

Verkennde studie naar vier varianten voor de winning van thermische energie uit oppervlaktewater

Uitwerking varianten in schetsontwerpen voor combinaties van directe of indirecte levering met open of gesloten bronsysteem voor Tiel aan de Waal

RAPPORT

Variantenstudie TEO-systeem Tiel

Klant: Warmte uit Water

Referentie: BI2901-WM-RP-220131-1502

Status: S0/0.5

Datum: 2 mei 2022



HASKONINGDHV NEDERLAND B.V.

Laan 1914 no.35
3818 EX AMERSFOORT
Industry & Buildings
Trade register number: 56515154

+31 88 348 20 00 **T**
+31 33 463 36 52 **F**
info@rhdhv.com **E**
royalhaskoningdhv.com **W**

Titel document: Variantenstudie TEO-systeem Tiel

Sub titel: \

Referentie: BI2901-WM-RP-220131-1502

Status: 0.5/S0

Datum: 2 mei 2022

Projectnaam: TEO Tiel

Projectnummer: BI2901

Auteur(s): Joost Poldervaart, Mark van Oostende, Marcela Busnelli, Martin Veenvliet

Opgesteld door: Marcela Busnelli, Joost Poldervaart en
Martin Veenvliet

Gecontroleerd door: Mark van Oostende

Datum/Initialen: 02-05-2022

Goedgekeurd door: Erik van Lith

Datum/Initialen: 02-05-2022

Classificatie
Open



Disclaimer

No part of these specifications/printed matter may be reproduced and/or published by print, photocopy, microfilm or by any other means, without the prior written permission of HaskoningDHV Nederland B.V.; nor may they be used, without such permission, for any purposes other than that for which they were produced. HaskoningDHV Nederland B.V. accepts no responsibility or liability for these specifications/printed matter to any party other than the persons by whom it was commissioned and as concluded under that Appointment. The integrated QHSE management system of HaskoningDHV Nederland B.V. has been certified in accordance with ISO 9001:2015, ISO 14001:2015 and OHSAS 18001:2007.

Colofon WuW

Warmte uit Water (WuW) is een pre-concurrentieel en co-creatief samenwerkingstraject van Rijkswaterstaat en Alliander. De resultaten uit dit samenwerkingstraject zijn openbaar en worden gepubliceerd bij De Bouwcampus (www.debouwcampus.nl).

Dit rapport is opgesteld door Royal HaskoningDHV in opdracht van het Warmte uit Water traject. De totstandkoming van dit rapport is vanuit Warmte uit Water begeleid door Albert Barneveld (Rijkswaterstaat) en Bram Delfos (Alliander).

Het rapport is te vinden op de website van www.debouwcampus.nl.

Disclaimer: Dit rapport is gemaakt in het pre-concurrentiële en co-creatie traject Warmte uit Water (voorheen Grip op de Maas), door inbreng van de partners van Rijkswaterstaat en Alliander. Aan de tekst, cijfers, tabellen en figuren uit dit rapport kunnen geen rechten worden ontleend.

Samenvatting

In woningen wordt vaak gebruik gemaakt van gas als bron van energie. Om woningen van een andere energiebron te voorzien, wordt gekeken naar de warmte uit bijvoorbeeld beken, rivieren en plassen. Dit wordt ook wel thermische energie uit oppervlaktewater (TEO) genoemd. Voor het onttrekken van warmte uit het oppervlaktewater zijn vier verschillende varianten uitgewerkt als schetsontwerp en onderling vergeleken. Dit is gebeurd aan de hand van een casus waarbij water uit de Waal benut wordt om 8.500 woningen in de gemeente Tiel te verwarmen.

Het doel van deze studie is de varianten te vergelijken. Voor het onderzoek is een aantal uitgangspunten gehanteerd. Eén van deze uitgangspunten is dat er voldoende warmte geleverd wordt om aan de basislast van zo'n 8.500 woningen gedurende het hele jaar te voldoen; dit is 15.000 kW ofwel 85% van de totale warmtevraag van deze woningen. De studie is beperkt tot het TEO bronsysteem. Het warmtenet met pompen en de aflevering aan woningen is buiten beschouwing gelaten.

De onderzochte varianten voor het halen van warmte uit het water van de Waal zijn:

- 1A: Indirecte levering - Open TEO: Bij een open systeem wordt rivierwater naar de technische ruimte gebracht voor warmteoverdracht. Vanwege het indirecte karakter wordt de warmte in de zomer onder de grond opgeslagen om in de winter te leveren aan de woningen.
- 1B: Indirecte levering - Gesloten TEO: Bij een gesloten systeem wordt de warmte met een warmtewisselaar in of naast de rivier overgedragen naar een circuit dat de warmte naar de technische ruimte brengt. Vanwege het indirecte karakter wordt de warmte in de zomer onder de grond opgeslagen om in de winter te leveren aan de woningen.
- 2A: Directe levering - Open TEO: Bij een open systeem wordt rivierwater naar de technische ruimte gebracht voor warmteoverdracht. Vanuit de technische ruimte wordt de warmte direct geleverd aan de woningen, in zomer en winter.
- 2B: Directe levering - Gesloten TEO: Bij een gesloten systeem wordt de warmte met een warmtewisselaar in of naast de rivier overgedragen naar een circuit dat de warmte naar de technische ruimte brengt. Vanuit de technische ruimte wordt de warmte direct geleverd aan de woningen, in zomer en winter.

Voor elk van de onderzochte varianten is een schetsontwerp gemaakt. De varianten zijn vervolgens beoordeeld aan de hand van de volgende aspecten:

1. Energetische kenmerken, waaronder hoeveelheid onttrokken warmte en benodigde elektriciteit,
2. De aanleginvestering en de operationele kosten,
3. De ruimtelijke inpassing in de omgeving,
4. De installatietechnische en rivierkundige aspecten.

Voor een beschrijving en nadere toelichting van de varianten wordt verwezen naar hoofdstuk 3 en 4. Het onderzoek naar warmte uit water bij de Waal in Tiel maakt duidelijk dat er verschillen zitten tussen de varianten. De belangrijkste verschillen zijn:

- Indirecte levering – Open TEO: Deze variant is de configuratie die momenteel het meest wordt toegepast voor TEO. Op het aspect vereist elektrisch piekvermogen en het totale elektraverbruik gedurende het jaar scoort deze variant het slechtst. Bij inzet van grijze stroom heeft de indirecte, open variant geen CO₂ besparing, maar een lichte toename. Op het aspect ruimtebeslag heeft deze variant voor- en nadelen. Alle elektrische componenten kunnen binnendijks worden opgesteld in de technische ruimte. De 30 WKO-doubletten met bijbehorend leidingwerk vragen veel ruimtebeslag en aanleg van ondergrondse infrastructuur. Op de totale geschatte investering voor aanleg (EUR 36,0 miljoen) en operationele kosten (EUR 5,2 miljoen) scoort deze variant in vergelijking gemiddeld.

- Indirecte levering – Gesloten TEO: Deze variant heeft een TEO bron die het gehele jaar operationeel is en gedurende gemiddeld negen maanden per jaar in warmtelevering ondersteund wordt door WKO doubletten. Op het aspect vereist elektrisch piekvermogen en het totale elektraverbruik gedurende het jaar scoort deze variant in de middenmoot. Op CO₂ besparing bij inzet van grijze stroom heeft de indirecte, gesloten variant een slechtere score dan de directe systemen. Op de totale, geschatte investering voor aanleg (EUR 36,2 miljoen) en operationele kosten (EUR 4,6 miljoen) scoort deze variant gemiddeld. Het ruimtelijk beslag van deze variant is groot.
- Directe levering – Open TEO: Deze variant is in aanleg en beheer duidelijk het kostbaarst van de onderzochte varianten met totale geschatte investering voor aanleg (EUR 57,8 miljoen) en operationele kosten (EUR 5,9 miljoen). Dit komt met name door het grote debiet oppervlaktewater waarvoor de installatie gedimensioneerd is. Daarnaast heeft deze variant het nadeel van aanzienlijk gasverbruik door een gasgestookte ketel voor de koudste maand, want dan kan er met het open systeem onvoldoende warmte gewonnen worden om volledige invulling te kunnen geven aan de basislast.
- Directe levering – Gesloten TEO: Deze variant scoort op energetische kenmerken het een na beste voor elektraverbruik en goed op elektrisch piekvermogen. De CO₂ besparing bij inzet van grijze stroom heeft de beste score van alle varianten. Ook op de totale schatte investering voor aanleg (EUR 27,4 miljoen) en operationele kosten (EUR 4,2 miljoen) scoort deze variant het beste. Belangrijke kanttekening is dat een dergelijke variant nog niet eerder op grote schaal is toegepast. Met name de ruimtelijk inpassing bij de rivier en het risico op aanvriezen zijn nog onvoldoende duidelijk.

Er wordt geen voorkeur uitgesproken voor een bepaalde variant in deze verkennende studie. Daarvoor zijn de onzekerheden nog te groot en is de voorkeur afhankelijk van de lokale wegging van de verschillende aspecten van de TEO bron. In algemene zin kan wel gezegd worden dat het gesloten, directe systeem de meest potentie lijkt te hebben gegeven de beoordeelde aspecten. Het indirecte, open systeem wordt momenteel het meest toegepast, en kent de minste onzekerheden. Voor de varianten met een gesloten TEO systeem zijn er meer onzekerheden vanwege het innovatieve karakter van het toepassen van deze methodiek op grote schaal zoals in voorliggende casus. Nader onderzoek is nodig om deze onzekerheden beter in beeld te brengen. Voor de casus bij de Waal in Tiel lijken de gesloten directe en de open indirecte variant als eerste in aanmerking te komen voor nadere uitwerking. Hierbij verdient het de aanbeveling voor het gesloten systeem in het bijzonder te kijken naar de ruimtelijke inpassing en het risico op aanvriezen van de warmtewisselaar in of nabij de rivier. Tevens moet gerealiseerd worden dat voor de open, indirecte variant de CO₂ besparing pas optreedt bij verdere overschakeling op groene stroom.

Afkortingen en begrippen

Afkortingen

- BPRW : Beheer- en Ontwikkelplan voor de Rijkswateren
- CAPEX : Capital Expenditure ofwel kapitaalsinvesteringen
- CIP : Cleaning in Place
- COP : Coefficient of performance
- GFT : Gesloten front techniek (Persing)
- HDD : Horizontal Direct Drilling (Horizontaal gestuurd boren)
- kWth : Kilowatt Thermische vermogenseenheid
- kWe : Kilowatt Elektrische vermogenseenheid
- LS : Laagspanning
- MS : Middenspanning
- OLR : Overeengekomen Lage Rivierstand
- Opex : Operational expenditure ofwel operationele kosten
- PFD : Proces Flow Diagram
- SPF : Seasonal Performance Factor
- TEO : Thermische Energie uit Oppervlaktewater
- TR : Technische Ruimte
- TSA : Terugstroomapparaat (Technische benaming voor warmtewisselaar)
- WKO : Warmte- en koudeopslag
- WP : Warmtepomp

Begrippen

Open TEO-systeem

Het met een leiding innemen van oppervlaktewater en dit transporteren naar een warmtewisselaar in een technische ruimte op het land voor het onttrekken van warmte. Het onttrokken water wordt vervolgens op een verderop gelegen locatie weer geloosd in het oppervlaktewater. Voor het innemen en lozen wordt gebruik gemaakt van een pomp.

Gesloten TEO-systeem

Het met een warmtewisselaar, geplaatst in het oppervlaktewater, onttrekken van warmte. De onttrokken warmte wordt via een gesloten leidingsysteem getransporteerd naar de technische ruimte op het land waarna het afgekoeld weer terugstroomt naar de warmtewisselaar in het oppervlaktewater.

Directe levering

Warmte gewonnen uit het oppervlaktewater wordt direct opgewaardeerd door een warmtepomp en geleverd aan de afnemers.

Indirecte levering

Warmte gewonnen uit het oppervlaktewater wordt (deels) opgeslagen in een WKO-systeem, alvorens het gedurende de koudere maanden uit de WKO onttrokken wordt voor de warmtelevering aan afnemers.

Primaire circuit

De aanvoer- en retourleiding van een TEO-installatie die in verbinding staat met oppervlaktewater.

Secundaire circuit

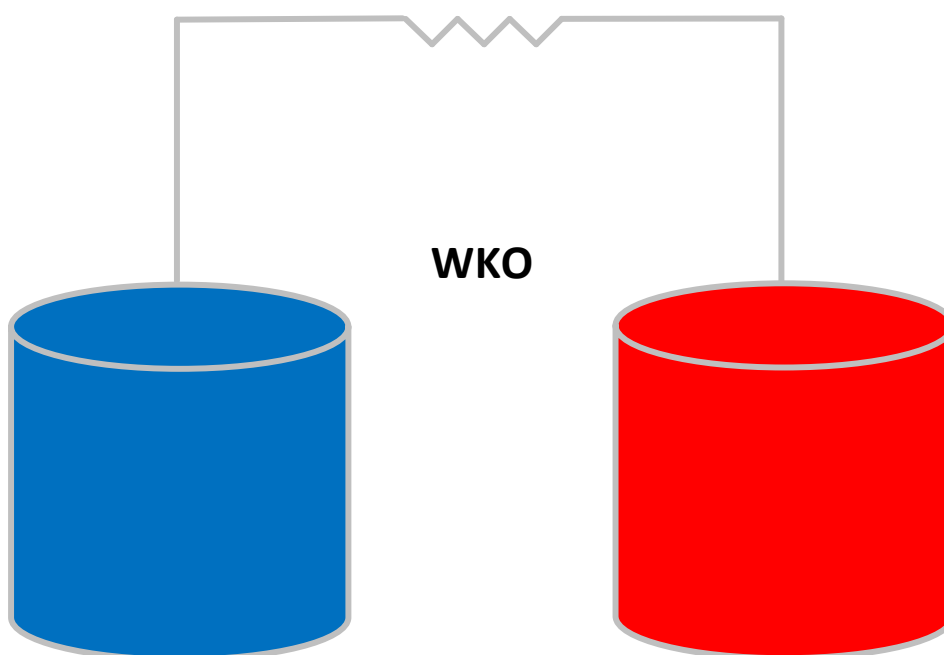
Het circuit dat de TEO skid, de warmtepomp en/of de WKO warmtewisselaars in de technische ruimte op het land met elkaar verbindt.

Skid

Losse componenten die gezamenlijk op een frame zijn geïnstalleerd in de Technische Ruimte.

WKO-doublet

Een open bodemenergiesysteem met twee verschillende bronnen, een warme en een koude. Zie onderstaand figuur van een WKO-doublet.



Inhoud

1. Inleiding	6
1.1 Aanleiding	6
1.2 Vraagstelling	7
1.3 Aanpak	7
1.4 Leeswijzer	7
2 Uitgangspunten	8
3 Beschrijving varianten	9
3.1 Inleiding	9
3.2 Samenvatting vier geselecteerde varianten uit fase 1	9
3.3 Proces Flow Diagram	10
4 Toelichting per onderdeel	21
4.1 Inrichting technische ruimte	21
4.2 Rivierkundige aspecten	22
4.3 In- en uitlaatconstructie	26
4.4 Gesloten warmtewisselaar	28
4.5 Warmte- en koudeopslag	30
4.6 Bovenanzicht ruimtelijke inpassing	32
4.7 Elektraverbruik	35
4.8 Kostenindicatie	37
4.9 CO ₂ besparingspotentieel	38
5 Analyse varianten	40
5.1 Analyse	40
5.2 Verschillen tussen varianten	41
5.3 Bandbreedte en gevoeligheid	43
6 Conclusie & aanbevelingen	45
6.1 Inleiding	45
6.2 Conclusies	45
6.3 Aanbevelingen	46

Tabellen

Tabel 1: Samenvatting van de voorkeursvarianten	10
Tabel 2: Vloeroppervlak technische ruimte	21
Tabel 3: Leidingdiameters en lengte WKO Variant 1A	31
Tabel 4: Leidingdiameters en lengte WKO Variant 1B	31
Tabel 5: Emissiefactoren	39
Tabel 6: CO ₂ Besparingspotentieel Variant 1A: Indirecte levering – Open TEO	39
Tabel 7: CO ₂ Besparingspotentieel Variant 1B: Indirecte levering – Gesloten TEO	39
Tabel 8: CO ₂ Besparingspotentieel Variant 2A: Directe levering – Open TEO	39
Tabel 9: CO ₂ Besparingspotentieel Variant 2B: Directe levering – Gesloten TEO	39
Tabel 10: Samenvatting van resultaten per variant	40
Tabel 11: Effect investeringskosten bij wijziging van het maximaal haalbare temperatuurverschil aan de verdamperzijde warmtepomp	44

Figuren

Figuur 1: De 8 clusters binnen het te ontwikkelen warmtenet Tiel	6
Figuur 2: Jaarduurkromme basis- en pieklast voor warmtenet Tiel	9
Figuur 3: PFD variant 1A – Indirecte levering – Open TEO zomersituatie	12
Figuur 4: Technische ruimte van variant 1A – Indirecte levering – Open TEO zomersituatie	12
Figuur 5: PFD variant 1A – Indirecte levering – Open TEO wintersituatie	13
Figuur 6: Technische ruimte variant 1A – Indirecte levering – Open TEO wintersituatie	14
Figuur 7: PFD variant 1B – Indirecte levering – Gesloten TEO zomersituatie	15
Figuur 8: Technische ruimte variant 1B – Indirecte levering – Gesloten TEO zomersituatie	16
Figuur 9: PFD variant 1B – Indirecte levering – Gesloten TEO wintersituatie	16
Figuur 10: Technische ruimte variant 1B – Indirecte levering – Gesloten TEO wintersituatie	17
Figuur 11: PFD variant 2A – Directe levering – Open TEO zomersituatie	18
Figuur 12: PFD variant 2A – Directe levering – Open TEO wintersituatie	18
Figuur 13: PFD variant 2B – Directe levering – Gesloten TEO zomersituatie	19
Figuur 14: PFD variant 2B – Directe levering – Gesloten TEO wintersituatie	20
Figuur 15: Morfologische reactie op korte ($t=0$) en lange ($t=\infty$) termijn (Mosselman, 2007)	24
Figuur 16: Voorgestelde locatie in- en uitlaatopening (groene lijn). Het gele kruis heeft geen verdere betekenis.	25
Figuur 17: Ontwerp inlaatconstructie	26
Figuur 18: Ontwerp uitlaatconstructie (*afsluiter met spindel = terugslagklep)	27
Figuur 19: Kattenrug en vacuüminstallatie voor kruising primaire waterkering	27
Figuur 20: Betonnen bak met twee warmtewisselaars van MEFA Energy Systems	29
Figuur 21: Bovenaanzicht van twee warmtewisselaren in betonnen bak incl. leidingwerk [mm]	29
Figuur 22: Doorsnede van twee warmtewisselaren in betonnen bak incl. leidingwerk [mm]	29
Figuur 23: Bovenaanzicht variant 1A: Indirecte levering met open TEO	32
Figuur 24: Bovenaanzicht variant 1B: Indirecte levering met gesloten TEO	33
Figuur 25: Bovenaanzicht variant 2A: Directe levering met open TEO	34
Figuur 26: Bovenaanzicht variant 2B: Directe levering met gesloten TEO	35

Bijlagen

Bijlage 1 Notitie sub varianten studie TEO Tiel
Bijlage 2 Notitie advies in- en uitlaatlocatie
Bijlage 3 Peilmatenschema inlaatconstructie
Bijlage 4 Locatie technische ruimte
Bijlage 5 Technische ruimte
Bijlage 6 Warmte- en koude opslag
Bijlage 7 CAPEX, OPEX, elektra- en CO ₂ verbruik
Bijlage 8 Herziening kostenindicatie ten behoeve van bepaling bandbreedte

1. Inleiding

1.1 Aanleiding

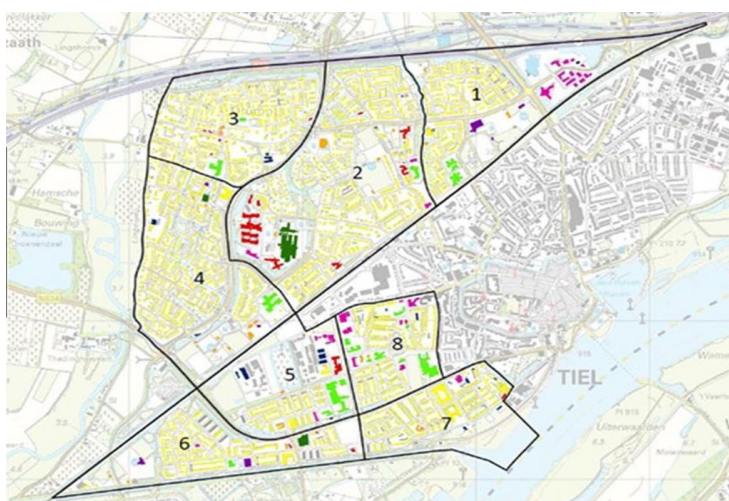
Momenteel is een groot aantal thermische energie uit oppervlaktewater (TEO) projecten in ontwikkeling of reeds gerealiseerd. Kenmerkend aan deze projecten is dat deze nagenoeg allemaal kleinschalig van aard zijn om te voorzien in de warmte- en koudebehoefte van enkele honderden huishoudens per project. Grootschalige TEO-projecten, waarbij warmte wordt geleverd aan duizenden woningen, komen nog weinig voor. Om het potentieel van thermische energie uit oppervlaktewater te benutten, circa 40% van de warmtebehoefte van woningen in Nederland (Deltares, 2018), is er behoefte aan de ontwikkeling van grootschalige TEO-projecten. Voor steden langs de grote rivieren ligt TEO als bron hierbij voor de hand, gezien de potentiële warmtevraag en het aanbod.

Voor de onttrekking van warmte uit grote rivieren zijn voor het huidige traject van WuW (samenwerking tussen Rijkswaterstaat en Alliander) vier varianten beschouwd, te weten:

- 1A: Indirecte levering - Open TEO
- 1B: Indirecte levering - Gesloten TEO
- 2A: Directe levering - Open TEO
- 2B: Directe levering - Gesloten TEO

Deze studie vergelijkt de vier varianten in een concrete casus: TEO Tiel. Aspecten die hierbij uitgewerkt worden zijn de energetische kenmerken, de ruimtelijke inpassing, de kosten per variant en de installatietechnische en rivierkundige aspecten.

Qirion (onderdeel van Alliander) ondersteunt momenteel de ontwikkeling van een nieuw warmtenet in Tiel waarop zo'n 8.500 woningen aangesloten zullen worden verdeeld over 8 clusters, zie Figuur 1. TEO is de bron die beoogd is om in te zetten als basislast voor het warmtenet. Onderzocht wordt of winning van warmte uit de Waal op deze grote schaal mogelijk is.



Figuur 1: De 8 clusters binnen het te ontwikkelen warmtenet Tiel

In opdracht van Warmte uit Water (WuW) heeft Royal HaskoningDHV een verkennend onderzoek uitgevoerd naar de onttrekking van TEO uit de Waal bij Tiel.

1.2 Vraagstelling

‘Hoe kan een schetsontwerp van vier verschillende varianten van een TEO-systeem gekoppeld aan de rivier de Waal en de stad Tiel eruitzien, waarbij rekening wordt gehouden met de energetische kenmerken, kosten, ruimtelijke inpassing en installatietechnische en rivierkundige aspecten. De vier varianten betreffen combinaties van een open/gesloten TEO-systeem met directe/indirecte levering.’

1.3 Aanpak

Het onderzoek is opgedeeld in drie fasen, welke zijn gevisualiseerd in de volgende flow-chart:



In de eerste fase ‘Onderzoek bronsysteem’ zijn de uitgangspunten en de relevante informatie verzameld en is gekeken naar sub-varianten. De sub-varianten zijn met elkaar vergeleken om tot een viertal varianten te komen die nader zijn uitgewerkt in fase twee.

In de tweede fase ‘nader onderzoek en uitwerking varianten’ is elk afzonderlijk onderdeel van het TEO-systeem nader onderzocht tot het niveau van schetsontwerp. Aan de hand van de resultaten uit het onderzoek is elke variant uitgewerkt in een Proces Flow Diagram (PFD), een bovenaanzicht om een beeld te geven van de ruimtelijke inpassing en een eerste inschatting van de aanlegkosten (CAPEX) en operationele kosten (OPEX). De voorliggende eindrapportage is het resultaat van fase 3.

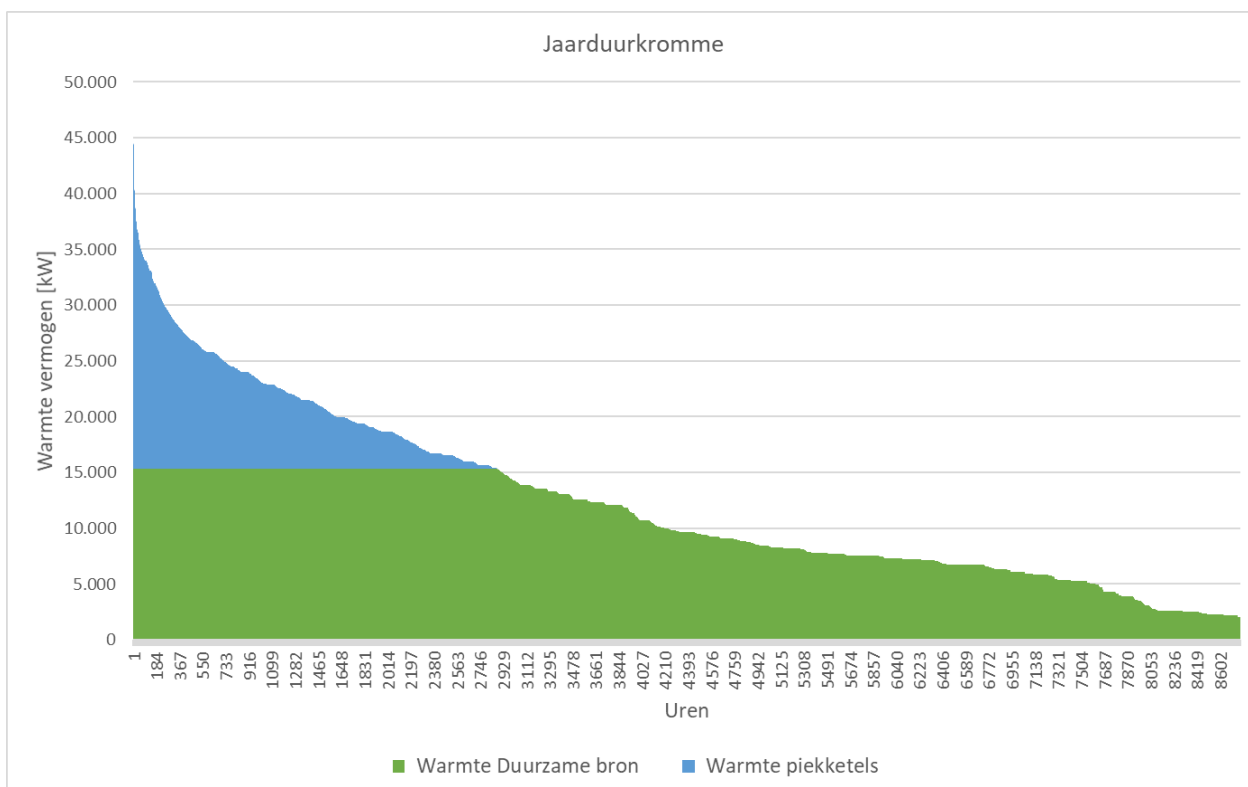
1.4 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 zijn de uitgangspunten opgenomen die de basis voor het onderzoek zijn geweest. In hoofdstuk 3 is een beschrijving opgenomen van de varianten die nader zijn uitgewerkt. In hoofdstuk 4 is een toelichting gegeven op de resultaten van het onderzoek naar de verschillende componenten van het TEO-systeem. Hoofdstuk 5 gaat in op de analyse van de varianten, waarin ook de verschillen tussen de varianten zijn aangegeven. Hoofdstuk 6 bevat de conclusies en aanbevelingen.

2 Uitgangspunten

De volgende uitgangspunten zijn gebruikt bij het onderzoek naar de vier varianten voor onttrekking van warmte uit de Waal voor de levering aan het toekomstige warmtenet in Tiel:

- In de studie is alleen het bronsysteem met al dan niet WKO's beschouwd. Het ontwerp van het warmtenet en de aansluiting op de woningen is geen onderdeel van deze studie;
- Vanuit het TEO-systeem wordt in combinatie met een warmtepomp enkel de basislast ingevuld van de warmtevraag vanuit de afnemers die beoogd zijn om aangesloten te worden op het warmtenet in Tiel. Een piekvoorziening zal naast de basislast nodig zijn om invulling te geven aan de totale warmtevraag. Binnen dit onderzoek is de piekvoorziening echter niet beschouwd. Figuur 2 geeft de verhouding tussen de basis- en pieklast weer voor het warmtenet in Tiel;
- Basislast van 15.000 kW voor de warmtevoorziening van 8.500 woningen in Tiel;
- Volloopsceario van 1.500 kW per jaar, dit als richtlijn voor het modulair opbouwen van het systeem. In totaal zijn de 8.500 woningen verdeeld over circa 20 wijken. Per aansluiting van twee wijken geldt gemiddeld genomen dat een volgende 1.500 kW aan installaties opgesteld kan worden;
- De totale jaarlijkse warmtevraag bedraagt 393.000 GJ voor de 8.500 woningen in Tiel;
- Aanvoertemperatuur voor distributie via het warmtenet vanaf de warmtepomp: 70-75°C;
- Verlies van 2 °C over de TEO en WKO warmtewisselaar;
- Verlies van 6 °C over de warmtewisselaar van het gesloten systeem in de Waal;
- Verlies van 1 °C in een WKO-bron (zowel warme als koude bron);
- Maximale deltaT van 10 °C over de verdamperzijde van de warmtepomp aan de kant van de warmtebron. Dit betreft een ambitieuze deltaT, in de huidige praktijk komt de deltaT van 5 °C het meeste voor;
- Minimale injectietemperatuur koude bron WKO: 6°C;
- Minimale temperatuur lozingswater in de Waal: 4°C;
- Het secundaire circuit in de technische ruimte heeft als medium een water/glycol-mengsel;
- De drukval in de leidingen is 1 bar/km = 100 kPa/km;
- Bij de gesloten varianten 1B en 2B is er sprake van een circuit dat volledig is gevuld met een water/glycol-mengsel;
- Warmtepompen hebben een SPF-waarde van 3, deze is bepaald aan de hand van de aanvoertemperatuur van het warmtenet;
- WKO-bronpompen hebben een COP-waarde van 60;
- De COP van de transportpompen van het warmtenet zijn voor dit onderzoek niet relevant, omdat het warmtenet binnen dit onderzoek buiten beschouwing is gelaten en hiermee ook het elektraverbruik van deze pompen niet zijn meegenomen binnen deze studie;
- Grijs stroom is op basis van de fossiele/groene gemiddelde mix van 2021;
- De jaarduurkromme van de 8500 woningen uit Tiel met basis en pieklast. De jaarduurkromme toont dat de piekvoorziening circa 33% van de tijd (2800 van de 8640 uur) wordt ingezet voor circa 15% van de totale warmtevraag. De piek is blauw weergegeven (figuur 2).



Figuur 2: Jaarduurkromme basis- en pieklast voor warmtenet Tiel

3 Beschrijving varianten

3.1 Inleiding

In fase 1 van het onderzoek zijn in totaal 8 subvarianten beschouwd voor een TEO-systeem in de Waal bij Tiel. De variabele tussen de verschillende subvarianten betrof de lengte van de onttrekkingsperiode om warmte uit de Waal te winnen en de verhouding van levering van warmte vanuit TEO en WKO in de winter. Aan de hand van de criteria *energetische kenmerken*, *kosten*, en *ruimtelijke inpassing* is van de subvarianten een selectie gemaakt om te komen tot vier varianten. In bijlage 1 is de volledige notitie van de subvariantenstudie opgenomen.

In fase 2 van het onderzoek zijn de vier geselecteerde varianten uitgewerkt:

- 1A: Indirecte levering - Open TEO
- 1B: Indirecte levering - Gesloten TEO
- 2A: Directe levering - Open TEO
- 2B: Directe levering - Gesloten TEO

3.2 Samenvatting vier geselecteerde varianten uit fase 1

In deze paragraaf is een korte omschrijving opgenomen van elke variant. Tabel 1 geeft per variant de onttrekkingsperiode en verhouding tussen de levering van warmte afkomstig vanuit TEO en WKO weer.

Tabel 1: Samenvatting van de voorkeursvarianten

Variant	Direct/indirect levering	TEO-systeem	Inzet TEO [maanden]	WKO / TEO [%] in winter
1A	Indirect	Open	7	100/0
1B	Indirect	Gesloten	3 + 9 (combinatie TEO+WKO)	50/50
2A	Direct	Open	11	N.v.t.
2B	Direct	Gesloten	12	N.v.t.

1A: Indirecte levering - Open TEO

Uit de subvariantenstudie is gebleken dat de optimale periode van onttrekking (op basis van energetische, rivierkundige, ruimtelijke en financiële aspecten), bij een open systeem met indirecte levering, 7 maanden bedraagt. Hierbij is het benodigde vermogen van de WKO's in de zomer en winter nagenoeg gelijk aan elkaar wat resulteert in een minimaal aantal benodigde WKO-doubletten.

1B: Indirecte levering - Gesloten TEO

Bij de variant met indirecte levering met een gesloten TEO bleek de optimale periode van onttrekking 3 maanden in de zomer te bedragen. Daarnaast bleek dat slechts de helft van het benodigde vermogen aan WKO's opgesteld hoeft te worden, omdat de andere helft van het benodigde vermogen in de overige 9 maanden in de winter direct vanuit het gesloten TEO-systeem geleverd kan worden.

2A: Directe levering - Open TEO

Bij directe levering met open TEO kan slechts gemiddeld 11 maanden worden verwarmd, doordat het oppervlaktewater naar verwachting één maand per jaar te koud zal zijn om warmte uit te kunnen onttrekken. Voor deze maand wordt een alternatieve collectieve warmtebron ingezet voor de warmtelevering. Meestal is dat een gasgestookte collectieve ketel en daarvoor is gekozen in deze studie.

2B: Directe levering - Gesloten TEO

Voor de variant met directe levering in combinatie met een gesloten TEO-systeem kan door de toepassing van een water/glycol mengsel 12 maanden per jaar warmte uit het oppervlaktewater worden onttrokken. Hierdoor is geen noodzaak om een piek- en back-up installatie in te zetten.

3.3 Proces Flow Diagram

Om een beeld te krijgen van het gehele proces van warmte-uitkoppeling bij de bron tot aan warmtelevering bij de afnemers zijn voor elke variant Proces Flow Diagrammen (PFD) opgesteld. Een PFD is een vereenvoudigde weergave van het proces, waarbij de werking van het systeem wordt weergegeven. Voor elke variant is zowel voor de zomer- als wintersituatie een PFD gemaakt. Per variant verschilt het aantal maanden waarvoor de zomer- of de wintersituatie geldt. Dit staat aangegeven op de PFD. In Hoofdstuk 2 zijn de uitgangspunten behandeld die zijn gehanteerd bij het opstellen van de PFD's.

In de volgende paragrafen zijn de processen van de varianten aan de hand van de PFD's toegelicht. Doordat het proces van de zomer- en de wintersituatie van elkaar verschillen wordt dit apart behandeld. Royal HaskoningDHV heeft de berekeningen van de warmteoverdracht met interne modellen uitgevoerd. Voor variant 1A een volledige beschrijving opgenomen waarin de PFD wordt doorlopen. Voor de opvolgende varianten zijn enkel de belangrijkste verschillen aangegeven ten opzichte van variant 1A. Voor de watertemperaturen van de Waal is gebruik gemaakt van de informatie afkomstig van de RWS TEO viewer die is geraadpleegd op 10-11-2021 en waarvan de informatie is opgenomen in bijlage 1.

1A: Indirecte levering – Open TEO

Zomersituatie

In Figuur 3 is de PFD voor de zomersituatie van variant 1A weergegeven. Voor variant 1A geldt dat de het meest optimaal is om in zomersituatie voor een periode van 7 maanden warmte te onttrekken uit de Waal. Figuur 4 geeft een uitsnede van de technische ruimte weer voor de zomersituatie. De weergegeven temperaturen zijn gemiddelde temperaturen over de onttrekkingsperiode voor de zomersituatie.

Uit de temperatuurmetingen van de Waal blijkt dat de gemiddelde temperatuur van het oppervlaktewater van mei tot en met november het warmst is met temperaturen tussen de 13°C en 24°C. Dit is gemiddeld over een periode van 7 maanden ongeveer 19°C dat door de bron zijde van de warmtewisselaar stroomt. Er wordt aangenomen dat er 2°C verlies optreedt in de warmtewisselaar van het TEO-systeem. Dit betekent dat het medium aan de kant van de technische ruimte van de warmtewisselaar op wordt gewarmd tot een gemiddelde temperatuur van 17°C. Deze warmte gaat ofwel direct naar de warmtepomp ofwel naar de warmtewisselaar van de WKO. De warmtepomp waardeert de 17°C op naar 70-75°C voor levering aan het warmtenet. Het uitgangspunt voor de delta T over de verdamperzijde van de warmtepomp bedraagt maximaal 10°C, dit is een bepalende factor voor de temperaturen van het systeem. Dit betekent dat de temperatuur die aan de verdamperzijde de warmtepomp uitstroomt gemiddeld 7°C is.¹

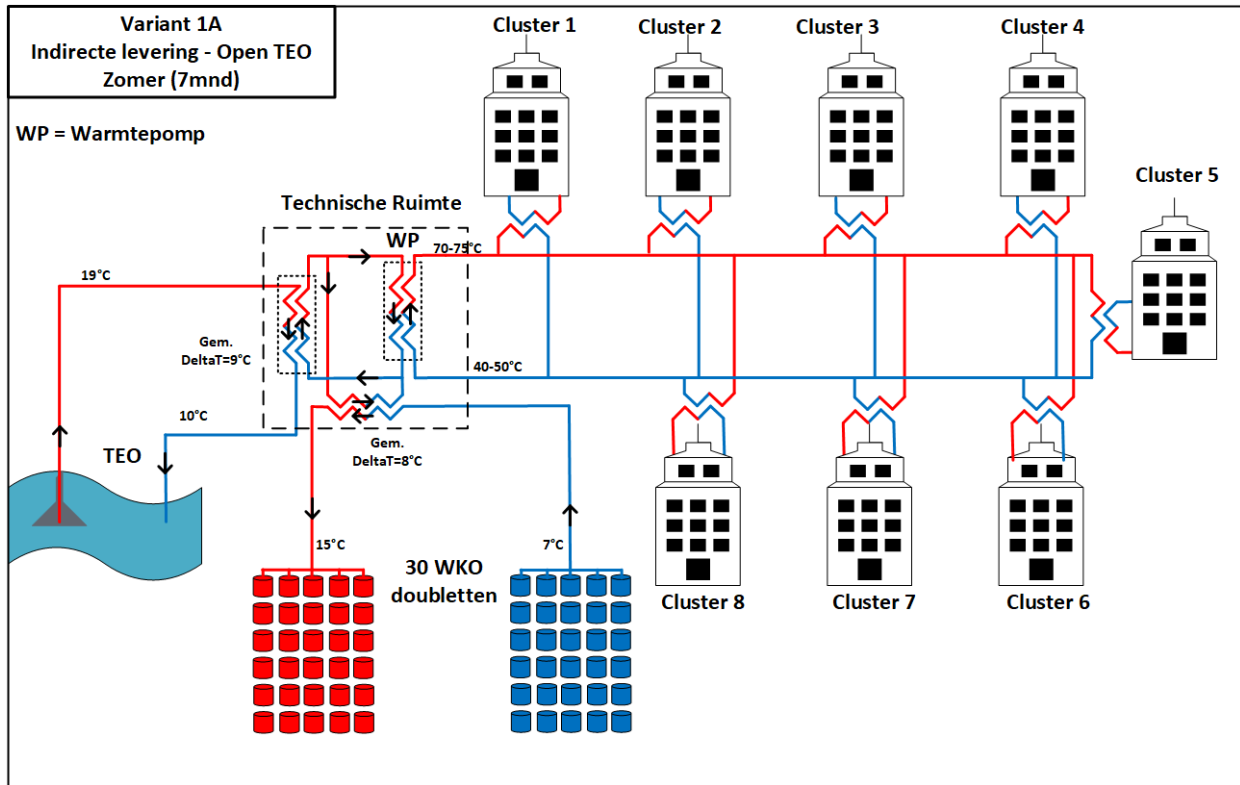
In de warmtewisselaar van de WKO wordt er ook aangenomen dat er een verlies van 2°C optreedt, waardoor de warme bron van de WKO geïnjecteerd wordt met gemiddeld 15°C. Uit de koude bron van de WKO wordt water van 7°C onttrokken. Dit is bepaald doordat de minimale temperatuur van het water in de koude bron van de WKO volgens 'de vuistregel' 6°C mag bedragen (Waterwet beschikking, 2017). Daarbij wordt het uitgangspunt gehanteerd dat er 1°C verlies van warmte optreedt in de ondergrond. Deze beide uitgangspunten zijn gebaseerd op algemeen gebruikte waardes in de branche bij eerste ontwerpen van WKO's. Met het verlies dat optreedt over de warmtewisselaar stroomt het medium de warmtewisselaar van de WKO vervolgens weer uit met een temperatuur van 9°C.

Het medium uit de warmtewisselaar van de WKO wordt gemengd met het medium uit de verdamperzijde van de warmtepomp. Na menging stroomt het medium naar de warmtewisselaar van het TEO-systeem. In het meest simpele scenario is deze menging van stroming 50/50, wat betekent dat na menging de gemiddelde temperatuur 8°C bedraagt. Met opnieuw 2°C verlies over de warmtewisselaar van het TEO-systeem, wordt de temperatuur aan de bronzijde van warmtewisselaar afgekoeld tot 10°C, waarmee het oppervlakte water weer wordt geloosd in de Waal. Dit betekent dat het temperatuurverschil tussen het onttrokken en geloosde oppervlaktewater gemiddeld 9°C bedraagt.

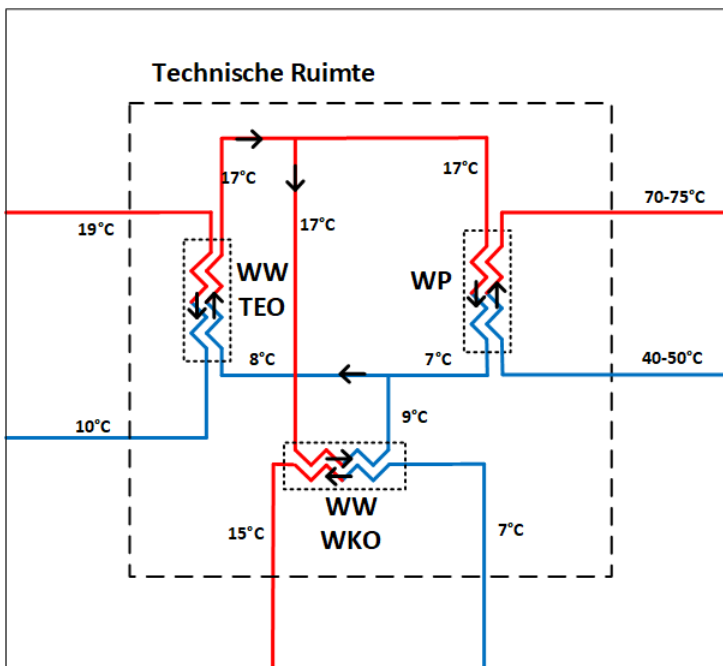
Er zijn echter ook scenario's denkbaar waarbij de warmtevraag hoog is en er meer debiet door de warmtewisselaar van de warmtepomp stroomt dan door de warmtewisselaar van de WKO. De temperatuur van het water/glycol mengsel uit de verdamperzijde van de warmtepomp is dan bepalend en zal resulteren in een lagere temperatuur dat bij de warmtewisselaar van het TEO-systeem aankomt dan bij het 50/50 scenario. Vice versa kan ook het geval zijn dat het debiet door de warmtewisselaar van de WKO stroomt groter is. Dit zal dan weer resulteren in een hogere temperatuur bij de warmtewisselaar van het TEO-systeem. Omwille van de begrijpbaarheid wordt het gemiddelde scenario, waarbij beide stromen gelijk aan elkaar zijn, toegepast. Dit betreft tevens een vereenvoudiging die in een volgende fase nader gedetailleerd kan worden. Hiermee ontstaat meer inzicht in de fluctuaties van temperaturen die door het jaar heen in het systeem voorkomen.

¹ De aanname van de delta T over de verdamperzijde van de warmtepomp is gebaseerd op gesprekken met een industriële warmtepomp fabrikant uit Duitsland die door MEFA Energy Systems is benaderd in opdracht van Royal HaskoningDHV. De delta T van 10 °C is iets waar door warmtepompen nog naartoe wordt gewerkt om te halen, de toekomst moet uitwijzen of een dergelijk hoge delta T ook door warmtepompen gehaald kan worden.

Figuur 3 geeft voor variant 1A totaal 30 WKO-doubletten weer. Dit grote aantal WKO-doubletten is benodigd om in de winter maanden voldoende vermogen te leveren om invulling te geven aan de basislast. In Paragraaf 4.5 is het aantal benodigde WKO-doubletten per variant nader toegelicht.



Figuur 3: PFD variant 1A – Indirecte levering – Open TEO zomersituatie

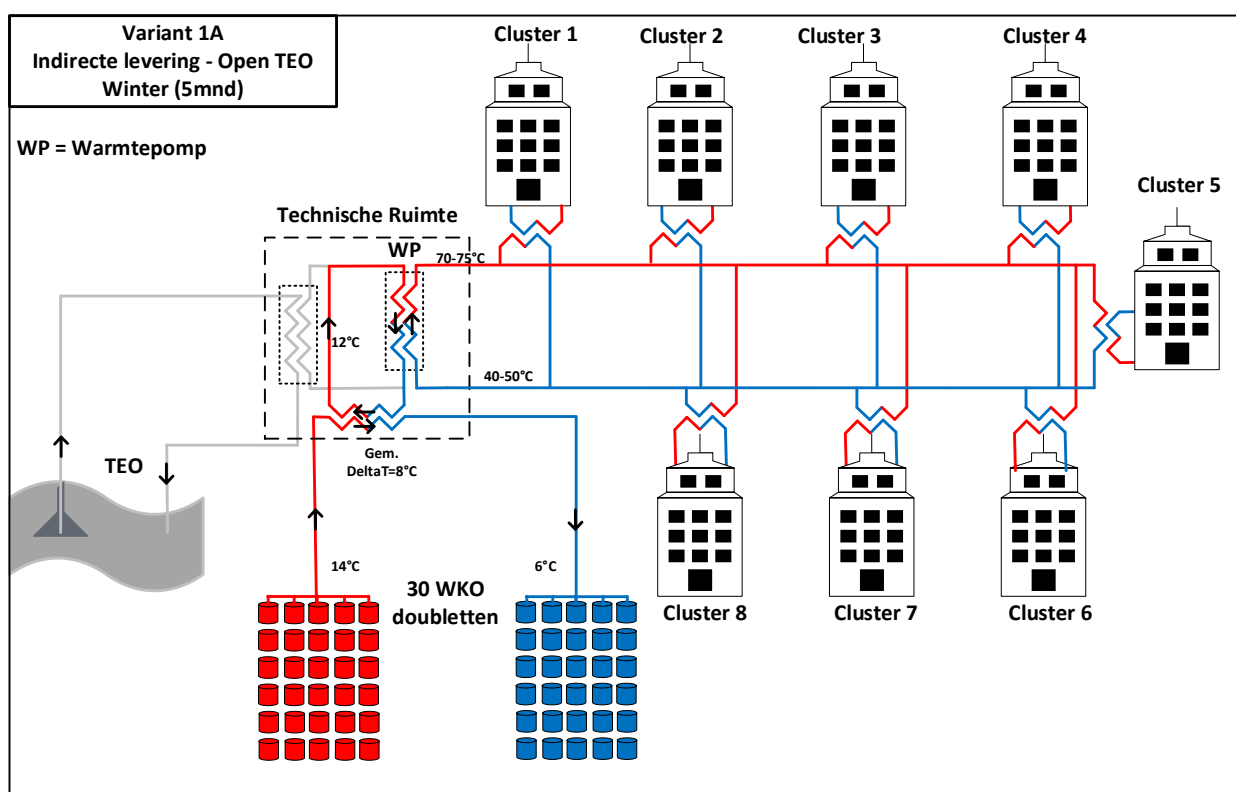


Figuur 4: Technische ruimte van variant 1A – Indirecte levering – Open TEO zomersituatie

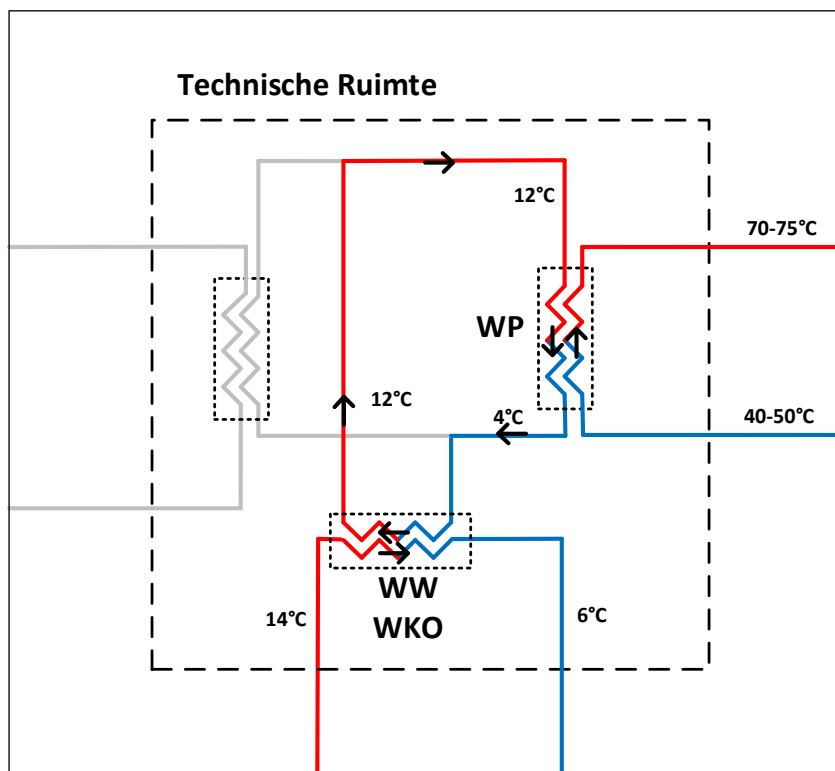
Wintersituatie

In Figuur 5 is de PFD voor de wintersituatie van variant 1A weergegeven. Voor de wintersituatie geldt dat het meest optimaal is om voor een periode van 5 maanden de warmte te onttrekken uit de WKO's. Figuur 6 geeft in detail de temperaturen weer voor de wintersituatie die voorkomen in de technische ruimte.

In de wintersituatie staat de TEO-installatie uit en wordt er alleen warmte onttrokken uit de warme bron van de WKO. Door een verlies van 1°C in de bodem wordt er 14°C onttrokken uit de warme bron van de WKO in de winter. Met een verlies van 2°C over de warmtewisselaar, wordt er vervolgens 12°C aangeboden aan de warmtepomp. Die zal deze temperatuur opwaarderen naar 70-75°C voor het warmtenet. Doordat de koude WKO-bron met minimaal 6 °C geïnjecteerd moet worden, dient vanuit de warmtepomp de medium temperatuur niet verder te worden terug gekoeld dan 4°C dat vervolgens door de warmtewisselaar van de WKO stroomt. De warmtepomp zal de 12°C dus terug moeten koelen naar 4°C. Dit betekent dat in de winter de delta T over de verdamperszijde van de warmtepomp maar 8°C is.



Figuur 5: PFD variant 1A – Indirecte levering – Open TEO wintersituatie



Figuur 6: Technische ruimte variant 1A – Indirecte levering – Open TEO wintersituatie

1B: Indirecte levering – Gesloten TEO

In Figuur 7 en Figuur 9 zijn de PFD's voor variant 1B voor de zomer- en wintersituatie weergegeven. In Figuur 8 en Figuur 10 zijn de uitsneden van de technische ruimte weergegeven. De zomersituatie geldt voor de 3 maanden van het jaar waarin de watertemperatuur van de Waal het warmst is en de wintersituatie voor de 3 maanden van het jaar waarin de watertemperatuur van de Waal het koudst is. In de overige 6 maanden van het jaar draait het gesloten TEO-systeem zonder WKO's. Hier is geen aparte PFD van gemaakt. Dit proces is vergelijkbaar aan variant 2B, al verschillen de temperaturen.

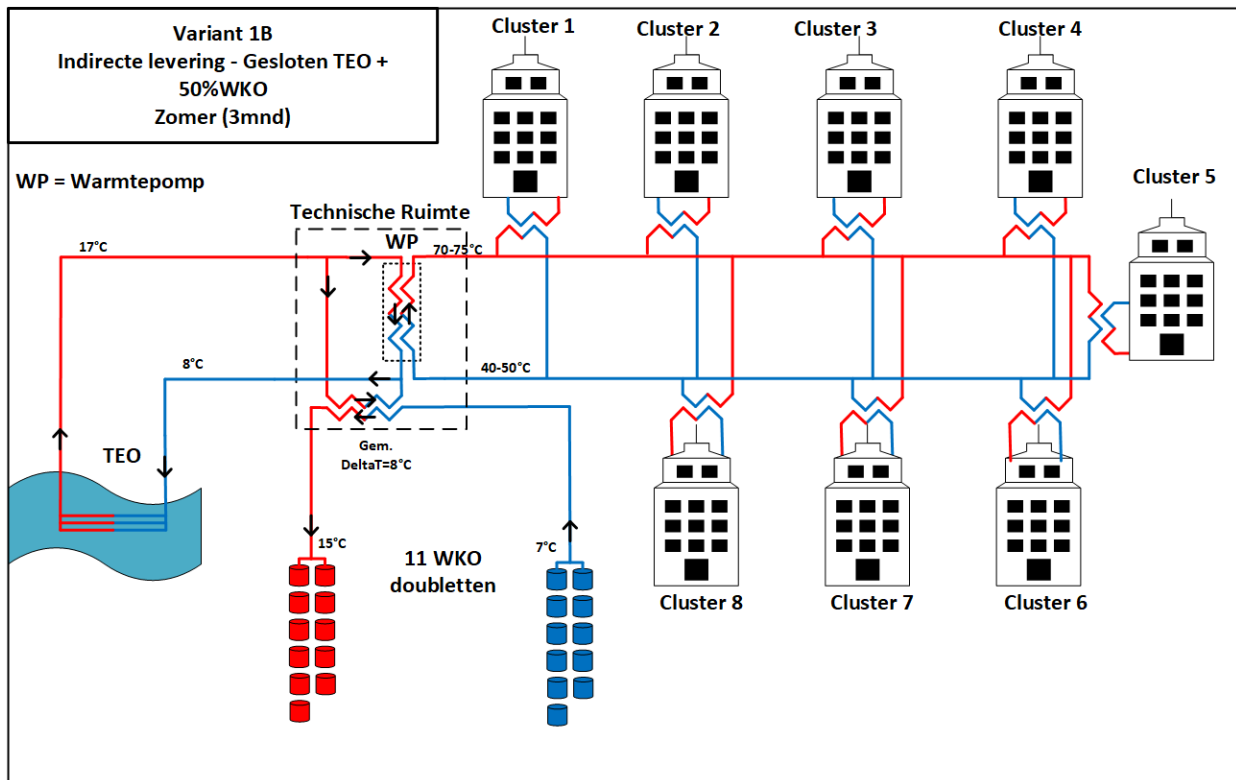
Bij variant 1B wordt de WKO opgeladen in de 3 warme zomermaanden juli, augustus en september. Het oppervlaktewater heeft een temperatuur van 22-24 °C in deze maanden, wat gemiddeld 23°C is. Over de warmtewisselaar treedt een temperatuurverlies van 6°C op (dit uitgangspunt is afkomstig van de leverancier MEFA Energy Systems). Hierdoor wordt het medium dat aan de technische ruimte kant van de warmtewisselaar stroomt opgewarmd tot 17°C. Met deze temperatuur stroomt het medium naar zowel de warmtepomp als de WKO warmtewisselaar. Met een delta T van opnieuw 10°C over de verdamperszijde van de warmtepomp stroomt er 7°C uit de warmtepomp. Vanuit de warmtewisselaar van de WKO stroomt opnieuw weer de 9°C vanwege dezelfde reden als bij variant 1A. Deze twee stromen mengen tot een gemiddelde van 8°C.

In de wintersituatie komt de helft van het vermogen uit de WKO en draait de TEO-installatie ook voor de helft van het vermogen. De gemiddelde watertemperatuur in de Waal is 5°C in de koudste maanden van het jaar (januari, februari, maart). Dit betekent dat het medium in de warmtewisselaar, rekening houdend met het warmteverlies dat over de warmtewisselaar optreedt, een temperatuur heeft van gemiddeld -1°C. Het water uit de WKO-installatie is opnieuw 12°C door het verlies van 2°C over de warmtewisselaar van de WKO. Dit betekent dat na de menging van het medium vanuit TEO en de WKO er naar de warmtepomp een temperatuur van 5,5 °C gaat wat is afgerond naar 6°C. De WKO installatie wordt dus

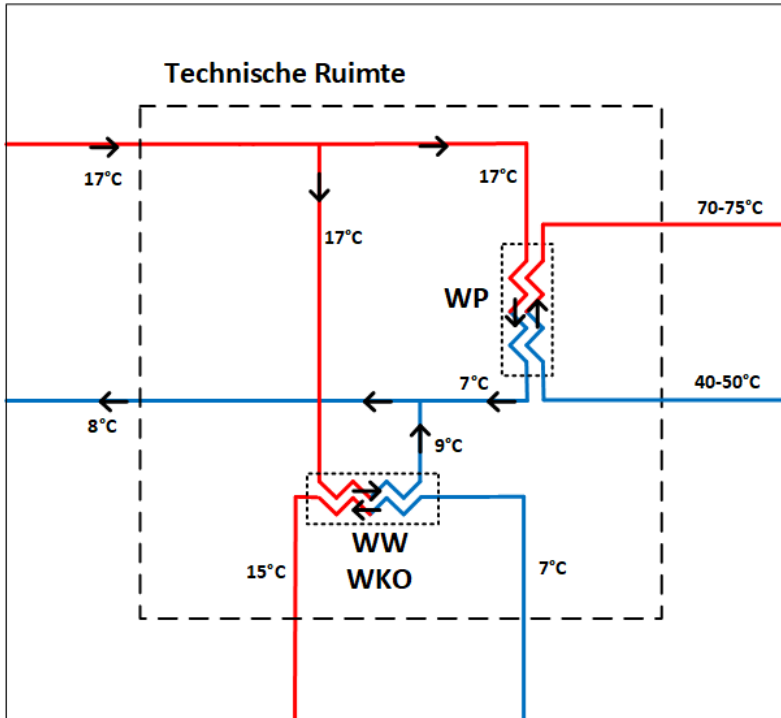
met name ingezet om de aanvoertemperatuur naar de warmtepomp te verhogen en op die manier de prestatie van de warmtepomp te verhogen.

Ook hier geldt de aanname dat de warmtepomp een ΔT van 10°C heeft. Het medium uit verdamperszijde van de warmtepomp heeft dus een temperatuur van -4°C . Dit medium stroomt zowel naar de warmtewisselaar van de WKO als naar de warmtewisselaar van het TEO systeem in de Waal. Bij temperaturen onder de 0 graden voor het medium dat door de warmtewisselaar stroomt is nog onduidelijk of er risico is op aanvriezen van het oppervlaktewater aan de warmtewisselaar die direct in het oppervlaktewater is geplaatst. Dit zal nog nader uitgezocht moeten worden.

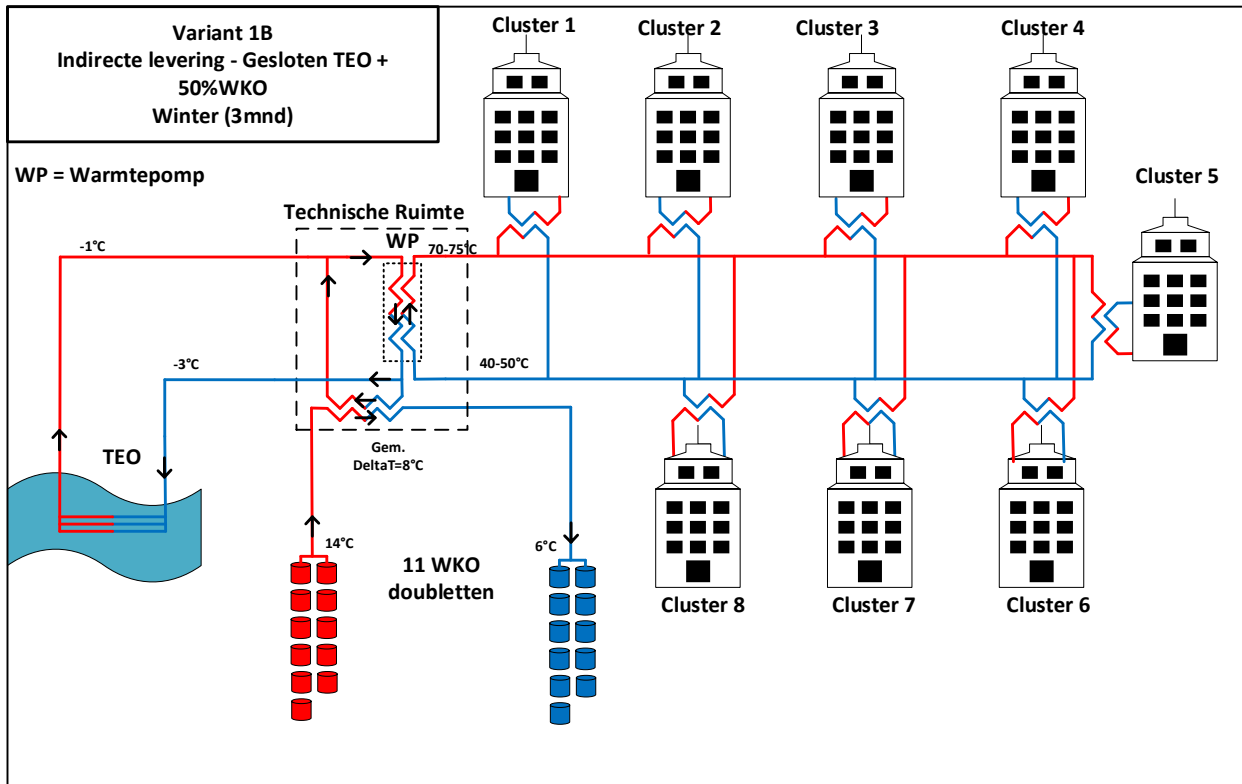
Figuur 7 geeft voor variant 1B totaal 11 WKO-doubletten weer. Dit aantal WKO-doubletten is benodigd om in de winter maanden voldoende vermogen te leveren om invulling te geven aan de basislast. In Paragraaf 4.5 is het benodigd aantal benodigde WKO-doubletten per variant nader toegelicht.



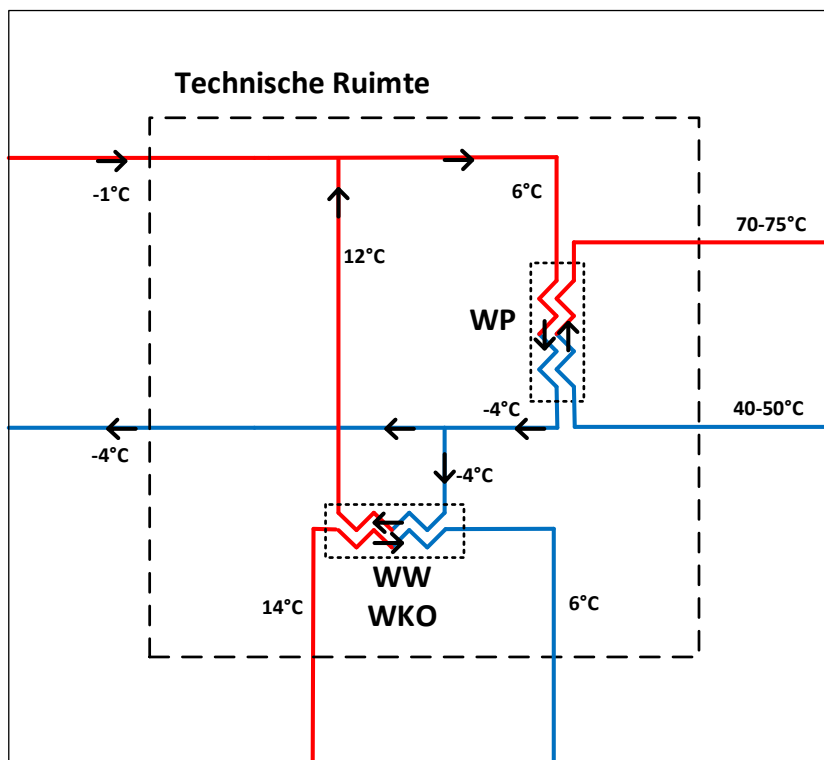
Figuur 7: PFD variant 1B – Indirecte levering – Gesloten TEO zomersituatie



Figuur 8: Technische ruimte variant 1B – Indirecte levering – Gesloten TEO zomersituatie



Figuur 9: PFD variant 1B – Indirecte levering – Gesloten TEO wintersituatie



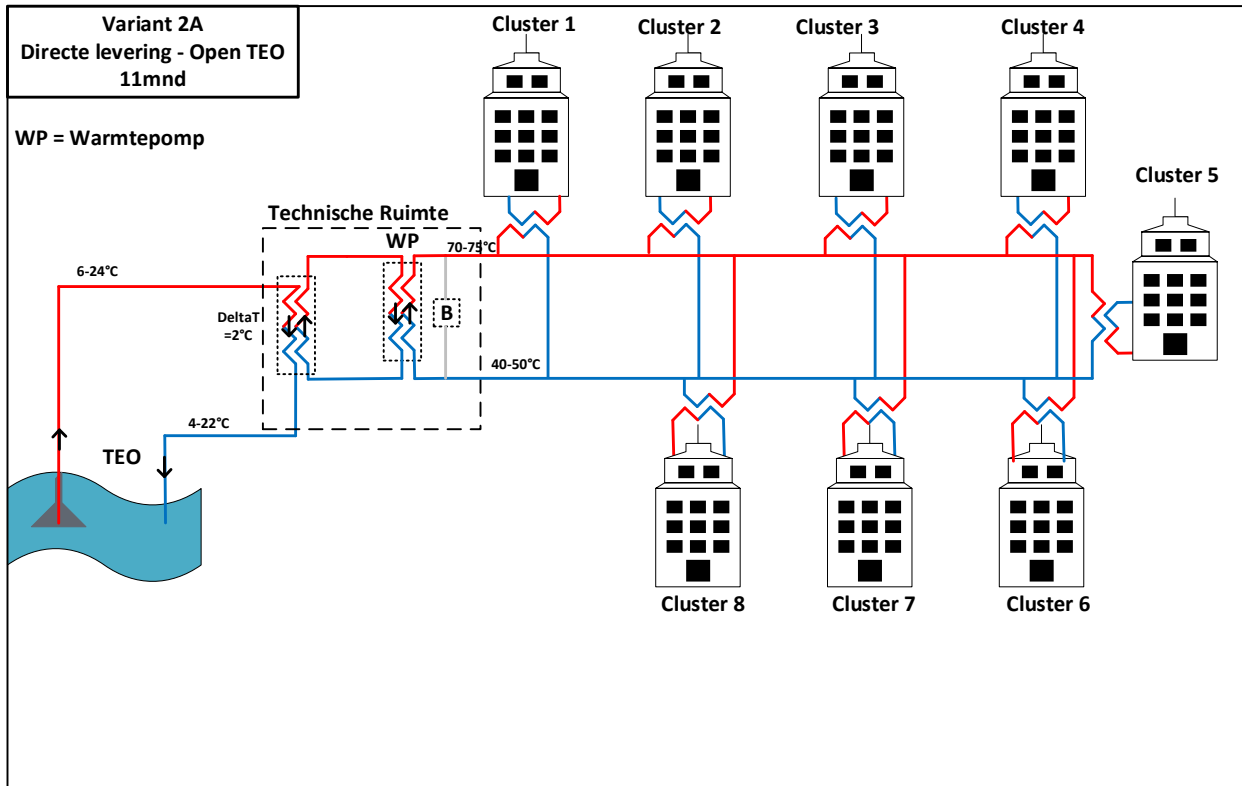
Figuur 10: Technische ruimte variant 1B – Indirecte levering – Gesloten TEO wintersituatie

2A: Directe levering – Open TEO

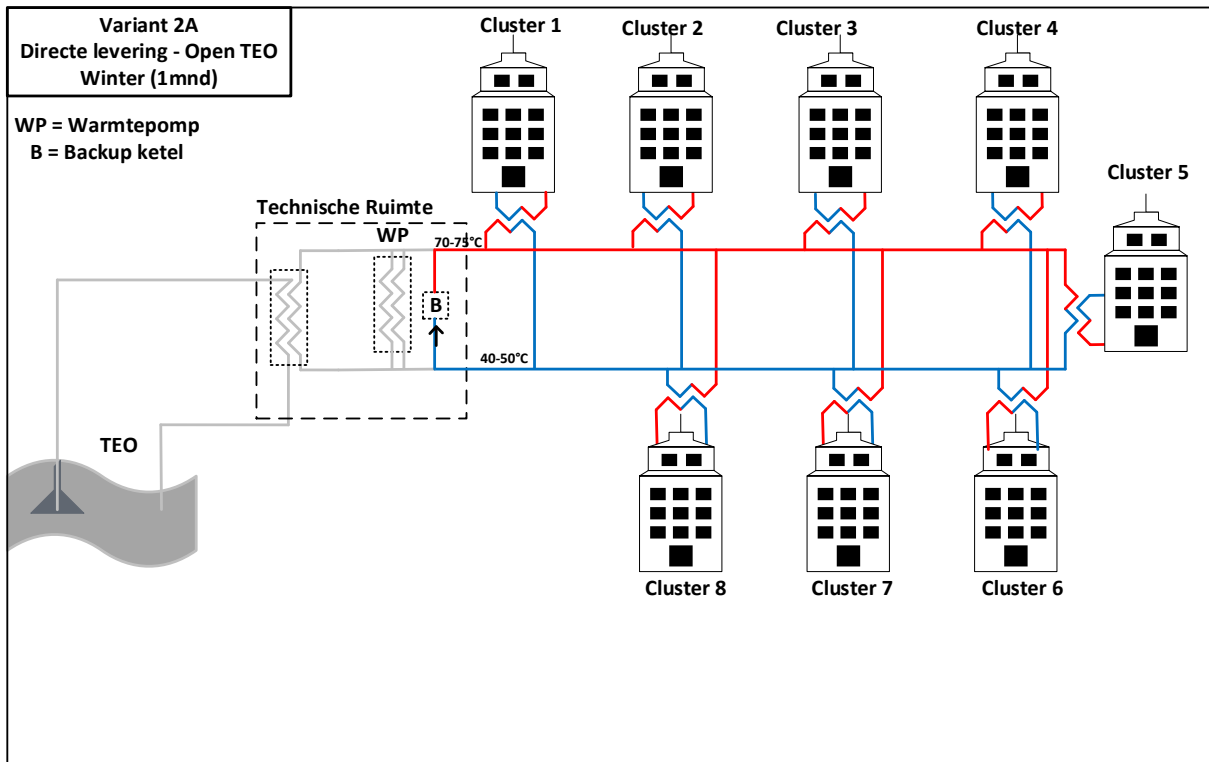
In Figuur 11 en Figuur 12 zijn de PFD's voor Variant 2A voor de zomer- en wintersituatie weergegeven. De PFD voor de zomersituatie geldt voor 11 maanden. Eén maand per jaar is het oppervlaktewater te koud om direct warmte uit te kunnen ontkoppelen. Voor de maand januari geldt de PFD voor de wintersituatie.

Het TEO-systeem moet zo ontworpen worden dat het in alle 11 maanden warmte kan onttrekken uit het oppervlaktewater. De laagste temperatuur in die periode is 6°C. De minimale temperatuur die geloosd mag worden in de Waal is 4°C. Dit levert een temperatuurverschil van 2°C op over de warmtewisselaar van het TEO systeem. Dit betekent dat het systeem ontworpen wordt op een delta T van 2°C die ten alle tijden haalbaar is. Met temperaturen van de Waal in deze 11 maanden van 6°C tot en met 24°C zorgt dit voor een lozingstemperatuur van 4 – 22°C.

Als in de koudste periode van het jaar het oppervlaktewater een te lage temperatuur heeft om warmte uit te winnen wordt de TEO-installatie uitgeschakeld en zal de warmte voor het warmtenet volledig vanuit een ketel komen. In dit voorlopig ontwerp is rekening gehouden met een conventionele ketel op gas. Dit kan op termijn vervangen worden voor een duurzame oplossing, zoals een E-boiler, biogas of waterstof.



Figuur 11: PFD variant 2A – Directe levering – Open TEO zomersituatie



Figuur 12: PFD variant 2A – Directe levering – Open TEO wintersituatie

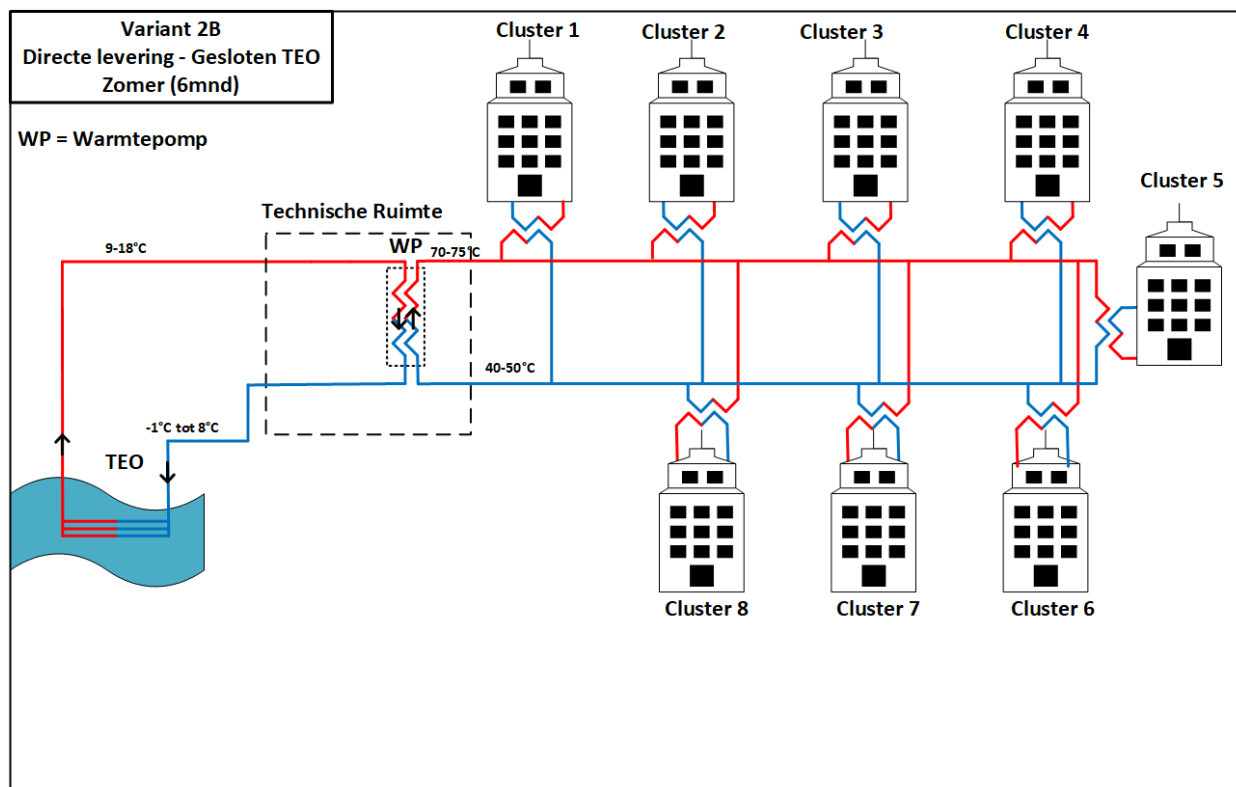
2B: Directe levering – Gesloten TEO

In Figuur 13 en Figuur 14 zijn de PFD's voor Variant 2B voor de zomer- en wintersituatie weergegeven. De zomersituatie geldt voor de 6 maanden van het jaar waarin de watertemperatuur van de Waal het warmst is en de wintersituatie voor de 6 maanden van het jaar waarin de watertemperatuur van de Waal het koudst is.

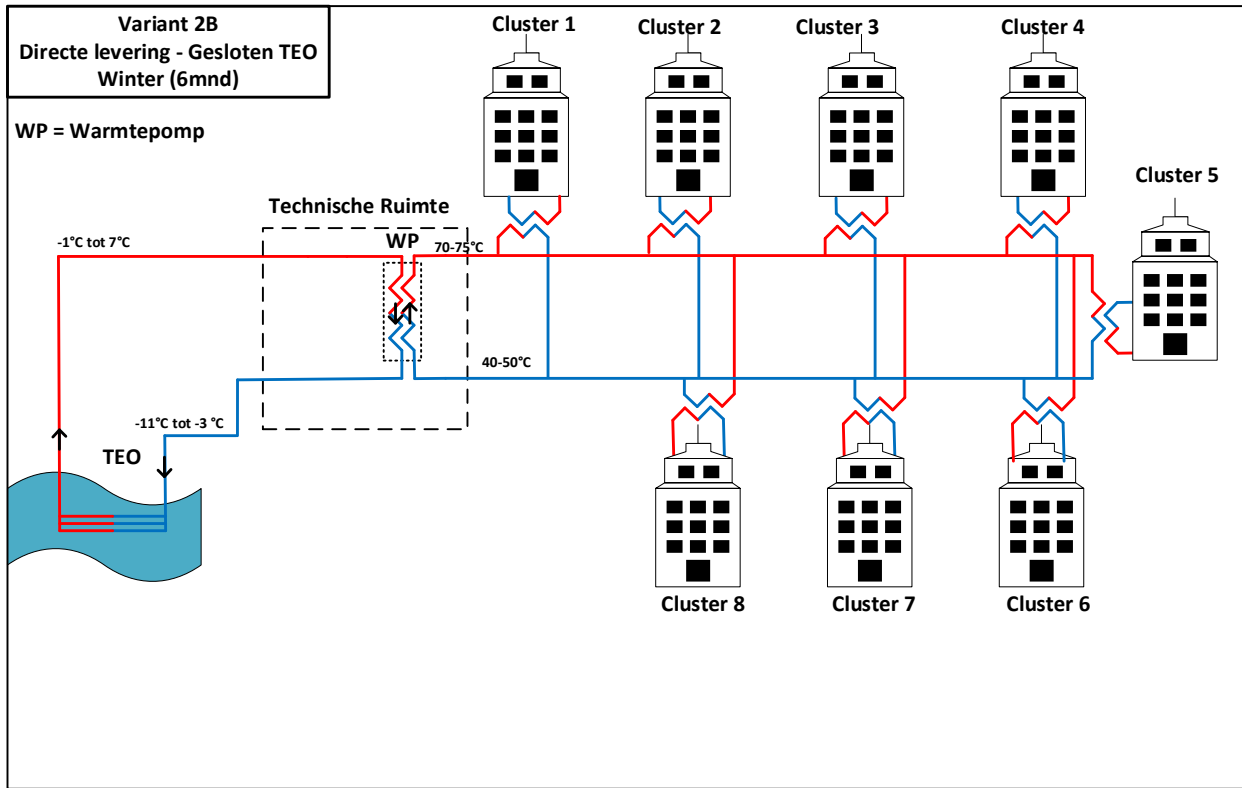
In variant 2B levert de warmtewisselaar in de Waal het gehele jaar door warmte aan de warmtepomp. In de zomersituatie is de temperatuur van de Waal tussen de 15°C en 24°C. Met een temperatuurverlies van 6°C in de warmtewisselaar in de Waal ten opzichte van het oppervlaktewater is de temperatuur van het medium uit de warmtewisselaar in de Waal tussen de 9°C en de 18°C. In de wintersituatie is de temperatuur van de Waal tussen de 5°C en 12°C en dit geeft een temperatuur van het medium uit de warmtewisselaar van het TEO systeem van -1°C tot 7°C.

De delta T over de verdamperszijde van de warmtepomp wordt aangenomen op 10°C, zoals uitgelegd bij variant 1A in dit hoofdstuk. Dit levert een temperatuur van de stroom uit de warmtepomp van tussen de -1°C en 8°C in de zomersituatie en tussen de -11°C en de -3°C in de wintersituatie.

Door de koude temperaturen in het primaire circuit zal het medium uit een glycol mengsel moeten bestaan, aangezien glycol pas bevroert bij temperaturen onder de -15°C. Met deze lage temperaturen van het medium in de warmtewisselaar bestaat er een mogelijkheid tot ijsvorming aan de buitenzijde van de warmtewisselaar. Dit zal de efficiëntie van de warmtewisselaar verlagen. Bij het samenstellen van dit rapport is nog niet bekend wat het effect van deze koude temperatuur van het medium heeft op ijsvorming. Echter kan beredeneerd worden dat de grote stroming in de Waal de kans op ijsvorming aanzienlijk verkleint. Dit zal in een vervolgstudie verder uitgezocht moeten worden. Met een lagere efficiëntie van de warmtewisselaar bij ijsvorming is dan vooralsnog ook geen rekening gehouden in dit onderzoek.



Figuur 13: PFD variant 2B – Directe levering – Gesloten TEO zomersituatie



Figuur 14: PFD variant 2B – Directe levering – Gesloten TEO wintersituatie

4 Toelichting per onderdeel

Elk van de varianten is nader uitgewerkt. Daarbij zijn relevante onderdelen samengebracht die tot voorlopige schets van het gehele TEO-systeem leiden:

- Inrichting technische ruimte
- Rivierkundige aspecten
- In- en uitlaatconstructie
- Gesloten warmtewisselaar
- Warmte- en koude opslag
- Bovenaanzicht ruimtelijke inpassing
- Elektraverbruik
- Kostenindicatie
- CO² besparingspotentieel

4.1 Inrichting technische ruimte

De technische ruimte (TR) is de centrale plek, waar de warmte overgedragen wordt op het warmtenet. In de technische ruimte bevinden zich de installaties en componenten die de warmteoverdracht mogelijk maken. Om te bepalen hoe groot de technische ruimte dient te worden is een lijst gemaakt van alle installaties en componenten die een plek dienen te krijgen in de technische ruimte. Dit is voor alle varianten apart gedaan. In Bijlage 5 is een lijst opgenomen waarin voor alle varianten, alle installaties en componenten die een plek dienen te krijgen in de TR zijn opgesomd. Ook is in Bijlage 5 een plattegrond van de TR van een mogelijke configuratie bij elke variant opgenomen. Daarbij is aangegeven wat het benodigde vloeroppervlak per onderdeel is. Het streven bij het ontwerp van de TR is geweest om deze modulair op te kunnen bouwen. Hierbij is het systeem zo ontworpen, dat afhankelijk van extra woningen die op het warmtenet worden aangesloten, geleidelijk aan warmtepompen, wisselaren en WKO-installaties kunnen worden bijgezet. Naarmate het te leveren vermogen vanuit het warmtenet toeneemt kan ook het opgestelde vermogen van de warmtebron worden verhoogd. Nader onderzocht dient te worden welke installaties op een 2e verdieping kunnen worden geplaatst, waarmee de benodigde aan te kopen grond geminimaliseerd kan worden. Tabel 2 geeft per variant het benodigd bruto vloeroppervlak weer. In de tabel valt op dat variant 2A: Directe levering – Open TEO het grootste vloeroppervlak heeft. Dit komt door het grote aantal skids dat in deze variant nodig is gegeven het grote debiet van oppervlaktewater.

Tabel 2: Vloeroppervlak technische ruimte

Variant	Vloeroppervlak
1A: Indirecte levering – Open TEO	1350 m ²
1B: Indirecte levering – Gesloten TEO	1200 m ²
2A: Directe levering – Open TEO	2250 m ²
2B: Directe levering – Gesloten TEO	1150 m ²

4.2 Rivierkundige aspecten

Inleiding

Voor alle varianten geldt dat dezelfde locatie kan worden gebruikt voor het onttrekken en lozen van het oppervlaktewater.

De rivierkundige aspecten met betrekking tot de inlaat- en uitlaatlocaties zijn op basis van het Rivierkundig Beoordelingskader gedefinieerd. Het Rivierkundig Beoordelingskader (Rijkswaterstaat, 2019) beschrijft hoe Rijkswaterstaat bij de vergunningverlening rivierkundige effecten van voorgenomen ingrepen in de rivier bepaalt en beoordeelt. De mate van detail van de uitwerking van de effectbepaling van een ingreep dient in een vooroverleg met het bevoegd gezag voor dit gebied Rijkswaterstaat Oost-Nederland te bespreken en vast te leggen.

Rivierkundige beoordelingsaspecten worden ingedeeld in de volgende drie hoofdthema's:

- Hoogwaterveiligheid
- Hinder of schade door hydraulische effecten
- Morfologische effecten

In deze verkennende studie is de invloed van het onttrekken en lozen van het oppervlaktewater op de bovenstaande aspecten geanalyseerd. De evaluatie van de rivierkundige aspecten is voornamelijk kwalitatief uitgevoerd. In de volgende fase dient de effectbepaling en analyse in overleg met RWS te worden vastgelegd. De methodiek voor een nauwkeuriger effectbepaling (indien nodig met modellen) moet in overleg met Rijkswaterstaat plaatsvinden.

Relevante aspecten aan rivierzijde

Hoogwaterveiligheid

Voor de onttrekking van warmte bij 1A Indirecte levering – Open TEO bedraagt het debiet 0,23m³/s en van Variant 2A Directe levering – Open TEO met 1,79 m³/s. Deze debieten zijn afkomstig uit de sub varianten studie die is opgenomen in bijlage 1 van deze rapportage. De debieten zijn zeer beperkt (minder dan 0,02%) in het geval van een maatgevende maximale Waal afvoer van 10.165 m³/s (herhalingsstijd van 10.000 jaar, betrekkinglijnen Rijn versie 2018). De technisch ruimte wordt bij alle varianten buiten het winterbed geplaatst. Er zijn geen significante effecten op hoogwaterveiligheid in relatie tot maatgevende waterstanden te verwachten.

Hinder en schade door hydraulische effecten

De volgende aspecten zijn relevant:

- Stroombeeld in vaarweg
- Onttrekking water uit zomerbed Rijntakken

Stroombeeld in vaarweg

Een lokale afvoer in dwarsrichting kan leiden tot een plotselinge zijdelingse verplaatsing van een schip. Hierbij dient een schip binnen de begrenzing van zijn twee scheepsbreedtes (2*B) brede vaarstrook te blijven. Bij een grote zijdelingse verplaatsing (groter dan ½ B) overschrijdt een schip deze begrenzing (schip wordt uit eigen pad gedrukt) en begeeft zich in de vaarstrook van andere (tegemoetkomende) schepen, waardoor een situatie ontstaat die onveilig is voor de scheepvaart.

De dwarsstroomsnelheid is gedefinieerd op de rand van de vaarweg. Bij (dominant) vrij stromende rivieren als de Rijntakken wordt de rand van de vaarweg aangegeven door de bakenlijn.

Bij dwarsstroming met een debiet van meer dan 50 m³/s wordt een dwarsstroomsnelheid van maximaal 0,15 m/s toegelaten. Alleen bij kleine debieten (< 50 m³/s) geldt conform de Richtlijnen Vaarwegen (2017) een maximum dwarsstroomsnelheid van 0,30 m/s.

De methodiek om de dwarsstroomsnelheden op de rand van de vaarweg te bepalen is door Rijkswaterstaat (2019) beschreven. Met het 2D-rivierkundige model dient de dwarsstroomcomponent haaks op de rand van de vaarweg berekend te worden.

In deze analyse wordt de dwarsstroomsnelheid geschat op de gestrekte oeverzone op basis van een afvoer van 0,23 m³/s voor de variant 1A Indirecte levering – Open TEO en leidingdiameter van 0,5 m. Voor variant 2A zullen meerdere leidingen met een diameter van 0,5 m parallel aan elkaar worden opgesteld. De dwarsstroomsnelheid (lokaal) bij de uitstroom/instroom is 1,2 m/s (Debiet/Pijpoppervlakte). De diepte gemiddelde dwarsstroomsnelheid is geschat op 0,22 m/s voor een diepte van 2,8 m, dat is de minimale waterdiepte bij de Overeengekomen Lage Rivierstand (OLR).

De dwarsstroomsnelheid op basis van deze schatting voldoet aan de criteria.

Onttrekking water uit zomerbed Rijntakken

Het beoordelingscriterium is als volgt gedefinieerd volgens het rivierkundig beoordelingskader: “Geen ongewenste afname van de waterdiepte ten gevolge van de wateronttrekking uit het zomerbed bij lage en mediane Boven-Rijn afvoeren.”

Het effect kan in een volgende fase in overleg met Rijkswaterstaat met behulp van numerieke simulaties in beeld worden gebracht voor de lage en gemiddelde afvoer. De afname van waterdiepte ten gevolge van de wateronttrekking/lozing uit het zomerbed van 0,23 m³/s zal beperkt zijn (ordergrootte millimeters). Een onttrekking/lozing van 1,79 m³/s over een korte afstand van 200 m zal ook een beperkt effect op de waterstanden hebben.

Morfologische effecten

Het aspect Sedimentatie en erosie van het zomerbed is van belang.

Sedimentatie en erosie van het zomerbed

Het beoordelingscriterium is als volgt gedefinieerd volgens het rivierkundig beoordelingskader: “Geen sedimentatie in de vaargeul conform BPRW en geen vermindering vaargeulafmetingen bij lage tot gemiddelde rivierafvoeren.”

BPRW: Beheer- en Ontwikkelplan voor de Rijkswateren. Dit plan beschrijft hoe en wat Rijkswaterstaat doet als het gaat om het waterbeheer van de grote rivieren en meren.

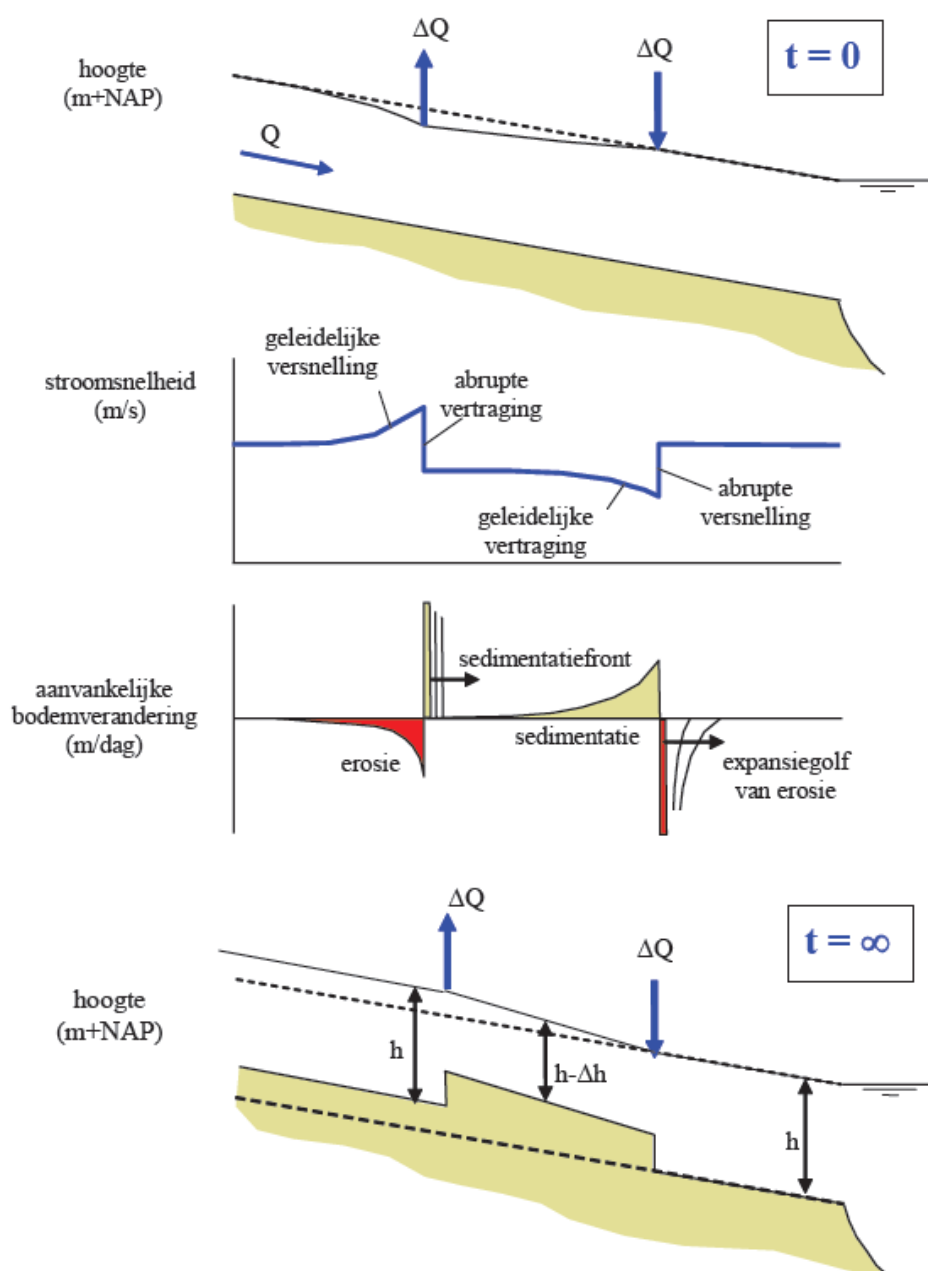
De morfologische effecten van bovenstrooms aan de hoofdgeul water te onttrekken en benedenstrooms weer aan de hoofdgeul toe te voeren worden in Figuur 15 geïllustreerd (Mosselman, 2007). Het lengteprofiel boven in de figuur laat zien hoe de waterstanden dalen en de waterdieptes afnemen. Door de afnemende waterdiepte juist bovenstrooms van de onttrekking convergeren de stroomlijnen en versnelt de stroming met erosie als gevolg. Onmiddellijk beneden de onttrekking daalt de stroomsnelheid abrupt. Dat veroorzaakt sedimentatie die met een steil front stroomafwaarts het verruimde traject in trekt. Verderop neemt de waterdiepte binnen het verruimde traject toe, zodat de stroming nog verder vertraagt. Ook dit veroorzaakt aanzanding in het verruimde traject. Daar waar het water weer terug in de rivier komt, stijgt de stroomsnelheid abrupt. Dat veroorzaakt een erosiegolf die zich geleidelijk stroomafwaarts uitbreidt. De bodem op lange termijn stijgt volgens het lengteprofiel onder in de figuur 15.

Voor de scheepvaart is vooral de aanzanding met het steile front vlak achter de inlaat maatgevend, omdat deze het grootst is. Deze hoeft echter niet over de gehele breedte van de rivier op te treden, maar kan zich tot een deel van het dwarsprofiel beperken als de rivier voldoende breed is. Van belang is dus de

vraag of deze aanzanding binnen of buiten de vaargeul optreedt, en indien dat binnen de vaargeul is, of deze aanzanding kan worden opgevangen door een ter plaatse aanwezige overdiepte. Op de lange termijn ontstaat uiteindelijk een nieuw evenwicht waarbij de rivierbodem in het verruimde traject steiler en hoger is.

De sedimentatie kan bepaald worden op basis van de volgende vergelijking (Lane's balans o.a. Sieben, 2003): $\Delta Z = h_o \cdot \Delta Q / Q_o$

Waarin: Q_o is de afvoer upstream, ΔQ is het onttrokken debiet en h_o is de waterdiepte en ΔZ is de sedimentatie. Voor een afvoer $Q_o = 1.500 \text{ m}^3/\text{s}$, $\Delta Q = 1,79 \text{ m}^3/\text{s}$ en $h_o = 5\text{m}$ is $\Delta Z = 0,006\text{m}$ en voor $\Delta Q = 0,23 \text{ m}^3/\text{s}$ is $\Delta Z = 0,0008\text{m}$. Op basis van deze vereenvoudigde analyse blijken er geen significante effecten van de TEO-varianten op bovenstaande de sedimentatie en erosie van de vaarweg te verwachten.



Figuur 15: Morfologische reactie op korte ($t=0$) en lange ($t=\infty$) termijn (Mosselman, 2007)

Analyse in- en uitlocaties

De meeste geschikte locatie binnen de gele cirkel in Figuur 16 is langs de gestrekte oever, aangegeven met een groene lijn. De locatie ligt aan de buitenbocht van de hoofdgeul. Hier zijn relatief hoge stromingssnelheden wat een reductie van het risico van het verstopen van in- en uitlaat constructie door vervuiling en/of bodemsedimentatie oplevert. Daarnaast is de dwarsstroming te minimaliseren door de in- en uitlaatlocatie op de kribben (aangesloten op de gestrekte oever) te kiezen.

Deze locaties zijn morfologisch stabiel dan de kribvak zone (rode cirkel in Figuur 16). In de kribvak zone is de bodem zeer actief door de invloed van de stroming en de scheepsgolven. Daarnaast is het risico op blokkering door vervuiling kleiner ten opzichte van de locatie bij de zwarte cirkel. In dit gebied kunnen de stroomsnelheden lager zijn wat lokaal aanslibbing en vervuiling kan veroorzaken, hoewel het risico beperkt is geschat.

De uitlaat locatie zal zich stroomafwaarts van de inlaat locatie bevinden om interferentie met koude geloosde water te voorkomen. Door wrijvingsverliezen die optreden in de leiding is een aanzuigende pomp nodig voor het transport van het water vanaf de inlaat naar de technische ruimte en vanaf de technische ruimte weer naar de uitlaat. Voor de varianten met een Open TEO-systeem geldt dat de aanzuigende pomp kan worden opgesteld in de technische ruimte op het land. Voor het Gesloten TEO-systeem dient een perspomp direct bij de inlaatconstructie, buitendijks, te worden geplaatst. Daarvoor moet er ook elektriciteit aangelegd worden naar de locatie van de perspomp. Aandachtspunt hierbij is dat voor de situatie van hoogwater de elektrische installaties boven het hoogwaterniveau opgesteld moeten worden.

In bijlage 2 is de volledige notitie opgenomen waarin de voorkeurslocatie voor de in- en uitlaatconstructie is toegelicht.



Figuur 16: Voorgestelde locatie in- en uitlaatopening (groene lijn). Het gele kruis heeft geen verdere betekenis.

4.3 In- en uitlaatconstructie

1A: Indirecte levering – Open TEO

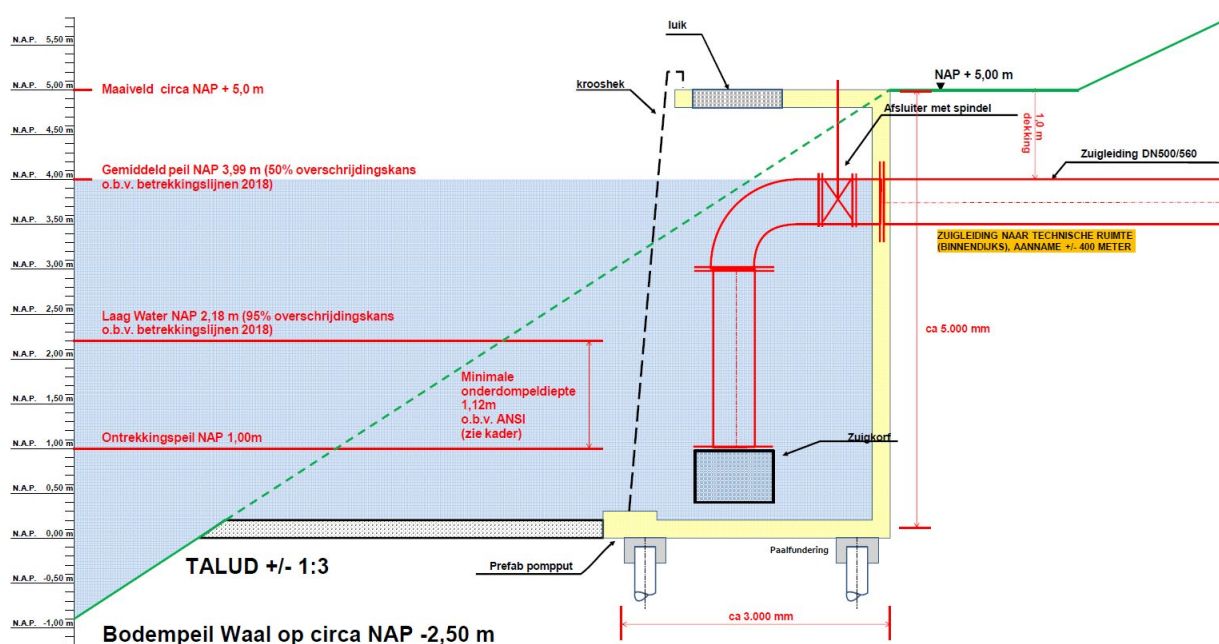
De in- en uitlaatconstructie komen in de oever van de Waal, talud met steenbestorting, en worden uitgevoerd in een betonput met vleugels van stalen damwanden. De vleugelwanden sluiten aan op de huidige oever van stortsteen. Voor de bouw van de putten wordt voorzien in een bouwkuip met onderwaterbeton. De dimensionering is zodanig dat er geen hinderlijke stroming voor de scheepvaart ontstaat. Ter bescherming worden grof spijlenroosters aangebracht om vervuiling te voorkomen. Deze zal periodiek geïnspecteerd en zo nodig m.b.v. een kraan gereinigd moeten worden. Figuur 17 geeft het ontwerp van de inlaatconstructie weer. Figuur 18 geeft het ontwerp van de uitlaatconstructie weer. In bijlage 3 is het peilmatenschema voor het ontwerp van de inlaatconstructie opgenomen. De inlaatconstructie heeft afmetingen breedte, lengte, hoogte van $3 \times 3 \times 5$ m. De uitlaatconstructie bestaat eveneens uit een betonput, maar is minder hoog dan de inlaatconstructie, de reden hiervoor is dat bij de uitlaatconstructie een leiding volstaat die direct op het oppervlaktewater loost.

Bij het dimensioneren van de inlaatlleidingen is rekening gehouden met de vereiste voordruk van de pompen in de technische ruimte. Een binnendiameter van +/- 500 mm is minimaal nodig om deze voordruk te garanderen en cavitatie bij de pomp te voorkomen.

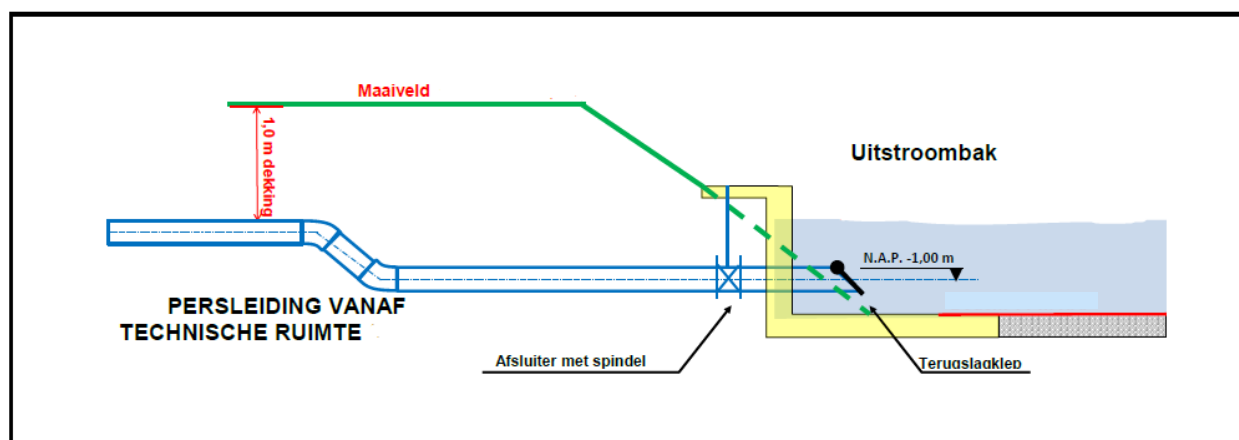
Bij het ontwerp van de instroomconstructie en het onttrekingspeil is rekening gehouden met voldoende diepteligging van de leiding in de Waal om aanzuigen van lucht en vortexvorming te voorkomen. Hierbij is een minimaal waterpeil aangehouden van 2,18mNAP (95% overschrijdingskans) die is afgeleid naar aanleiding van laagwater in 2018.

Op de in- en uitlaatconstructie sluiten de aan- en afvoerleidingen aan. Deze worden voorzien van afsluiters. De uitlaatconstructie wordt tevens voorzien van een terugslagklep. Dit is bij de inlaatconstructie niet mogelijk.

De in- en uitlaatconstructie zullen bij hogere waterstanden in de Waal onderlopen en zijn op dat moment niet bereikbaar. Voor het functioneren van het systeem heeft dit geen nadelig effect.

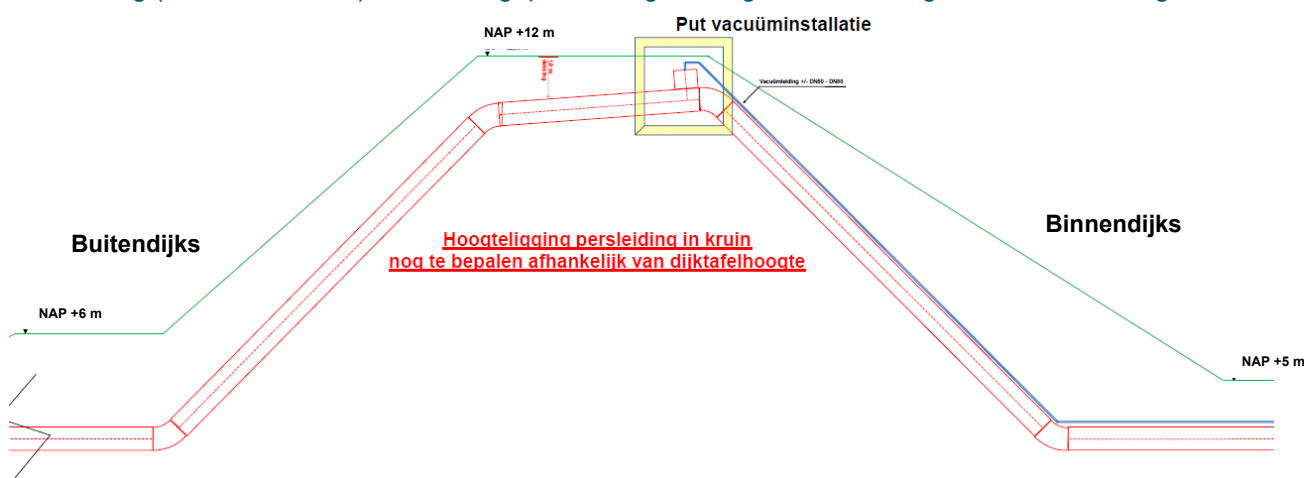


Figuur 17: Ontwerp inlaatconstructie



Figuur 18: Ontwerp uitlaatconstructie (*afsluiter met spindel = terugslagklep)

De aan- en afvoerleidingen worden uitgevoerd in PE en kruisen de primaire watergang. Het waterschap wil voor de dijk kruising geen GFT-boring zodat de leidingen in open ontgraving worden aangelegd met een kattenrug over de dijk. In de dijk kruising dient een afsluiterput (op paalfundering) en vervangende waterkering (stalen damwand) te worden geplaatst. Figuur 19 geeft de kruising van de waterkering weer.



Figuur 19: Kattenrug en vacuüminstallatie voor kruising primaire waterkering

De inlaatleiding fungeert als zuigleiding en zal voor de opstart met een vacuüminstallatie moeten worden ontluicht. Voor de retourleiding (persleiding) geldt hetzelfde; deze wordt eveneens op de vacuüminstallatie aangesloten. De pompinstallatie komt binnendijks.

Voor de aanleg in open ontgraving zal mogelijk grondwater worden onttrokken. De bodemkwaliteit in de uiterwaarden zal nader uitgezocht moeten worden. Vooralsnog is ervan uitgegaan dat het schone grond is.

1B: Indirecte levering – Gesloten TEO

Dezelfde in- en uitlaatconstructie wordt gebruikt als variant 1A. De aanvoerleiding loopt echter niet direct naar de technische ruimte, maar naar de betonnen bakken in de uiterwaarden waarin de gesloten warmtewisselaars zich bevinden. Hier wordt ook een perszuigpomp opgesteld om het water langs de warmtewisselaars te laten stromen. Vanaf deze bakken gaat de retourleiding naar de uitstroombakconstructie.

2A: Directe levering – Open TEO

Voor variant 2A dient een groter debiet, met een factor van ca. 5, onttrokken te worden dan bij variant 1A, hierdoor zijn meerdere onttrekkingsconstructies nodig. Deze worden parallel aan elkaar opgesteld en hebben dezelfde afmetingen als de uitgewerkte inlaatconstructie zoals opgenomen bij variant 1A. Hetzelfde geldt voor de uitlaatconstructie. Een optimalisatie zou kunnen zijn om een in- en uitlaatconstructie toe te passen dat met een groter debiet het oppervlaktewater kan onttrekken.

2B: Directe levering – Gesloten TEO

Dezelfde in- en uitlaatconstructie wordt gebruikt als variant 1A. De aanvoerleiding loopt echter niet direct naar de technische ruimte, maar naar de betonnen bakken in de uiterwaarden ingegraven bakken waarin de gesloten warmtewisselaars zich bevinden. Hier wordt ook een perspomp opgesteld om het water langs de warmtewisselaars te laten stromen. Vanaf deze bakken gaat de retourleiding naar de uitstroomconstructie.

4.4 Gesloten warmtewisselaar

Varianten 1B en 2B hebben een gesloten TEO-systeem als warmtebron. Dit houdt in dat een warmtewisselaar direct warmte uit het oppervlaktewater overdraagt op een transportmedium (water/glycol-mengsel) in plaats van dat het oppervlaktewater wordt ingenomen en via een pijpleiding door een warmtewisselaar stroomt. De meest conventionele manier van een gesloten TEO-systeem is om de warmtewisselaar direct in het oppervlaktewater te hangen. Hierbij stroomt water met een koudere temperatuur dan het oppervlaktewater door de warmtewisselaar en wordt door de hogere temperatuur van het oppervlaktewater het medium dat door de warmtewisselaar stroomt opgewarmd. Een tweede manier is beschreven in voorliggende paragrafen, waarbij de warmtewisselaars in betonnen bakken op het land geplaatst worden. Vanaf de inlaatconstructie, die voorzien is van een perspomp, stroomt het oppervlaktewater via een bypass-leiding naar betonnen bakken die zich buitendijks bevinden. Het oppervlaktewater stroomt door de betonnen bakken waar de warmte van het oppervlaktewater wordt overgedragen aan de warmtewisselaars. De betonnen bakken worden onder het maaiveldniveau ingegraven. Figuur 20 geeft een visualisatie van een betonnen bak met twee warmtewisselaar modules van MEFA Energy Systems.

De optie met de warmtewisselaars in een betonnen bak op het land in plaats van de warmtewisselaars in de Waal te plaatsen heeft een aantal voordelen:

- De Waal is een drukbeveende rivier en de kans op een aanvaring met de warmtewisselaars is aanwezig, wanneer de warmtewisselaar modules in de Waal zouden komen te hangen. Om een aanvaring te voorkomen kan een aanvaarbeveiliging geïnstalleerd worden, echter vraagt dit om extra investeringen. Bovendien vraagt dit ruimte in de rivier.
- De warmtewisselaars zijn makkelijker bereikbaar wanneer ze in betonnen bakken op land geplaatst worden. Hier kunnen de betonnen bakken drooggezet worden door de bypass te sluiten om onderhoud te plegen. Wanneer de warmtewisselaars in de Waal zouden hangen zou onderhoud altijd direct in de rivier moeten plaats vinden.
- Een civiele constructie op land is goedkoper dan een civiele constructie in het water.

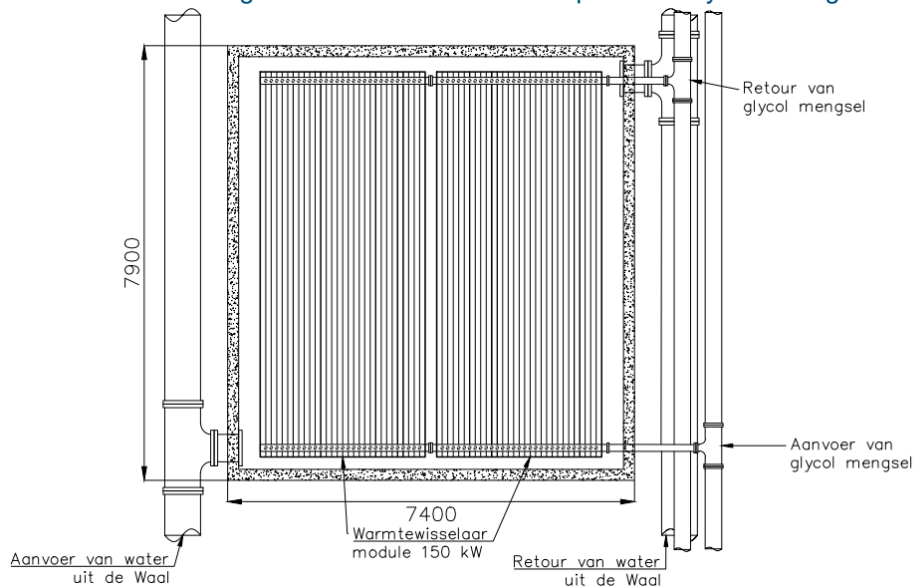
MEFA Energy Systems heeft aangegeven dat zij op dit moment modules kunnen ontwikkelen tot maximaal 150 kW per stuk.² Deze hebben een afmeting van ca. 7 m lang, 3 m breed en 2,5 m hoog. Dit zijn de grootste gesloten TEO-systemen die momenteel door een leverancier als standaard module kunnen worden geleverd. Het modulair opbouwen van het gesloten TEO-systeem blijft hierdoor mogelijk.

² MEFA Energy Systems is benaderd om mee te denken over het ontwerp van de warmtewisselaar in de Waal die ingezet kan worden bij de varianten van het gesloten TEO systeem.

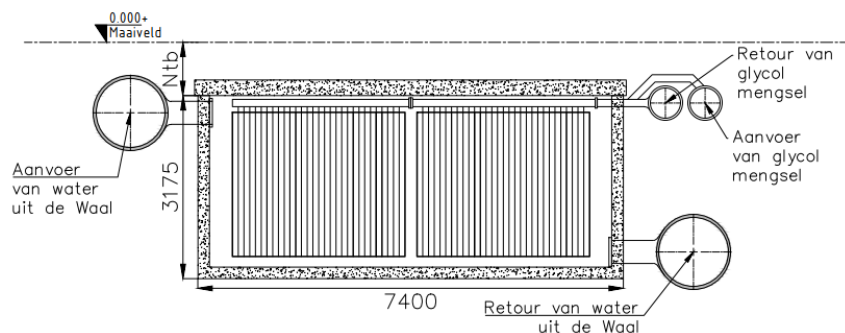


Figuur 20: Betonnen bak met twee warmtewisselaars van MEFA Energy Systems

Ter indicatie en verduidelijking is een schets van het bovenaanzicht en een doorsnede van het gesloten wisselaar gedeelte en bijbehorend leidingwerk weergegeven in figuur 21 en Figuur 22. Het betreft een schets van één betonnen bak met twee warmtewisselaar modules die gezamenlijk in totaal 300 kW aan vermogen kunnen leveren. De betonnen bakken zijn aan de bovenkant voorzien van een deksel, zodat deze waterdicht kunnen worden afgesloten, maar nog wel kunnen worden open gemaakt voor onderhoud. Leidingdiameters zijn niet hydraulisch bepaald. In deze fase is voor de diameters een inschatting gedaan, hiervoor is dezelfde diameter aangehouden als dat voor het Open TEO-systeem is gebruikt.



Figuur 21: Bovenaanzicht van twee warmtewisselaren in betonnen bak incl. leidingwerk [mm]



Figuur 22: Doorsnede van twee warmtewisselaren in betonnen bak incl. leidingwerk [mm]

Voor dit schetsontwerp is uitgegaan van bestaande technologie die direct op de markt verkrijgbaar is. Gezien de gevraagde capaciteit van de warmtewisselaar van het gesloten systeem is het ontwerpen van een specifieke warmtewisselaar voor dit doel een optie die nader onderzocht dient te worden. Dat gaat voor het niveau van schetsontwerp in dit rapport echter te ver.

Variant 1B: Indirecte levering – Gesloten TEO

Het vermogen dat berekend is voor variant 1B komt uit op 15.000 kW in de zomer en 7.500 kW in de winter. In de zomer zal 7.500 kW worden gebruikt voor de basislast aan de warmtepomp en 7.500 kW zal worden gebruikt om de WKO's te regenereren. In de winter komt dan 7.500 kW aan vermogen uit de WKO's en hoeft het TEO-systeem ook maar 7.500 kW aan vermogen te leveren. In de tussenliggende maanden zal het TEO-systeem ook 15.000 kW moeten leveren.

Om het vermogen van 15.000 kW te kunnen leveren dienen 50 betonnen bakken te worden opgesteld waarin zich twee warmtewisselaar modules per bak bevinden. Deze modules nemen samen 400 m × 10 m aan ruimte in beslag, dit is inclusief ruimte om het benodigde leidingwerk kwijt te kunnen. Daarnaast dient bij het innamepunt een pomp te worden geplaatst waarmee het water op voldoende druk wordt gebracht om vervolgens door de leidingen en bakken te kunnen stromen. Voor de ruimtelijke inpassing zijn twee rijen van elk 25 betonnen bakken naast elkaar opgesteld. In een volgende fase kan de opstelling van de bakken geoptimaliseerd worden.

Variant 2B: Directe levering – Gesloten TEO

In variant 2B is het bepaalde vermogen 15.000 kW voor de zomer- en de wintersituatie. De warmtewisselaars draaien het gehele jaar door. Dezelfde opstelling is van toepassing als voor variant 1B.

4.5 Warmte- en koudeopslag

Deze paragraaf bevat een samenvatting van het collectieve WKO-systeem voor variant 1A en 1B. In variant 2A en 2B is geen WKO-systeem voorzien. Een doublet bestaat uit een warmte en een koude bron. De koude en warme bronnen liggen op enkele afstand van elkaar vandaan om thermische interferentie onderling te voorkomen. Voor een uitgebreide toelichting en de gebruikte formules wordt verwezen naar bijlage 6.

1A: Indirecte levering – Open TEO

In variant 1A zal de gehele basislast van 15.000 kW in de winterperiode door het collectieve WKO-systeem geleverd moeten worden.

Aan de hand van informatie uit omliggende systemen en de gegevens van de bodemopbouw op de projectlocatie wordt uitgegaan van plaatsing van het WKO-systeem in het 3^e watervoerende pakket (ca. 80 – 110 m – mv). Bij een boordiameter van 800 mm kan elk doublet in dit pakket ca. 55 m³/uur onttrekken en infiltreren. Gegeven de infiltratietemperaturen in de PFD en de achtergrondtemperatuur van 12 graden levert elk doubletpaar ca. 500 kW, waardoor het totaal aantal benodigde doubletten 30 is.

De 30 bronnen worden verdeeld in 5 clusters, elk met 6 doubletten. Elk cluster levert ca. 3.000 kW. Gezien het volloopscenario van ca. 1,5 tot 2 MW per jaar bedraagt zal ca. elke 2 jaar een cluster bijgeplaatst moeten worden. Binnen deze clusters worden de bronnen op ca. 70 m onderlinge afstand geplaatst. De clusters liggen ca. 210 m uit elkaar om interferentie te voorkomen.

De clusters worden met een vertakte leiding aangesloten op de technische ruimte. In de technische ruimte zal elke ringleiding worden aangesloten op een warmtewisselaar. Daarnaast wordt in de technische ruimte een aparte pomp geplaatst ten behoeve van het circuleren van het water in de vertakte leiding.

Een samenvatting van het totaal benodigd leidingwerk voor de WKO-installatie is weergegeven in tabel 3. Opgemerkt wordt dat vanaf de technische ruimte het inundatiekanaal gekruist wordt met een tweetal 700 mm leidingen. Vanwege de beperkte ruimte vindt deze kruising plaats door middel van een GFT-boring van circa 90 m in lengte.

Tabel 3: Leidingdiameters en lengte WKO Variant 1A

Diameter [mm]	Lengte [m]
355	9635
500	645
600	360
700*	100
800	470
Totaal	11.210
*excl. GFT-boring, ca. 90 m: 2 x 700 mm.	

1B: Indirecte levering – Gesloten TEO

In variant 1B moet 7.500 kW (gedurende 3 maanden in de winter) door het collectieve WKO-systeem geleverd worden. De overige warmtevraag wordt geleverd door het gesloten TEO-systeem.

Bij eenzelfde diepte (80-110 m –mv) en een boordiameter van 800 mm kan elk doublet ca. 80 m³/uur onttrekken en injecteren. Dit verschil in debiet per doublet t.o.v. variant 1A wordt verklaard door een afname in equivalente vollasturen van het systeem (systeem draait een kortere periode waardoor er minder kans is op verstopping). Gegeven de temperaturen in de PFD bedraagt het vermogen ca. 720 kW per doublet, waardoor het totaal aantal doubletten op 11 ligt. De 11 doubletten worden verdeeld over 2 clusters, waarbij elk cluster ca. 3.600 – 4.300 kW levert en per cluster 5 of 6 doubletten worden geplaatst.

Gelijk aan variant 1A worden de clusters aangesloten via een vertakte leiding op de technische ruimte vanwaar het grondwater langs een warmtewisselaar wordt geleid. Tevens is een pomp nodig voor het circuleren van water in de leidingen.

Een samenvatting van het totaal benodigd leidingwerk is weergegeven in tabel 4. Opgemerkt wordt dat vanaf de technische ruimte het inundatiekanaal gekruist wordt met een tweetal 550 mm leidingen. Vanwege de beperkte ruimte vindt deze kruising plaats door middel van een GFT-boring van ca. 90 m in lengte.

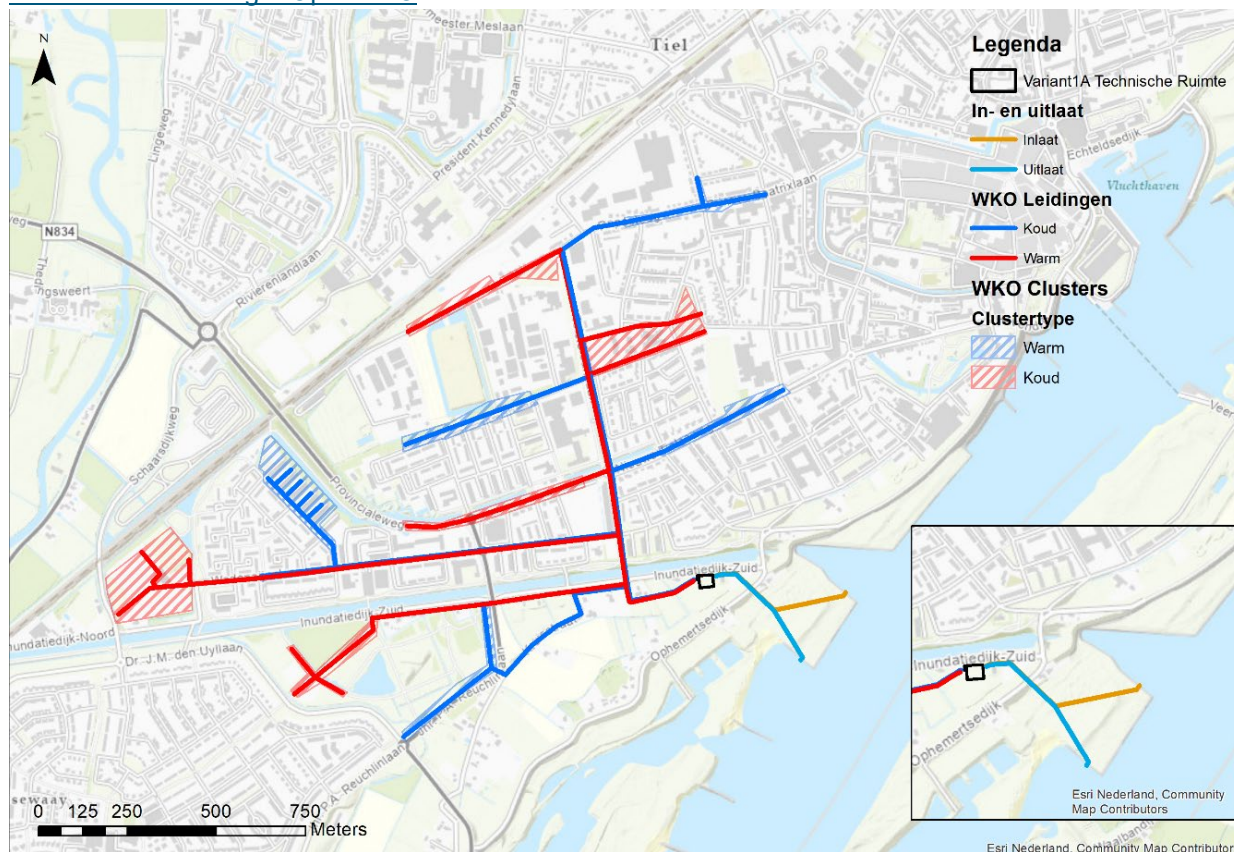
Tabel 4: Leidingdiameters en lengte WKO Variant 1B

Diameter [mm]	Lengte [m]
400	3.020
550*	9.20
Totaal	3.940

*excl. GFT-boring, ca. 90 m: 2 x 550 mm.

4.6 Bovenaanzicht ruimtelijke inpassing

1A: Indirecte levering – Open TEO

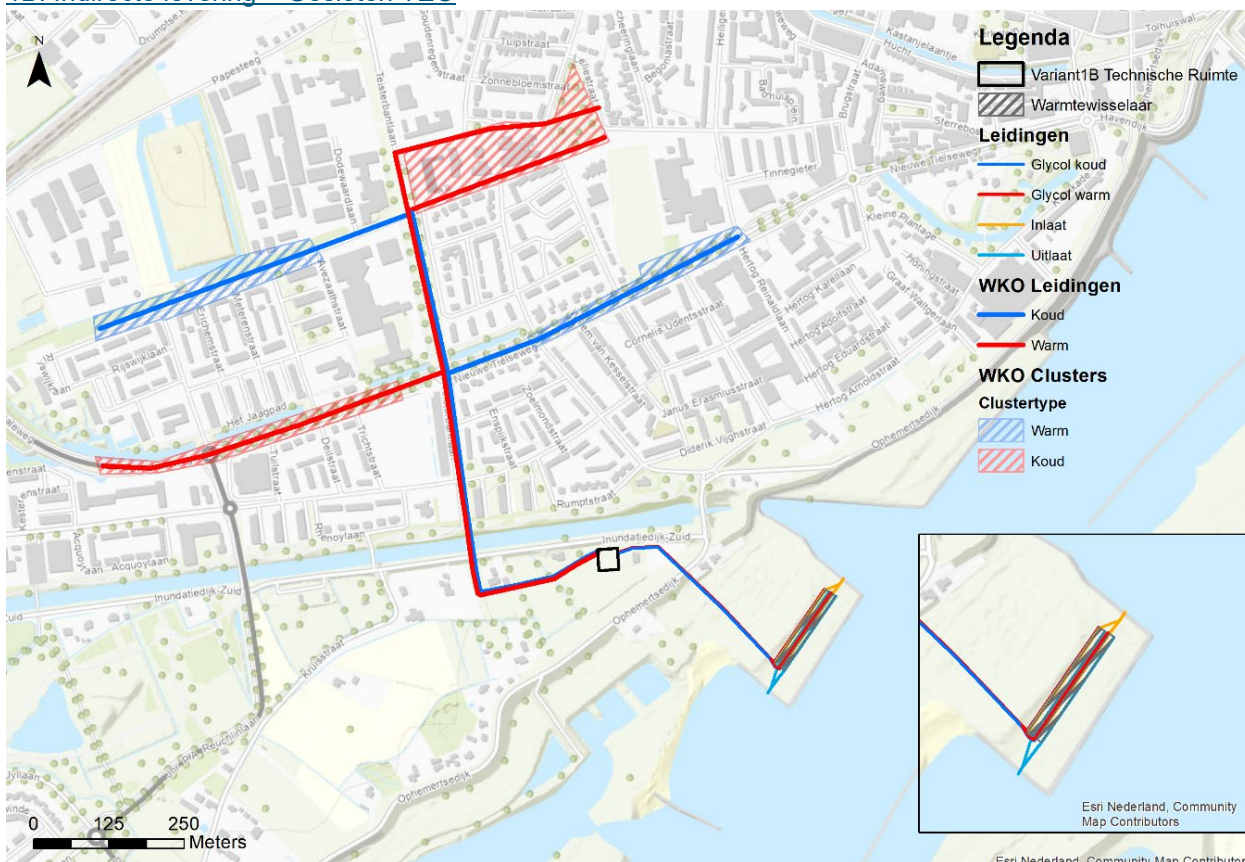


Figuur 23: Bovenaanzicht variant 1A: Indirecte levering met open TEO

In variant 1A wordt water vanuit de waal ingelaten, langs een warmtewisselaar in de technische ruimte geleid en vervolgens weer, aan de andere zijde van de strekoever, geloosd. Daarnaast worden 30 WKO-doubletten, verdeeld over 5 clusters geplaatst. Het onttrokken grondwater stroomt via een vertakte leiding vanaf de technische ruimte langs een warmtewisselaar en wordt vervolgens in de andere bronnen geïnfiltreerd. Elke bron krijgt een betonnen put die 2 x 2 m groot is en die circa 20 cm boven de grond uitsteekt.

In deze variant leveren de WKO-bronnen de gevraagde warmte en worden de bronnen gere genereerd door het open TEO-systeem.

1B: Indirecte levering – Gesloten TEO



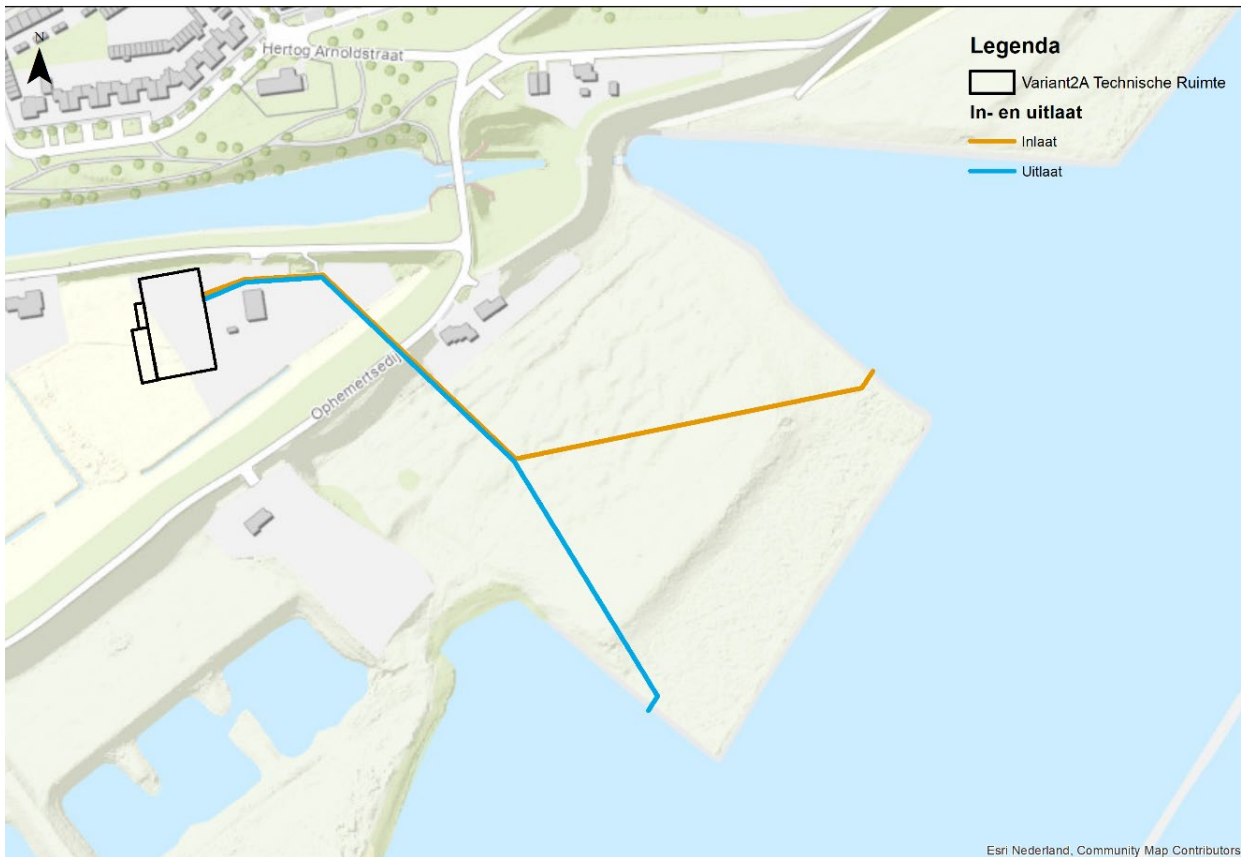
Figuur 24: Bovenaanzicht variant 1B: Indirecte levering met gesloten TEO

In variant 1B wordt water vanuit de Waal vanaf de inlaatconstructie naar de gesloten warmtewisselaren getransporteerd die zich in betonnen bakken in de strekoever bevinden. Vanwege het grote aantal benodigde betonnen bakken worden deze in twee rijen gepositioneerd. Nadat het water door de betonnen bakken langs de warmtewisselaren is gestroomd wordt het water bij de uitlaatconstructie geloosd in de waal. Rekening dient te worden gehouden met actuele vergunningsvoorwaarden, zoals opgenomen in de 'Beleidsregels grote rivieren' van Rijkswaterstaat, in het kader van dit onderzoek is hier geen nadere analyse van uitgevoerd. Vanuit de warmtewisselaar in de betonnen bak stroomt het water/glycol mengsel naar de technische ruimte op het land.

De 11 WKO-doubletten worden verdeeld over 2 clusters. Het onttrokken grondwater stroomt via een vertakte leiding naar de technische ruimte langs een warmtewisselaar en wordt vervolgens in de andere bronnen geïnfilteerd.

In deze variant levert het gesloten TEO-systeem altijd een deel van, of de volledige, warmtevraag, afhankelijk van het seizoen. In de koudste 3 maanden leveren de WKO-bronnen de helft van het gevraagde vermogen om zo de efficiëntie van de warmtepomp te verhogen. In de warmste 3 maanden worden de bronnen gere genereerd door het gesloten TEO-systeem.

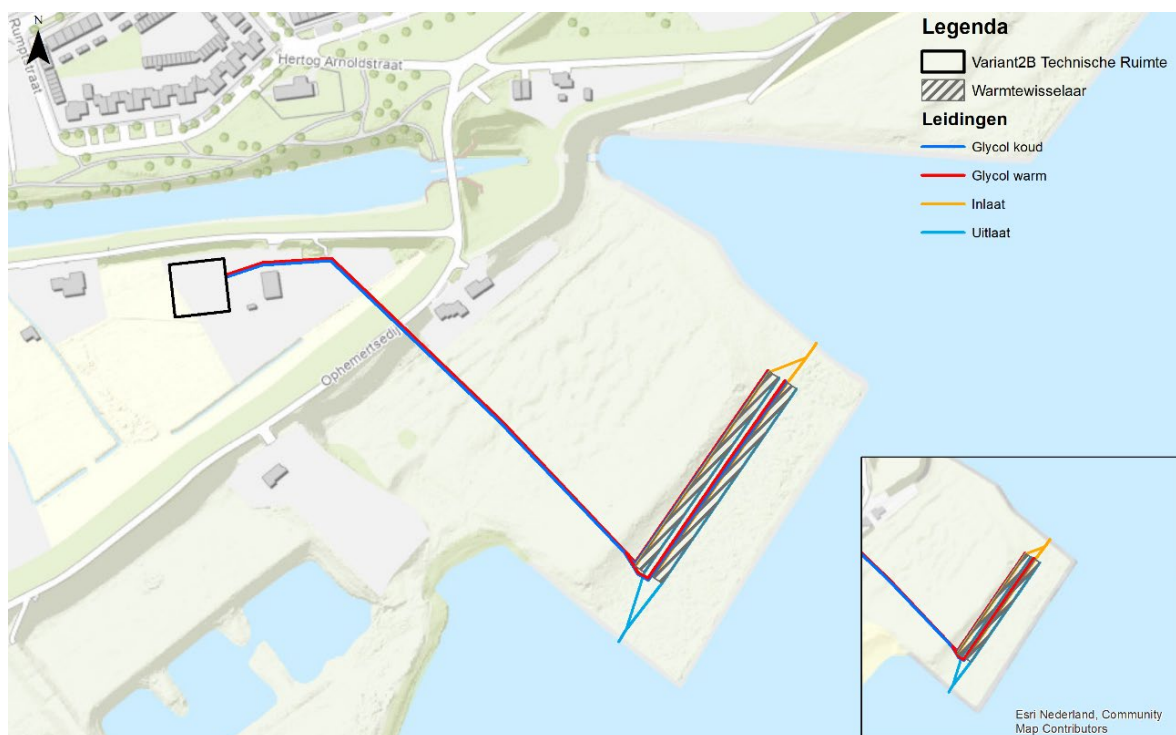
2A: Directe levering – Open TEO



Figuur 25: Bovenaanzicht variant 2A: Directe levering met open TEO

In variant 2A wordt water vanuit de Waal ingelaten, langs een warmtewisselaar in de technische ruimte geleid en vervolgens weer, aan de andere zijde de strekoever, geloosd. Het TEO-systeem levert gedurende 11 maanden de warmtevraag, enkel in de koudste maand zullen gasketels de warmtevoorziening overnemen.

2B: Directe levering – Gesloten TEO



Figuur 26: Bovenaanzicht variant 2B: Directe levering met gesloten TEO

In variant 2B wordt water vanuit de Waal langs een gesloten warmtewisselaar, gelegen in de strekoever, geleid. Vanwege het benodigd oppervlak wordt het ingelaten waalwater vertakt over 2 blokken van wisselaars. Vervolgens wordt het water weer geloosd in de waal. Rekening dient te worden gehouden met actuele vergunningsvoorwaarden, zoals opgenomen in de 'Beleidsregels grote rivieren' van Rijkswaterstaat, in het kader van dit onderzoek is hier geen nadere analyse van uitgevoerd.

Vanuit de wisselaar in de strekoever stroomt het glycol/water mengsel naar de technische ruimte. In deze variant levert het gesloten TEO-systeem altijd de warmtevraag. Als indicatie voor een dwarsdoorsnede van de wisselaar en het leidingwerk wordt verwezen naar figuur 21.

4.7 Elektraverbruik

Om de warmte uit de Waal te kunnen onttrekken en om de warmte uit de WKO's te kunnen benutten zijn diverse technische installaties benodigd die een elektrische voeding vragen. Met de huidige status van het ontwerp is het mogelijk om voor een aantal hoofdcomponenten een schatting van het elektraverbruik af te geven. Voor deze studie zijn voor de volgende systeemcomponenten het elektrisch verbruik bepaald:

- Warmtepompen
- Distributiepompen van het warmtenet
- Bronpompen van de WKO
- Distributiepompen van het WKO leidingnet
- Bronpompen TEO: Open TEO (aanzuigpomp), Gesloten TEO (perspomp), Water/glycol pomp

Voor variant 2A: Directe levering – Open TEO is een piek/back-up ketel voorzien die 1 maand per jaar de warmte levert en hiervan is een gasverbruik bepaald.

Warmtepompen

De elektrische voeding van de warmtepompen is bepaald aan de hand van een SPF waarde (=Seasonal Performance Factor). De SPF waarde geeft aan hoe efficiënt de warmtepomp omgaat met zijn energie over een stookseizoen. Oftewel hoeveel elektrische energie toegevoegd moet worden aan de warmtepomp om de benodigde hoeveelheid warmte energie te produceren over een heel stookseizoen. De SPF hangt onder andere af van de brontemperatuur en de warmtenettemperatuur. Voor een warmtenet met 70 °C bedraagt de SPF circa 3 (Stowa, 2020). Dus 1/3 deel van de hoeveelheid te leveren warmte energie komt uit elektriciteit.

De aanvoer temperatuur vanuit de WKO of het oppervlaktewater is in de winter lager dan in de zomer. Dit houdt in dat de COP (=Coëfficiënt Performance) van de warmtepomp lager zal zijn in deze koude periode dan de SPF. De COP geeft de efficiëntie van de warmtepomp voor een specifiek moment. Om het benodigd elektrisch piekvermogen van de warmtepompen, koudste periode in de winter, te bepalen is als conservatieve waarde 2,5 voor de COP van de warmtepomp aangenomen.

Per variant is bekend wat de hoeveelheid warmte in (kWh) is die door de warmtepomp aan het warmtenet geleverd zal moeten worden. Door de SPF toe te passen, kan hieruit berekend worden hoeveel warmte er uit de TEO en/of WKO gehaald dient te worden en hoeveel elektrische energie er aan de warmtepomp toegevoerd moet worden. De warmtepomp blijkt voor bijna alle varianten een maximaal elektrisch vermogen van ca. 5.000 kWe te vragen, enkel voor variant 2A waar voor de koudste periode van het jaar een ketel wordt ingezet geldt een maximaal vermogen van de warmtepomp van ca. 4.000 kWe. In bijlage 7 is de berekening van het elektrisch vermogen opgenomen.

Distributie- en bronpompen

Om het elektrisch verbruik van de pompen te kunnen bepalen wordt eerst een inschatting gemaakt van het theoretische pompvermogen. De gevraagde 15 MW aan vermogen op het warmtenet is een basislast, dit houdt in dat de pompen van de TEO-installatie en de pompen van de WKO's op een constant vermogen zullen gaan draaien om de warmte aan te leveren aan de warmtepomp. Voor de inschatting wordt uitgegaan dat de pompen op maximaal vermogen zullen draaien om het gevraagde debiet (en dus warmte) rond te pompen. Het resultaat van onderstaande berekening is dan ook de piekvraag aan elektrische energie.

Om het theoretisch pompvermogen te kunnen berekenen is gebruik gemaakt van de volgende formule:

$$Pompvermogen (kW) = Debiet \times Drukval$$

Toegepast uitgangspunt: De drukval is 1 bar/km = 100 kPa/km

Het elektrisch pompvermogen is vervolgens bepaald met:

$$Elektrisch\ pompvermogen\ (kW) = \frac{theoretisch\ pompvermogen}{pomp\ rendement \times motor\ rendement}$$

De hoeveelheid elektrische energie is vervolgens bepaald door:

$$Elektrische\ energie\ (kWh) = elektrisch\ pompvermogen \times\ vllasturen$$

Het benodigd elektrisch pompvermogen per variant verschilt van ca. 215 kWe tot 820 kWe. In bijlage 7 is een uitwerking van de berekening per variant opgenomen. Daar staat in tabelvorm hoeveel elektrische energie en elektrisch vermogen elk systeemcomponent benodigd heeft. In paragraaf 4.8 is de vertaling naar de kosten gemaakt.

4.8 Kostenindicatie

De kostenindicatie is opgebouwd uit 2 onderdelen:

- CAPEX: Capital Expenditure, wat gedefinieerd is als de initiële investeringskosten van het gehele systeem. De CAPEX is onderverdeeld in 3 categorieën:
 - TEO
 - Technische ruimte
 - WKO
- OPEX: Operational Expenditure, wat gedefinieerd is als de jaarlijkse operationele kosten. De OPEX is onderverdeeld in:
 - Onderhoud & Administratie: De onderhoud en administratieposten worden bepaald met een percentage van de initiële investeringskosten.
- Elektrakosten: Aan de hand van het elektraverbruik, wat in paragraaf 4.7 is bepaald voor de verschillende systeemcomponenten, worden de elektrakosten bepaald. Een prijs per kWh wordt vermenigvuldigd met de totale hoeveelheid elektrische energie. Ook is voor variant 2B een prijs bepaald voor de hoeveelheid gas die ingezet zal moeten worden.

In bijlage 7 is zowel de uitwerking van de investeringskosten als de uitwerking van de operationele kosten terug te vinden. Transportpompen van het warmtenet, warmtenet, en huisaansluitingen maken zoals eerder bij de uitgangspunten genoemd geen onderdeel uit van de scope van het onderzoek. In onderstaande paragrafen zijn de bijzonderheden per variant beschreven. In hoofdstuk 5 zijn de totale kosten per variant opgenomen.

1A: Indirecte levering – Open TEO

- Voor deze variant zijn een vijftal TEO Skids benodigd. Bij Xylem is een verkoopprijs van een TEO skid opgevraagd. Een factor 1.6 voor installatie etc. is gebruikt om de totale investeringskosten te bepalen.
- Voor deze variant zijn ook een vijftal WKO-warmtewisselaars en een vijftal distributiepompen geraamd. Voor elk WKO-cluster is rekening gehouden met een warmtewisselaar en distributiepomp.
- 30 WKO-doubletten zijn nodig voor het injecteren van warmte in de zomer en onttrekken in de winter.
- Het aandeel elektraverbruik van de warmtepompen bedraagt 79% van de totale elektriciteitsvraag. De tweede grote vrager is de pompenergie voor het WKO-distributienet met 15% door de grote lengte aan WKO-distributieleidingen van 11,2 km.

1B: Indirecte levering – Gesloten TEO

- De investeringskosten voor de warmtewisselaar zijn opgevraagd bij MEFA. Een factor 1.6 voor installatie etc. is gebruikt om te komen tot de totale investeringskosten van het gesloten TEO-systeem.
- De dimensionering van het leidingwerk dat de warmtewisselaar met de technische ruimte verbindt is niet bekend. Het is onbekend hoe groot deze leidingen dienen te worden. Daarom is er een schatting gemaakt van de dimensionering op basis van het leidingwerk voor het Open TEO-systeem.
- Voor de kruising met de primaire waterkering zijn eveneens de investeringskosten overgenomen zoals deze zijn berekend voor variant 1A.
- Het vermogen van de perspompen die geplaatst dienen te worden bij de inlaatconstructie voor het transport van het oppervlaktewater naar de betonnen bakken is geschat a.d.h.v. het benodigde debiet.

- 2 WKO warmtewisselaars en 2 distributiepompen zijn nodig, omdat er twee WKO-clusters ontworpen zijn. Het WKO-distributienet is daarmee ook een stuk kleiner met 3,9 km aan leidingwerk.
- 11 WKO-doubletten zijn nodig voor het injecteren van warmte in de zomer en onttrekken in de winter.
- Het aandeel elektraverbruik van de warmtepompen bedraagt 91% van de totale elektriciteitsvraag.

2A: Directe levering – Open TEO

- Voor deze variant zijn 43 TEO skids benodigd, waardoor dit een forse extra uitgave geeft.
- Een collectieve gasketel is nodig voor de warmtelevering in de koudste maand van het jaar.
- De kosten voor beheer en onderhoud vallen bij deze variant een stuk hoger uit vergeleken met de andere varianten, vanwege de grote kostenpost van het onderhoud aan de gasketel.
- De energiekosten voor deze variant zijn ongeveer gelijk aan de energiekosten van de andere varianten, ondanks dat er 1 maand met gas gestookt wordt.
- Het aandeel elektraverbruik van de warmtepompen bedraagt 75% van de totale energievraag. Het aandeel gasverbruik bedraagt van het totale energieverbruik ca 21%.

2B: Directe levering – Gesloten TEO

- De investeringskosten voor de warmtewisselaar zijn opgevraagd bij MEFA. Een factor 1.6 voor installatie etc. is gebruikt om te komen tot de totale investeringskosten van het gesloten TEO-systeem.
- De dimensionering van het leidingwerk dat de warmtewisselaar met de technische ruimte verbindt is niet bekend. Het is onbekend hoe groot deze leidingen dienen te worden. Daarom is er een schatting gemaakt van de dimensionering op basis van het leidingwerk voor het Open TEO systeem. De schatting is dat het leidingwerk voor deze variant een kleinere diameter nodig heeft.
- Ditzelfde geldt ook voor de kruising met de primaire waterkering. Deze komt goedkoper uit, vanwege de schatting van een kleinere diameter is geen vacuüminstallatie met vacuümleidingen benodigd.
- Het vermogen van de perspompen die geplaatste dienen te worden bij de inlaatconstructie voor het transport van het oppervlaktewater naar de betonnen bakken is geschat.
- Het aandeel elektraverbruik van de warmtepompen bedraagt 97% van de totale elektriciteitsvraag.

4.9 CO₂ besparingspotentieel

Naast de kostenindicatie is ook een CO₂ besparingspotentieel bepaald per variant. De CO₂ besparing is bepaald aan de hand van emissiefactoren. Emissiefactoren geven aan hoeveel kg CO₂ er per kWh elektriciteit of m³ gas wordt uitgestoten. Het betreft hier de emissiefactoren die aangeven hoeveel CO₂ er wordt uitgestoten in de gehele keten: zowel van het produceren van de energiedragers die de elektriciteitscentrale gebruikt, als bij de productie van elektriciteit: de zogenoemde Well to Wheel benadering. In Tabel 5 zijn de emissiefactoren per brandstof gegeven, aldus de website co2emissiefactoren.nl. Dit is de website met betrouwbare emissiefactoren voor de Nederlandse markt.

Tabel 5: Emissiefactoren

Brandstof	Emissiefactor	Eenheid
Grijze stroom	0.556	kg CO ₂ uitstoot per kWh of m ³ gas
Groene stroom ³	0	kg CO ₂ uitstoot per kWh of m ³ gas
Aardgas	1.884	kg CO ₂ uitstoot per kWh of m ³ gas

Tabel 6 tot en met 9 geeft in de laatste kolom per variant weer wat de mogelijke percentuele CO₂ besparing is ten opzichte van een situatie waarbij de volledige warmtevraag ingevuld wordt door een aardgas ketel. In de middelste kolom staat de absolute hoeveelheid CO₂ die bij benadering uitgestoten zal worden. In de toekomst kan de grijze stroom vervangen worden door groene stroom. Dit is ook weergegeven in de tabel in de rij 'Groene Stroom'.

Tabel 6: CO₂ Besparingspotentieel Variant 1A: Indirecte levering – Open TEO

Brandstof	Totaal uitstoot in kg CO ₂	CO ₂ besparing
Grijze stroom	25.100.000	-3% (negatief)
Groene stroom	0*	100%
Eq. Aardgas	24.400.000	-

Tabel 7: CO₂ Besparingspotentieel Variant 1B: Indirecte levering – Gesloten TEO

Brandstof	Totaal uitstoot in kg CO ₂	CO ₂ besparing
Grijze stroom	22.600.000	8%
Groene stroom	0*	100%
Eq. Aardgas	24.400.000	-

Tabel 8: CO₂ Besparingspotentieel Variant 2A: Directe levering – Open TEO

Brandstof	Totaal uitstoot in kg CO ₂	CO ₂ besparing
Grijze stroom	19.500.000	13%
Groene stroom + Backup Aardgas	2.000.000*	92%
Eq. Aardgas	24.400.000	-

Tabel 9: CO₂ Besparingspotentieel Variant 2B: Directe levering – Gesloten TEO

Brandstof	Totaal uitstoot in kg CO ₂	CO ₂ besparing
Grijze stroom	21.300.000	15%
Groene stroom	0*	100%
Eq. Aardgas	24.400.000	-

Uit de CO₂ besparing blijkt dat voor de variant met 1A Indirecte levering – open TEO met de huidige energiemix, grijze stroom, de CO₂ besparing negatief uit valt. De oorzaak hiervan is de grote leidinglengte naar de WKO doubletten, waar veel elektriciteit voor nodig is. Hieruit blijkt dat voor TEO-systemen op een dergelijk grote schaal de CO₂ besparing negatief uitpakt bij inzet van grijze stroom.

³ De emissiefactor voor groene stroom is 0 indien de Well To Wheel benadering wordt toegepast. Indien de CO₂ uitstoot t.g.v. de bouw en sloop van de duurzame energiebron ook wordt meegenomen zal deze fluctueren tussen de 4 en 61 gram CO₂ uitstoot per kWh voor wind-, zonne- en waterenergie. (Van der Niet & Bruinsma, 2022).

5 Analyse varianten

In dit hoofdstuk is een analyse uitgevoerd van de resultaten van de schetsontwerpen van de varianten en zijn tevens de verschillen tussen de varianten benoemd. Daarnaast is een toelichting gegeven op de bandbreedte in de gebruikte data en gevoeligheden die er nog bij de varianten zijn.

5.1 Analyse

Tabel 10: Samenvatting van resultaten per variant

	Variant 1A – Indirecte levering Open TEO	Variant 1B – Indirecte levering Gesloten TEO	Variant 2A – Directe levering Open TEO	Variant 2B – Directe levering Gesloten TEO
Gevraagde vermogen basislast 8.500 woningen	15.000 kW	15.000 kW	15.000 kW	15.000 kW
Onttrekkingsperiode TEO	5136 uur (7mnd)	8760 uur (12mnd)	8088 uur (11mnd)	8760 uur (12mnd)
Vermogen TEO - Zomer	14.179 kW(7mnd)*	15.000 kW	15.000 kW (11mnd)	15.000 kW
Vermogen TEO - Winter	-	7.500 kW	15.000 kW	15.000 kW
Vermogen WKO - Winter	15.000 kW (5mnd)	7.500 kW	-	-
Vermogen gasketel - Winter	-	-	15.000 kW (1 mnd)	-
Temperatuurverschil onttrekking en lozing oppervlaktewater - Zomer	9°C	9°C	2°C	10°C
Temperatuurverschil onttrekking en lozing van oppervlaktewater - Winter	-	2°C	2°C	2°C
Maximaal debiet TEO uit Waal - Zomer	0,4 m ³ /s	0,2 m ³ /s	0,4 m ³ /s	0,2 m ³ /s
Maximaal debiet TEO uit Waal – Winter	--	0,2 m ³ /s	1,8 m ³ /s	0,2 m ³ /s
Aantal WKO doubletten	30	11	-	-
Lengte WKO leidingen	11,2 km	3,9 km	-	-
Ruimtebeslag Technische Ruimte	1.350 m ²	1.200 m ²	2.250 m ²	1.150 m ²
Ruimtebeslag betonnen bakken in oever Waal	-	4.200 m ²	-	4.200 m ²
Elektrisch piekvermogen	5.820 kWe	5.280 kWe	5.215 kWe	5.225 kWe

	Variant 1A – Indirecte levering Open TEO	Variant 1B – Indirecte levering Gesloten TEO	Variant 2A – Directe levering Open TEO	Variant 2B – Directe levering Gesloten TEO
Elektraverbruik	45 mln. kWh/jaar	41 mln. kWh/jaar	35 mln. kWh/jaar	38 mln. kWh/jaar
Percentage elektraverbruik warmtepomp t.o.v. totaal elektraverbruik	80%	90%	95%	95%
Gasverbruik	-	-	9 mln. kWh/jaar	-
Percentage warmte afkomstig van TEO	59%	63%	59%	65%
CO2 besparing t.o.v. 100% aardgasverwarming (bij gebruik grijze stroom)	-3%	8%	13%	15%
CO2 besparing t.o.v. 100% aardgasverwarming (bij gebruik groene stroom)	100%	100%	92%	100%
CAPEX**	€36.000.000	€36.200.000	€57.800.000	€27.400.000
OPEX***	€5.200.000	€4.600.000	€5.900.000	€4.200.000

* In de zomer is minder vermogen basislast nodig dan in de winter. TEO wordt enkel gebruikt voor de regeneratie van de WKO bronnen in de zomer. Bij variant 1A is het vermogen vanuit TEO in de zomer lager door een lange onttrekkingsperiode van 7 maanden.

** Alle CAPEX zijn geraamd op basis van prijspeil 2021 en zijn excl. BTW.

*** Voor de OPEX is voor de elektra en gaskosten gebruikt gemaakt van CBS, Aardgas en elektriciteit, gemiddelde prijzen van eindgebruikers, kwartaal 2 2021. Deze prijzen zijn incl. BTW en belastingen. Voor de elektriciteitsprijs is €0,0830/kWh en voor de gasprijs is €10,4800/GJ als uitgangspunt aangenomen.

5.2 Verschillen tussen varianten

Gegeven de vraagstelling en de genoemde criteria voor beoordeling van de verschillende varianten (energetische kenmerken (piekvermogen en elektraverbruik; % CO₂ besparing), kosten (OPEX en CAPEX), ruimtelijke inpassing (WKO en TR en bakken) en installatietechnische en rivierkundige aspecten) worden hierna de meest opvallende en relevante verschillen per variant geïdentificeerd.

1A: Indirecte levering – Open TEO

Deze variant is de configuratie die het meest wordt toegepast voor TEO. In de warmste maanden van het jaar wordt warmte uit het oppervlaktewater onttrokken en opgeslagen in een WKO om in de winter maanden te gebruiken voor de warmtevoorziening van woningen. In de 5 koudste maanden van het jaar wordt geen oppervlaktewater onttrokken.

Op het aspect vereist piekvermogen en het totale elektraverbruik gedurende het jaar scoort deze variant

het slechtst. Opvallend is dat de CO₂ besparing bij inzet grijze stroom van de indirecte, open variant negatief is. Er wordt met inzet van de huidige grijze stroom mix extra CO₂ uitgestoten, een slechte score. Op het aspect ruimtebeslag heeft deze variant voor- en nadelen. De 30 WKO-doubletten met bijbehorend leidingwerk vragen veel ruimtebeslag en de aanleg van ondergrondse infrastructuur. Een voordeel van deze variant is dat er weinig buitendijkse infrastructuur hoeft te worden aangelegd. Op de ruimtelijke aspecten rust vaak vergunningsplicht. Op de totale investering voor aanleg (EUR 36,0 miljoen) en de operationele kosten (EUR 5,2 miljoen) scoort deze variant gemiddeld in vergelijking met de andere varianten.

Met betrekking tot de installatietechnische en rivierkundige aspecten kan gezegd worden dat deze variant het meeste wordt toegepast voor TEO projecten. Daardoor is met het ontwerp en de aanleg van dit ontwerp de meeste ervaring in Nederland.

1B: Indirecte levering – Gesloten TEO

Deze variant met gesloten TEO-bronsysteem en WKO opslag is een concept dat op dergelijke grote schaal nog niet is voorgekomen in Nederland. Uit de vergelijking met de andere varianten blijkt deze variant wel potentie te hebben. Het TEO-bronsysteem is het gehele jaar operationeel, en wordt gedurende een aantal maanden per jaar in warmtelevering ondersteund door WKO-doubletten.

Op het aspect vereist piekvermogen en het totale elektraverbruik gedurende het jaar scoort deze variant in de middenmoot. Op CO₂ besparing bij inzet grijze stroom heeft de indirecte, gesloten variant een slechtere score dan de directe systemen. Op het aspect ruimtebeslag heeft deze variant als nadeel dat naast een aantal (11) WKO-doubletten met bijbehorend leidingwerk ook aanzienlijke infrastructuur moet worden aangelegd. Dit betreft de bakken voor de warmte uitwisseling met het gesloten glycol/water medium. Op de ruimtelijke aspecten rust vaak vergunningsplicht. Op de totale investering voor aanleg (EUR 36,2 miljoen) en de operationele kosten (EUR 4,6 miljoen) scoort deze variant in vergelijking relatief goed, slechts 1 variant scoort beter op kosten.

Met betrekking tot de installatietechnische en rivierkundige aspecten kan gezegd worden dat deze variant door de inzet van een gesloten circuit in het bronsysteem relatief onbekend is. Hoe de warmteuitwisseling met de rivier het beste plaats kan vinden zal nog nader onderzocht moeten worden, voortbouwend op het voorliggend schetsontwerp. Ook de grote betonnen constructie buitendijks betekent een risico, waaronder de gunbaarheid en de betrouwbaarheid bij hoogwater door de aanwezigheid van pompen en elektriciteit.

2A: Directe levering – Open TEO

De variant zonder WKO opslag, met open bronsysteem is opvallend omdat dit systeem gemiddeld een maand van het jaar extra warmte moet leveren vanuit een alternatief systeem, in dit ontwerp een gasgestookte ketel. Door deze keuze kan de aanleg van een WKO-systeem voorkomen worden. In de komende jaren is de verwachting dat de gasketel door aardgas gestookt zal worden, en daarmee is deze variant de enige die voor het leveren van de basislast terugvalt op aardgas. De overige elf maanden kan het systeem de basislast warmtevraag leveren.

Op het totale elektraverbruik gedurende het jaar scoort deze variant goed met de laagste score. Op CO₂ besparing bij inzet grijze stroom heeft de directe, open variant de een-na-beste score van alle varianten, ondanks de vereiste bijstook met gas in de koudste wintermaand. Op het aspect ruimtebeslag heeft deze variant voor- en nadelen. De variant heeft de grootste Technische Ruimte voor alle apparatuur. Echter, er is geen WKO-systeem met leidingwerk, en maar beperkte buitendijkse infrastructuur. Wel is door het vereiste hoge debiet in het winterseizoen (1,8 m³/s) een ruimere inlaat- en uitlaatconstructie nodig. Op de totale investering voor aanleg (EUR 57,8 miljoen) en de operationele kosten (EUR 5,9 miljoen) scoort deze variant in vergelijking het minst goed. Met name het vereiste waterdebiet in het winterseizoen is

significant groter dan de alternatieve varianten. Dit verklaart de grote technische ruimte, en de hoge investeringskosten en operationele kosten.

2B: Directe levering – Gesloten TEO

Voor een gesloten TEO systeem is gebleken dat een WKO niet noodzakelijk is. Het gesloten TEO-bronsysteem scoort op energetische kenmerken het een-na-beste voor elektraverbruik en goed op piekvermogen. Op CO₂ besparing bij inzet grijze stroom heeft de directe, gesloten variant de beste score van alle varianten. Voor het ruimtebeslag heeft het voor- en nadelen. Deze variant heeft de kleinste Technische Ruimte en geen WKO-systeem. Als nadeel wordt genoemd de betonnen bakken die buitendijks geplaatst worden voor de warmteuitwisseling van de rivier met het gesloten glycol/water medium. Zoals bij de andere gesloten variant betekent de grote betonnen constructie buitendijks een risico, waaronder de gunbaarheid, de betrouwbaarheid bij hoogwater door de aanwezigheid van pompen en elektriciteit en de erg lage temperaturen waaraan het Waalwater wordt blootgesteld (tot -11 graden Celsius). Op de totale investering voor aanleg (EUR 27,4 miljoen) en de operationele kosten (EUR 4,2 miljoen) scoort deze variant in vergelijking met de alternatieven het beste.

Op energetisch gebied, CO₂ besparing en kosten presteert deze variant dus het beste ten opzichte van de andere varianten. Het gesloten TEO-bronsysteem zonder WKO is op deze schaal niet eerder toegepast. Dat heeft als gevolg dat deze variant de meeste onzekerheden kent van de verschillende schetsontwerpen uit dit rapport. Er is dan ook meer onderzoek nodig naar de toepassing van directe, gesloten TEO systemen voor grootschalige toepassingen.

5.3 Bandbreedte en gevoeligheid

- I. De warmtevraag van de aan te sluiten woningen op het warmtenet is aangeleverd door Qirion. Onbekend is welke nauwkeurigheid hierbij van toepassing is. Het is aannemelijk dat voor dit vroege stadium waarin het project zich bevindt dat het benodigd vermogen voor levering van warmte aan de woningen nog een ruwe inschatting zal zijn.
- II. Voor de temperatuur van het oppervlaktewater is de gemiddelde temperatuur aangenomen, zie hiervoor bijlage 1. Over meerdere jaren kan sprake zijn van variatie in de gemiddelde jaartemperatuur. Dit zal met name een risico zijn voor de varianten met directe levering. Door een lagere temperatuur bij gelijkblijvend debiet daalt het te leveren vermogen vanuit TEO. De basislast kan hierdoor niet langer volledig worden ingevuld.
- III. De insteek van een modulaire opbouw van de varianten geeft voor de varianten met een groot benodigd vermogen hogere kosten door het opstellen van veel kleine componenten ten opzichte van het direct plaatsen van één groot component.
- IV. Het oppervlak van de technische ruimte is aan de hand van de grootte van een component, inclusief een factor voor voldoende loopruimte ten behoeve van onderhoud, bepaald. Op het moment dat op component, leiding en werkruimte niveau de technische ruimte ingericht gaat worden ontstaat een beter beeld van het benodigd oppervlak voor de technische ruimte. Hiermee kan ook worden bepaald of de componenten over meerdere verdiepingen zijn te plaatsen waarmee de voetafdruk op het benodigde ruimtebeslag kleiner wordt.
- V. Maximaal temperatuurverschil waarmee de warmtepomp overweg kan is nog onzeker. De aanneme van de delta T over de verdamperzijde van de warmtepomp is gebaseerd op gesprekken met een industriële warmtepomp fabrikant uit Duitsland die door MEFA Energy Systems is benaderd in opdracht van Royal HaskoningDHV. De delta T van 10 °C is een ontwikkeling waar de leveranciers van warmtepompen nog naar toe werken om te halen. De

- toekomst moet uitwijzen of een dergelijk hoge delta T ook door warmtepompen gehaald kan worden. Het effect een lagere delta T voor de warmtepomp is inzichtelijk gemaakt in Tabel 11.
- VI. Onbekend is nog wat het lokale effect van een grote koude lozing in een rivier is op de ecologie.
 - VII. De gesloten TEO is nog beperkt toegepast en er zijn nog maar weinig leveranciers die hier apparatuur voor leveren. Voor dit onderzoek is contact geweest met één leverancier die tot op heden de grootste gesloten TEO heeft geïnstalleerd. Dit betrof een 150 kW warmtewisselaar module in een betonnen bak. Ditzelfde concept is overgenomen voor deze studie, echter is het nadeel dat de betonnen bakken buitendijks moeten worden geplaatst. Hierdoor zijn er extra uitdagingen bij het buitendijks plaatsen van pompen incl. aansturing en elektriciteitsvoorziening. De aandacht zal in een vervolgonderzoek uit moeten gaan naar alternatieve concepten om de gesloten TEO warmtewisselaren buitendijks te kunnen plaatsen. De gesloten TEO is nog volop in ontwikkeling en heeft nader onderzoek nodig voordat deze op grote schaal kan worden toegepast.
 - VIII. De kosten voor de warmtewisselaar modules bij de twee gesloten TEO varianten zijn bepaald aan de hand van kentallen. Deze kentallen zijn aangeleverd door MEFA Energy Systems.
 - IX. De kosten voor het leidingwerk van de gesloten TEO varianten zijn op basis van een expert guess bepaald. De dimensionering van deze leidingen ontbreekt doordat er nog geen helder concept ontwerp van de leverancier voor de warmtewisselaar modules is ontvangen. Er is uitgegaan van een kleinere diameter dan die benodigd is voor het open TEO systeem.
 - X. Om een beeld te krijgen van de bandbreedte die geldt voor de CAPEX kostenindicatie is gekeken het aspect dat het grootste effect heeft op de investeringskosten per variant. Hieruit is gebleken dat dit het temperatuurverschil is dat over de verdamperzijde van de warmtepomp bereikt kan worden. Deze is namelijk maatgevend gebleken voor het temperatuurverschil tussen het onttrokken en geloosde oppervlaktewater. Tabel 11 geeft het temperatuurverschil tussen het onttrokken en geloosde oppervlaktewater bij een maximaal temperatuurverschil van 10 °C en 5 °C over de verdamperzijde van de warmtepomp. De 5 °C is een temperatuurverschil wat op dit moment in de praktijk veel voorkomt bij warmtepompen. Dit temperatuurverschil is medebepalend voor het aantal benodigde componenten per variant en de investeringskosten daarvan. Aan de hand van de toe- of afname van het aantal benodigde componenten per variant zijn de kosten opnieuw berekend, deze zijn opgenomen in bijlage 8. Tabel 11 geeft de bandbreedte van de investeringskosten. Deze tabel geeft een illustratie van de gevoeligheid van de uitgangspunten.

Tabel 11: Effect investeringskosten bij wijziging van het maximaal haalbare temperatuurverschil aan de verdamperzijde warmtepomp

Variabele	Variant 1A	Variant 1B	Variant 2A	Variant 2B
Temperatuurverschil onttrekking en lozing bij gehanteerde uitgangspunten in het rapport van 10 °C over de verdamper zijde van de warmtepomp [°C]	9	9	2	10
Temperatuurverschil onttrekking en lozing bij temperatuurverschil van 5 °C over de verdamper zijde van de warmtepomp [°C]	6	6	2	5
Relatief effect investeringskosten	+ 45%	+ 12%	+ 0%	+52%

Uit de vergelijking van het temperatuurverschil tussen het onttrokken en geloosde oppervlaktewater blijkt dat variant 2B gevoeliger is voor een kleiner te behalen temperatuurverschil over de verdamper van de warmtepomp dan de andere varianten. Dit is ook de verklaring dat variant 2B het grootste relatieve effect op de investeringskosten heeft. Variant 2A heeft geen last van een kleiner te behalen temperatuurverschil over de verdamper van de warmtepomp, omdat deze variant al een klein temperatuurverschil heeft tussen het onttrokken en geloosde oppervlaktewater.

6 Conclusie & aanbevelingen

6.1 Inleiding

Om te komen tot een schetsontwerp van verschillende varianten van een TEO-systeem bij de Waal in Tiel is nader onderzoek gedaan naar de energetische eigenschappen, de ruimtelijke inpassing, de kosten per variant en de installatietechnische en rivierkundige aspecten. Hierbij is enkel de TEO bron beschouwt en zijn het warmtenet met pompen en huisaanpassingen buiten beschouwing gelaten. De studie gaat uit van een basislast van een middentemperatuur warmtenet (70°C -75°C) en voorziet niet in het benodigde piek en back-up systeem. Op basis van de beschrijving en analyses (hoofdstukken 3 tot en met 5) worden de navolgende conclusies getrokken en aanbevelingen gedaan.

6.2 Conclusies

Uit de schetsontwerpen van de varianten die in deze studie aan bod zijn gekomen, blijkt dat alle vier de varianten in meer of mindere mate geschikt zijn voor de levering van warmte aan 8.500 woningen. Dat geldt niet alleen specifiek voor de casus in Tiel, maar de inzichten zijn ook goed bruikbaar voor andere locaties waar TEO systemen langs grote rivieren in overweging worden genomen.

De variant met het directe, gesloten TEO bron scoort op energetische kenmerken het een na beste voor elektraverbruik en goed op elektrisch piekvermogen. Op CO₂ besparing bij inzet grijze stroom heeft de directe, gesloten variant de beste score van alle varianten. Ook op de totale investering voor aanleg (EUR 27,4 miljoen) en de operationele kosten (EUR 4,2 miljoen) scoort deze variant in vergelijking het beste. Voor het ruimtebeslag heeft het voor- en nadelen. Deze variant heeft de kleinste Technische Ruimte, en geen WKO systeem. Als nadeel wordt genoemd de betonnen bakken die buitendijks geplaatst worden voor de warmte uitwisseling van de rivier met het gesloten glycol/water medium. Deze grote betonnen constructie buitendijks vormt een risico door de gunbaarheid, de betrouwbaarheid bij hoogwater (ondergelopen uiterwaarden) door de aanwezigheid van pompen en elektriciteit en de erg lage temperaturen (tot -11 graden Celsius) bij de warmtewisselaar in verband met ijsvorming. Dit moet nader onderzocht worden. Samengevat scoort de directe, gesloten variant het beste op de onderzochte criteria. Wel kent deze variant ook de meeste onzekerheid over de nadere uitwerking door de buitendijkse betonnen bakken met zeer lage temperaturen voor warmte uitwisseling. Uit de gevoeligheidsanalyse is gebleken dat bij een kleiner haalbare temperatuur over de verdamper zijde van de warmtepomp dit een groot effect heeft op de investeringskosten (+ 52%).

De indirecte, gesloten variant heeft een TEO bron dat het gehele jaar operationeel is, en wordt gedurende gemiddeld negen maanden per jaar in warmtelevering ondersteund door WKO doubletten. Op het aspect vereist elektrisch piekvermogen en het totale elektraverbruik gedurende het jaar scoort deze variant in de middenmoot. Op CO₂ besparing bij inzet grijze stroom heeft de indirecte, gesloten variant een slechtere score dan de directe systemen. Op de totale investering voor aanleg (EUR 36,2 miljoen) en de operationele kosten (EUR 4,6 miljoen) scoort deze variant in vergelijking gemiddeld. Op het aspect ruimtebeslag heeft deze variant als nadeel dat het zowel een aantal (11) WKO-doubletten in de bewoonde omgeving verspreid met bijbehorend leidingwerk heeft, als buitendijkse betonnen bakken voor de warmte uitwisseling met het gesloten glycol/water medium. Ook is de gunbaarheid een aandachtspunt, net als bij de voorgenoemde variant. De indirecte, gesloten variant scoort goed, maar heeft ook de onzekerheid over de nadere uitwerking door de buitendijkse betonnen bakken met lage temperaturen voor warmte uitwisseling.

De indirecte, open variant is de configuratie die momenteel het meest wordt toegepast voor TEO. In de warmste maanden van het jaar wordt warmte uit het oppervlaktewater onttrokken en opgeslagen in een WKO om in de winter maanden te gebruiken voor de warmtevoorziening van woningen. Op het aspect

vereist elektrisch piekvermogen en het totale elektraverbruik gedurende het jaar scoort deze variant het slechtst. Opvallend is dat de CO₂ besparing bij inzet grijze stroom van de indirecte, open variant negatief is. Er wordt met inzet van de huidige grijze stroom mix extra CO₂ uitgestoten vergeleken met aardgas, een slechte score. Op het aspect ruimtebeslag heeft deze variant voor- en nadelen. De 30 WKO-doubletten met bijbehorend leidingwerk vragen veel ruimtebeslag en de aanleg van ondergrondse infrastructuur. Op de ruimtelijke aspecten rust vaak vergunningsplicht. Op de totale investering voor aanleg (EUR 36,0 miljoen) en de operationele kosten (EUR 5,2 miljoen) scoort deze variant in vergelijking gemiddeld. Samengevat scoort de indirecte, open variant minder goed op de onderzoek criteria, waarbij het opvalt dat bij inzet van grijze stroom geen sprake is van CO₂ besparing. Doordat deze variant geen gebruik maakt van de buitendijkse betonnen bakken en geen gebruik maakt van erg lage temperaturen in de warmtewisselaar kent deze variant minder risico. Uit de gevoeligheidsanalyse is gebleken dat bij een kleinere haalbare temperatuur over de verdampers zijde van de warmtepomp dit een groot effect heeft op de investeringskosten (+ 45%).

De directe, open variant is in aanleg en beheer duidelijk het kostbaarst van de onderzochte varianten met totale investering voor aanleg (EUR 57,8 miljoen) en de operationele kosten (EUR 5,9 miljoen). Dit komt voor een belangrijke reden door het grote debiet oppervlaktewater waarvoor de installatie gedimensioneerd is. Op het totale elektraverbruik gedurende het jaar scoort deze variant goed met de laagste score. Daarnaast heeft deze variant het nadeel van aanzienlijk gasverbruik door een gasgestookte ketel voor de koudste maand, want dan kan er met het open systeem onvoldoende warmte gewonnen worden. De directe, open variant is met name door de hoge kosten een minder aantrekkelijke variant.

Resumerend: er wordt naar aanleiding van verkennende onderzoek naar varianten bij de Waal in Tiel geen voorkeur uitgesproken. Daarvoor zijn de onzekerheden nog te groot en is een mogelijke voorkeur afhankelijk van de weging van de verschillende onderzochte aspecten van de TEO bron. Gaan ruimtelijke aspecten boven financiële of wordt op maximale warmtepotentie ingezet? Wel kan worden geconcludeerd dat voor de casus bij de Waal in Tiel gegeven de onderzoek aspecten de TEO bron met de meeste potentie de directe, gesloten variant is. Deze kent echter ook onzekerheden die nader onderzoek vereisen. De variant met de minste onzekerheden is de indirecte, open variant. Deze scoort echter minder op de onderzochte aspecten, en leidt in eerste instantie niet tot een CO₂ besparing.

6.3 Aanbevelingen

De verkennende variantenstudie is specifiek voor TEO uit de Waal bij Tiel uitgevoerd. De aanbevelingen kunnen behulpzaam zijn bij bepaling van de haalbaarheid of de verdere uitwerking en ontwerp van TEO systemen aan de grote rivieren. Uit het rapport volgende de onderstaande aanbevelingen:

- In het rapport is geen structurele gevoeligheidsanalyse uitgevoerd door het variëren met invoerparameters. Hierdoor zijn er geen bandbreedtes van de berekende resultaten bepaald. In paragraaf 5.3 is met een invoerparameter gevarieerd en leidde tot een aanzienlijke bandbreedte in de berekeningsuitkomsten. Het verder uitwerken van bandbreedtes van berekeningsuitkomsten wordt aanbevolen.
- Verder onderzoek is nodig naar welke parameters nu de grootste effecten hebben op de meest aantrekkelijke TEO-varianten; tevens dient onderzocht te worden hoe de bandbreedte van gevonden parameters verkleind kan worden.
- Operationele aspecten zijn niet nader onderzocht in deze studie. In een vervolgstudie zal hier wel aandacht aan gegeven moeten worden. Te denken valt aan conditionering WKO putten, spoelen van leidingen in het systeem, het vervuilen van de warmtewisselaars door rivierwater en planmatig onderhoud.

- In de studie is geen aandacht uitgegaan naar de verwachte levensduur van de installatie. Om tot een goede inschatting van “Total Cost of Ownership” te komen, is een onderzoek naar verwachte levensduur nog een volgende stap.
- Nader onderzoek is ook gewenst bij de volgende items:
 - Ecologie: effect bij waterkwaliteit - en leven bij warmtewisselaars waarbij warmte uit de rivier in aanraking komt met -11 °C van de gesloten warmtewisselaar bij directe levering; wat is de algen aangroei rond de warmtewisselaars; wat is risico bij lek raken warmtewisselaar gesloten systeem waarin water/glycol-mengsel aanwezig is; kan er milieuvriendelijker glycol worden toegepast.
 - De exacte capaciteit in de ondergrond voor de WKO's is een eerste inschatting op basis van al gerealiseerde WKO's in de omgeving van Tiel. Voor de exacte capaciteit van de WKO's dienen altijd proefboringen te worden uitgevoerd om inzicht te krijgen in welke debieten kunnen worden geïnjecteerd en onttrokken in/uit de WKO-bronnen.
 - Hoe ontwerpen van constructies (bakken met warmtewisselaars in de rivieroever, WKO's) in of net naast Natura2000-gebieden binnen de geldende vergunningsvoorwaarden.
 - Welke alternatieve denkbaar zijn om warmtewisselaars van het gesloten TEO systeem direct in contact te brengen met het oppervlaktewater, zonder dat deze op de oever in betonnen bakken worden geplaatst waar het oppervlaktewater doorheen stroomt.
 - Voor het integrale warmtesysteem van rivier tot woning zijn installaties nodig die via water of grond van diverse eigenaren lopen; verschillende eigenaren betekent vaak verschillende regels en vergunningen; dit dient tijdig onderzocht te worden en er dient tijdig afstemming plaats te vinden tussen de diverse partijen. Er dient bijvoorbeeld rekening te worden gehouden met actuele voorwaarden voor watervergunningverlening door Rijkswaterstaat en Bestemmingsplanwijzigingen door de gemeente, zoals die zijn opgenomen in de 'Beleidsregels grote rivieren' en het 'Besluit algemene regels Ruimtelijke Ordening' (in het kader van deze verkenning is hier nog geen nadere analyse van uitgevoerd). Ook voor lokale ontgraving voor aanleg van constructies is sprake van grondwateronttrekking. Hier moet ook een vergunning voor aangevraagd worden.
 - De gesloten TEO-varianten hebben bakken met warmtewisselaars in de oever van de rivier. Deze vereisen elektriciteitsvoorzieningen voor de benodigde perspompen. Onderzocht moet worden hoe dit zo te realiseren is dat dit geen obstakel wordt in de oever bij hoog water en dat de pompen te allen tijde kunnen functioneren.
 - De variant met een gesloten TEO-systeem is nog zeer beperkt toegepast. Er is een beperkt aantal leveranciers die hier apparatuur voor levert, maar nog niet op de gevraagde schaalgrootte voor deze studie. Informatie in deze verkenning is afkomstig van gesprekken met één van de leveranciers, die tot op heden de grootste warmtewisselaar in een gesloten TEO systeem heeft geplaatst t.b.v. van eigen kantoor. De warmtewisselaar in een gesloten TEO systeem verdient nader onderzoek naar toepassingen op de schaalgrootte van deze studie.
 - Voor de berekeningen van het vermogen van de warmtewisselaar in het gesloten systeem in de winter is met een temperatuur van -11 °C van het glycol mengsel gerekend. Dit is een theoretische waarde en nog niet geverifieerd in de praktijk. Daarnaast moet onderzocht worden of bij deze temperaturen aanvriezen van het water plaatsvindt, en wat voor effect dit heeft op de prestatie van de warmtewisselaar.
 - Bij verder uitwerken van de TEO-varianten van schetsontwerp naar voorlopig en definitief ontwerp moeten ook piek/back-up systemen voor warmteproductie meegenomen worden.
 - Bakken met warmtewisselaars in de rivieroever (gesloten systeem) en technische ruimten kennen een groot ruimtebeslag; onderzoek naar verkleinen ruimtebeslag van bakken en technische ruimten biedt extra kansen bij locaties met schaarse ruimte.

- Voor het uitwerken van de varianten is uitgegaan van bestaande apparatuur die direct op de markt verkrijgbaar is. Het kan kansen bieden om specifiek gedimensioneerde en ontworpen componenten in te zetten.

Referenties

CBS (2021). CBS, Aardgas en elektriciteit, gemiddelde prijzen van eindgebruikers, kwartaal 2 2021.

Deltares (2018), Nationaal potentieel van aquathermie.

De Vries, M. (1974). Sedimenttransport. Collegedictaat. Technische Hogeschool Delft

Frings, R., Hillebrand, G., Gehres, N., Banhold, K., Schriever, S., & Hoffmann, T. (2019). From source to mouth: Basin-scale morphodynamics of the Rhine River. *Earth-Science Reviews*.

Mosselman E. (2007). Riviermorphologie onmisbaar om maatregelen te beoordelen. In: Ruimte voor hoogwater; Nederland rivierenland, Ed. B. Keijts, bijlage bij Land+Water, december 2007, pp.94-96.

Sieben A. (2003). Zomerbedveranderingen door nevengeulen bij Gameren.

STOWA (2020). Configuraties voor Aquathermie, de afwegingen boven water.

RHDHV (2019). Case-studie bodemerosie Midden-Waal.

Rijkswaterstaat (2019). Rivierkundig Beoordelingskader voor ingrepen in de Grote Rivieren. Versie 5.0. 4 juni 2019.

Waterwet beschikking (2017). Omgevingsdienst Flevoland & Gooi en vechtstreken. Waterwet beschikking ROC Almere Poort te Almere. Kenmerk 253862/HZ_WVV-71095.

Bijlage 1

Notitie sub varianten TEO Tiel (Fase I)



Notitie / Memo

**HaskoningDHV Nederland B.V.
Water & Maritime**

Aan: Erik van Lith, Ruben Roelofs, Martin Veenvliet, Marcela Busnelli
 Van: Joost Poldervaart, Mark van Oostende
 Datum: 22 december 2021
 Kopie:
 Ons kenmerk: BI2901WMNT2111161324
 Classificatie: Projectgerelateerd
 Goedgekeurd door: [Click or tap here to enter text.](#)

Onderwerp: Variantenstudie TEO systeem Tiel

Variantenstudie

Onderstaande tabel geeft de subvarianten weer die zijn beschouwd in fase 1 van het onderzoek om op energetisch, ruimtelijk en financieel vlak tot de meest optimale varianten te komen om nader uit te werken.

WKO	Open/Gesloten	Broninzet [maanden]	WKO/TEO [%] in winter	WuW Variant	RHDHV Fase 1
Zonder	Open	11	N.v.t.	2A	✓
Zonder	Gesloten	12	N.v.t.	2B	✓
Met	Open	3	100/0	1A	✓
Met	Open	7	100/0	1A	✓
Met	Gesloten	3+9	50/50	1B	✓
Met	Gesloten	3	100/0	1B	✓
Met	Gesloten	7+5	50/50	1B	✓
Met	Gesloten	7	100/0	1B	✓

Voor de varianten waarbij een WKO wordt ingezet voor de seizoensopslag van warmte zijn twee subvarianten uitgewerkt. Het verschil tussen deze subvarianten betreft de onttrekkingsperiode van het oppervlaktewater. Eén subvariant betreft een onttrekkingsperiode van 3 maanden, de maanden dat het water de hoogste temperatuur heeft. De tweede subvariant betreft 7 maanden, waarbij de watertemperatuur gemiddeld wat lager ligt, maar waardoor het benodigde vermogen van de TEO en de WKO installatie nagenoeg gelijk aan elkaar zijn. Dit resulteert in de volgende subvarianten:

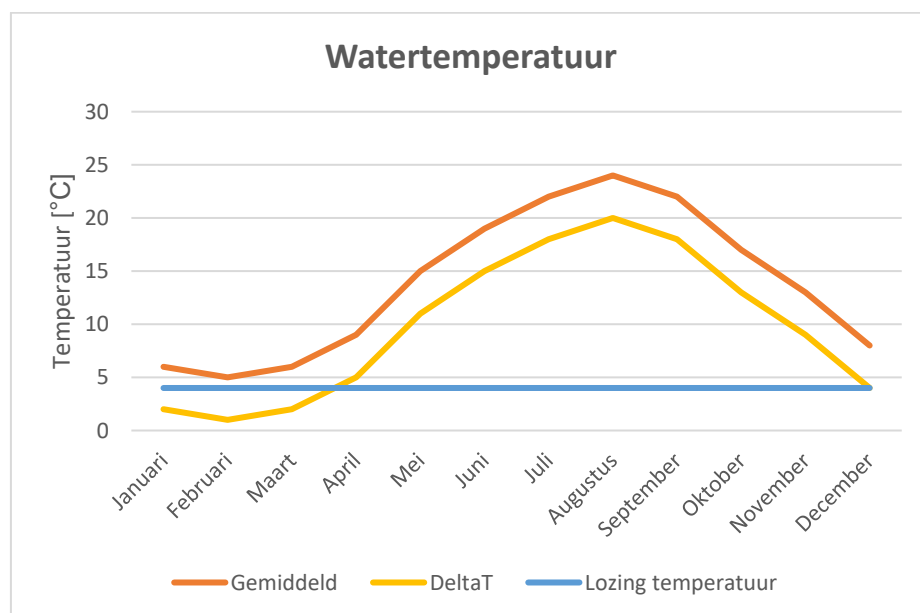
- Open TEO (3 maanden) met WKO
- Open TEO (7 maanden) met WKO
- Gesloten TEO (3 maanden) met WKO
- Gesloten TEO (7 maanden) met WKO

Voor de varianten waarbij een gesloten TEO systeem met WKO wordt toegepast zijn twee subvarianten denkbaar. Eén waarbij de WKO volledig in de winter in de warmtevraag voorziet en één waarbij de WKO in de winter maar voor 50% in de warmtevraag voorziet en de andere 50% direct vanuit TEO wordt geleverd. Deze subvariant s enkel voor het gesloten TEO systeem mogelijk, omdat hier een koelvloeistof in wordt toegepast dat bevriezing voorkomt bij lagere temperaturen. Dit resulteert in de volgende subvarianten:

- Gesloten TEO (3 maanden) met WKO 50%
- Gesloten TEO (7 maanden) met WKO 50%

Berekening open TEO systeem

Voor de berekening van het open TEO systeem is eerst gekeken naar de gemiddelde watertemperatuur in de Waal over het hele jaar heen. Dit is weergegeven in onderstaande grafiek.



Figuur 1 Watertemperatuur met deltaT voor een Open TEO systeem

Aan de hand van een minimale uitkoeling tot 4 graden is per maand berekend wat de maximaal te bereiken deltaT betreft. Hieruit valt op te maken dat in de maanden waarin de grootste warmtevraag is de deltaT het kleinste is, dit is nadelig voor de variant waarin geen WKO wordt toegepast. Voor de maanden mei t/m november blijkt de deltaT altijd groter dan 10 graden te zijn.

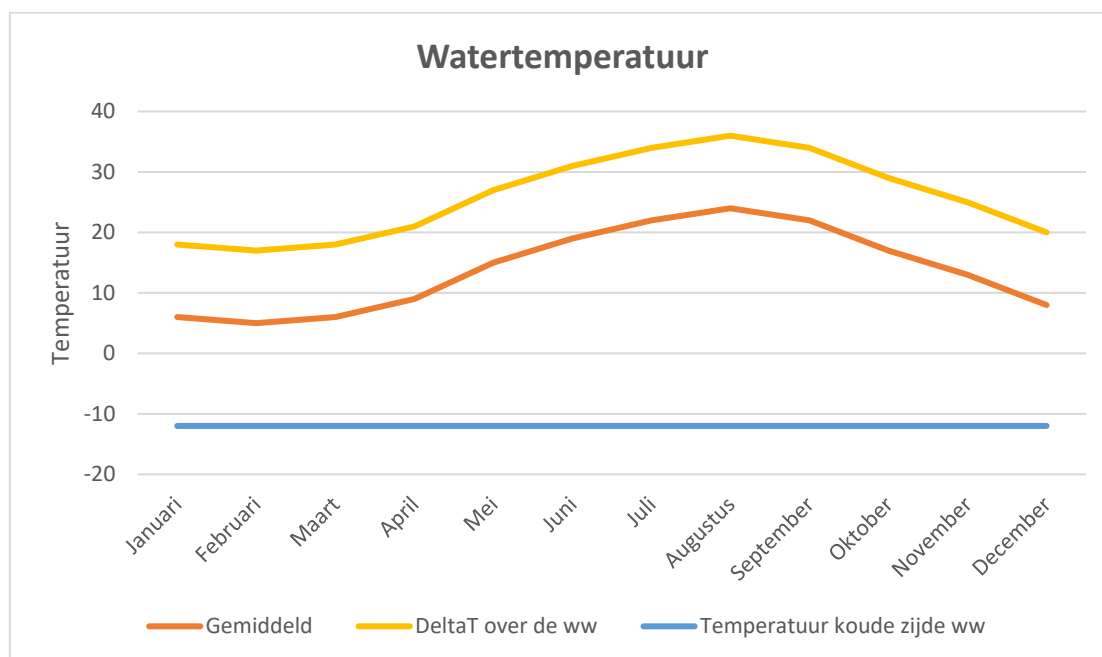
Voor de subvariant met open TEO zonder WKO is berekend welk debiet vanuit TEO onttrokken moet kunnen worden om in de maand met de kleinste deltaT een vermogen van 15.000 kW geleverd kan worden.

Voor de subvariant met open TEO met WKO is eerst de onbalans van de WKO berekend. Hiervoor is van de jaarlijkse warmtevraag de energie afgetrokken die door de warmtepompen wordt toegevoegd. De resterende hoeveelheid energie dient door volledig door TEO te worden aangevuld in de zomer maanden doordat de bestaande gebouwen geen koudevraag kennen. Voor een onttrekkingsperiode van 3 en 7 maanden is vervolgens berekend welk debiet de TEO installatie moet hebben om de WKO's te regenereren.

De volledige berekeningen van de open TEO varianten zijn opgenomen in bijlage 1.

Berekening gesloten TEO systeem

Ook voor de berekening van het gesloten TEO systeem is gekeken naar de watertemperatuur in de Waal over het jaar heen. Doordat een gesloten TEO systeem geen directe uitwisseling van waterstromen heeft kan er in het systeem een water/glycol mengsel worden toegepast in plaats van alleen water. Een water/glycol mengsel met 30% glycol kan tot maximaal -15 graden worden afgekoeld. Dit levert een significante hogere deltaT op en hierdoor kan een gesloten TEO systeem ook in de winter gewoon door draaien. Omdat in de praktijk de temperatuur in het afgekoelde retourwater kan fluctueren is er voor de berekening gekozen om een conservatieve waarde van -12 graden als ondergrens aan te houden. Dit levert de volgende grafiek op.



Figuur 2 Watertemperatuur met deltaT voor een gesloten TEO systeem

Uit de grafiek volgt dat er voor een gesloten TEO systeem altijd een deltaT haalbaar is van 17 graden. De maximale deltaT die haalbaar is met een gesloten TEO systeem is 36 graden in de warmste maand van het jaar.

Voor een gesloten TEO systeem is vervolgens berekend wat het debiet door de warmtewisselaar het gehele jaar tenminste zal moeten zijn om 15.000 kW aan vermogen te kunnen leveren. Vervolgens zijn voor een gesloten systeem de verschillende subvarianten op debiet door de warmtewisselaar doorgerekend. Voor de subvariant met een WKO is vervolgens ook het debiet voor het WKO systeem berekend en daarmee het aantal WKO's dat benodigd zal zijn om voldoende vermogen te kunnen leveren. Zowel het debiet dat nodig is de warmte te injecteren als het debiet dat nodig is om de warmte te onttrekken uit de warme bron is berekend. Deze blijken niet gelijk aan elkaar te zijn. Hiervoor is eerst de onbalans in de WKO berekend net als bij de Open TEO systemen door van de totale warmtevraag het gedeelte dat door de warmtepomp wordt geleverd af te trekken.

Om het WKO systeem verder te optimaliseren, zodat er zo min mogelijk WKO's nodig zijn en waarbij de vermogens voor het TEO systeem en het WKO systeem zo laag mogelijk zijn, is er iteratief gekeken naar een verdeling van de hoeveelheid warmte die per systeem geleverd kan worden. Immers hoe minder de WKO aan warmte hoeft te leveren, hoe minder het TEO systeem hoeft te regenereren. Dit optimum blijkt op 50% te liggen, waarbij beide systemen de helft van de warmte leveren.

Wanneer een WKO wordt toegepast als seizoen buffer is er maar een retourtemperatuur in de warmtewisselaar van maximaal 6 graden haalbaar, omdat de temperatuur in de koude bron van de WKO niet onder deze grens mag zakken. Dit betekent dat de deltaT kleiner wordt voor de subvarianten waar een WKO is toegepast.

Voor de subvarianten waarbij TEO nog 50% van de warmte blijft leveren geldt er een ondergrens van -12 graden, omdat het water/glycol mengsel hierbij ook direct zijn warmte kan afgeven aan de warmtepomp. Hierbij zal het retouromengsel uit de warmtewisselaar met de WKO gemengd worden met het mengsel dat direct warmte heeft geleverd aan de warmtepomp.

De volledige berekeningen van de gesloten TEO subvarianten zijn opgenomen in bijlage 1.

Gesloten TEO systemen in de praktijk

Om een gesloten TEO systeem verder te kunnen ontwerpen zijn de specificaties van een wisselaar nodig die in het water kan worden gehangen. Verblijfstijd en daarmee de lengte van een warmtewisselaar zijn belangrijke parameters. Daarmee kan het vermogen per m² worden bepaald. Voor deze studie wordt uitgegaan van al bestaande gesloten TEO systemen. Een bureaustudie is uitgevoerd om deze bestaande gesloten TEO systemen te inventariseren. Hier is een korte lijst van fabrikanten uit voort gekomen die vooral nog gericht zijn op kleinschalige individuele toepassingen. Grootschalige gesloten TEO systemen zijn nog niet in praktijk gebracht of gefabriceerd. Om de specificaties van hun systemen te achterhalen zal er nog contact gezocht moeten worden met de fabrikanten, onder andere om na te gaan of hun systemen schakelbaar zijn of dat er bijvoorbeeld schaalvergroting toegepast kan worden. Daaruit zal blijken of deze systemen ook daadwerkelijk geschikt zijn voor deze casus.

Een lijst van gesloten TEO systemen:

- Mefa Energy Systems
- ThermoGenius Indurio
- Limnion Lima
- Exegy HydroX 1.6

Mefa Energy Systems heeft op dit moment een systeem ter grootte van 45 kW als grootste systeem in de praktijk. ThermoGenius van Indurio heeft op dit moment een maximale capaciteit van 22 kW in de praktijk. Dit geeft aan dat deze alleen nog voor individuele toepassingen worden ingezet. Dit zijn de twee voorbeelden die in Nederland al zijn toegepast. Voor zover bekend zijn de andere twee voorbeelden nog niet in Nederland toegepast. In Bijlage 2 zijn enkele afbeeldingen opgenomen van de verschillende systemen.

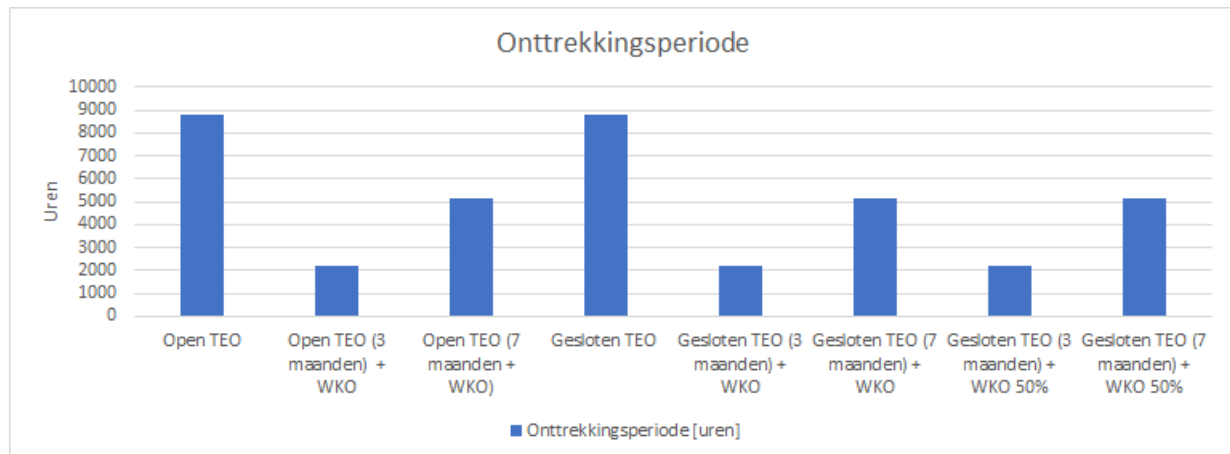
In gesloten TEO systemen is het mogelijk om een water/glycol mengsel toe te passen. Dit heeft dan hetzelfde effect als de koelvloeistof in een auto. Er zijn twee verschillende soorten glycol die worden toegepast in de industrie als koelvloeistof:

1. Ethyleenglycol
2. Propyleenglycol

Beide soorten glycol hebben een ondergrens van -15 graden wanneer het voor 30% wordt gemengd met water. Ethyleenglycol is daarentegen een stuk goedkoper en wordt daarom veel toegepast in de industrie en bijvoorbeeld in auto's. Echter is deze vorm van glycol zeer giftig, in bijvoorbeeld de voedingsindustrie is daarom deze vorm van glycol niet toegestaan. Propyleenglycol is weliswaar een stuk duurder, maar minder giftig en in kleine hoeveelheden zelfs niet giftig volgens de WHO.

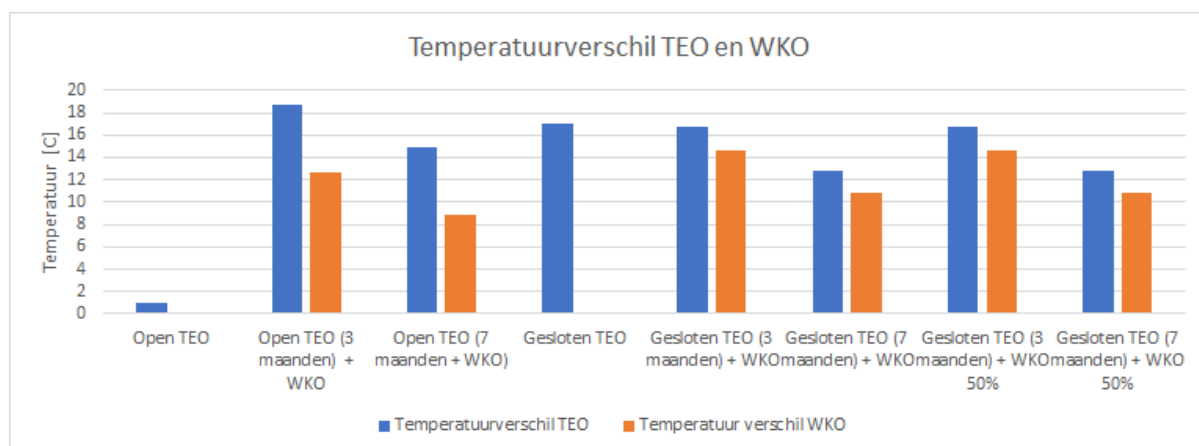
Resultaten

Uit de berekening van de 8 subvarianten volgt dat de onttrekkingsperiode van het systeem een belangrijke parameter is. Voor de TEO varianten zonder WKO geldt dat deze het hele jaar door draaien. Voor de TEO varianten met WKO geldt hoe langer de onttrekkingsperiode, hoe meer tijd er is om de WKO's te regenereren. Figuur 3 geeft de grafiek van de onttrekkingsperiode per subvariant.



Figuur 3 Onttrekkingsperiode per subvariant

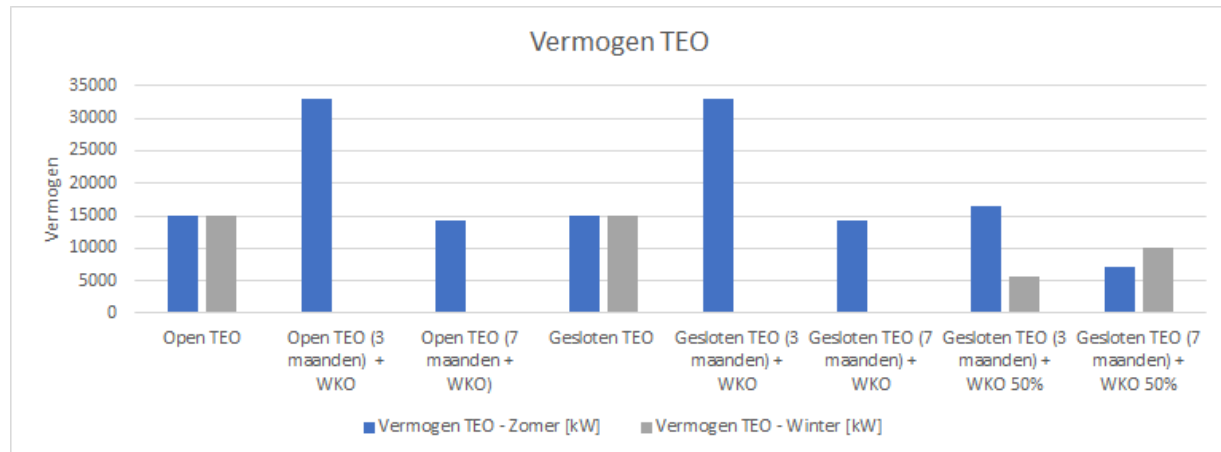
Voor de open TEO zonder WKO blijkt in de koudste maand van het jaar dat de watertemperatuur zo laag is dat slechts een deltaT van 1 graden over de warmtewisselaar bereikt kan worden. In de praktijk zal dit niet haalbaar zijn, waardoor dit geen realistisch subvariant blijkt. Een gesloten TEO zonder WKO kan daarentegen nog wel een grote deltaT bereiken, omdat de afkoeling van de koelvloeistof tot beneden het vriespunt mogelijk is. Voor de subvarianten met een open of gesloten TEO met WKO blijkt dat naarmate een langere periode water wordt onttrokken de gemiddelde te bereiken deltaT lager wordt evenals het temperatuurverschil dat hierbij in de WKO is te behalen. Dit is niet gek gezien er in koudere maanden nog steeds water wordt onttrokken. Figuur 4 geeft het temperatuurverschil voor TEO en de WKO per subvariant weer.



Figuur 4 Temperatuurverschil TEO en WKO

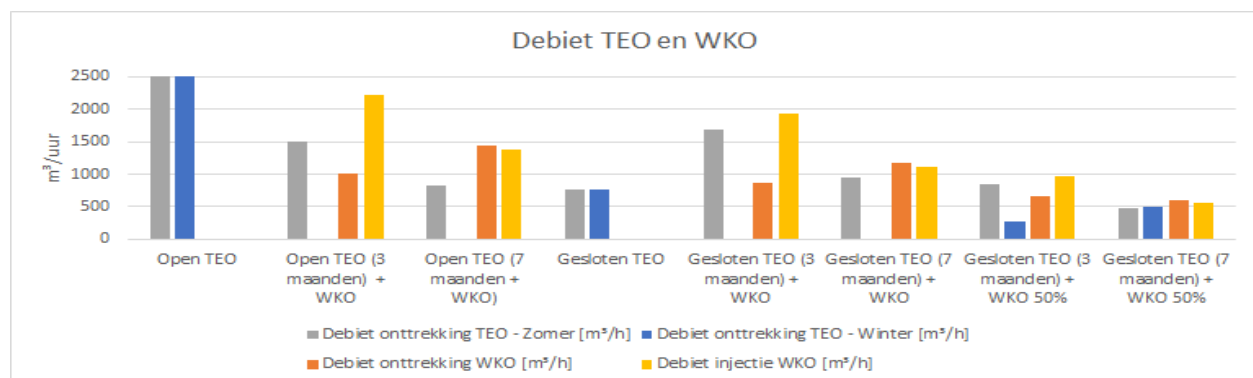
Het benodigde vermogen van TEO is bepaald aan de hand van de minimaal te leveren basislast van 15.000 kW aan het warmtenet in Tiel met tussenkomst van een warmtepomp. Voor de varianten TEO zonder WKO volgt dat vanuit TEO constant het benodigde vermogen van 15.000 kW geleverd moet worden. Voor de varianten die maar 3 maanden per jaar actief zijn blijkt dat deze een aanzienlijk hoger

vermogen moeten leveren om in een korte periode de WKO bronnen te regenereren. Voor de varianten die 7 maanden per jaar actief zijn blijkt dat het te leveren vermogen voor regeneratie van de WKO bronnen op 15.000 kW uitkomt. Voor de gesloten TEO met een WKO die 50% van het benodigde vermogen over het jaar heen invult, resulteert dit in een aanzienlijk lager vermogen dat in de zomer en winter maanden vanuit TEO geleverd moet worden. Figuur 5 geeft het vermogen dat per subvariant vanuit TEO wordt geleverd.



Figuur 5 Vermogen TEO

De combinatie van de deltaT met het benodigde vermogen van TEO en de WKO's resulteert in een debiet dat door beide systemen moet kunnen stromen. Voor de open TEO zonder WKO zien we dat de zeer lage deltaT leidt tot een debiet van bijna 13.000 m³/h (voor leesbaarheid van de grafiek is het debiet van dit subvariant niet uit de grafiek te herleiden). Voor de gesloten TEO is het debiet veel lager doordat altijd een hoge deltaT bereikt kan worden. Voor de subvarianten met WKO zien we dat het benodigd debiet vanuit TEO haast altijd kleiner of gelijk aan het debiet van de WKO. De verklaring hiervoor is dat de TEO een hogere deltaT kan bereiken dan de WKO. Voor de subvarianten met 3 maanden onttrekking zien we dat het debiet voor de onttrekking in de winter maanden uit de WKO een stuk lager ligt dan voor de injectie in de zomer maanden. Dit is ongunstig omdat het aantal WKO bronnen gedimensioneerd moet worden op het grootste debiet en hierdoor een groot aantal WKO bronnen nodig zijn. Voor de subvarianten met een onttrektingsperiode van 7 maanden blijkt het debiet van de WKO voor onttrekking en injectie nagenoeg gelijk aan elkaar te zijn, waarmee een optimum voor het aantal benodigde WKO bronnen wordt bereikt. Interessant aan de subvariant met een WKO vermogen van slechts 50% van de benodigde capaciteit is dat het debiet van TEO en de WKO sterk gereduceerd wordt t.o.v. de andere subvarianten. Figuur 6 geeft het debiet van TEO en WKO voor de zomer en winter maande.



Figuur 6 Debiet zomer en winter maanden TEO en WKO

Conclusie

Uit de energetische vergelijking van de 8 subvarianten blijken de volgende 4 subvarianten het meest interessant om in stap 2 van dit onderzoek nader uit te werken:

- Open TEO zonder WKO
- Open TEO 7 maanden met WKO
- Gesloten TEO zonder WKO
- Gesloten TEO 7 maanden met WKO 50%

Afbeeldingen gesloten TEO systemen



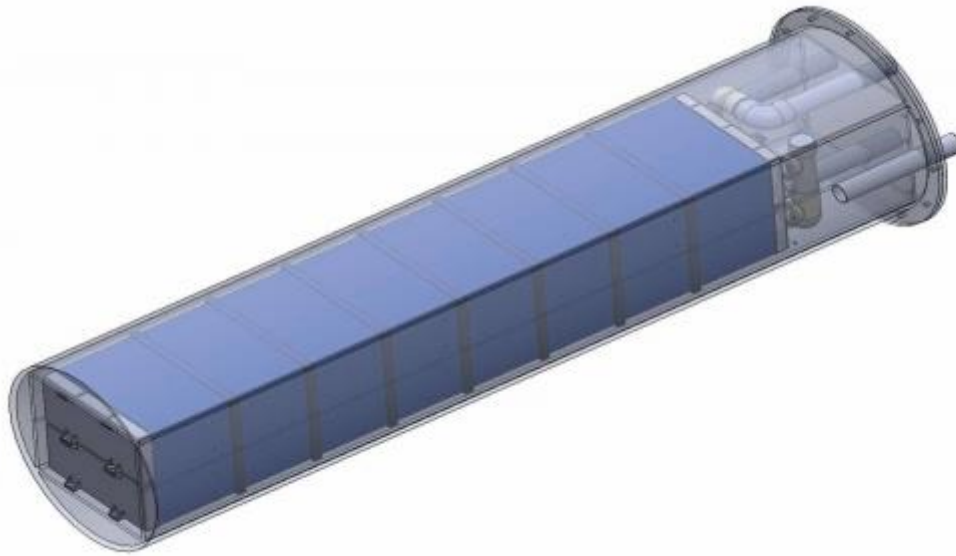
Figuur 7 Gesloten TEO systeem Mefa Energy systems



Figuur 8 ThermoGenius van Indurio



Figuur 9 Limnion Lima 1



Figuur 10 Exegy HydroX 1.6

Bijlage 2

Notitie advies in- en uitlaatlocatie TEO



Notitie / Memo

HaskoningDHV Nederland B.V.
Water & Maritime

Aan: Projectteam
Van: Dr. Marcela Busnelli
Datum: 4 februari 2022
Kopie:
Ons kenmerk: BI2901-RHD-ZZ-XX-NT-Z-0001
Classificatie: Projectgerelateerd
Goedgekeurd door: Ir. Marcel van den Berg

Onderwerp: Advies in- en uitlaatlocatie voor open variant Thermische Energie uit Oppervlaktewater (TEO) in de Waal bij Tiel

1 Inleiding

Deze notitie vat de uitgevoerde analyses en het advies voor de in- en uitlaatlocatie, van de **open variant**, in de Waal bij Tiel met betrekking tot de Thermische Energie uit Oppervlaktewater (TEO) samen.

De structuur van deze notitie is als volgt:

1. Hoofdstuk 2: Uitgangspunten voor de analyse van de meest geschikte locatie
2. Hoofdstuk 3: Omschrijving van de relevante aspecten om de in- en uitlaatlocatie in het gebied te kiezen
3. Hoofdstuk 4: Analyses en advies betreffende de in- en uitlaatlocaties.

2 Uitgangspunten

De uitgangspunten voor de analyses en het advies zijn als volgt:

- Zoekgebied: Figuur 2-1 toont het zoekgebied voor alle mogelijke locaties in de Waal bij Tiel.
- Debiëten: Voor de open TEO-variant zonder WKO zal het debiet ca. 1,79m³/s zijn. Voor de TEO-variant met WKO zal het debiet bij een onttrekking over 7 maanden slechts 0,23 m³/s zijn.



Figuur 2-1 Zoekgebied Waal bij Tiel

3 Te analyseren aspecten

De volgende rivierkundige- of ontwerpaspecten zijn geanalyseerd (waar mogelijk met deskundigheidsoordeel):

- Rivierkundige beoordelingsaspecten (conform het Rivierkundig Beoordelingskader van Rijkswaterstaat, 2019)
- Specifieke ontwerpaspecten:
 - o Sedimenttransport en morfologie
 - o Hydrodynamica

3.1 Rivierkundige beoordelingsaspecten

Het Rivierkundig Beoordelingskader voor ingrepen in de Grote Rivieren beschrijft hoe Rijkswaterstaat bij de vergunningverlening rivierkundige effecten van voorgenomen ingrepen in de rivier bepaalt en beoordeelt.

Het Rivierkundig Beoordelingskader wordt toegepast op elke ingreep in de rivier. Niet altijd zal het nodig zijn om de rivierkundige effecten van alle beoordelingsaspecten tot hetzelfde niveau uit te werken. Dit hangt af van de aard en omvang van de ingreep en de verwachte effecten. Van belang is om de mate van detail van de uitwerking van de effectbepaling in een vooroverleg met het bevoegd gezag Waterwet (voor dit gebied Rijkswaterstaat Oost-Nederland) te bespreken en vast te leggen.

Het Rivierkundig Beoordelingskader beschrijft de rivierkundige beoordelingsaspecten en criteria voor de beoordeling van een aanvraag van een Waterwet vergunning of de beoordeling van een projectplan Waterwet.

Rivierkundige beoordelingsaspecten worden ingedeeld in de volgende drie hoofdthema's:

- Hoogwaterveiligheid
- Hinder of schade door hydraulische effecten
- Morfologische effecten

In deze studie is de invloed van de onttrekking en de in- uitlaatlocaties op de bovenstaande aspecten onderzocht.

Het gaat om een beperkte onttrekking van 1,79 of 0,23 m³/s afhankelijk van de TEO-variant. Voor een gemiddelde afvoer van de Waal van 1.500m³/s betekent dit een onttrekking van 0,12% of 0,015% afhankelijk van de TEO-variant. Voor een lage afvoer van de Waal van 600m³/s betekent dit een onttrekking van 0,3% of 0,04% afhankelijk van de TEO-variant. Dezelfde afvoer wordt weer in het water opgelost.

De onttrekking (1,79 - 0,23 m³/s) is zeer beperkt voor de maatgevende Waal afvoer van 10.165 m³/s (herhalingstijd van 10.000 jaar) (minder dan 0,02%). Bovendien vindt deze onttrekking/lozing plaats over een korte afstand (ongeveer 200m). Er zijn geen significante effecten op hoogwaterveiligheid in relatie tot maatgevende waterstanden te verwachten.

Met betrekking tot het hoofdthema *Hinder en schade door hydraulische effecten* zijn de volgende aspecten relevant: **Stroombeeld in vaarweg** en **Onttrekking water uit zomerbed Rijntakken**.

Met betrekking tot het hoofdthema *Morfologische effecten* is het volgende aspect van belang: **Sedimentatie en erosie van het zomerbed**.

3.1.1 Strombeeld in vaarweg

Een lokale afvoer in dwarsrichting kan leiden tot een plotselinge zijdelingse verplaatsing van het schip. Hierbij dient het schip binnen de begrenzing van zijn twee scheepsbreedtes ($2 \cdot B$) brede vaarstrook te blijven. Bij een grote zijdelingse verplaatsing (groter dan $\frac{1}{2} B$) overschrijdt het schip deze begrenzing (schip wordt uit eigen pad gedrukt) en begeeft zich in de vaarstrook van andere (tegemoetkomende) schepen, waardoor een situatie ontstaat die onveilig is voor de scheepvaart.

De dwarsstroomsnelheid is gedefinieerd op de rand van de vaarweg. Bij (dominant) vrij stromende rivieren als de Rijntakken wordt de rand van de vaarweg aangegeven door de bakenlijn.

Bij dwarsstroming met een debiet van meer dan $50 \text{ m}^3/\text{s}$ wordt een dwarsstroomsnelheid van maximaal $0,15 \text{ m/s}$ toegelaten. Alleen bij kleine debieten ($< 50 \text{ m}^3/\text{s}$) geldt conform de Richtlijnen Vaarwegen (2017) een maximum dwarsstroomsnelheid van $0,30 \text{ m/s}$.

De methodiek om de dwarsstroomsnelheden op de rand van de vaarweg te bepalen is door Rijkswaterstaat (2019) beschreven. Met het 2D-rivierkundige model dient de dwarsstroomcomponent haaks op de rand van de vaarweg berekend te worden. De dwarsstroming (in m/s) op de rand van de vaarweg dient gepresenteerd te worden per rekencel in de lengterichting van de rivier over het gehele invloedsgebied van de ingreep. Zowel voor de referentiesituatie (de situatie zonder ingreep), alsmede voor de situatie met ingreep. In de grafieken dient met een horizontale lijn het van toepassing zijnde dwarsstroomcriterium te worden aangegeven.

In deze analyse wordt de dwarsstroomsnelheid geschat op de gestrekte oeverzone op basis van een afvoer van $0,23 \text{ m}^3/\text{s}$ en pijpdiameter van $0,5 \text{ m}$. De dwarsstroomsnelheid (lokaal) bij de uitstroom/instroom is $1,2 \text{ m}^3/\text{s}$. De diepte gemiddelde dwarsstroomsnelheid is geschat op $0,22 \text{ m/s}$ voor een diepte van $2,8 \text{ m}$ (minimale waterdiepte bij OLR). De dwarsstroomsnelheid op basis van deze schatting voldoet aan de criteria ($< 0,30 \text{ m/s}$ en debiet $< 50 \text{ m}^3/\text{s}$).

3.1.2 Onttrekking water uit zomerbed Rijntakken

Het beoordelingscriterium is als volgt gedefinieerd volgens het rivierkundig beoordelingskader: "Geen ongewenste afname van de waterdiepte ten gevolge van de wateronttrekking uit het zomerbed bij lage en mediane Boven-Rijn afvoeren."

De afname van waterdiepte ten gevolge van de wateronttrekking/lozing uit het zomerbed van $0,23 \text{ m}^3/\text{s}$ zal beperkt zijn (ordergrootte millimeters). Een onttrekking/lozing van $1,79 \text{ m}^3/\text{s}$ over een korte afstand van 200 m zal ook een beperkt effect op de waterstanden hebben. Het effect kan met behulp van numerieke simulaties in beeld worden gebracht voor de lage en gemiddelde afvoer.

3.1.3 Sedimentatie en erosie van het zomerbed

Het beoordelingscriterium is als volgt gedefinieerd volgens het rivierkundig beoordelingskader: "Geen sedimentatie in de vaargeul conform BPRW en geen vermindering vaargeulafmetingen bij lage tot gemiddelde rivierafvoeren."

BPRW: Beheer- en Ontwikkelplan voor de Rijkswateren. Dit plan beschrijft hoe en wat Rijkswaterstaat doet als het gaat om het waterbeheer van de grote rivieren en meren.

De morfologische effecten van bovenstrooms aan de hoofdgeul water te onttrekken en benedenstrooms weer aan de hoofdgeul toe te voeren worden in Figuur 3-1 geïllustreerd (Mosselman, 2007). Het lengteprofiel boven in de figuur laat zien hoe dan bij de waterstanden dalen en de waterdieptes afnemen.

Door de afnemende waterdiepte juist bovenstrooms van de onttrekking convergeren de stroomlijnen en versnelt de stroming met erosie als gevolg. Onmiddellijk beneden de onttrekking daalt de stroomsnelheid abrupt. Dat veroorzaakt sedimentatie die met een steil front stroomafwaarts het verruimde traject in trekt. Verderop neemt de waterdiepte binnen het verruimde traject toe, zodat de stroming nog verder vertraagt. Ook dit veroorzaakt aanzanding in het verruimde traject. Daar waar het water weer terug in de rivier komt, stijgt de stroomsnelheid abrupt. Dat veroorzaakt een erosiegolf die zich geleidelijk stroomafwaarts uitbreidt. In tegenstelling tot het steil blijvende sedimentatiefront bovenstroom, wordt het front van deze erosiegolf geleidelijk flauwer. Als de nevengeul bij lagere afvoeren niet meer meestroomt, gaan de gevormde uitschuringen en aanzandingen lopen. De stroming verplaatst ze langzaam stroomafwaarts en vlakkt ze geleidelijk uit. Dat betekent dat erosie en sedimentatie ook optreden op locaties die niet in de figuur zijn aangegeven. Ondanks de uitvlakking blijft een resteffect behouden waardoor de bodem op lange termijn stijgt volgens het lengteprofiel onder in de figuur.

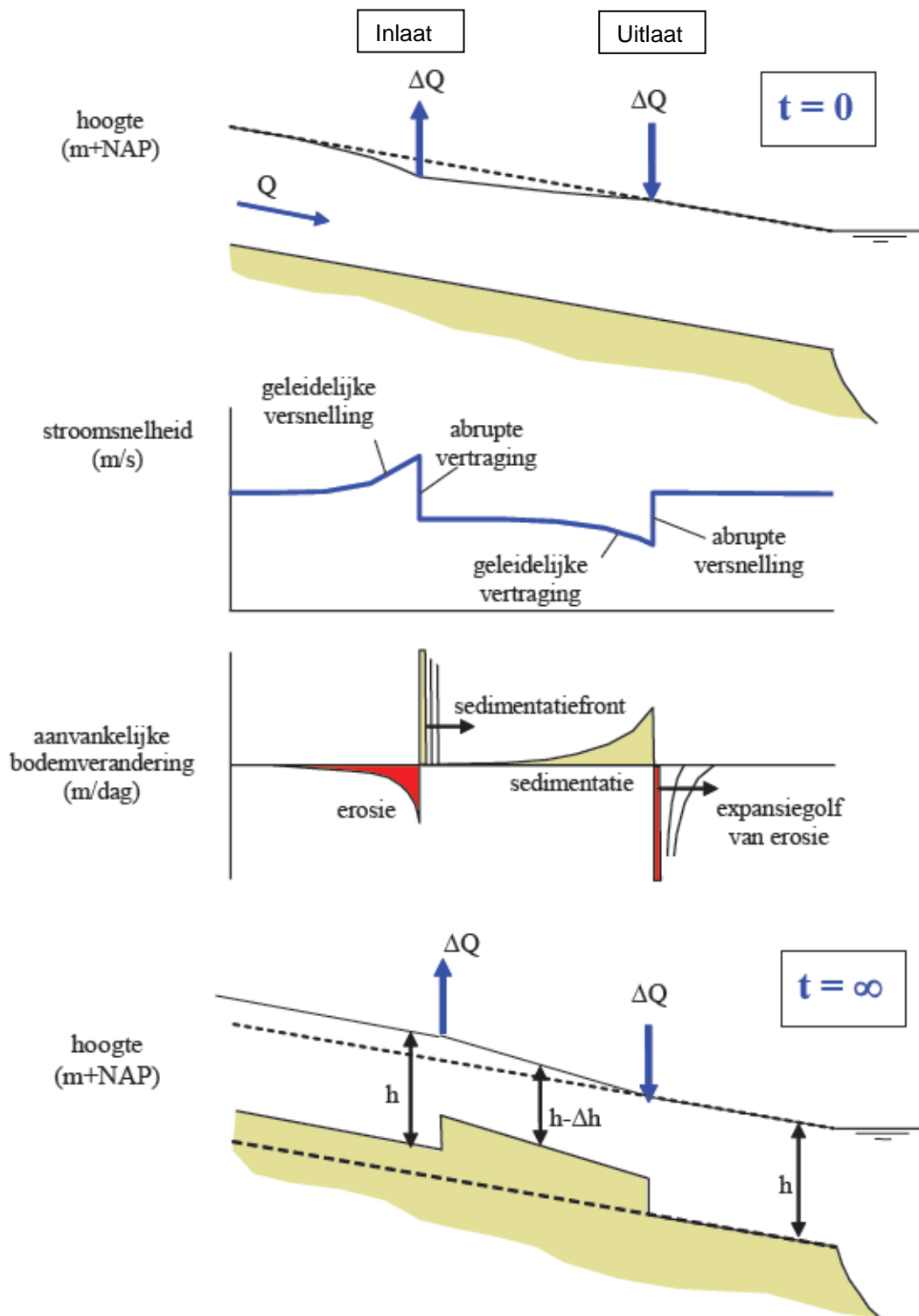
Voor de scheepvaart is vooral de aanzanding met het steile front vlak achter de inlaat maatgevend, omdat deze het grootst is. Deze hoeft echter niet over de gehele breedte van de rivier op te treden, maar kan zich tot een deel van het dwarsprofiel beperken als de rivier voldoende breed is. Van belang is dus de vraag of deze aanzanding binnen of buiten de vaargeul optreedt en, indien dat binnen de vaargeul is, of deze aanzanding kan worden opgevangen door een ter plaatse aanwezige overdiepte. Het gaat daarbij niet alleen om de situatie onmiddellijk na een hoogwater, maar ook om latere situaties waarin de aanzanding zich stroomafwaarts heeft verplaatst en nog niet volledig is uitgevlakt. De beantwoording van deze vraag vereist een ruimtelijk beeld dat kan worden verkregen uit morfologische numerieke simulaties.

Op de lange termijn ontstaat uiteindelijk een nieuw evenwicht waarbij de rivierbodem in het verruimde traject steiler en hoger is. Het steilere verhang maakt dat stroomopwaarts de hele rivier hoger komt te liggen.

De sedimentatie kan bepaald worden op basis van de volgende vergelijking (Lane's balans o.a. Sieben, 2003):

$$\Delta z = h_o \cdot \frac{\Delta Q}{Q_o}$$

Waarin: Q_o is de afvoer upstream, ΔQ is het onttrokken debiet en h_o is de waterdiepte en ΔZ is de sedimentatie. Voor een afvoer $Q_o=1.500 \text{ m}^3/\text{s}$, $\Delta Q=1,79 \text{ m}^3/\text{s}$ en $h_o=5\text{m}$ is $\Delta Z=0,006\text{m}$ en voor $\Delta Q=0,23 \text{ m}^3/\text{s}$ is $\Delta Z=0,0008\text{m}$. Op basis van deze vereenvoudigde analyse zijn er dan geen significante effecten van de TEO-varianten op bovenstaande de sedimentatie en erosie van de vaarweg te verwachten.



Figuur 3-1 Morfologische reactie op korte ($t=0$) en lange ($t=\infty$) termijn als gevolg van wateronttrekking (Mosselman, 2007)

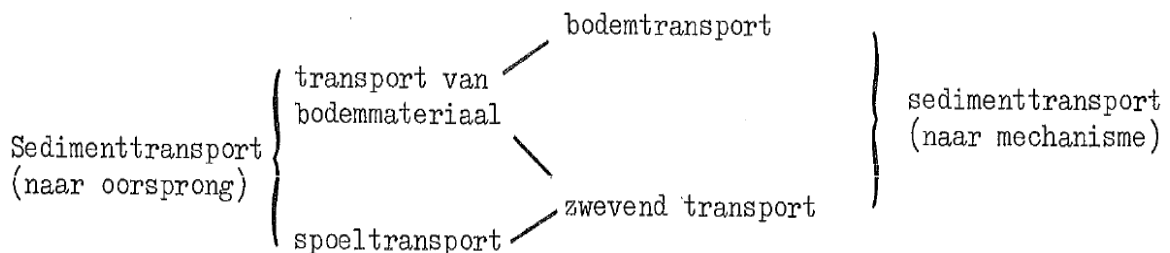
3.2 Specifieke ontwerpaspecten

Om de geschiktheid van de in- en uitlaatlocaties te bepalen zijn bovendien de volgende aspecten van belang:

- **Het sedimenttransport en de morfologie:**

Het sedimenttransport in een rivier kan geclassificeerd worden naar oorsprong en mechanisme (De Vries, 1974), zoals weergegeven in Figuur 2-2. In dit geval is er sprake van transport van het bodemmateriaal en daarnaast wordt een hoeveelheid fijn sediment door dit vak gespoeld. De grootte van dit spoeltransport (in het Engels “wash load”) hangt af van het aanbod (afkomstig van bovenstrooms riviergebied). Bodemtransport kan worden onderscheiden van zwevend transport. Bij bodemtransport hebben de korrels namelijk regelmatig onderling contact waardoor het gaat zweven. Het sediment beweegt dus zowel als zwevend- als bodemtransport.

Fysisch gezien is dus zowel het spoeltransport als een deel van het transport van bodemmateriaal onderdeel van het zwevend transport. Neemt men een monster van sediment in suspensie, dan bevat dit monster een fijne fractie, die meestal niet in het bodemmateriaal aanwezig is. Het zwevend materiaal is dus afkomstig uit de bodem en uit het bovenstroomse deel van het stroomgebied.



Figuur 2-2 Sedimenttransport classificatie naar oorsprong en mechanisme (De Vries, 1974).

Het transport van bodemmateriaal is het meest relevant voor de morfologie (dat wil zeggen voor bodemveranderingen, bodemerosie of sedimentatie). Voor de morfologie is het spoeltransport slechts van belang bij specifieke situaties zoals sedimentatie in uiterwaarden, haven, meren/reservoirs.

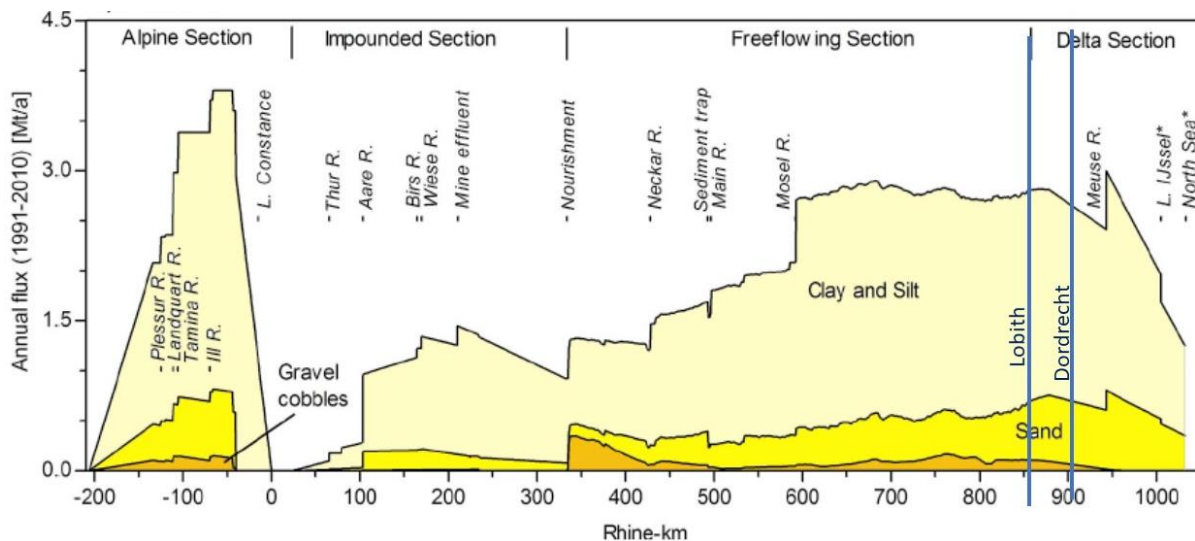
De morfologie van de hoofdgeul van de Waal wordt bepaald door het sedimenttransport van het bodemmateriaal. Hydrodynamica (waterstanden en voornamelijk stromingssnelheden) beïnvloeden het sedimenttransport en daardoor de morfologie. Het meest fijnere materiaal (zoals bijvoorbeeld klei en slib) komt van bovenstrooms en wordt merendeel als zwevend transport getransporteerd naar de zee. Het sedimenttransport van dit materiaal wordt nauwelijks beïnvloedt door de hydrodynamische condities. Dit fijnere materiaal bezinkt alleen op specifieke locaties zoals uiterwaarden, haven en meren. Daarnaast spelen ook andere fysische processen zoals aanhechting van cohesief materiaal, welke kunnen veroorzaken dat er vervuiling optreedt waardoor in- en/of uitlaatlocaties geblokkeerd raken.

Figuur 2-3 toont het sedimenttransport in de Rijn en ook de Waal zoals door Frings et al (2019) gepresenteerd. Er is geen andere data specifiek voor het interessegebied gevonden. Het sedimenttransport bestaat tussen Lobith en Dordrecht voornamelijk uit klei en slib (75%). Op plekken met hogere snelheden is het risico dat de inlaat geblokkeerd wordt (door vervuiling) het minst. Locaties met hogere snelheden hebben dus de voorkeur.

Daarnaast dient de in- uitlaatlocatie op een stabiele morfologische locatie zodat de locaties niet door sedimentatie of erosie worden getroffen.

- **Hydrodynamica:**

Er moet geen sprake van een recirculatie van geloosd water (kouder water) terug naar de inlaat zijn.



Figuur 2-3 Gemiddelde jaarlijkse totale sedimentfluxen (1991-2010) voor de Rijn van bron tot monding: grindflux ("Gravel cobbles" diameter 2-125 mm), zandflux ("Sand" diameter 0,063-2 mm), klei- en slibflux ("Clay and Silt" diameter < 0,063 mm). Source: Frings et al. (2019)

4 Analyse en advies in- en uitlaat locaties

De analyse wordt uitgevoerd voor de open TEO-varianten op basis van de rivierkundige aspecten en de specifieke ontwerpaspecten:

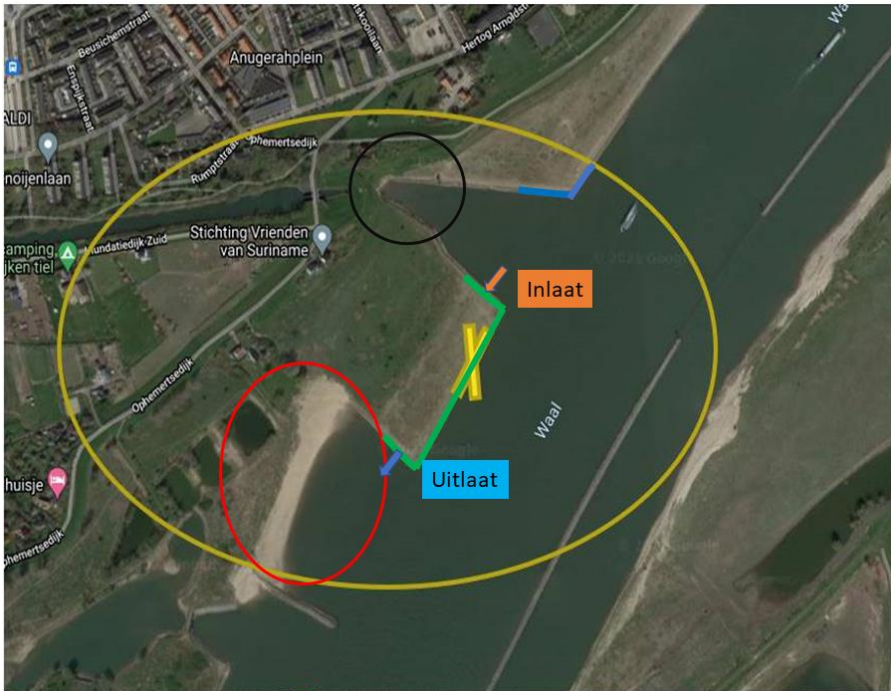
- Stroombeeld in vaarweg
- Onttrekking water uit zomerbed
- Sedimentatie en erosie van het zomerbed
- Sediment transport
- Hydrodynamica inlaat/uitlaat

De meeste geschikte locatie binnen de gele cirkel is langs de strekdam (groene lijn in Figuur 4-1). De locatie ligt aan de buitenbocht van de hoofdgeul. Hier zijn relatief hoge stromingssnelheden (Figuur 4-2, km 916) wat een reductie van het risico van het verstopping van in- en uitlaat constructie door vervuiling en/of bodemsedimentatie oplevert. Daarnaast is de dwarsstroming te minimaliseren door de inlaat en uitlaat locatie op de kribben (aangesloten aan de strekdam) te kiezen.

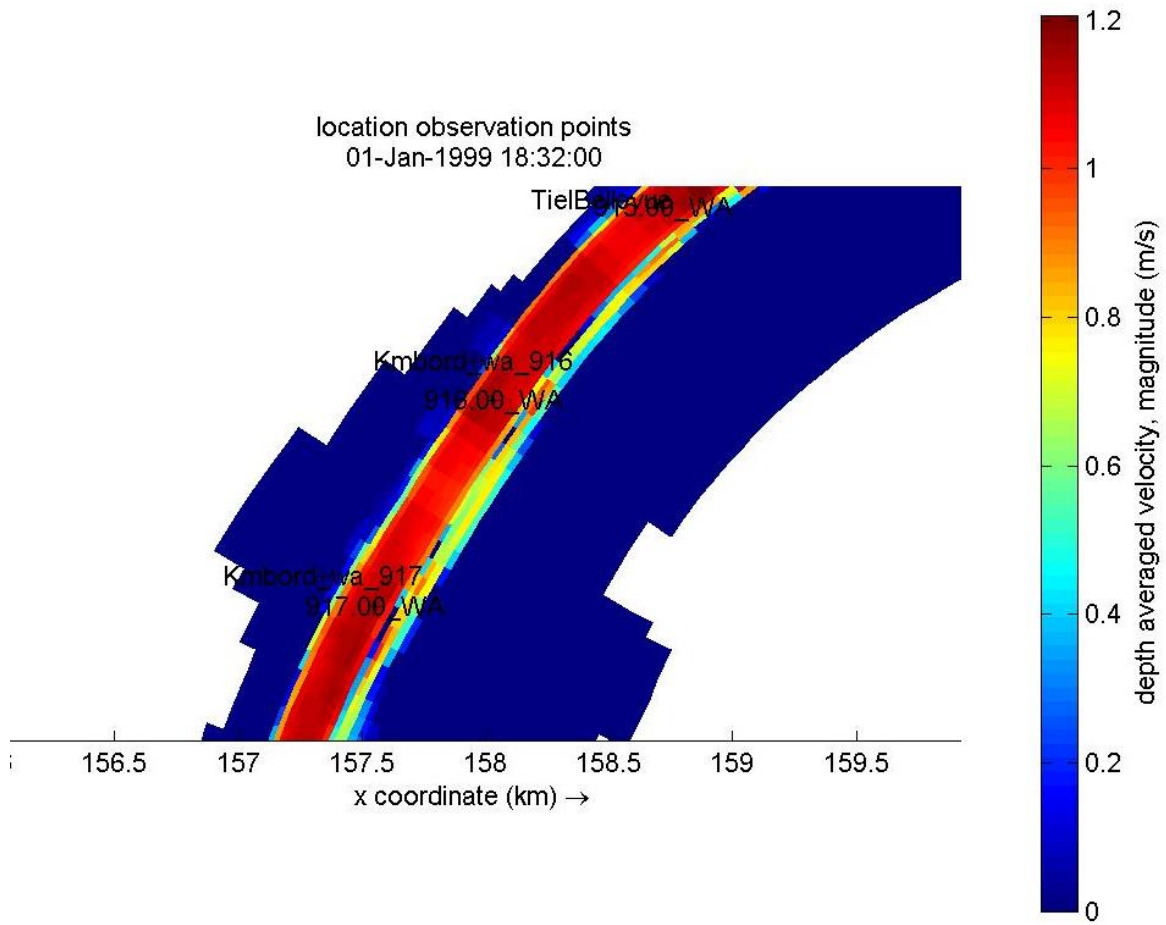
Deze locatie is morfologisch stabiel dan de kribvak zone (rode cirkel in Figuur 4-1). In de kribvak zone is de bodem zeer actief door de invloed van de stroming en scheepsgolven. Daarnaast is het risico op blokkering door vervuiling kleiner ten opzichte van de locatie bij de zwarte cirkel in Figuur 4-1. Bij deze locatie (zwarte cirkel) kunnen de stroomsnelheden lager zijn wat lokaal aanslibbing en vervuiling kan veroorzaken, hoewel het risico beperkt is geschat.

De uitlaat locatie zal zich stroomafwaarts van de inlaat locatie bevinden om recirculatie van het water terug naar de inlaat te voorkomen.

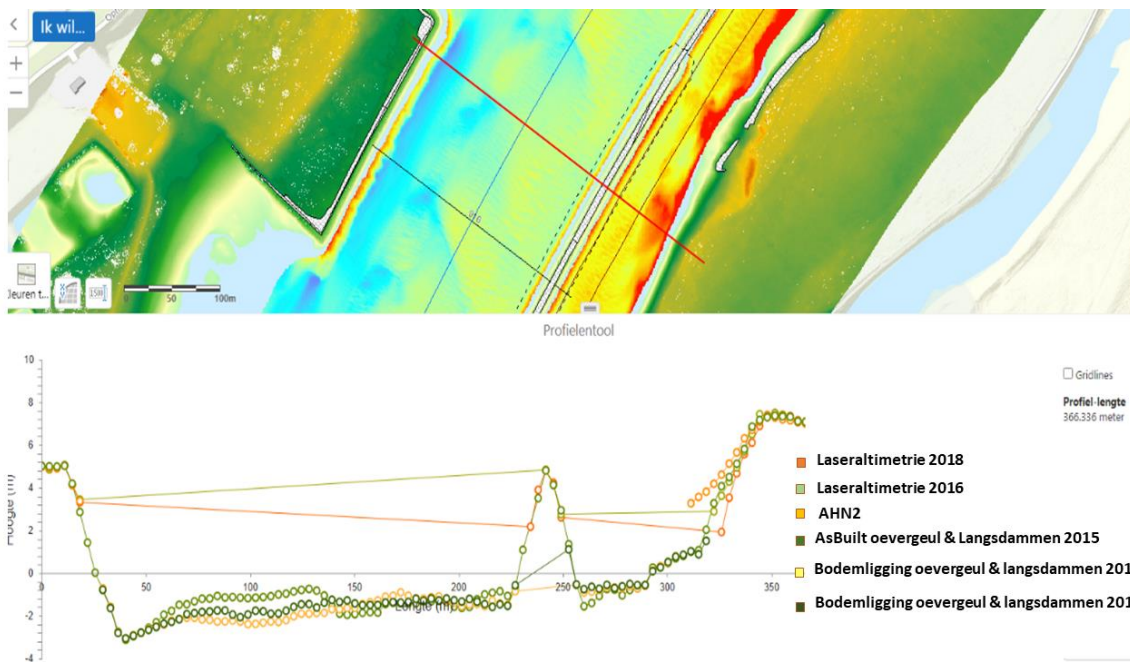
Daarnaast dient te worden bepaald hoe hoog de in- en uitlaat komt. Er wordt aanbevolen om de inlaat en uitlaat een paar meter boven de bodem te ontwerpen (Figuur 4-3) zodat er minder bodem sediment wordt getransporteerd en de uitlaat niet door sedimentatie wordt geblokkeerd. De inlaat komt op NAP +1 m, de bodem van de rivier bevindt zich op NAP -2,5 m.



Figuur 4-1 Voorgestelde locatie (groene lijn)



Figuur 4-2 Stromingssnelheden berekend met Delft3D (RHDHV, 2019)



Figuur 4-3 Bathymetrie. Dwarsprofiel (Source: [Bathymetrie Nederland \(rijkswaterstaat.nl\)](http://Bathymetrie Nederland (rijkswaterstaat.nl)) en [Langsdammen Oost-Nederland \(rijkswaterstaat.nl\)](http://Langsdammen Oost-Nederland (rijkswaterstaat.nl)))

5 Referenties

De Vries, M. (1974). Sedimenttransport. Collegedictaat. Technische Hogeschool Delft

Frings, R., Hillebrand, G., Gehres, N., Banhold, K., Schriever, S., & Hoffmann, T. (2019). From source to mouth: Basin-scale morphodynamics of the Rhine River. *Earth-Science Reviews*.

Mosselman E. (2007). Riviermorphologie onmisbaar om maatregelen te beoordelen. In: Ruimte voor hoogwater; Nederland rivierenland, Ed. B. Keijts, bijlage bij Land+Water, december 2007, pp.94-96.

Rijkswaterstaat (2019). Rivierkundig Beoordelingskader voor ingrepen in de Grote Rivieren. Versie 5.0. 4 juni 2019.

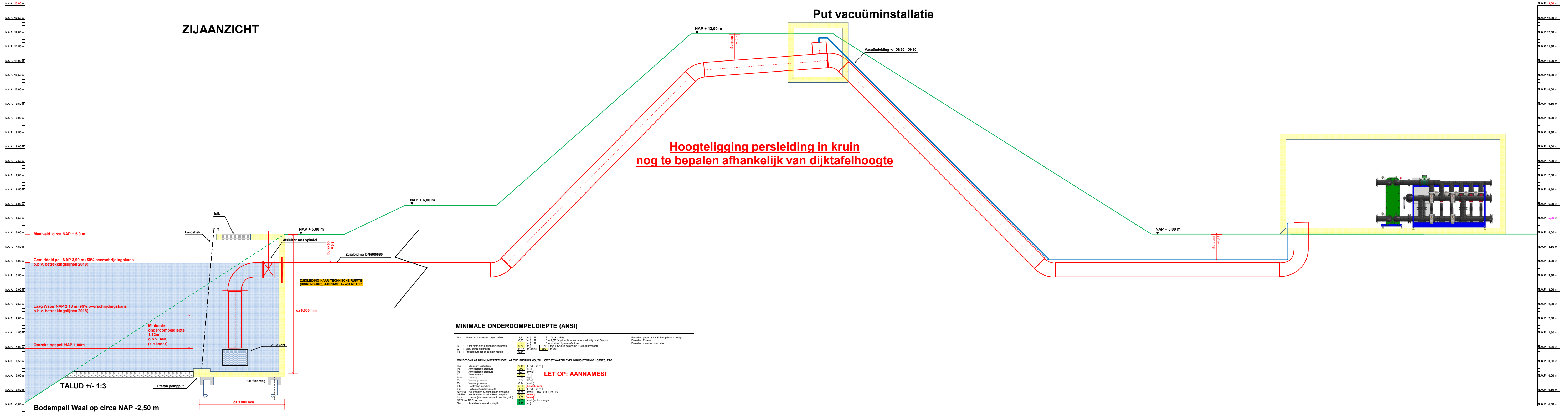
Sieben A. (2003). Zomerbedveranderingen door nevengeulen bij Gameren.

RHDHV (2019). Case-studie bodemerosie Midden-Waal

Bijlage 3

Peilmatenschema inlaatconstructie





ZIJAAANZICHT

Put vacuüminstallatie

**Hoogteligging persleiding in kruin
 nog te bepalen afhankelijk van dijktafelhoogte**

MINIMALE ONDERDOMPELDIEPTE (ANSI)

Sm : Minimum immersion depth inflow	1.12	m	ft	S = D(1+2.3F ^{0.5})	
D : Outer diameter suction mouth pump	0.75	m	ft	S = 1.50 (applicable when mouth velocity is $v \le 1.3 \text{ m/s}$)	
Q : Max. pump discharge	10.00	m ³ /min		S = provided by manufacturer	
Fd : Froude number at suction mouth	0.54	-		S = 1.20 (m/s) [Should be around 1.3 m/s (Prosser)]	

Based on page 18 ANSI Pump intake design
 Based on Prosser
 Based on manufacturer data

CONDITIONS AT MINIMUM WATERLEVEL AT THE SUCTION MOUTH: LOWEST WATERLEVEL MINUS DYNAMIC LOSSES, ETC.

He	2.18	LEVEL in m
Pa	990	hPa
Pv	1013	mbar
T	20.0	°C
rho	998	kg/m ³
Pv	2.34	mbar
Pv	0.30	mbar
z-h	2.50	LEVEL in m
z-h	1.00	LEVEL in m
NPSHa	6.55	m
NPSHr	4.50	m
L _{acc}	1.00	m
NPSHa - NPSHr - L _{acc}	1.05	m
z-h	1.00	m

LET OP: AANNAMES!

Bijlage 4

Locatie technische ruimte



Voor alle varianten is dezelfde locatie gekozen voor de technische ruimte, met name omdat de mogelijkheden tot het kruisen van de waaldijk en de dijk langs het inundatiekanaal zeer beperkt zijn. Vanwege het grote belang van de waaldijk zijn er strenge eisen verbonden aan de dijkkruising.

Daarnaast zijn de volgende aspecten in ogenschouw genomen bij de keuze voor de locatie van de technische ruimte:

- Bij voorkeur worden alle technische installaties in 1 ruimte geplaatst
- De technische ruimte wordt binnendijs geplaatst
- Bij voorkeur wordt de technische ruimte op publieke grond geplaatst
- De technische ruimte wordt niet op, of nabij, kritische kabels en/of leidingen geplaatst

In de variant met open TEO gaat de voorkeur tevens uit naar een locatie zo dicht mogelijk bij de inlaat vanwege de karakteristieken van de zuigleiding die gebruikt wordt om water in te laten. Bij een grote afstand is mogelijk een tussenstation nodig of zouden pompen buitendijs geplaatst moeten worden (persleiding i.p.v. zuigleiding).

Daarnaast is overwogen om de technische ruimte uit te voeren met twee verdiepingen, om zo het ruimtebeslag te beperken en eventueel anders ongeschikte locaties aan te wijzen als locatie voor de technische ruimte.

Op basis van bovenstaande afwegingen is een selectie gemaakt van 2 mogelijke locaties voor de technische ruimte, weergegeven in figuur 27.



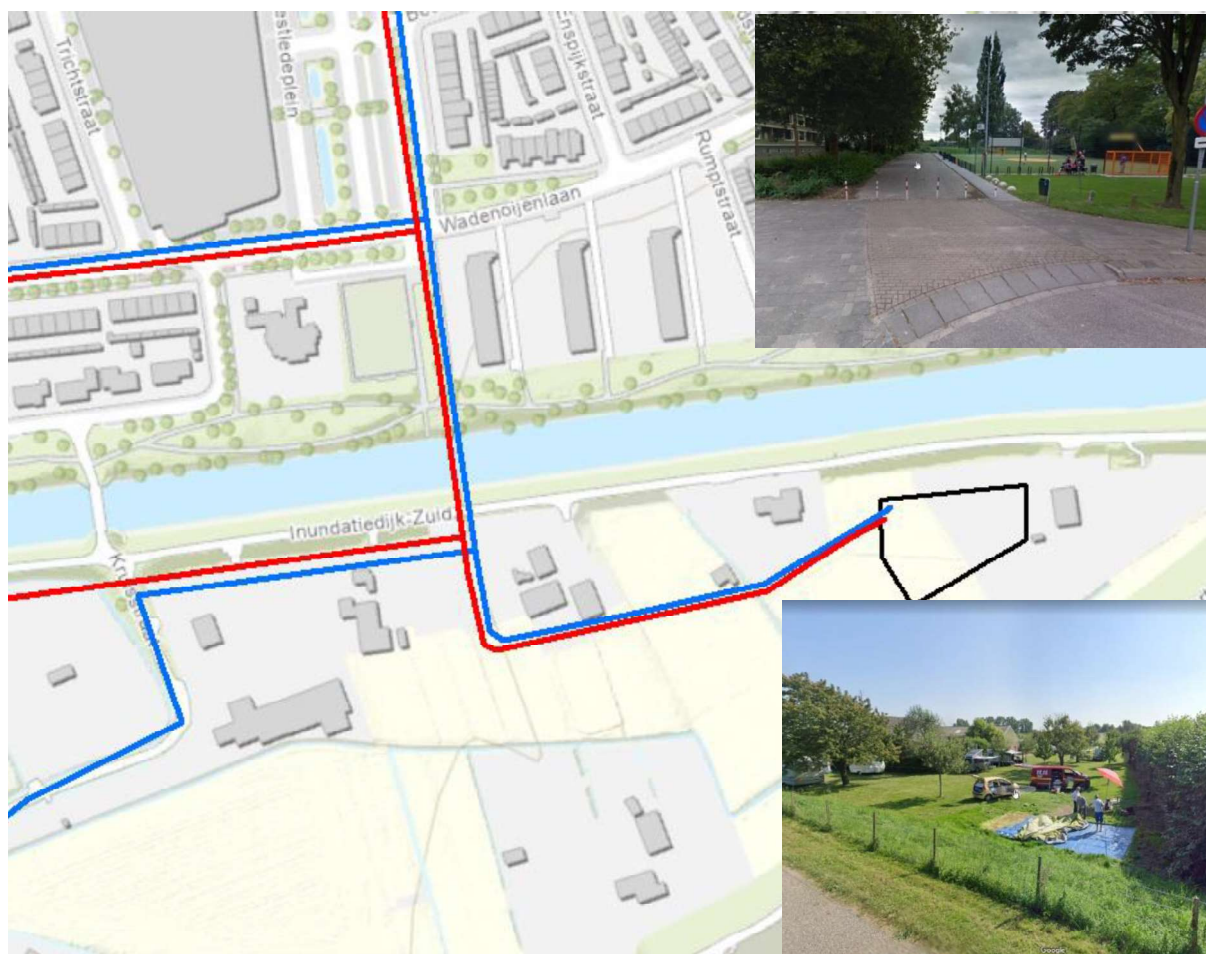
Figuur 27: Mogelijke locaties technische ruimte

Locatie 1 is gelegen op publieke grond en heeft als voordeel dat er na de technische ruimte geen dijkkruisingen noodzakelijk zijn. Echter is de dijkkruising met de waaldijk dusdanig complex dat deze

locatie niet mogelijk wordt geacht. Tussen de technische ruimte en de inlaat is een civiele constructie in het inundatiekanaal gelegen en is er geen mogelijkheid om de waaldijk haaks te kruisen, conform eisen van het waterschap. Daarnaast zijn boringen vrijwel niet mogelijk vanwege de beperkte ruimte en de eisen m.b.t. de diepte van de kruising (min. 6 meter in het pleistoceen ter plaatse van de dijk, ca. 13 m – mv).

Om de bovenstaande redenen is gekozen voor locatie 2 als bouwlocatie voor de technische ruimte. Locatie 2 betreft private grond welke opgekocht dient te worden bij realisatie van de technische ruimte. Vanaf locatie 2 naar de inlaat kan de waaldijk in een open ontgraving (conform eisen waterschap) gekruist worden. Het inundatiekanaal zal gekruist moeten worden door middel van een GFT-boring voor het warmtenet, en in de varianten met WKO, een aparte GFT-boring voor de WKO-ringleiding. De keuze voor een GFT-boring in plaats van een HDD-boring is gemaakt vanwege de beperkte ruimte aan de Tiel-zijde van het inundatiekanaal.

De locatie van de genoemde GFT-boringen zijn indicatief weergegeven in figuur 28. Opgemerkt wordt dat deze aan de zuidzijde in ieder geval in private grond (camping) zullen moeten plaatsvinden. Vanwege de hoge stijghoogte in het 1^e watervoerende pakket en de nabijheid van de waterkeringen wordt uitgegaan van een GFT-boring binnen een gesloten kuip (damwanden en onderwaterbeton).



Figuur 28: Locatie GFT boring

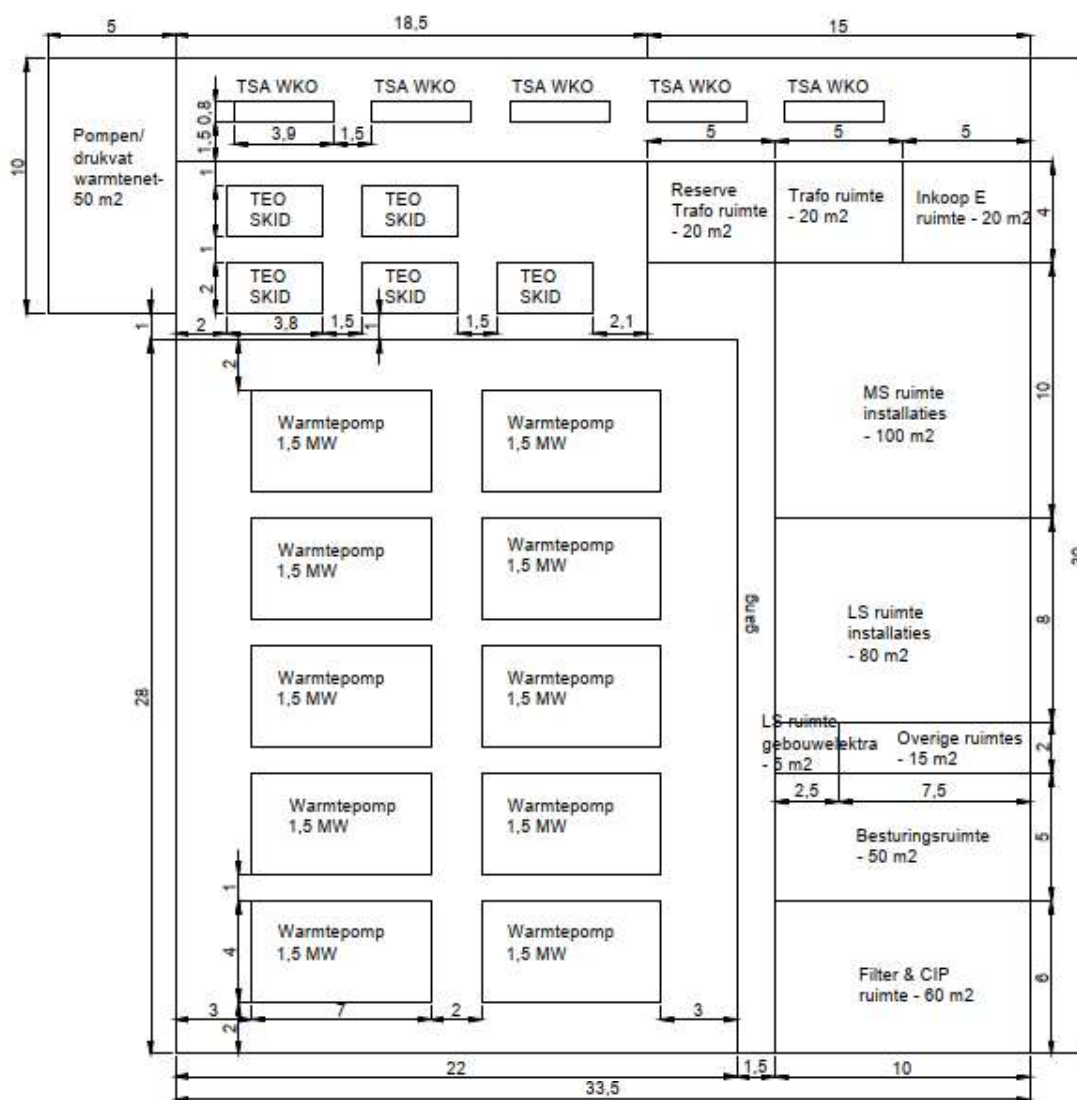
Bijlage 5

Technische ruimte



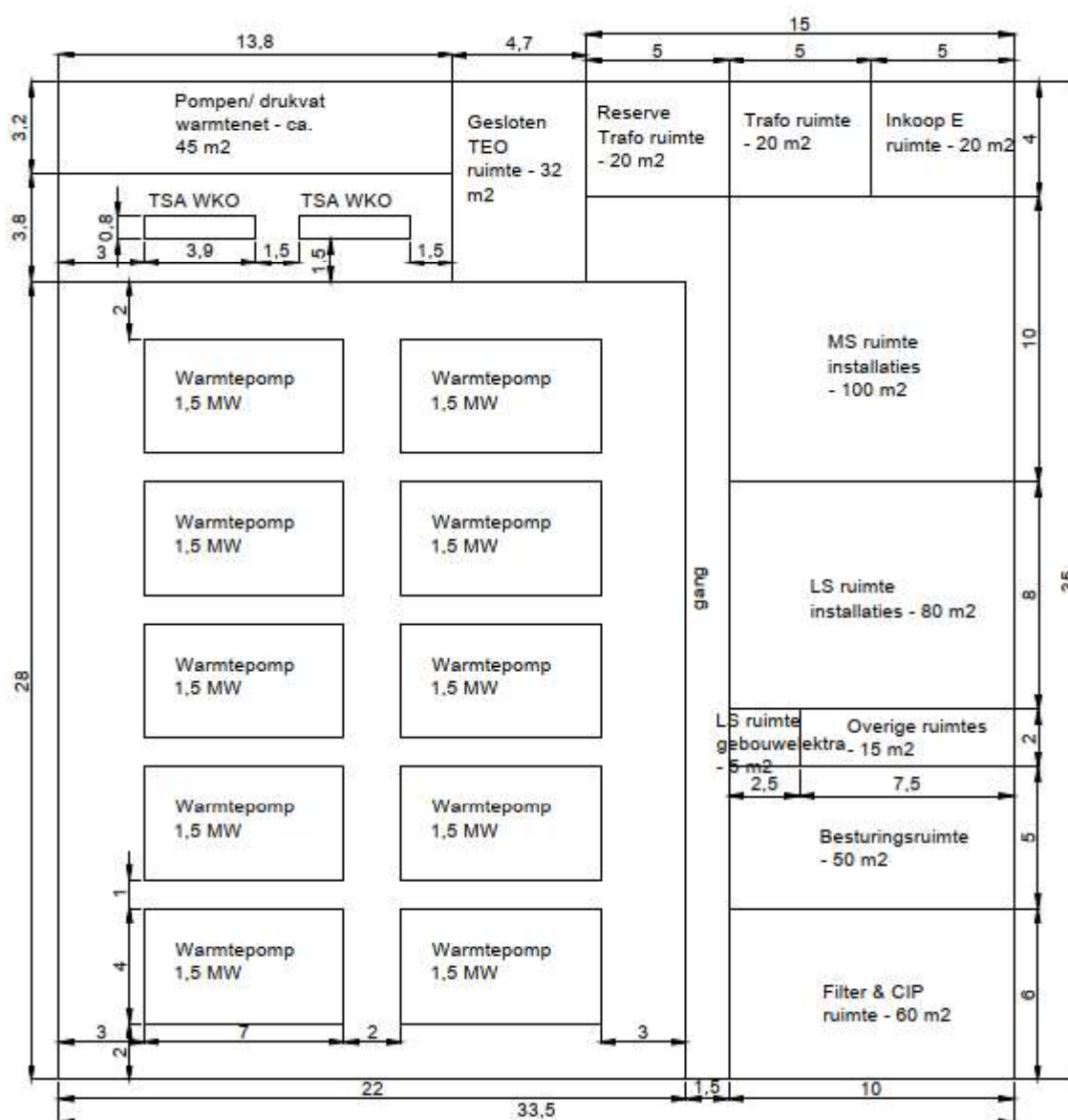
Variant 1A:

- Warmtepompen van GEA: 1,5 MW lxbxh:7x4x2.5 m per stuk. 10 stuks totaal.
- TEO Skid van Xylem: capaciteit van 150 m³/h met 2.6 MW. lxbxh: 4x2x2 m per stuk. 5 stuks totaal.
- WKO TSA van Alfa Laval: 3 MW per stuk. 5 stuks. lxbxh: 3.9x0.8x1.5 m
- Aansluiting warmtenet ruimte van 50m² (met pompen, drukvat, etc.)
- LS-ruimte van 80 m²
- MS-ruimte van 100m²
- Filter en CIP-ruimte van 60m²
- Trafo ruimte van 20 m². 2 stuks voor reserve trafo.
- Aparte elektrainkoopruimte van 20m²
- Besturingsruimte/kantoor van 50m²
- Overige ruimten van 20 m²

1A - Indirecte levering Open TEO - ca. BVO 1350 m²**Variant 1B:**

- Warmtepompen van GEA: 1,5 MW lxbxh:7x4x2.5 m per stuk. 10 stuks totaal.

- WKO TSA van Alfa Laval: 3.75 MW lxbxh: 3.9x0.8x1.5 m per stuk. 2 stuks totaal.
- Aansluiting warmtenet ruimte van 45m² (met pompen, drukvat, etc.)
- Ruimte voor pompen ed. gesloten TEO systeem van 32m²
- LS-ruimte van 80 m²
- MS-ruimte van 100m²
- Filter en CIP-ruimte van 60m²
- Trafo ruimte van 20 m². 2 stuks voor reserve trafo.
- Aparte elektra inkoopruimte van 20m²
- Besturingsruimte/kantoor van 50m²
- Overige ruimten van 20 m²

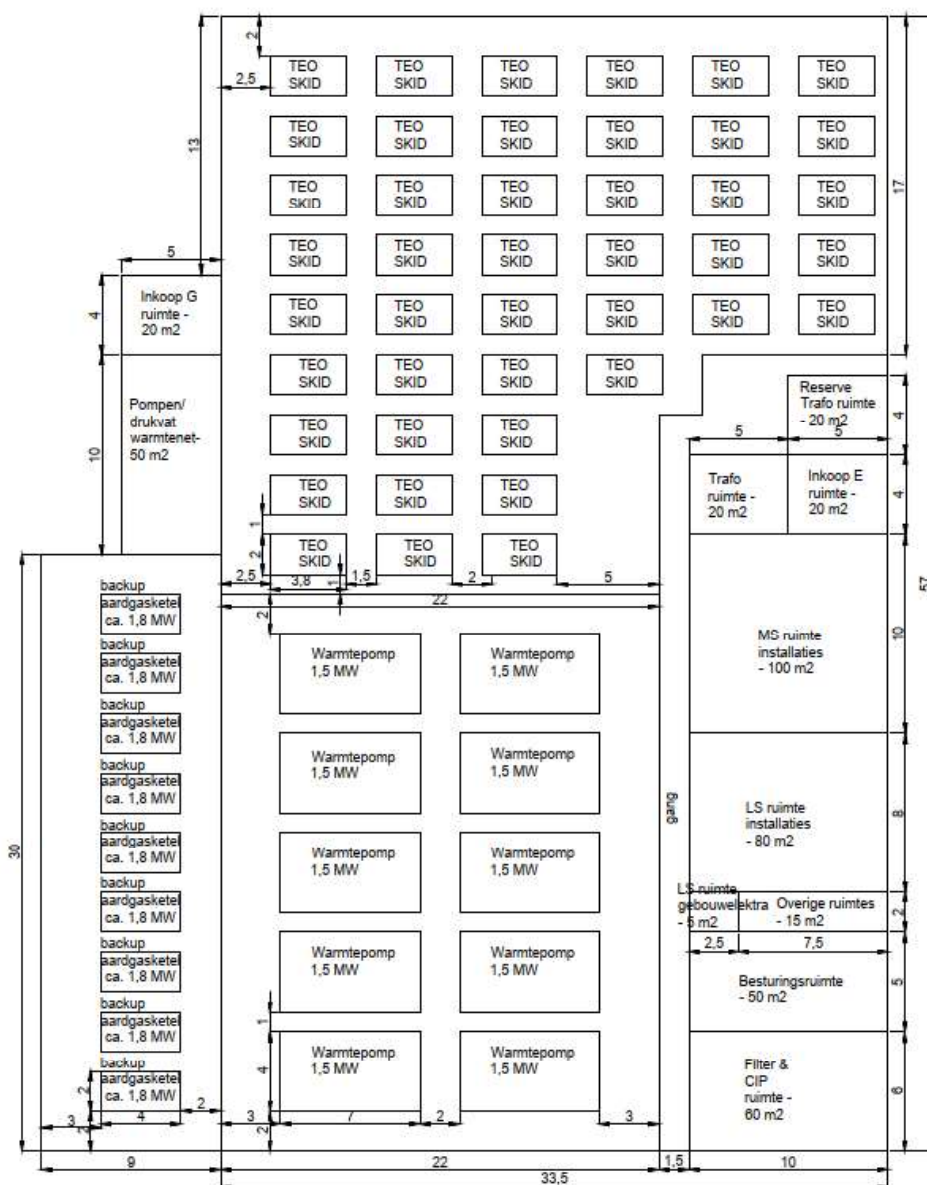


1B - Indirecte levering Gesloten TEO - ca. BVO 1200 m²

Variant 2A:

- Warmtepompen van GEA: 1,5 MW lxbxh:7x4x2.5 m per stuk. 10 stuks.

- TEO Skid van Xylem: capaciteit van 150 m³/h met 0.3 MW lxbxh: 4x2x2 m per stuk. 43 stuks totaal.
- Back-up aardgasketels van Vitomax: 1.8 MW per stuk. 9 stuks. lxbxh: 4x2x2.5 m
- Aansluiting warmtenet ruimte van 50m² (met pompen, drukvat, etc.)
- LS-ruimte van 80 m²
- MS-ruimte van 100m²
- Filter en CIP-ruimte van 60m²
- Trafo ruimte van 20 m². 2 stuks voor reserve trafo.
- Aparte elektra inkoopruimte van 20m²
- Aparte G-inkoopruimte van 20 m²
- Besturingsruimte/kantoor van 50m²
- Overige ruimten van 20 m²

2A - Directe levering Open TEO - ca. BVO 2250 m²**Variant 2B:**

Bijlage 6

Warmte- en koudeopslag



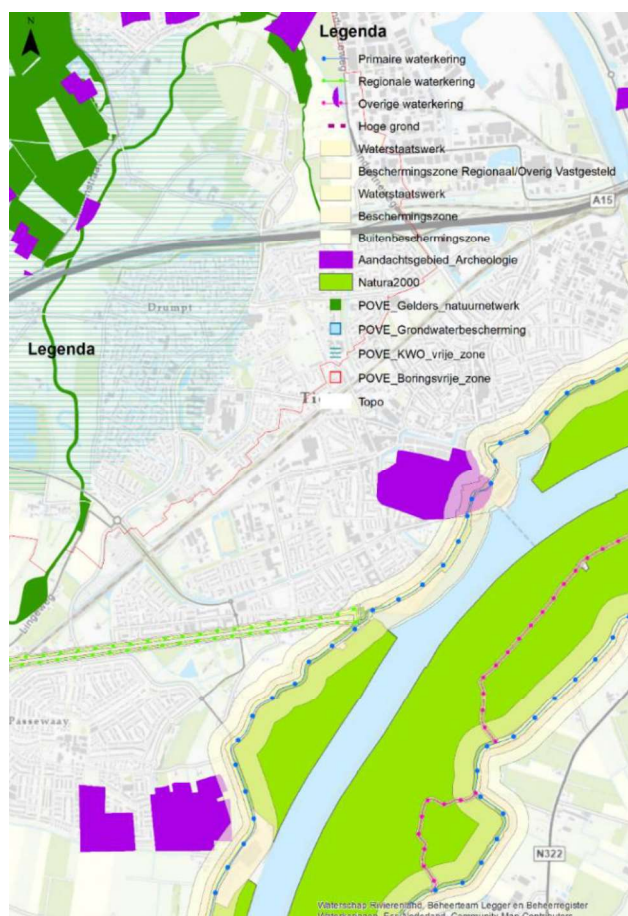
In de indirecte varianten wordt een deel van, of de volledige, warmtevraag geleverd door een collectief WKO-systeem. In deze bijlage zijn de gemaakte keuzes en gebruikte formules toegelicht.

Locatiekeuze

In fase 1 van de studie is onderzoek gedaan naar mogelijke beperkingen in de locaties van te plaatsen WKO-boringen in het projectgebied, zie figuur 30. Geconcludeerd werd dat aan de noordzijde een drinkwaterwinning aanwezig is waaromheen een WKO-vrije zone is aangewezen, en in een ruimer gebied een boring vrije zone is aangewezen. Aan de zuidelijke zijde zijn met name de rivierdijk en de dijk langs het inundatiekanaal van belang. Daarnaast is, midden door de projectlocatie, een spoorbaan gelegen waar bij voorkeur geen boringen plaats vinden.

Opgemerkt wordt dat er in de studie geen onderzoek is gedaan naar verontreinigingen in het gebied. Indien er in het pakket mobiele grondwaterverontreinigingen aanwezig zijn dient daar bij de WKO-installatie rekening mee te worden gehouden zodat verplaatsing van de grondwaterverontreiniging zoveel als mogelijk voorkomen wordt.

Tevens wordt opgemerkt dat de locatie van de in- en uitlaat gelegen is in een natura 2000 gebied. Voor de verdere ontwikkeling van het TEO systeem dient nader onderzoek gedaan te worden naar gevolgen van de bouw en het gebruik van het systeem op het natura 2000 gebied.



Figuur 30: Omgevingscan WKO

Op basis van deze selectie is een keuze gemaakt om enkel WKO-boringen te plaatsen ten zuiden van de spoorbaan en ten noorden van de rivier- en inundatiekanaaldijk. Opgemerkt wordt dat door het gehele

gebied hogedruk gasleidingen zijn gelegen. Bij de keuze voor daadwerkelijke boorlocaties dient rekening gehouden te worden met de aanwezigheid van deze leidingen.

Warmtevraag en equivalente vollasturen

Op basis van de totale warmtevraag (393,241 GJ), een aangehouden COP (3,0) van de warmtepomp en de varianten in welk deel van de warmtevraag door WKO wordt geleverd is een inschatting gemaakt van de draaiuren per jaar (equivalente vollasturen) voor het WKO-systeem. Het aantal equivalente vollasturen is van belang voor het bepalen van de capaciteit van de bronnen.

Het aantal equivalente vollasturen kan berekend worden aan de hand van de volgende formule, waarbij U_{eq} gelijk is aan de equivalente vollasturen:

$$U_{eq} = \frac{\text{Jaarlijkse energieopbrengst}}{\text{vermogen}}$$

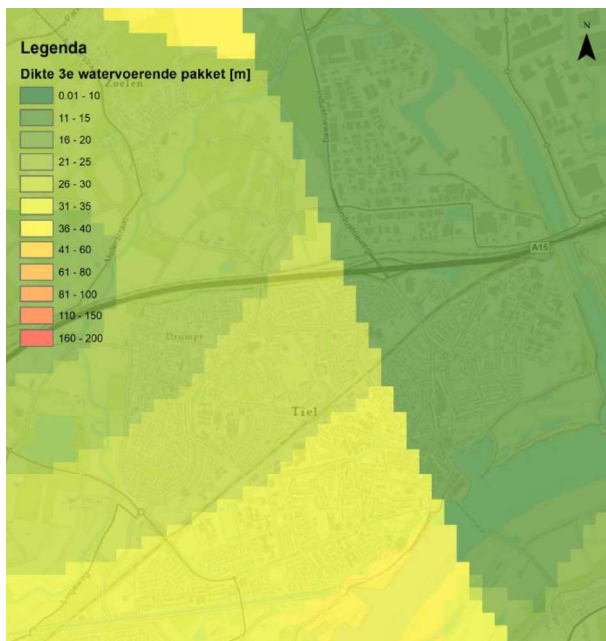
In variant 1A wordt de totale warmtevraag geleverd door WKO. In dat geval dient een vermogen van 15000 kW geplaatst te worden welke een totale hoeveelheid energie moeten leveren van 72.800 MWh. Dit leidt tot een U_{eq} van 4850 uur.

In variant 1A wordt 50% van het gevraagde vermogen geleverd door WKO gedurende 3 maanden. In dat geval dient een vermogen van 7500 kW geplaatst te worden welke een totale hoeveelheid energie moeten leveren van 16.560 MWh. Dit leidt tot een U_{eq} van 2200 uur.

Opgemerkt wordt dat de equivalente vollasturen in variant 1A meer dan een half jaar bedragen en dat de bronnen bij grofweg dezelfde delta T ook eenzelfde periode bijgeladen moeten worden. Dit houdt in dat de gevraagde hoeveelheid energie niet volledig geleverd kan worden door het WKO-systeem wanneer deze altijd op volledig vermogen draait. Gezien de marges in het ontwerp van het TEO-systeem wordt aangenomen dat de open TEO in de zomerperiode naast het laden van de WKO-bronnen ook een minimale basislast kan leveren aan de woningen (waardoor de warmtevraag van het WKO-systeem iets afneemt).

Uitgangspunten bronnen en geohydrologie:

De meeste grote WKO-systemen in de omgeving van Tiel zijn geplaatst in het 3^e watervoerend pakket bestaand uit het de formatie van Peize en Waalre (zand 3), gelegen op ca. 80 tot 110 m-mv. De formaties die daarboven gelegen zijn, zijn doorgaans te grof voor het toepassen van een WKO. Het diepere pakket, de formatie van Maassluis, bestaat doorgaans uit sterk afwisselende bodemlagen en is daarmee doorgaans tevens niet geschikt voor WKO. De dikte van het 3^e watervoerend pakket volgens REGIS II.2 in het gebied is weergegeven in figuur 31.



Figuur 31: Dikte 3e watervoerende pakket [m]

De dikte van het 3^e watervoerende pakket varieert van ca. 20 tot 30 m over het projectgebied. Omdat er lokaal mogelijk stoorlagen aanwezig zijn waar geen filter geplaatst kan worden is in de berekeningen uitgegaan van een maximale filterlengte van 22,5 m over het gehele pakket. Conform REGIS II.2 wordt uitgegaan van een doorlatendheid van het pakket van 35 m/dag. De grondwatertemperatuur in dit pakket is ca. 12 graden (Stork, Analyse van temperatuurmetingen in de Nederlandse ondergrond, 2000).

Gezien de grootte van het systeem en de beperkte beschikbare ruimte voor de bronnen is uitgegaan van een zo groot mogelijk, maar wel gangbare, boordiameter, namelijk 800 mm. Omdat het maximaal te leveren vermogen van een individueel doublet toeneemt bij een groter debiet, en het debiet toeneemt bij een grotere boordiameter wordt hierdoor het totaal aantal bronnen beperkt.

Te behalen debieten

Op basis van de norm voor infiltratiebronnen en onttrekkingsbronnen (Protocol 11001, SIKB BRL 11000) is indicatief het maximaal te onttrekken debiet in het studiegebied geraamd. Aangezien infiltratiebronnen bij reguliere parameterwaarden maatgevend is, is voor het debiet uitgegaan van infiltratie. De gebruikte formule is hieronder weergegeven:

$$V_{inf} = 1000 \left(\frac{k}{150} \right)^{0,6} \sqrt{\frac{V_{verstopping}}{2 * MFI * U_{eq}}}$$

Waarbij:

V_{inf}	=	ontwerp stroomsnelheid op de boorgatwand [m/u]
k	=	Doorlatendheid van het watervoerend pakket [m/dag]
U_{eq}	=	Equivalente vollasturen [uren/jaar]
$V_{verstopping}$	=	Specifieke verstoppingsnelheid [m/j] (uitgegaan van standaardwaarde 0,1 m/j)
MFI	=	Gemeten MFI (s/l ²) (uitgegaan van standaardwaarde 2 s/l ²)

De relatie tussen de boordiameter, het te behalen debiet en de ontwerp stroomsnelheid op de boorgatwand wordt bepaald door de formule $Q = \left(\frac{O_{boorgat}}{1000} * \pi * L \right) * V_{inf}$, waarbij $O_{boorgat}$ de boorgatdiameter [mm] is, L de filterlengte [m] en Q [m³/uur] het maximaal te behalen debiet. De uitkomsten van de berekeningen en aangehouden uitgangspunten zijn weergegeven in tabel 11.

Tabel 11: Samenvatting uitgangspunten WKO-systeem

Parameter	Variante 1A	Variante 1B
Doorlatendheid [m/dag]	35	35
Achtergrondtemperatuur [°C]	12	12
Maximale filterlengte [m]	22,5	22,5
Vermogen [kW]	15000	7500
Equivalentte vollasturen [uren]	4850	2200
Boorgatdiameter [mm]	800	800
Ontwerp stroomsnelheid [m/u]	0,94	1,4
Debiet [m ³ /uur]	54	79

Injectie en onttrekkingstemperaturen en vermogen:

Op basis van de temperaturen van de Waal en de uitgangspunten per warmtewisselaar (2 graden verlies bij reguliere warmtewisselaar, 6 graden bij warmtewisselaar in waal) is per variant een gemiddelde injectietemperatuur bepaald, zie ook de PFD's van de verschillende varianten.

Op basis van een gemiddelde terugwin-efficiëntie van ca. 0,8 van het WKO-systeem is de onttrekkingstemperatuur per bron bepaald. Gegeven een energiebalans wordt de onttrekkingstemperatuur bepaald aan de hand van de volgende formule:

$$T_{ont} = (T_{inject} - T_{achtergrond}) * rendement + T_{achtergrond}$$

De injectie en onttrekkingstemperatuur per variant zijn weergegeven in tabel 12. Deze temperaturen zijn toevalligerwijs gelijk omdat het verschil over de wisselaar bij de gesloten variant t.o.v. de open variant gelijk is aan de temperatuurschommeling van de Waal.

Aan de hand van de onttrekkings- en injectietemperaturen en de maximale debieten kan het vermogen per bron bepaald worden aan de hand van de formule $P = 1,16 * Q * \Delta T$. Het vermogen van de bron varieert enigszins vanwege de wisselende delta T in het koude of warme seizoen.

Tabel 12: Samenvatting onttrekking en injectietemperaturen, debiet en vermogen

Parameter	Variante 1A	Variante 1B
Injectietemperatuur koude zijde [°C]	6	6
Onttrekkingstemperatuur koude zijde [°C]	7,2	7,2
Injectietemperatuur warme zijde [°C]	15	15
Onttrekkingstemperatuur warme zijde [°C]	14,4	14,4
Debiet [m ³ /uur]	54	79
Vermogen per bron [kW]	480-520	720-775
Totaal vermogen [kW]	15000	7500
Totaal aantal bronnen [-]	30	11

Inrichting technische ruimte

De clusters worden met een vertakte leiding aangesloten op de technische ruimte. In de technische ruimte zal elke cluster worden aangesloten op een aparte warmtewisselaar. Doorgaans worden voor WKO-systemen platenwisselaars gebruikt. Op basis van informatie van de Alfa Laval (fabrikant warmtewisselaar) is het benodigd wisselaaroppervlak per variant indicatief berekend aan de hand van de volgende formule:

$$A = \frac{q}{U}$$

Waarbij:

A	=	wisselaaroppervlak [m ²]	
q	=	heat flux [W/m ²]	= massa [kg/s] * specific heat [j/kgK] * ΔT
U	=	Overall heat transfer coëfficiënt [w/(m ² K)]	

Door Alfa Laval wordt een overall heat transfer coëfficiënt van 6000-7500 w/m²K genoemd voor de platenwisselaars. Het berekende indicatieve wisselaaroppervlak is per variant weergegeven in tabel 13.

Tabel 13: Samenvatting onttrekking en injectietemperaturen, debiet en vermogen

Parameter	Variant 1A	Variant 1B
Debiet [m ³ /uur]	54	79
ΔT [°C]	8,4	8,4
Specific heat [j/kgK]	4200*	4200*
Overall heat transfer coëfficiënt [w/(m ² K)]	6000-7500	6000-7500
Wisselaaroppervlak [m ²]	420-530	620-770
* Uitgaande van water		

Bij dit oppervlak kan indicatief worden uitgegaan van Alfa Laval type T20 met een maximaal wisselaaroppervlak van 630 m². Opgemerkt wordt dat het maximale wisselaaroppervlak in variant 1B het maximale wisselaaroppervlak van de T20 overschrijdt. Gezien het indicatieve karakter van deze berekening wordt in de variantenstudie, met name voor het benodigd oppervlak in de technische ruimte, uitgegaan van deze wisselaar.

Opgemerkt wordt dat naast de warmtewisselaar in de technische ruimte nog een aparte pomp wordt geplaatst ten behoeve van de leidingen van de WKO, omdat verwacht wordt dat de onderwaterpompen in de WKO-bronnen dergelijke afstanden niet kunnen overbruggen. Gezien het grootte verschil in leidingdiameters zal deze pomp ver terug moeten kunnen moduleren of zal deze na het plaatsen van een aantal clusters vervangen moeten worden.

Thermische straal van de bronnen en minimale bronafstand

Voor het inpassen van het collectieve WKO-systeem is de verwachte thermische straal van belang. Op basis van de thermische straal kan de minimale onderlinge afstand tussen 2 bronnen bepaald worden. De thermische straal van de WKO-bronnen kan bepaald worden door middel van de volgende formule (BRL 11000, protocol 11001, SIKB):

$$R_{th} = \sqrt{\frac{C_w * Q}{C_a * H * \pi}}$$

$$C_a = n * C_w + (1 - n) * C_r$$

Waarbij:

R_{th}	=	thermische straal [m]
C_w	=	warmtecapaciteit van water [J/m ³ K]
C_a	=	warmtecapaciteit van de aquifer [J/m ³ K]
Q	=	onttrokken hoeveelheid warmte per seizoen [m ³]
H	=	Filterlengte [m]
C_r	=	warmtecapaciteit korrelskelet [J/m ³ K]
n	=	porositeit [-]

Voor het korrelskelet is een warmtecapaciteit van 2,5 MJ/m³/k aangehouden op basis van protocol 11001. De porositeit is geraamd op 0,3.

Conform het protocol 11001, BRL11000, wordt voor energieopslag bij een energiebalans een minimale onderlinge bronafstand van 3 keer de thermische straal aangehouden voor bronnen van het tegengestelde (warme/koude) type.

In de rapportage van KWR “Optimale ondergrondse inpassing van open bodemenergiesystemen”¹ is uitgebreid onderzoek gedaan naar de optimalisatie van het gebruik van de bodem. Middels een case-study is bepaald wat de optimale afstand is tussen de bronnen in relatie tot de CO₂-reductie en de terugwinefficiëntie. De bronafstand wordt in deze studie uitgedrukt door een factor D_s (voor dezelfde soort bronnen bijv. warm-warm) en D_o (voor verschillende type bronnen bijv. warm-koud) maal de thermische straal R_{th} van de bronnen. Uit de studie van KWR blijkt dat de terugwinefficiëntie het grootst is bij $D_s=2$ en $D_o=3$. Gezien de beperkte ruimte wordt in deze studie uitgegaan van $D_s=1$ en $D_o=3$, waarbij een terugwinefficiëntie van circa 0.84 kan worden gerealiseerd. Hiermee wordt maar weinig ingeboet op de maximale terugwinefficiëntie van circa 0.87 uit de KWR studie.

Een samenvatting van de thermische straal per bron en de aan te houden afstanden tussen de bronnen is weergegeven in tabel 14. Met de onderlinge bronafstand is thermische interferentie tussen de bronnen te voorkomen.

Tabel 14: Samenvatting thermische straal

Parameter	Variante 1A	Variante 1B
Thermische straal [m]	71	58
Onderlinge bronafstand zelfde type [m]	71	58
Onderlinge bronafstand ander type [m]	220	175

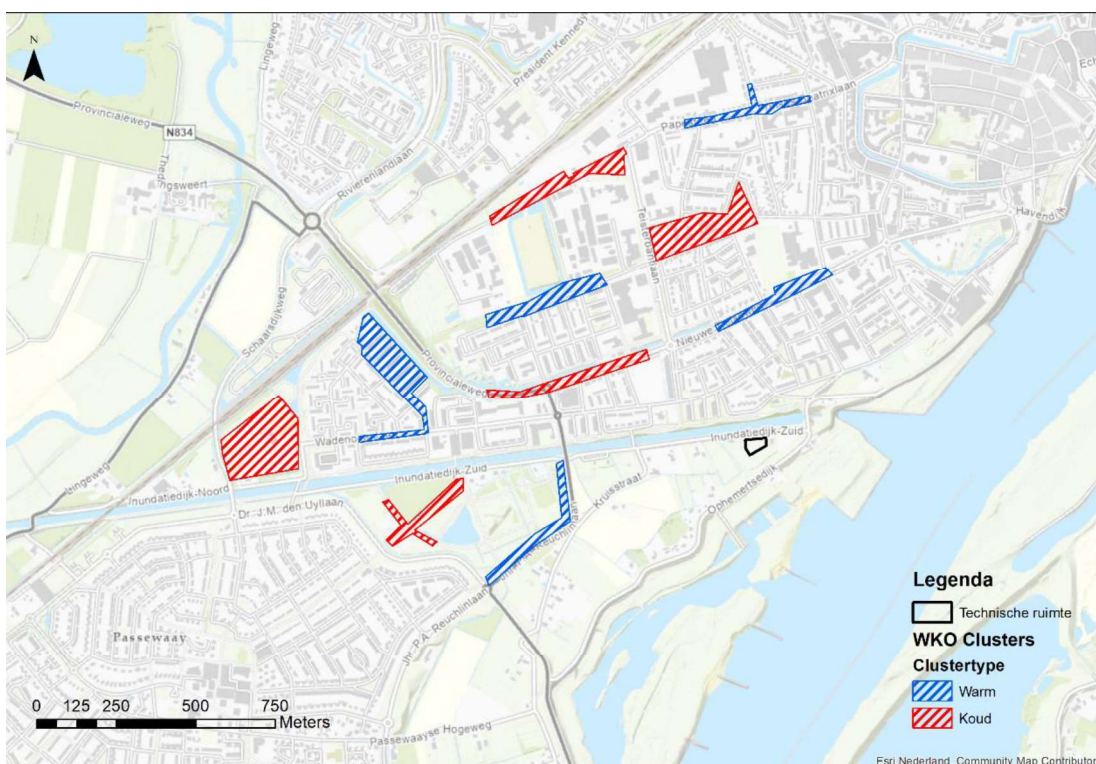
Clusters en locatiekeuze

Vanwege de wens om modulair op te kunnen bouwen is ervoor gekozen om uit te gaan van een aantal clusters van bronnen. In variant 1A is uitgegaan van 5 clusters, elk met 6 WKO-doubletten. Elk cluster levert ca. 3000 kW. Gezien het volloopsценario van ca. 1,5 tot 2 MW per jaar zal ca. elke 2 jaar een cluster bijgeplaatst moeten worden. In variant 1B is uitgegaan van 2 clusters, elk met 5 of 6 WKO-doubletten. In dit geval zal halverwege het volloopsценario een nieuw cluster geplaatst moeten worden (bij 1,5 MW per jaar als volloopsценario, na ca. 5 jaar).

Door de clusters te verdelen over het projectgebied en af te wisselen tussen een warme zone en een koude zone worden omgevingseffecten als gevolg van onttrekking en infiltratie enigszins beperkt. Opgemerkt wordt dat getracht is het koude cluster altijd aan de stroomafwaarts zijde van het pakket te

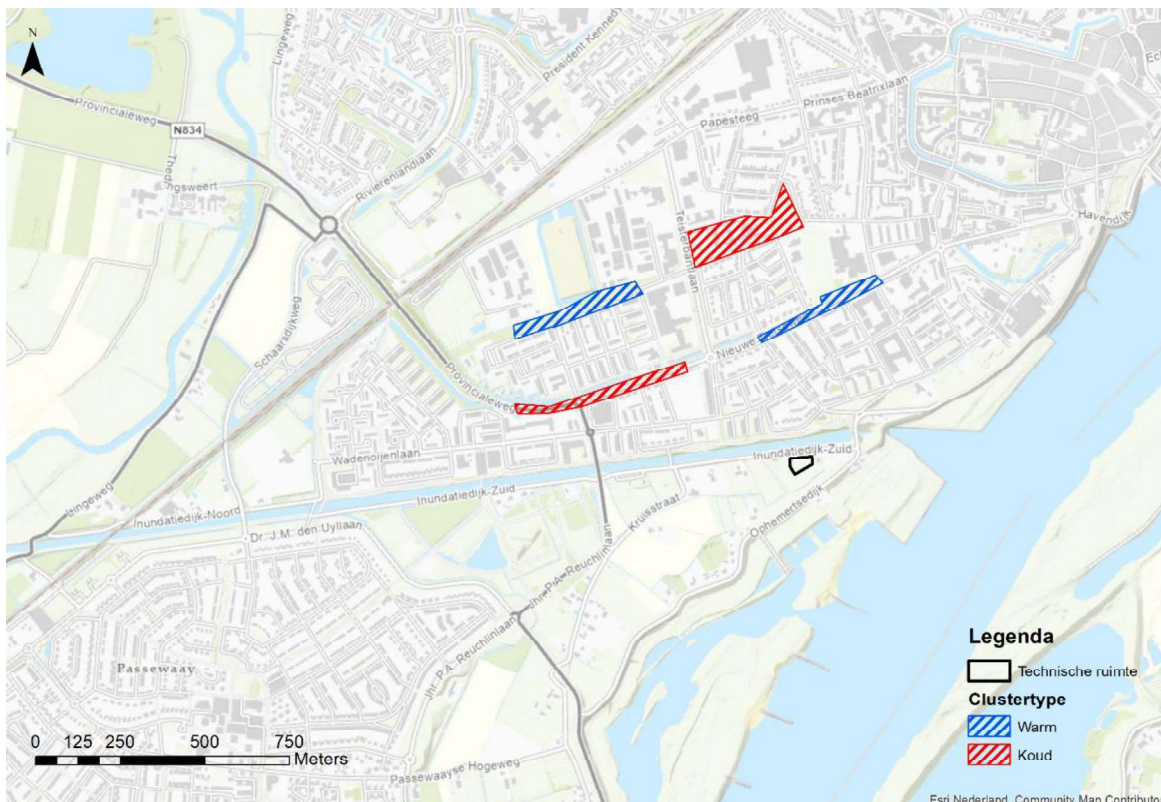
plaatsen omdat dit normaliter een eis is van de omgevingsdienst. De clusters zijn gekozen op basis van beschikbare ruimte, zoveel mogelijke publieke grond, en daar waar mogelijk niet bij belangrijke kabels of leidingen. Opgemerkt wordt dat door het gehele projectgebied een hogedruk gasleiding aanwezig is, deze behoeft specifieke aandacht bij het uitkiezen van de daadwerkelijke boorlocaties.

De locatie van de genoemde WKO-clusters voor variant 1A is weergegeven in figuur 32. Binnen deze clusters worden de bronnen op ca. 70 m afstand van elkaar geplaatst.



Figuur 32: Cluster locaties WKO variant 1A (6 bronnen per cluster)

De locaties van de genoemde WKO-clusters voor variant 1B is weergegeven in figuur 33. Binnen deze clusters worden de bronnen tevens op ca. 70 m afstand van elkaar geplaatst.

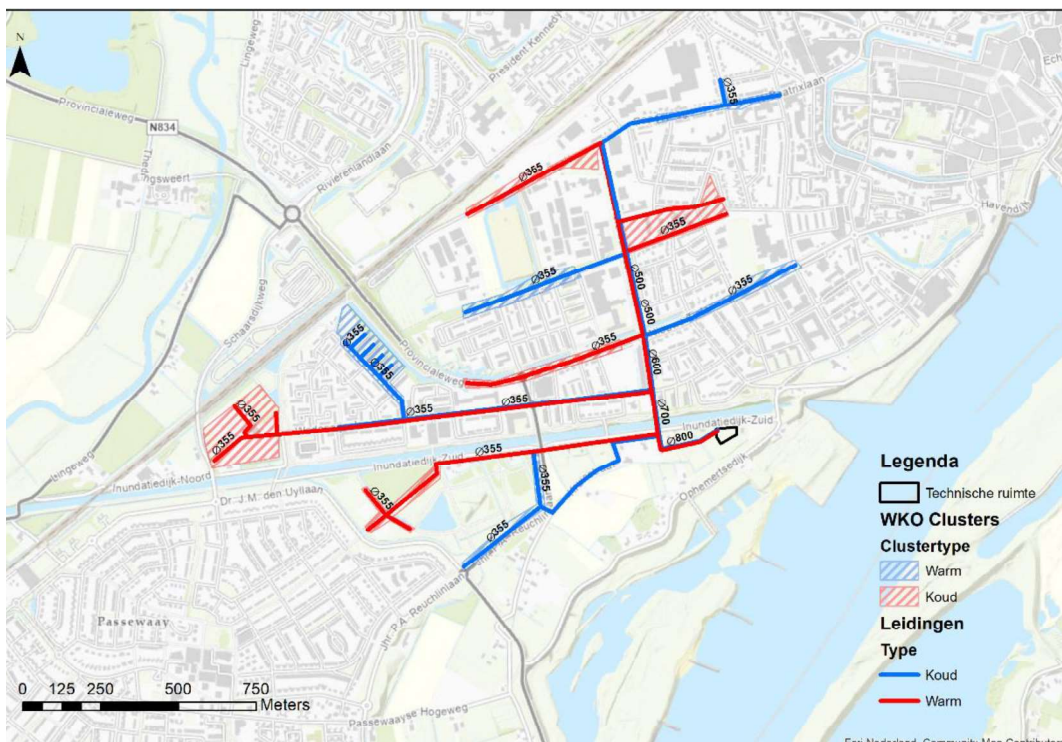


Figuur 33: Cluster locaties WKO variant 1B (5-6 bronnen per cluster)

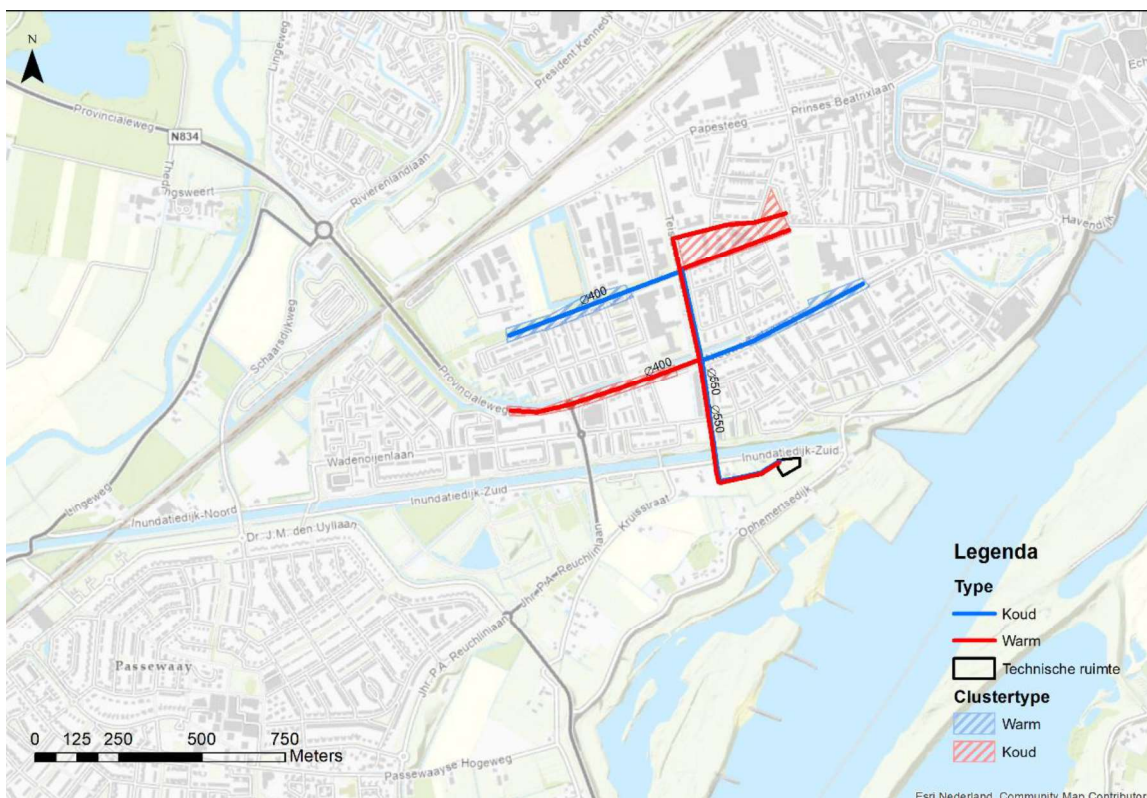
Leidingen

Voor de vertakte leidingen is uitgegaan van een maximale stroomsnelheid van 1 m/s. Op basis van deze aanname zijn de benodigde leidingdiameters bepaald. Vanwege het grote aantal clusters, en bijbehorende leidingen (2 per cluster) zijn waar mogelijk leidingen geclusterd. Dit heeft als voordeel dat enkele werkzaamheden (bijv. dijkruising) maar eenmalig plaatsvinden voor de WKO en dat er minder ruimtebeslag is (als voorbeeld: 10 leidingen van 355 mm of 2 leidingen van 800 mm). Het nadeel is dat het systeem daardoor niet geheel modulair is.

Het benodigde leidingwerk, alsmede de diameter, voor variant 1A is weergegeven in figuur 34. Het benodigde leidingwerk, alsmede de diameter, voor variant 1B is weergegeven in figuur 35.



Figuur 34: Leidingen en diameters WKO variant 1A



Figuur 35: Leidingen en diameters WKO variant 1B

Opgemerkt wordt dat in beide varianten vanaf de technische ruimte het inundatiekanaal gekruist wordt met een tweetal leidingen. Vanwege de beperkte ruimte vindt deze kruising plaats door middel van een GFT-boring van ca. 90 m in lengte. De exacte diepteligging van het inundatiekanaal is bij RHDHV onbekend, maar gezien de bodemopbouw en de wens om geen kleilagen te verstoren met de boring is uitgegaan van een GFT-boring op ca. 6 m – mv. Gezien de hoge stijghoogte in het 1^e watervoerende pakket wordt ervan uitgegaan dat de boring wordt uitgevoerd binnen een gesloten kuip (damwanden met onderwaterbeton). In variant 1A wordt de GFT-boring uitgevoerd als twee 700 mm leidingen, in variant 2B als twee 550 mm leidingen. De totale leidinglengte van de varianten is als samenvatting weergegeven in tabel 15.

Tabel 15: Samenvatting leidinglengtes

Diameter	Variante 1A, lengte [m]	Variante 1B, lengte [m]
355	9635	-
400	-	3020
500	645	-
550	-	920
600	360	-
700*	100	-
800	470	-

Bijlage 7

CAPEX, OPEX, elektra- en CO₂ verbruik



CAPEX

Variant 1A - Indirecte levering - Open TEO					
	Onderdelen	Eenheid		Kosten per eenheid	Kosten
TEO	Inlaat & uitlaat put	st.	1	€ 1.100.000	€ 1.100.000
	Leidingwerk	st.	1	€ 800.000	€ 800.000
	Kruising primaire waterkering	st.	1	€ 600.000	€ 600.000
	SKID	st.	5	€ 312.000	€ 1.560.000
	Vacuuminstallatie	st.	1	€ 200.000	€ 200.000
	Aanzuigpompen	st.	2	€ 80.000	€ 160.000
Technische Ruimte	Gebouw	m2	1350	€ 822	€ 1.109.700
	Aankopen grond	m2	1350	€ 150	€ 202.500
	Warmtepomp	kW	15000	€ 547,5	€ 8.212.500
	Hoofdverdelinrichting incl trafo, noodstroom	KVA	15000	€ 205	€ 3.075.000
WKO	WKO warmtewisselaars	st.	5	€ 60.000	€ 300.000
	WKO distributiepompen	st.	5	€ 80.000	€ 400.000
	WKO leidingwerk (11,2 km)	st.	1	€ 10.100.000	€ 10.100.000
	WKO-doubletten	st.	30	€ 240.000	€ 7.200.000
	Kruising secundaire waterkering (GFT)	st.	2	€ 500.000	€ 1.000.000
Totaal					€ 36.019.700

Variant 1B - Indirecte levering - Gesloten TEO					
	Onderdelen	Eenheid		Kosten per eenheid	Kosten
TEO	Inlaat & uitlaat put	st.	1	€ 1.100.000	€ 1.100.000
	Perspompen in inlaatput	st.	2	€ 400.000	€ 800.000
	Leidingwerk	st.	1	€ 400.000	€ 400.000
	Warmtewisselaar	kW	15000	€ 320	€ 4.800.000
	Betonnenbak voor wisselaar	st.	100	€ 65.000	€ 6.500.000
	Leidingwerk	st.	1	€ 500.000	€ 500.000
	Kruising primaire waterkering	st.	1	€ 500.000	€ 500.000
	Perspompen secundair circuit	st.	2	€ 180.000	€ 360.000
Technische Ruimte	Gebouw	m2	1200	€ 822	€ 986.400
	Aankopen grond	m2	1200	€ 150	€ 180.000
	Warmtepomp	kW	15000	€ 547,5	€ 8.212.500
	Hoofdverdelinrichting incl trafo, noodstroom	KVA	15000	€ 205	€ 3.075.000
WKO	WKO warmtewisselaars	st.	2	€ 60.000	€ 120.000
	WKO distributiepompen	st.	2	€ 80.000	€ 160.000
	WKO leidingwerk (3,9 km)	st.	1	€ 5.100.000	€ 5.100.000
	WKO-doubletten	st.	11	€ 240.000	€ 2.640.000
	Kruising secundaire waterkering (GFT)	st.	2	€ 400.000	€ 800.000
Totaal					€ 36.233.900

Variant 2A - Directe levering - Open TEO					
	Onderdelen	Eenheid		Kosten per eenheid	Kosten
TEO	Inlaat & uitlaat put	st.	8	€ 1.100.000	€ 8.800.000
	Leidingwerk	st.	8	€ 800.000	€ 6.400.000
	Kruising primaire waterkering	st.	8	€ 600.000	€ 4.800.000
	SKID	st.	43	€ 312.000	€ 13.416.000
	Vacuuminstallatie	st.	8	€ 200.000	€ 1.600.000
	Aanzuigpompen	st.	16	€ 80.000	€ 1.280.000
Technische Ruimte	Gebouw	m2	2250	€ 816	€ 1.836.000
	Aankopen grond	m2	2250	€ 150	€ 337.500
	Warmtepomp	kW	15000	€ 548	€ 8.212.500
	Hoofdverdelinrichting incl trafo, noodstroom	KVA	15000	€ 205	€ 3.075.000
	Gasaansluiting	st.	1	€ 24.500	€ 24.500
	Piek-/Backup ketel	kW	16200	€ 497	€ 8.051.400
Totaal					€ 57.832.900

Variant 2B - Directe levering - Gesloten TEO					
	Onderdelen	Eenheid		Kosten per eenheid	Kosten
TEO	Inlaat & uitlaat put	st.	1	€ 1.100.000	€ 1.100.000
	Perspompen in inlaatput	st.	2	€ 400.000	€ 800.000
	Leidingwerk	st.	1	€ 400.000	€ 400.000
	Warmtewisselaar	kW	15000	€ 320	€ 4.800.000
	Betonnenbak voor wisselaar	st.	100	€ 65.000	€ 6.500.000
	Leidingwerk	st.	1	€ 500.000	€ 500.000
	Kruising primaire waterkering	st.	1	€ 500.000	€ 500.000
	Perspompen secundair circuit	st.	2	€ 180.000	€ 360.000
Technische Ruimte	Gebouw	m2	1150	€ 846	€ 972.900
	Aankopen grond	m2	1150	€ 150	€ 172.500
	Warmtepomp	kW	15000	€ 548	€ 8.212.500
	Hoofdverdelinrichting incl trafo, noodstroom	KVA	15000	€ 205	€ 3.075.000
Totaal					€ 27.392.900

OPEX

Variant 1A - Indirecte levering - Open TEO							
		Enheid	Percentage	Investerings	Kosten	Bron	Opmerkingen
Onderhoud	Warmteoverdrachtstation	%/jaar		3 € 1.109.700,00	€ 33.291	PBL 2019 Vesta Mais 4.0	
	Installaties in warmtenetten	%/jaar		3 € 3.775.000,00	€ 113.250	PBL 2019 Vesta Mais 4.0	
	Transportleidingen	%/jaar		3 € 12.500.000,00	€ 375.000	PBL 2019 Vesta Mais 4.0	
	Warmtepompen	%/jaar	3,5	€ 8.212.500,00	€ 287.438	PBL 2019 Vesta Mais 4.0	
	WKO	%/jaar		2 € 7.200.000,00	€ 144.000	PBL 2019 Vesta Mais 4.0	
	TEO	%/jaar		3 € 3.020.000,00	€ 90.600	PBL 2019 Vesta Mais 4.0	
Administratie	Warmteoverdrachtstation	%/jaar		3 € 1.109.700,00	€ 33.291	PBL 2019 Vesta Mais 4.0	
	Installaties in warmtenetten	%/jaar		3 € 3.775.000,00	€ 113.250	PBL 2019 Vesta Mais 4.0	
	Warmtepompen	%/jaar	2,5	€ 8.212.500,00	€ 205.313	PBL 2019 Vesta Mais 4.0	
Totaal Onderhoud & Administratie				€ 1.395.432			
Elektra	Warmtepompen	kWhe	36.374.793	€ 0,0830	€ 3.019.108	CBS, Aardgas en elektriciteit	Niet-huishoudens, 150.000 MWh prijs aangehouden
	WKO	kWhe	8.588.703	€ 0,0830	€ 712.862	CBS, Aardgas en elektriciteit	Niet-huishoudens, 150.000 MWh prijs aangehouden
	TEO	kWhe	234.789	€ 0,0830	€ 19.487	CBS, Aardgas en elektriciteit	Niet-huishoudens, 150.000 MWh prijs aangehouden
Totaal Elektra				€ 3.751.458			
Totaal				€ 5.146.890			
Variant 1B - Indirecte levering - Gesloten TEO							
		Enheid	Percentage	Investerings	Kosten	Bron	Opmerkingen
Onderhoud	Warmteoverdrachtstation	%/jaar		3 € 986.400,00	€ 29.592	PBL 2019 Vesta Mais 4.0	
	Installaties in warmtenetten	%/jaar		3 € 3.355.000,00	€ 100.650	PBL 2019 Vesta Mais 4.0	
	Transportleidingen	%/jaar		3 € 7.300.000,00	€ 219.000	PBL 2019 Vesta Mais 4.0	
	Warmtepompen	%/jaar	3,5	€ 8.212.500,00	€ 287.438	PBL 2019 Vesta Mais 4.0	
	WKO	%/jaar		2 € 2.640.000,00	€ 52.800	PBL 2019 Vesta Mais 4.0	
	TEO	%/jaar		3 € 6.260.000,00	€ 187.800	PBL 2019 Vesta Mais 4.0	
Administratie	Warmteoverdrachtstation	%/jaar		3 € 986.400,00	€ 29.592	PBL 2019 Vesta Mais 4.0	
	Installaties in warmtenetten	%/jaar		3 € 3.355.000,00	€ 100.650	PBL 2019 Vesta Mais 4.0	
	Warmtepompen	%/jaar	2,5	€ 8.212.500,00	€ 205.313	PBL 2019 Vesta Mais 4.0	
Totaal Onderhoud & Administratie				€ 1.212.834			
Elektra	Warmtepompen	kWhe	36.374.793	€ 0,0830	€ 3.019.108	CBS, Aardgas en elektriciteit	Niet-huishoudens, 150.000 MWh prijs aangehouden
	WKO	kWhe	2.930.672	€ 0,0830	€ 243.246	CBS, Aardgas en elektriciteit	Niet-huishoudens, 150.000 MWh prijs aangehouden
	TEO	kWhe	1.327.832	€ 0,0830	€ 110.210	CBS, Aardgas en elektriciteit	Niet-huishoudens, 150.000 MWh prijs aangehouden
Totaal Elektra				€ 3.372.564			
Totaal				€ 4.585.398			
Variant 2A - Directe levering - Open TEO							
		Enheid	Percentage	Investerings	Kosten	Bron	Opmerkingen
Onderhoud	Warmteoverdrachtstation	%/jaar		3 € 1.836.000,00	€ 55.080	PBL 2019 Vesta Mais 4.0	
	Installaties in warmtenetten	%/jaar		3 € 3.075.000,00	€ 92.250	PBL 2019 Vesta Mais 4.0	
	Transportleidingen	%/jaar		3 € 11.200.000,00	€ 336.000	PBL 2019 Vesta Mais 4.0	
	Warmtepompen	%/jaar	3,5	€ 8.212.500,00	€ 287.438	PBL 2019 Vesta Mais 4.0	
	TEO	%/jaar		3 € 16.296.000,00	€ 488.880	PBL 2019 Vesta Mais 4.0	
	Piek/backup ketel	%/jaar	12,5	€ 8.075.900,00	€ 1.009.488	RHDHV Database	
Administratie	Warmteoverdrachtstation	%/jaar		3 € 1.836.000,00	€ 55.080	PBL 2019 Vesta Mais 4.0	
	Installaties in warmtenetten	%/jaar		3 € 3.075.000,00	€ 92.250	PBL 2019 Vesta Mais 4.0	
	Warmtepompen	%/jaar	2,5	€ 8.212.500,00	€ 205.313	PBL 2019 Vesta Mais 4.0	
	Piek/backup ketel	%/jaar	2,5	€ 8.075.900,00	€ 201.898	RHDHV Database	
Totaal Onderhoud & Administratie				€ 2.621.778			
Elektra	Warmtepompen	kWhe	33.343.560	€ 0,0830	€ 2.767.515	CBS, Aardgas en elektriciteit	Niet-huishoudens, 150.000 MWh prijs aangehouden
	TEO	kWhe	1.741.657	€ 0,0830	€ 144.557	CBS, Aardgas en elektriciteit	Niet-huishoudens, 150.000 MWh prijs aangehouden
				€/GJ			
Gas	Piek/backup ketel	GJg	34.136	€ 10.4800	€ 357.740	CBS, Aardgas en elektriciteit	Niet-huishoudens 10 tot 100 TJ
Totaal Elektra & Gas				€ 3.269.813			
Totaal				€ 5.891.591			
Variant 2B - Directe levering - Gesloten TEO							
		Enheid	Percentage	Investerings	Kosten	Bron	Opmerkingen
Onderhoud	Warmteoverdrachtstation	%/jaar		3 € 972.900,00	€ 29.187	PBL 2019 Vesta Mais 4.0	
	Installaties in warmtenetten	%/jaar		3 € 3.075.000,00	€ 92.250	PBL 2019 Vesta Mais 4.0	
	Transportleidingen	%/jaar		3 € 1.400.000,00	€ 42.000	PBL 2019 Vesta Mais 4.0	
	Warmtepompen	%/jaar	3,5	€ 8.212.500,00	€ 287.438	PBL 2019 Vesta Mais 4.0	
	TEO	%/jaar		3 € 6.260.000,00	€ 187.800	PBL 2019 Vesta Mais 4.0	
Administratie	Warmteoverdrachtstation	%/jaar		3 € 972.900,00	€ 29.187	PBL 2019 Vesta Mais 4.0	
	Installaties in warmtenetten	%/jaar		3 € 3.075.000,00	€ 92.250	PBL 2019 Vesta Mais 4.0	
	Warmtepompen	%/jaar	2,5	€ 8.212.500,00	€ 205.313	PBL 2019 Vesta Mais 4.0	
Totaal Onderhoud & Administratie				€ 965.424			
Elektra	Warmtepompen	kWhe	36.374.793	€ 0,0830	€ 3.019.108	CBS, Aardgas en elektriciteit	Niet-huishoudens, 150.000 MWh prijs aangehouden
	TEO	kWhe	1.991.747	€ 0,0830	€ 165.315	CBS, Aardgas en elektriciteit	Niet-huishoudens, 150.000 MWh prijs aangehouden
Totaal Elektra				€ 3.184.423			
Totaal				€ 4.149.847			

Elektraverbruik

Variant 1A - Indirecte levering - Open TEO						
			-	GJth/jaar	GJe/jaar	kWhe/jaar
Elektraverbruik	Warmtepompen basis	ratio GJe/GJth	0,333	393.241	130.949	36.374.793
	Bronpompen WKO	ratio GJe/GJth	0,025	262.161	6.554	1.820.560
	Pompenenergie distributienet WKO					6.768.143
	Pompenenergie TEO					234.789
Variant 1B - Indirecte levering - Gesloten TEO						
			-	GJth/jaar	GJe/jaar	kWhe/jaar
Elektraverbruik	Warmtepompen basis	ratio GJe/GJth	0,333	393.241	130.949	36.374.793
	Bronpompen WKO	ratio GJe/GJth	0,025	262.161	6.554	1.820.560
	Pompenenergie distributienet WKO					1.110.112
	Pompenenergie TEO					1.327.832
Variant 2A - Directe levering - Open TEO						
			-	GJth/jaar	GJe/jaar	kWhe/jaar
Elektraverbruik	Warmtepompen basis	ratio GJe/GJth	0,333	360.471	120.037	33.343.560
	Pompenenergie TEO					1.741.657
Gasverbruik				GJth/jaar	GJg/jaar	kWhg/jaar
	Piek/backup Ketel	ratio GJg/GJth	0,96	32.770	34.136	9.482.084
Variant 2B - Directe levering - Gesloten TEO						
			-	GJth/jaar	GJe/jaar	kWhe/jaar
Elektraverbruik	Warmtepompen basis	ratio GJe/GJth	0,333	393.241	130.949	36.374.793
	Pompenenergie TEO					1.991.747

Pompvermogens

Om het theoretisch pompvermogen te kunnen berekenen is gebruik gemaakt van de volgende formule:

$$Pompvermogen (kW) = Debiet \times Drukval$$

Toegepast uitgangspunt: De drukval is 1 bar/km = 100 kPa/km

Het elektrisch pompvermogen is vervolgens bepaald met:

$$Elektrisch\ pompvermogen\ (kW) = \frac{theoretisch\ pompvermogen}{pompendement \times motorrendement}$$

De hoeveelheid elektrische energie is vervolgens bepaald door:

$$Elektrische\ energie\ (kWh) = elektrisch\ pompvermogen \times vollasturen$$

Indirecte levering	Grootheid	Eenheid	Variant 1A		Variant 1B	
			Open TEO		Gesloten TEO	
Debiet WKO	Qwko	m ³ /s	0,46		0,21	
Lengte WKO leidingen	Lwko	m	11.210		3.940	
Drukval	dP	kPa	1.121,00		394,00	
Theoretisch WKO pompvermogen	Ptheorie	kW	514		84	
Pomprendement	npomp	%	0,70		0,70	
Motorrendement	nmotor	%	0,95		0,95	
Elektrisch WKO pompvermogen	Pelekt	kW	773		127	
Vollasturen	T	h	8.760		8.760	
Energie per jaar	Eelekt	kWhe/jaar	6.768.143		1.110.112	
	Grootheid	Eenheid	Variant 1A		Variant 1B	
			Open TEO		Gesloten TEO	
Circuit			Primair		Primair	Secundair
Debiet TEO	Qteo	m ³ /s	0,38		0,14	0,14
Lengte TEO leidingen	Lteo	m	800		400	800
Drukval	dP	kPa	80,00		440,00	280,00
Theoretisch TEO pompvermogen	Ptheorie	kW	30		62	39
Pomprendement	npomp	%	0,70		0,70	0,70
Motorrendement	nmotor	%	0,95		0,95	0,95
Elektrisch TEO pompvermogen	Pelekt	kW	46		93	59
Vollasturen	T	h	5.136		8.760	8.760
Energie per jaar	Eelekt	kWhe/jaar	234.789		811.453	516.379
Directe levering	Grootheid	Eenheid	Variant 2A		Variant 2B	
			Open TEO		Gesloten TEO	
Circuit	-	-	Primair		Primair	Secundair
Debiet TEO	Qteo	m ³ /s	1,79		0,21	0,21
Lengte TEO leidingen	Lteo	m	800		400	800
Drukval	dP	kPa	80,00		440,00	280,00
Theoretisch TEO pompvermogen	Ptheorie	kW	143,20		92,40	58,80
Pomprendement	npomp	%	0,70		0,70	0,70
Motorrendement	nmotor	%	0,95		0,95	0,95
Elektrisch TEO pompvermogen	Pelekt	kW	215		139	88
Vollasturen	T	h	8.088		8.760	8.760
Energie per jaar	Eelekt	kWhe/jaar	1.741.657		1.217.179	774.568
Berekening elektrisch piekvermogen	Eenheid	Variant 1A	Variant 1B	Variant 2A	Variant 2B	
Warmtepomp	kWe	5000	5000	5000	5000	
Elektrisch WKO pompvermogen	kWe	773	127	-	-	
Elektrisch TEO pompvermogen	kWe	46	152	215	227	
Totaal piekvermogen	kWe	5818	5278	5215	5227	

Bij de Open varianten is er wel sprake van een secundair circuit, de lengte hiervan is echter zo klein dat het energieverbruik hier verwaarloosbaar is.

CO₂

Variant 1A - Indirecte levering - Open TEO									
			Ratio GJe/GJth	GJth/jaar	GJe/jaar	kWhe/jaar	Emissiefactor grijze stroom kg CO2 per kWh	CO2 uitstoot kg CO2	m3 gas/jaar
Elektravert	Warmtepompen		0,333	393.241	130.949	36.374.793	0,556	20.224.385	12.964.664
	Bronpompen WKO		0,025	262.161	6.554	1.820.560	0,556	1.012.231	
	Pompenergie distributienet WKO					6.768.143	0,556	3.763.087	
	Pompenergie TEO					234.789	0,556	130.542	
		Totaal kg CO2	CO2 besparing						
	Grijze stroom	25.130.246	-3%						
	Groene stroom	0	100%						
	Eq. Aardgas	24.425.427	-						
Variant 1B - Indirecte levering - Gesloten TEO									
			Ratio GJe/GJth	GJth/jaar	GJe/jaar	kWhe/jaar	Emissiefactor grijze stroom kg CO2 per kWh	CO2 uitstoot kg CO2	m3 gas/jaar
Elektravert	Warmtepompen		0,333	393.241	130.949	36.374.793	0,556	20.224.385	12.964.664
	Bronpompen WKO		0,025	262.161	6.554	1.820.560	0,556	1.012.231	
	Pompenergie distributienet WKO					1.110.112	0,556	617.222	
	Pompenergie TEO					1.327.832	0,556	738.274	
		Totaal kg CO2	CO2 besparing						
	Grijze stroom	22.592.113	8%						
	Groene stroom	0	100%						
	Eq. Aardgas	24.425.427	-						
Variant 2A - Directe levering - Open TEO									
			Ratio GJe/GJth	GJth/jaar	GJe/jaar	kWhe/jaar	Emissiefactor grijze stroom kg CO2 per kWh	CO2 uitstoot kg CO2	m3 gas/jaar
Elektravert	Warmtepompen		0,333	360.471	120.037	33.343.560	0,556	18.539.019	11.884.276
	Pompenergie TEO					1.741.657	0,556	968.361	
Gasverbruik							Emissiefactor aardgas kg CO2 per m3		
	Piek/backup Ketel	ratio GJg/GJth	0,96	32.770	34.136	9.482.084	1,884	2.035.452	
		Totaal kg CO2	CO2 besparing						
	Grijze stroom	19.507.380	13%						
	Groene stroom	0	92%						
	Backup Aardgas	2.035.452	-						
	Eq. Aardgas	24.425.427	-						
Variant 2B - Directe levering - Gesloten TEO									
			Ratio GJe/GJth	GJth/jaar	GJe/jaar	kWhe/jaar	Emissiefactor grijze stroom kg CO2 per kWh	CO2 uitstoot kg CO2	m3 gas/jaar
Elektravert	Warmtepompen		0,333	393.241	130.949	36.374.793	0,556	20.224.385	12.964.664
	Pompenergie TEO					1.991.747	0,556	1.107.412	
		Totaal kg CO2	CO2 besparing						
	Grijze stroom	21.331.796	15%						
	Groene stroom	0	100%						
	Eq. Aardgas	24.425.427	-						

Bijlage 8

Herziening kostenindicatie ten behoefte van bepaling bandbreedte



CAPEX

Variant 1A - Indirecte levering - Open TEO					
	Onderdelen	Eenheid		Kosten per eenheid	Kosten
TEO	Inlaat & uitlaat put	st.	1,5	€ 1.100.000	€ 1.650.000
	Leidingwerk	st.	1,5	€ 800.000	€ 1.200.000
	Kruising primaire waterkering	st.	1,5	€ 600.000	€ 900.000
	SKID	st.	14	€ 312.000	€ 4.368.000
	Vacuuminstallatie	st.	1,5	€ 200.000	€ 300.000
	Aanzuigpompen	st.	4	€ 80.000	€ 320.000
Technische Ruimte	Gebouw	m2	2000	€ 822	€ 1.644.000
	Aankopen grond	m2	2000	€ 150	€ 300.000
	Warmtepomp	kW	15000	€ 548	€ 8.212.500
	Hoofdverdeelinrichting incl trafo, noodstroom	KVA	15000	€ 205	€ 3.075.000
WKO	WKO warmtewisselaars	st.	8	€ 60.000	€ 480.000
	WKO distributiepompen	st.	8	€ 80.000	€ 640.000
	WKO leidingwerk (11,2 km)	st.	1,6	€ 10.100.000	€ 16.160.000
	WKO bronnen	st.	50	€ 240.000	€ 12.000.000
	Kruising secundaire waterkering (GFT)	st.	2	€ 500.000	€ 1.000.000
Totaal					€ 52.249.500
Variant 1B - Indirecte levering - Gesloten TEO					
	Onderdelen	Eenheid		Kosten per eenheid	Kosten
TEO	Inlaat & uitlaat put	st.	1	€ 1.100.000	€ 1.100.000
	Perspompen in inlaatput	st.	2	€ 400.000	€ 800.000
	Leidingwerk	st.	1	€ 400.000	€ 400.000
	Warmtewisselaar	kW	15000	€ 480	€ 7.200.000
	Betonnenbak voor wisselaar	st.	130	€ 65.000	€ 8.450.000
	Leidingwerk	st.	1	€ 500.000	€ 500.000
	Kruising primaire waterkering	st.	1	€ 500.000	€ 500.000
	Perspompen	st.	2	€ 180.000	€ 360.000
Technische Ruimte	Gebouw	m2	1200	€ 822	€ 986.400
	Aankopen grond	m2	1200	€ 150	€ 180.000
	Warmtepomp	kW	15000	€ 547,5	€ 8.212.500
	Hoofdverdeelinrichting incl trafo, noodstroom	KVA	15000	€ 205	€ 3.075.000
WKO	WKO warmtewisselaars	st.	2	€ 60.000	€ 120.000
	WKO distributiepompen	st.	2	€ 80.000	€ 160.000
	WKO leidingwerk (3,9 km)	st.	1	€ 5.100.000	€ 5.100.000
	WKO bronnen	st.	11	€ 240.000	€ 2.640.000
	Kruising secundaire waterkering (GFT)	st.	2	€ 400.000	€ 800.000
Totaal					€ 40.583.900
Variant 2A - Directe levering - Open TEO					
	Onderdelen	Eenheid		Kosten per eenheid	Kosten
TEO	Inlaat & uitlaat put	st.	8	€ 1.100.000	€ 8.800.000
	Leidingwerk	st.	8	€ 800.000	€ 6.400.000
	Kruising primaire waterkering	st.	8	€ 600.000	€ 4.800.000
	SKID	st.	43	€ 312.000	€ 13.416.000
	Vacuuminstallatie	st.	8	€ 200.000	€ 1.600.000
	Aanzuigpompen	st.	16	€ 80.000	€ 1.280.000
Technische Ruimte	Gebouw	m2	2250	€ 816	€ 1.836.000
	Aankopen grond	m2	2250	€ 150	€ 337.500
	Warmtepomp	kW	15000	€ 548	€ 8.212.500
	Hoofdverdeelinrichting incl trafo, noodstroom	KVA	15000	€ 205	€ 3.075.000
	Gasaansluiting	st.	1	€ 24.500	€ 24.500
	Piek-/Backup ketel	kW	16200	€ 497	€ 8.051.400
Totaal					€ 57.832.900
Variant 2B - Directe levering - Gesloten TEO					
	Onderdelen	Eenheid		Kosten per eenheid	Kosten
TEO	Inlaat & uitlaat put	st.	2	€ 1.100.000	€ 2.200.000
	Perspompen in inlaatput	st.	2	€ 400.000	€ 800.000
	Leidingwerk	st.	2	€ 400.000	€ 800.000
	Warmtewisselaar	kW	15000	€ 640	€ 9.600.000
	Betonnenbak voor wisselaar	st.	200	€ 65.000	€ 13.000.000
	Leidingwerk	st.	2	€ 500.000	€ 1.000.000
	Kruising primaire waterkering	st.	2	€ 500.000	€ 1.000.000
	Perspompen	st.	4	€ 180.000	€ 720.000
Technische Ruimte	Gebouw	m2	1150	€ 846	€ 972.900
	Aankopen grond	m2	1150	€ 150	€ 172.500
	Warmtepomp	kW	15000	€ 548	€ 8.212.500
	Hoofdverdeelinrichting incl trafo, noodstroom	KVA	15000	€ 205	€ 3.075.000
Totaal					€ 41.552.900