

BACHELOR'S THESIS

Duurzaamheidsbeoordeling van warmtebronnen voor warmtenetten in Nederland

Boerhof, M; Gerritsma, T; Vermaas, L

Award date:
2022

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain.
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

pure-support@ou.nl

providing details and we will investigate your claim.

Downloaded from <https://research.ou.nl/> on date: 19. Nov. 2022

Open Universiteit
www.ou.nl





Duurzaamheidsbeoordeling van warmtebronnen voor warmtenetten in Nederland

ADVIESRAPPORT

InCompany 
Milieuadvies

MARK BOERHOF, TIALDA GERRITSMa, LIESBETH VERMAAS

ONDERZOEK UITGEVOERD IN OPDRACHT VAN ENNATUURLIJK, EINDHOVEN, NEDERLAND.
EINDHOVEN, 7 feb 2022.



Colofon

Naam document	NB9906-PWAE-WARMTENETTEN-2122-TeamC_Final.docx
Opdrachtgever	Dit onderzoek is uitgevoerd in opdracht van Ennatuurlijk, Stef Boesten
Uitgave	InCompany Milieuadvies, Faculteit Bètawetenschappen, vakgroep Milieuwetenschappen, Open Universiteit, Postbus 2960, 6401 DL Heerlen, NL. www.ou.nl/nw
Projectteam (auteurs)	Tialda Gerritsma;Liesbeth Vermaas;Mark Boerhof
Projectteam (nummer)	Team C, WARMTENET, 2021
Projectcoach (docent)	dr ir Angelique Lansu, Faculty of Science, Dept Environmental Sciences, Open Universiteit – InCompany Milieuadvies
Datum (laatst bijgewerkt)	
Status	<input type="checkbox"/> in bewerking <input type="checkbox"/> voor review (intern: team/projectcoach; extern: opdrachtgever) <input type="checkbox"/> ter beoordeling <input checked="" type="checkbox"/> definitief
	InCompany Milieuadvies hanteert de APA Style als norm voor haar wetenschappelijke rapportages.

Copyright	© 2022 Open Universiteit, Heerlen De auteursrechten op dit materiaal berusten bij de Open Universiteit. Behoudens uitzonderingen door de Wet gesteld mag zonder schriftelijke toestemming van de rechthebbende(n) op het auteursrecht niets uit deze uitgave worden veeleenvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of anderszins, hetgeen ook van toepassing is op de gehele of gedeeltelijke bewerking. Copyright on this material is vested in the Open Universiteit. Save exceptions stated by the law no part of this publication may be reproduced in any form, by print, photoprint, microfilm or other means, included a complete or partial transcription, without the prior written permission of the publisher.
InCompany Milieuadvies	InCompany Milieuadvies is het online milieuadviesbureau van de Open Universiteit (www.ou.nl). Studenten werken in teamverband aan echte milieup opdrachten van echte opdrachtgevers. Leren en werken zijn één in deze bijzondere cursus, die de afronding vormt van de wetenschappelijke Bachelor-of-Science opleiding Milieu-natuurwetenschappen

Projectgegevens

Titel (nl)	Duurzaamheidsbeoordeling van warmtebronnen voor warmtenetten in Nederland
Title (in English)	Sustainability assessment of heat sources in Dutch District Heating Systems
Opdrachtgevende instantie	Ennatuurlijk, Achtseweg Zuid 153 X, 5651 GW Eindhoven.
Opdrachtgever	Contactpersoon: Stef Boesten. Ennatuurlijk, Eindhoven.
Omschrijving opdracht (nl)	Ennatuurlijk is een energiebedrijf dat warmtenetten door heel Nederland aanlegt. Ennatuurlijk heeft ons gevraagd warmtebronnen in kaart te brengen, duurzaamheidscriteria op te stellen en deze criteria op de regio's Leeuwarden, Twente en Eindhoven – Helmond te toetsen.
Description of the order (in English)	Ennatuurlijk is an energy company that installs heat and cooling networks throughout the Netherlands. Ennatuurlijk has asked us to map out heat sources, to draw up sustainability criteria and to apply these criteria on the regions of Leeuwarden, Twente and Eindhoven – Helmond.
Trefwoorden	Warmtenet, duurzaam, ecologisch, uitstoot, energie, leveringszekerheid
Key words	District heating, DHC, sustainable, ecological, emissions, energy; Sustainability assessment; energy supply security
Betrokkene(n) bij opdrachtgeversorganisatie	Stef Boesten (Ennatuurlijk). 1e aanspreekpunt. Frank Soons (Ennatuurlijk).
Projectleider team IM	Liesbeth Vermaas (LV), cursus Virtueel milieuadviesbureau NB9906, wo-bacheloropleiding Milieu-natuurwetenschappen (BSc), Rol: projectleider
Projectmedewerker team IM	Tialda Gerritsma (TG), cursus Virtueel milieuadviesbureau, NB9906, wo-bacheloropleiding Milieu-natuurwetenschappen (BSc), Rol: contact externen, kennismanager (mappenstructuur en coördinatie)
Projectmedewerker team IM	Mark Boerhof (MB), cursus Virtueel milieuadviesbureau, NB9906, wo-bacheloropleiding Milieu-natuurwetenschappen (BSc), Rol: contact opdrachtgever.
Projectcoach/examinator	dr ir Angelique Lansu, Faculty of Science, Dept Environmental Sciences, Open Universiteit.
Examinator (plv.)	dr Wilfried Ivens, Faculty of Science, Dept Environmental Sciences, Open Universiteit, Heerlen, NL
Referentie naar dit rapport	BOERHOF, Mark, GERRITSMA, Tialda, & VERMAAS, Liesbeth (2022). Duurzaamheidsbeoordeling van warmtebronnen voor warmtenetten in Nederland. Onderzoek uitgevoerd in opdracht van Ennatuurlijk. Eindhoven, NL. [Sustainability assessment of heat sources in Dutch District Heating Systems (in Dutch)]. [Unpublished Bachelor's thesis, Environmental Sciences, Open Universiteit, Heerlen, NL], Open Universiteit research portal https://research.ou.nl/

Inhoud

Colofon	2
Projectgegevens	3
Inhoud	4
Voorwoord	5
Samenvatting	6
Abstract	7
1. Inleiding: het probleem	8
1.1. Klimaatverandering en energietransitie	8
1.2. Warmtenet en warmtebronnen	10
1.3. Toetsen van Duurzaamheid	12
1.4. Vraagstelling en doelstelling	14
2. Methode	15
2.1. Systematisch literatuuronderzoek	15
2.2. Ontwerp van het Decision support system	15
2.3. Casestudies	16
3. Resultaat: Literatuuronderzoek	18
3.1. Ecologische duurzaamheidscriteria	18
3.1.1. Geothermie	18
3.1.2. Aquathermie	19
3.1.3. Restwarmte	21
3.2. Uitstoot	21
3.2.1. Uitstoot bij de warmtebron	21
3.2.2. Uitstoot van het warmtenet	22
3.2.3. Uitstoot door het opwekken van elektriciteit	24
3.2.4. In de literatuur gebruikte duurzaamheidscriteria	24
3.3. Leveringszekerheid	24
3.3.1. Wettelijk eisen aan leveringszekering van warmte	24
3.3.2. Diversiteit en alternatieve bronnen	25
3.3.3. Importafhankelijkheid	26
3.3.4. Geothermie	27
3.3.5. Aquathermie	27
3.3.6. Restwarmte	28
3.4. Veiligheid	29
3.4.1. Ecologie en veiligheid	29
3.4.2. Uitstoot en veiligheid	30
3.4.3. Veiligheid en risico's bij leveringszekerheid	31
4. Resultaat: Ontwerp van Decision Support System	32
4.1. Duurzaamheidscriteria	32
4.2. Weging van criteria in DSS	32
5. Resultaat: Casestudies	35
5.1. Regio Leeuwarden	35
5.2. Regio Eindhoven/Helmond	37
5.3. Regio Twente	39
6. Discussie en Conclusie	42
6.1. Discussie	42
6.2. Conclusies	44
7. Aanbevelingen	45
7.1.1. Aanbevelingen voor warmtebedrijven met betrekking tot het DSS	45
7.1.2. Algemene aanbevelingen voor warmtebedrijven	45
7.1.3. Aanbevelingen voor warmtebedrijven, lokale politiek en onderzoekscentra	45
Literatuur	46
Bijlage A: Vragenlijsten Geothermie, Aquathermie, Restwarmte	55
Bijlage B: Overzicht van koelmiddelen	56
Bijlage C: Decision Support System (DSS)	57
Bijlage D: Toelichting tabblad uitstoot van het DSS	63

Voorwoord

Dit rapport bevat het verslag van een onderzoek uitgevoerd in opdracht van warmteleverancier Ennatuurlijk, tevens het afstudeeronderzoek voor de bachelor Natuur- en Milieuwetenschappen aan de Open Universiteit van Mark Boerhof, Tialda Gerritsma en Liesbeth Vermaas.

Met veel plezier hebben wij ons de afgelopen vijf maanden verdiept in warmtenetten, voor ons allen een nieuw onderwerp. We hebben onderzoek gedaan naar de duurzaamheid van de warmtebronnen geothermie, aquathermie en restwarmte. Aan de hand van het effect op ecologie, uitstoot en leveringszekerheid hebben we duurzaamheidscriteria opgesteld en een decision support system ontworpen. Dit model moet de opdrachtgever ondersteunen bij het beoordelen op duurzaamheid van nieuwe of bestaande warmtebronnen. We hebben het model getoetst aan de hand een aantal warmtebronnen in verschillende regio's.

Voor het onderzoek hebben we informatie gebruikt uit verschillende bronnen, in dit kader willen we graag de experts bedanken voor hun input op het gebied van geothermie: Henk van Oeveren, aquathermie: Barry Scholten en restwarmte: Else Hoeks. Ook bedanken we Stef Boesten, de opdrachtgever, voor deze interessante opdracht en voor de introductie in de wereld van warmtenetten.

Ten slotte dank aan Angelique Lansu, onze begeleider, voor het nauwkeurig doorlezen van onze tussenrapportages en het toegewijd leveren van feedback en tips voor het verbeteren van ons onderzoek.

Liesbeth Vermaas
Tialda Gerritsma
Mark Boerhof

Februari 2022

Samenvatting

Om de effecten van klimaatverandering te beperken is in het Nederlandse Klimaatakkoord afgesproken om de CO₂ uitstoot te reduceren naar nul in 2050. Een groot deel van de CO₂ komt vrij bij de verbranding van aardgas voor verwarming van gebouwen. De Nederlandse regering heeft besloten de gaswinning uit het Groningse veld in 2022 te stoppen vanwege de ontstane aardbevingen en bijkomende schade. Aangezien 90% van de Nederlandse gebouwde omgeving gebruik maakt van aardgas voor verwarming is een overgang naar andere warmte vereist. Warmtenetten - dat zijn netwerken van leidingen onder de grond, waardoor warm water van een warmtebron naar een warmte afnemer stroomt - kunnen als collectieve voorziening de individuele aardgasgestookte CV-ketels als warmtebron vervangen. Daarbij zullen huidige en toekomstige warmtenetten duurzaam moeten zijn (Wet collectieve warmte in 2023).

Om de duurzaamheid van een warmtenet aan te geven wordt nog vaak de simpele definitie 'CO₂ - besparing ten opzichte individuele aardgasgestookte CV-ketels' gehanteerd. Het doel van dit onderzoek was om duurzaamheidscriteria te formuleren en deze te combineren in een toetsingsstelsel. In dit rapport wordt antwoord gegeven op de vragen 'Op welke wijze kan de duurzaamheid van de warmtebronnen voor huidige en toekomstige warmtenetten getoetst worden?' en 'Wat betekent de uitkomst van deze toetsing voor de verduurzaming van de warmtebronnen in de warmtenet-regio?'.

De vraag hoe de duurzaamheid van warmtebronnen getoetst kan worden is onderzocht doormiddel van literatuuronderzoek en vraaggesprekken met warmtebron-experts van Ennatuurlijk. In dit onderzoek zijn criteria op het gebied van ecologie, uitstoot en leveringszekerheid uitgewerkt en samengevoegd in een DSS (decision support system). De vraag wat de uitkomst van de toetsing van warmtebronnen in een warmtenet-regio kan betekenen is onderzocht door drie warmtenet-regio's te toetsen aan de geformuleerde criteria.

Voor het duurzaamheidsaspect ecologie zijn de criteria verzilting van zoetwataquifers (bij geothermie), effecten door koudelozing en het inzuigen van vissen (bij aquathermie) met bijbehorende classificaties gedefinieerd. De belangrijkste criteria voor leveringszekerheid gelden voor alle drie de warmtebronnen en zijn: temperatuur van de warmtebron, verschil tussen warmte vraag en aanbod, lange termijn beschikbaarheid en importafhankelijkheid. De onderzochte warmtebronnen hebben geen directe uitstoot bij het gebruik in een warmtenet, maar indirecte uitstoot kan optreden door het opwaarderen van warmte met te lage temperaturen. Dit kan voor alle onderzochte warmtebronnen nodig zijn, bij een verschil in temperatuur tussen vraag en aanbod. Ook de opwekking van elektriciteit die gebruikt wordt voor warmtewinning (bijvoorbeeld oppompen) en het transporteren van de warmte naar de afnemers is, afhankelijk van de manier van opwekken, een potentiële bron van uitstoot.

In totaal zijn twaalf duurzaamheidscriteria met bijbehorende classificaties geformuleerd en in een DSS samengevoegd. Met dit DSS kan de duurzaamheid van warmtebronnen bepaald worden. De onderzochte warmtebronnen worden in het DSS afgezet tegen de gangbare manier van verwarmen: gasgestookte HR ketels. Het DSS blijkt uit de drie casestudies een bruikbare tool om de duurzaamheid van een warmtebron in beeld te krijgen. Daarnaast blijkt uit de casestudies dat er in de drie onderzochte regio's nog ruimte is voor verduurzaming van de bestaande warmtenetten. We adviseren warmtebedrijven om onbekende negatieve effecten van warmtebronnen in warmtenetten op mens en milieu in kaart te brengen. Dit is realistisch aangezien het STOWA, TNO en SCAN al grootschalige studies opgestart hebben waarbij aangesloten kan worden.

Abstract

Following the international Paris agreement (United Nations FCCC, 2015) and the Dutch derivative "Climate Agreement" (Dutch Central Government, 2019) various sectors, including the heating sector, need to improve on sustainability. Currently 90% of the Dutch households are heated by individual natural gas boilers, causing CO₂ emissions, while only ~4% is connected to a district heating system (DH-system). DH-systems can be based on several types of heat sources, not all equally sustainable. The sustainability of geothermal heat, aquathermal heat and residual heat is explored in this study. Through literature study and expert judgement, the impact on ecology, emissions and security of supply of these three heat sources have been inventoried, leading to a set of sustainability criteria. Literature based classification of these criteria is combined in a Decision Support System: a model designed to determine the sustainability of a heat source when used in a DH-system. The model also takes the environmental situation and the characteristics of a chosen heat source into account. The usability of the model is tested and verified by applying it to practical examples: heat sources in the regions of Leeuwarden, Twente and Helmond (NL) and was found to be workable and useful for actual situations. The model can be modified, fine-tuned or extended as desired.

1. Inleiding: het probleem

1.1. Klimaatverandering en energietransitie

In de stedelijke omgeving zijn warmtenetten in gebruik als collectieve oplossing om gebouwen te verwarmen, de zogenaamde stadsverwarming. Als bron wordt vaak de verbrandingswarmte van afval of aardgas gebruikt, maar deze warmtenetten kunnen bijvoorbeeld ook gebaseerd zijn op restwarmte van de industrie. De warmtevraag van huishoudens in Nederland omvat ongeveer de helft van de totale energiebehoefte van gebouwen (Segers et al., 2020). Om klimaatverandering tegen te gaan zal de uitstoot van broeikasgassen beperkt moeten worden, via een energietransitie (naar duurzame bronnen van elektriciteit) en een warmtetransitie (naar duurzame bronnen van warmte). Nederland streeft ernaar 'aardgasvrij' te zijn in 2050. Het collectief benutten van warmtebronnen in een warmtenet kan daarin een oplossing bieden. Wel zal het inzetten van een warmtenet duurzaam moeten zijn; de mate van duurzaamheid kan verschillen tussen verschillende warmtebronnen. De vraag is welke warmtebronnen er beschikbaar zijn en in welke mate deze warmtebronnen aan duurzaamheidscriteria voldoen.

Met het Klimaatakkoord van Parijs (Paris Agreement) (UNFCCC, 2018) en het daarop volgende Glasgow-akkoord (UNFCCC, 2021) hebben landen wereldwijd voor het eerst een bindende afspraak gemaakt om gerichte inspanningen te leveren gericht om de verdere opwarming van de aarde tegen te gaan. Het lange termijndoel in dit akkoord is om de opwarming van de aarde te beperken tot ruim onder de 2 graden Celsius (bij voorkeur 1,5 °C) ten opzichte van het pre-industriële niveau. Om in 2050 een klimaatneutraal energie en warmte op te wekken zal de uitstoot van broeikasgassen ingeperkt moeten worden.

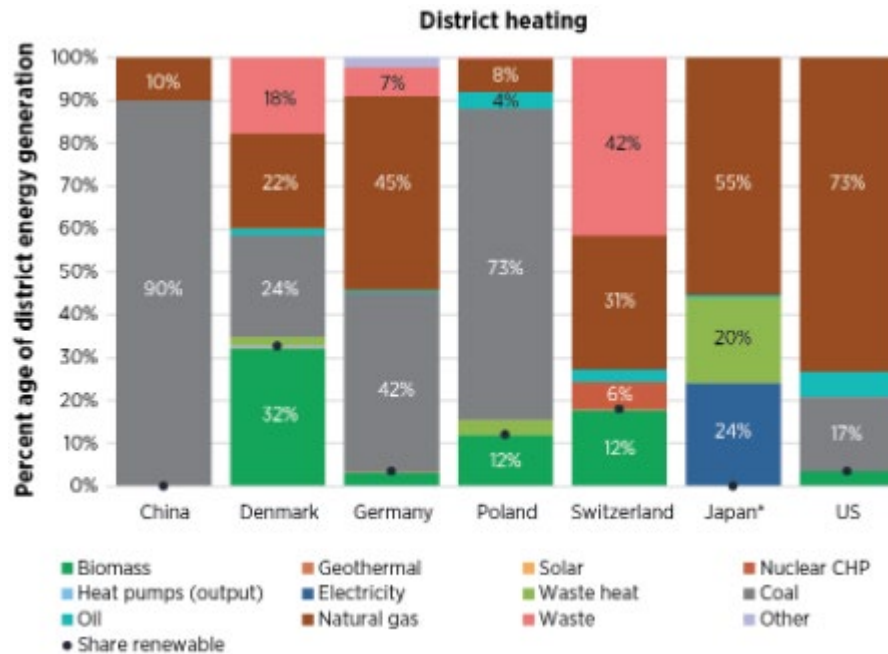
Energietransitie in Nederland

Om uitvoering te geven aan de Paris Agreement heeft de Nederlandse overheid als onderdeel van het Nederlandse klimaatbeleid het Klimaatakkoord opgesteld. Dit is een overeenkomst tussen de overheid, organisaties en bedrijven in Nederland om de opwarming van de aarde tegen te gaan (Rijksoverheid, 2019). De Nederlandse uitstoot van CO₂ moet in 2030 49% lager liggen dan het niveau van 1990. In 2050 moet dit zelfs 95% lager zijn. Om dit doel te bereiken is de energietransitie die in het klimaatakkoord vastgelegd is noodzakelijk. Het overstappen van fossiele brandstoffen op duurzame energiebronnen zoals zon en wind is een belangrijke stap bij de energietransitie. Segers et al. (2020) hebben berekend dat bijna de helft van alle opgewekte energie in 2019 (49%) gebruikt wordt voor het verwarmen van bebouwde gebieden. Naast de energietransitie is er daarom ook een warmtetransitie nodig om de uitstoot van CO₂ te beperken.

Warmtetransitie in NL: aardgasvrij in 2050

Wereldwijd zijn er zeer verschillende warmtebronnen en warmtesystemen waarmee aan verwarmingsdoeleinden voldaan wordt (Figuur 1-1). In Nederland werd in 2015 80% van de warmte geproduceerd door het verbranden van aardgas (Menkveld et al., 2017). Naast aardgas werd er wereldwijd in 2015 voornamelijk steenkool gebruikt om warmte op te wekken, waarbij China tot wel 90% steenkool gebruikt (IRENA, 2017). China, de Verenigde Staten en Polen staan in de top 10 van grootste steenkoolproducenten ter wereld (Statista, 2020). Het is daarom niet opvallend te noemen dat deze landen een groot deel van hun warmte opwekken via steenkool.

In Nederland wordt in de huidige situatie nog steeds voornamelijk aardgas gebruikt als warmtebron voor het verwarmen van gebouwen (CBS, 2021). Woningen en bedrijfspanden zijn over het algemeen aangesloten op het aardgasnetwerk en hebben daarbij een eigen gasketel waarmee de verbranding van het aardgas gerealiseerd wordt. De keuze voor aardgas als warmtebron is logisch te verklaren vanwege de door de jaren heen grote beschikbaarheid. In 1959 werd de voor Nederland en Europa grootste aardgasvoorraad gevonden in het noordoosten van Groningen. Deze voorraad wordt sindsdien ingezet voor het opwekken van energie en het produceren van warmte. Sinds de jaren '90 treden er echter merkbare geografische effecten op die door de gaswinning veroorzaakt worden: de bodem verzakt met aardbevingen tot gevolg (KNMI, 2021).



Figuur 1-1. Verdeling van warmtebronnen gebruikt in warmtenetten in 2015 voor enkele geselecteerde landen. Legenda geeft de typen warmtebronnen weer. (Bron: IRENA.org)

Vanwege de lokale schade door verzakkingen en aardbevingen heeft de overheid in 2015 besloten deze gaswinning terug te schroeven (Rijksoverheid, 2021) met een totale stop in 2022. Dit besluit zal ervoor zorgen dat Nederland op zoek moet naar buitenlands aardgas of naar nieuwe warmtebronnen. Naast de verminderde beschikbaarheid van aardgas is er nog een reden om te kijken naar alternatieve warmtebronnen. De transitie van aardgas naar duurzamere opties komt namelijk terug in het in 2019 in werking getreden Klimaatakkoord. Onderdeel van deze warmtetransitie is het overstappen van de per gebouw of huishouden opgewekte warmte door aardgasverbranding naar centraal opgewekte warmte in collectieve warmtesystemen, de zogenaamde warmtenetten. Opvallend aan de Nederlandse warmtetransitie is dat aardgas in Nederland niet als duurzame warmtebron wordt beschouwd, terwijl het wereldwijd wel als duurzame(re) warmtebron gezien wordt.

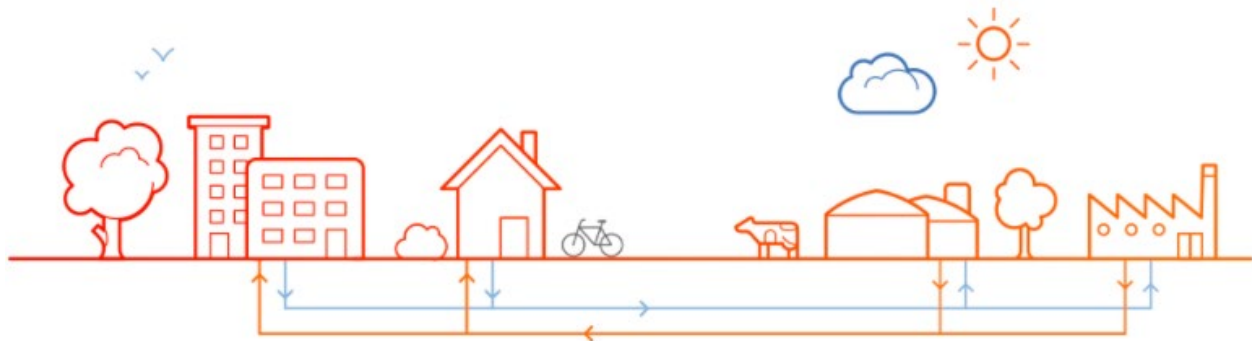
Regelgeving vanuit overheden kan als een grote stimulans werken op de ontwikkeling van warmtenetten (Lake et al., 2017). Het stimuleren van de aanleg en het gebruik van warmtenetten krijgt in Nederland vanuit de overheid meer aandacht door de Wet collectieve warmtevoorziening (ook wel Warmtewet 2); een uitbreiding op de huidige Warmtewet. Deze warmtewet 2 treedt waarschijnlijk in 2023 in werking. Naast het 'het mogelijk maken van groei van collectieve warmtesystemen door nieuwe spelregels' heeft de Warmtewet 2 nog de volgende doelen:

- Het zeker stellen van de verduurzaming, waardoor de zoektocht naar duurzame warmtebronnen voor warmtenetten belangrijk is voor de stakeholders in beleid en uitvoering. De verduurzaming wordt gegarandeerd door in de nieuwe Warmtewet normen op te stellen voor de CO₂-uitstoot van warmtebronnen (Rus - van der Velde, 2021).
- Het aanscherpen van de vereisten voor leveringszekerheid, dit is van belang voor levering van warmte in de toekomst.
- Meer transparantie in de kosten voor de afnemer. Dit punt valt buiten de scope van deze studie.

Om de relatie tussen ons project en deze doelstellingen van de warmtewet duidelijk te maken (zowel de groei van collectieve warmtenetten als het zekerstellen van verduurzaming van de warmtebronnen), definiëren we eerst wat precies verstaan wordt onder de term "warmtenet" en het zekerstellen van de verduurzaming.

1.2. Warmtenet en warmtebronnen

Een collectief warmtesysteem, oftewel een warmtenet, kan eenvoudig uitgelegd worden als de verbinding tussen een warmtebron en een warmteafnemer (Figuur 1-2). De warmte die vrijkomt bij de warmtebron (Figuur 1-2: industrie en biogas/biomassa aan de rechterkant) wordt door de afnemer gebruikt bij het verwarmen van bijvoorbeeld een woning of een kantoor. Op de plekken waar warmte wordt afgegeven, kan koude worden opgenomen. Op deze manier kan een warmtenet zowel verwarmen als verkoelen en spreken we van een warmte-koudenet. In dit rapport richten we ons verder op warmtenetten en laten we warmte-koudenetten achterwege.



Figuur 1-2. Schematische weergave van een gesloten warmtenet: bestaande uit (in rood) de warmteafnemers (pijl omhoog), (in rood) warmtebronnen (pijl omlaag) en (in oranje) de warmtestroom die bron met afnemer verbindt. De blauwe pijl geeft de afgekoelde stroom weer die teruggeleid wordt naar de warmtebron om opnieuw opgewarmd te worden. Naar bron: Ennatuurlijk (2021a).

De collectieve warmtenetten waar in de nieuwe Warmtewet naar verwezen wordt, zijn een verbinding tussen één of meerdere warmtebronnen en meerdere afnemers, bijvoorbeeld een woonwijk. Dit systeem is vergelijkbaar met de reeds bestaande stadsverwarming (Ennatuurlijk, 2021c). Het begrip warmtenet lijkt de laatste jaren echter vaker te worden gebruikt en wordt doorgaans gelinkt aan duurzame(re) warmtebronnen. Elk warmtenet is maatwerk door de unieke combinaties van geografische eigenschappen van de regio, verschil in warmtevraag en beschikbare warmtebronnen.

Warmtebronnen

RVO (2021b) brengt naast aardgasverbranding ook de volgende warmtebronnen in Nederland in kaart: verbranding van biogas en biomassa, geothermie (aardwarmte), aquathermie (warmte uit oppervlaktewater, afvalwater of drinkwater) en het gebruik van restwarmte uit de industrie. Naast deze typen warmtebronnen worden in de literatuur ook waterstof en zonne-energie beschreven als potentiële warmtebron (Hadian & Madani, 2015). Voor warmteleveranciers is het nog niet mogelijk om een afgewogen, duurzame keuze te maken als het om warmtebronnen gaat. Een compleet overzicht van de duurzaamheid van de verschillende bronnen is er niet.

Voor ons onderzoek hebben we geothermie, aquathermie en restwarmte uit industrie gekozen om verder te onderzoeken. Deze keuze is op literatuur gebaseerd. Lake et al. (2017) zetten in een studie naar de implementatie van warmtenetten verschillende warmtebronnen tegen elkaar af. De voor- en nadelen van geothermie, biogas, restwarmte, afvalverbranding, fossiele brandstoffen en zonne-energie worden opgesomd, waarbij voor Europese gebieden geothermie en restwarmte een duurzame beoordeling krijgen. In zijn studie naar warmte- en koudesystemen voor verschillende Mediterrane klimaten noemt Calise (2012) de verbranding van waterstof. Vanuit duurzaamheidsoogpunt geeft hij aan dat de productie van waterstof veel energie kost. Om deze energie op te wekken kan zonne- en windenergie gebruikt worden. Het verwarmen van een woonwijk zou echter zoveel waterstof kosten, dat het financieel niet aantrekkelijk is om daarvoor zonne- of windparken aan te leggen. Een groot nadeel van zonne-energie als individuele warmtebron is dat de warmteopbrengst in de winter terugloopt door het afnemend aantal zonuren (Calise, 2012), terwijl de warmtevraag in de winter juist toeneemt. Overproductie in combinatie met opslag van warmte in de zomermaanden kan een oplossing zijn voor deze mismatch tussen vraag en aanbod, ook kan met andere warmtebronnen bijverwarmd worden. Tabel 1.1 geeft de verschillende warmtebronnen met bijbehorende temperatuur weer. Calise (2012) concludeert dat geothermie,

aquathermie en restwarmte uit de industrie daardoor op korte termijn een logischere keuze lijken, wat onze keuze van warmtebronnen voor dit onderzoek sterkt.

Verwarmen door middel van geothermie gebeurt door warm water dat diep - soms tot 7 kilometer diepte - in de aarde zit omhoog te pompen en in een netwerk naar de afnemers te sturen. Het afgekoelde water wordt weer naar dezelfde diepte teruggebracht, zodat het opnieuw kan opwarmen. Geothermie wordt al jaren wereldwijd in warmtenetten gebruikt, waardoor er al veel bekend is over de effectiviteit van deze warmtebron (Naicker & Rees, 2018). In theorie is het potentieel van geothermie groot, aangezien overal onder het aardoppervlak warmte voorkomt. Er zijn diverse vormen van geothermie, afhankelijk van de diepte waarop warm water gewonnen wordt. Ondiepe geothermie, ook wel bodem energie genoemd, wordt gewonnen op minder dan 500 meter, met een stijging van de bodemtemperatuur van 30°C per 1 km daling komt dit op een temperatuur van maximaal 15°C. Daarnaast is er de conventionele geothermie van 2,5 km tot 4 km diepte en ultra diepe geothermie, dieper dan 4 km (Geothermie Nederland, 2020).

In het geval van aquathermie wordt ook gebruik gemaakt van de warmte die in water zit. Het verschil met geothermie is dat dit water niet diep uit de aarde opgepompt wordt, maar dat de warmte uit oppervlaktewater (TEO), afvalwater (TEA) of drinkwater (TED) gebruikt wordt. Net als geothermie heeft aquathermie een grote potentie, door de grote hoeveelheid water die zowel in Nederland als wereldwijd beschikbaar is. De potentiële warmte uit oppervlaktewater in Nederland wordt voor 2050 geschat op ruim 43% van de benodigde warmte (Kruit et al., 2018). Voor het omzetten van de thermische energie uit water is een warmtewisselaar zodat de warmte uit het water naar het gesloten systeem van het warmtenet wordt omgezet. Vervolgens kan door een warmtepomp het water opgewaardeerd worden als dat nodig is. De warmte van oppervlaktewater is bruikbaar tussen 4°C en 20 °C en varieert afhankelijk van seizoen en type waterlichaam. De temperatuur van afvalwater (rioolwater) en drinkwater zijn redelijk constant rond 10°C (H2O, 2020).

Een bron van warmte die al sinds de industriële revolutie op grote schaal beschikbaar is, is de restwarmte uit de industrie. Bij industriële processen komt veel warmte vrij, die vaak via schoorsteenpijpen in de lucht verdwijnt. Vanwege hoge temperatuurniveaus en ruime beschikbaarheid is deze restwarmte zeer geschikt om met behulp van een warmtenet nabijgelegen woonwijken van warmte te voorzien (Expertise Centrum Warmte, 2021). Naast industriële restwarmte wordt ook restwarmte uit datacentra een belangrijke warmtebron (Huang et al., 2020).

Tabel 1.1. Classificering van de gemiddelde warmtebrontemperaturen classificering: zeer lage-temperatuur (ZLT), lage-temperatuur (LT), midden temperatuur (MT) of hoge-temperatuur (HT).

Warmtebron	Typering	T _{bron} (°C) gemiddeld	Indeling	Literatuurbron
Geothermie	Bodemenergie (<500 m)	12	ZLT/LT/MT	(EBN, 2018)
	Aardwarmte (500m-4km)	70	MT/HT	(EBN, 2018)
	Ultradiepe geothermie (>4km)	120	HT	(EBN, 2018)
Aquathermie	Oppervlaktewater (TEO)	15	ZLT/LT	(STOWA/Rioned, 2021)
	Afvalwater (TEA)	17	ZLT/LT	(STOWA/Rioned, 2021)
	Drinkwater (TED)	10	ZLT/LT	(STOWA/Rioned, 2021)
Restwarmte	Industrie	20-90	LT/MT/HT	(van Leeuwen et al., 2017)
	Datacenter	25-90	LT/MT/HT	(Huang et al., 2020)
CV-ketel	HR 107	60-90	MT/HT	(Milieu Centraal, 2022)

Uit een recent uitgebrachte whitepaper van TNO-EBN (2021) blijkt dat warmteopslag interessant is voor warmte uit geothermie, aquathermie en restwarmte uit industrie. Ook seizoensgebonden warmtebronnen kunnen hiervan gebruik maken, zodat de overproductie in de zomer wordt opgeslagen en gebruikt in de winter. Naast de bij geothermie genoemde warmteopslag in de bodem – ook wel warmte-koude opslag (WKO) of Aquifer Storage genoemd - zijn er andere warmteopslag mogelijkheden, zoals in buffertanks (Tank Storage), kuilopslag (Pit Storage) en opslag in boorgaten (Borehole Storage). De keuze voor type opslag is afhankelijk van de benodigde capaciteit en omgevingsmogelijkheden (Mahon et al., 2022).

Stakeholders

De keten van de warmtebron tot de afnemers loopt via meerdere stakeholders. Dit zijn warmtebedrijven, die daadwerkelijk warmte leveren. Warmteleveranciers hebben een afspraak met de afnemer over de warmtelevering. De kan een energieleverancier zijn, maar ook een warmtebedrijf of een gemeente. Aan het eind van de keten staan de warmteafnemers: bewoners van huizen of flatgebouwen, (agrarische) bedrijven, industrie of andere gebouwen met gebruiksfunctie zoals scholen of ziekenhuizen. Daarnaast zijn netbeheerders, waterschappen, drinkwaterbedrijven, gemeentes, RES-regio en provincie ook stakeholders. Natuurorganisaties en lokale instanties kunnen een rol spelen, en omwonenden die niet direct zelf de afnemers zijn, dit hangt samen met de omgeving van de warmtebron.

1.3. Toetsen van Duurzaamheid

De overstap van een fossiele brandstof als aardgas naar een andere warmtebron kan een duurzame ontwikkeling lijken, maar het toetsen van duurzaamheid van deze warmtebronnen is een belangrijke stap die genomen moet worden. Het formuleren en bundelen van verschillende duurzaamheidscriteria maakt het voor warmteleveranciers eenvoudiger om het huidige verwarmen via aardgas te vergelijken met andere warmtebronnen en mogelijke negatieve gevolgen in beeld te brengen.

Green versus green dilemma

Met de energietransitie is een negatief effect, een onverwachte tegenstrijdigheid, ontstaan die in de literatuur beschreven wordt als de 'green versus green dilemma' (Johnson & Stephens, 2011; Straka et al., 2020; Voigt et al., 2019). De drie studies bespreken allemaal de gevolgen van het bouwen van windturbines op de biodiversiteit. Zo is bekend dat veel vogels en vleermuizen sterven doordat ze in aanraking komen met de turbines. De vraag die daarbij gesteld kan worden is of de positieve kant van de windenergie opweegt tegen het verlies van individuele dieren met mogelijk een achteruitgang in de biodiversiteit binnen een ecosysteem tot gevolg. Flora en fauna binnen een ecosysteem hebben altijd een bepaalde relatie tot elkaar, bijvoorbeeld eten of gegeten worden. Deze voedselketen begint bij de producenten, meestal de flora, die gegeten wordt door planteneters, de eerste consumenten. Deze planteneters worden op hun beurt weer gegeten door carnivoren, de secundaire consumenten. Uitwerpselen worden door micro-organismen weer omgezet in nutriënten voor de producenten. Zelfs het verdwijnen van kleine, op het eerste oog onbelangrijke soorten kan uiteindelijk de keten laten instorten (Dobson et al., 2006). Door het gebruik van warmtebronnen voor warmtenetten kan eenzelfde green versus green dilemma als voor windenergie beschreven is ontstaan. Gezonde ecosystemen zijn altijd in balans, dat wil zeggen: er zijn altijd schommelingen in de biotische en abiotische omstandigheden, maar er wordt altijd een evenwicht gezocht. Schommelingen kunnen ontstaan door veranderende omstandigheden als overstromingen, een vulkaanuitbarsting, maar ook door bijvoorbeeld het toetreden of wegvallen van een toppredator binnen een ecosysteem. Het ecosysteem is in zo'n geval een bepaalde periode in onbalans, maar na verloop van tijd zal het weer herstellen richting een evenwicht (Dunne et al., 2002). Antropogene invloeden, door de mens veroorzaakt, zorgen meer en meer voor onbalans binnen ecosystemen. Wanneer er teveel negatieve effecten optreden kan een drempelwaarde worden bereikt, waarna een ecosysteem niet meer kan herstellen en ineens stort (Scheffer et al., 2001). Wanneer deze drempelwaarde overschreden wordt is de kans groot dat aanwezige flora en fauna (lokaal) niet kan overleven.

Door een duurzame bron te kiezen kan door middel van het warmtenet een grote hoeveelheid afnemers op een duurzame manier van warmte worden voorzien. Het begrip 'duurzaam' is voor warmtebronnen echter lastig te definiëren. Wanneer we kijken naar het Nederlandse Klimaatakkoord en de nieuwe

Warmtewet is 'de uitstoot van CO₂' een belangrijk duurzaamheidsaspect. Toch zijn er meer aspecten te benoemen waaraan een warmtebron op duurzaamheid te toetsen is.

Duurzaamheid

Het begrip duurzaamheid kan op verschillende manieren worden gebruikt. Een gangbare definitie van duurzame ontwikkeling, afkomstig uit het Brundtland-rapport (Brundtland, 1987) is "een ontwikkeling die tegemoetkomt aan de levensbehoeften van de huidige generatie, zonder die van de toekomstige generaties tekort te doen". In deze context is dit vergelijkbaar met het Engelse sustainability (niet te verwarren met durability - hoe lang gaat een product mee). De duurzaamheid van warmtebronnen wordt beschouwd vanuit de duurzaamheidsprincipes met gevolgen voor: ecologie, de mens, de beschikbaarheid en welzijn en welvaart.

In diverse duurzaamheidsonderzoeken, zoals van Hadian and Madani (2015) en Berjawi et al. (2021), komen de naast CO₂ -uitstoot ook de duurzaamheidsaspecten: waterverbruik, landgebruik, draagvlak voor de warmtetransitie, levenscyclus van warmteproductie en leveringszekerheid van warmte naar voren. Sociale factoren, economische factoren en het milieu worden gezien als de drie pijlers van duurzaamheid (Chen et al., 2020) en (Dincer, 2021). In ons onderzoek sluiten we aan bij algemeen in de literatuur gehanteerde aspecten van duurzaamheid van energie- en warmteproductie. Deze aspecten zijn vaak terug te vinden in zogenaamde Sustainability Assessments, ofwel duurzaamheidsonderzoeken.

Duurzaamheidsaspecten

Een mogelijkheid is om naast de in de nieuwe Warmtewet genoemde CO₂-uitstoot andere uitstoot uit de warmtebronnen te beschouwen. Naast CO₂ kan er bij verbranding van een brandstof, bijvoorbeeld aardgas of biogas, fijnstof vrijkomen. Fijnstof is een verzamelnaam voor minuscule vaste deeltjes die door de lucht kunnen zweven en schadelijk voor de gezondheid kunnen zijn (WHO, 2021a). Voor inwoners die in de omgeving van een warmtebron wonen die fijnstof uitstoot, is deze warmtebron mogelijk minder duurzaam dan een alternatief dat geen fijnstof uitstoot. De vraag is in welke mate de uitstoot van CO₂ en fijnstof per warmtebron verschilt en of er wellicht nog andere, relevante vormen van uitstoot optreden bij het gebruik van geothermie, aquathermie en restwarmte uit industrie.

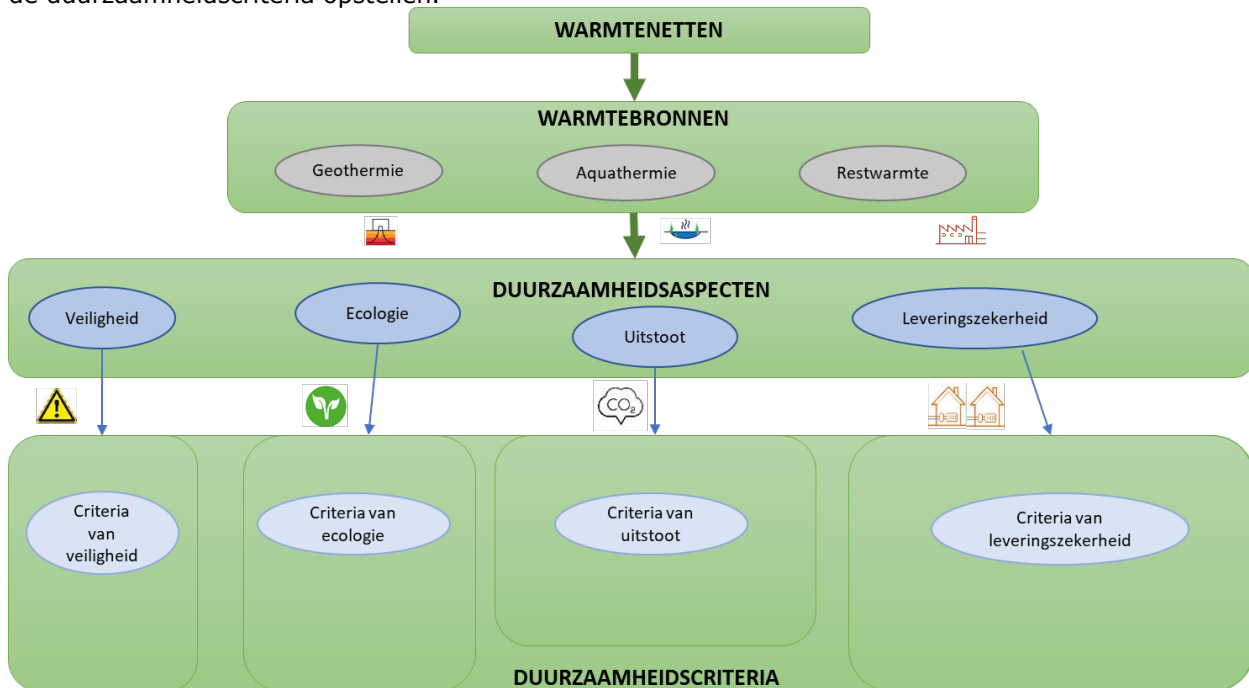
Naast duurzaamheidsaspecten die gebaseerd zijn op de gevolgen voor de mens, zoals uitstoot naar de omgeving van CO₂ en fijnstof, kunnen er ook duurzaamheidsaspecten opgesteld worden voor de gevolgen voor ecologie. Geothermie en aquathermie veranderen de temperatuur van het water in de omgeving van de warmtebron. Lokale gevolgen van deze temperatuurveranderingen voor vispopulaties zijn nog maar weinig onderzocht. Daarnaast treedt er mogelijk vervuiling op van de grond en het oppervlaktewater, als gevolg van het gebruik van warmtebronnen. Deze vervuiling kan een negatieve ecologische effecten hebben op ecosystemen en de biodiversiteit (Li et al., 2017). De vraag is welke andere ecologische duurzaamheidscriteria relevant kunnen zijn bij het gebruik van geothermie, aquathermie en restwarmte uit industrie.

Een derde mogelijkheid is om naar leveringszekerheid te kijken als duurzaamheidsaspect. Ten slotte moet een warmtenet ook op langere termijn stabiel warmte kunnen leveren om duurzaam te zijn (Brundtland, 1987). De warmte van geothermie en aquathermie lijkt oneindig voorradig te zijn, maar ook de installaties die nodig zijn om deze warmte te gebruiken hebben een bepaalde levensduur. (Babiarz & Blokus, 2020) beschrijven daarnaast in zijn studie naar leveringszekerheid van warmtebronnen dat er tijdens de verschillende jaargetijden grote verschillen in vraag en aanbod kunnen optreden. De vraag is of deze variaties ook effect hebben op geothermie, aquathermie en restwarmte uit industrie en welke andere factoren de leveringszekerheid kunnen beïnvloeden.

Vanuit het duurzaamheidsprincipe welzijn en welvaart is onderzoek naar het duurzaamheidsaspect veiligheid van de warmtebron ook van belang. Dit betreft zowel de veiligheid voor de mens (CO₂-uitstoot, fijnstof en leveringszekerheid) als de veiligheid voor ecosystemen en biodiversiteit. In de praktijk zijn al op meerdere plekken projecten met nieuwe warmtebronnen afgeblazen vanwege verschillende veiligheidsrisico's. Dit is voor de initiatiefnemers een grote financiële tegenvaller, maar kan ook het aanbod van warmte in een bepaalde regio beperken.

Met deze achtergrond is de opdracht voor het onderzoeken naar duurzaamheid van warmtebronnen voor de opdrachtgever Ennatuurlijk gesplitst in drie deelonderzoeken op basis van de

duurzaamheidsaspecten: ecologie, uitstoot en leveringszekerheid. Het kader van het gehele onderzoek is weergegeven in Figuur 1-3. De drie deelonderzoeken zullen de drie warmtebronnen: geothermie, aquathermie en restwarmte – grijs in de figuur – beoordelen op een duurzaamheidsaspect en hiervoor de duurzaamheidscriteria opstellen.



Figuur 1-3. Projectkader van duurzaamheidsonderzoek van warmtenetten. Voor alle warmtebronnen (grijze ovalen) worden voor de vier duurzaamheidsaspecten: veiligheid, ecologie, uitstoot en leveringszekerheid (blauwe ovalen) de duurzaamheidscriteria (lichtblauwe ovalen) opgesteld.

1.4. Vraagstelling en doelstelling

In dit onderzoek stellen we duurzaamheidscriteria voor warmtebronnen van warmtenetten op, die het inzicht in de duurzaamheid van deze warmtebronnen vergroten. Het onderzoek draagt bij aan de kennis van warmtebedrijven, zodat warmtebedrijven een gefundeerde duurzaamheidskeuze kunnen maken bij het aanleggen van nieuwe en het verduurzamen van bestaande warmtenetten. Hierbij maken we gebruik van wetenschappelijke literatuur en openbare documenten.

De Doelstelling is een op literatuur gebaseerde tool (raamwerk in Excel) te ontwerpen waarmee de duurzaamheid van de warmtebronnen voor warmtenetten getoetst kan worden voor de typische situatie in Nederland, en geschikt is om de uniciteit van een warmtenet-regio te ondervangen.

Milieuwetenschappelijke vraagstelling:

Op welke wijze kan de duurzaamheid van de warmtebronnen voor huidige en toekomstige warmtenetten getoetst worden? En wat betekent de uitkomst van deze toetsing voor de verduurzaming van de warmtebronnen in de warmtenet-regio?

Deelvragen:

- Welke duurzaamheidscriteria kunnen met betrekking tot ecologie, uitstoot en leveringszekerheid voor warmtebronnen worden opgesteld om (potentiële) warmtebronnen als duurzaam te kwalificeren?
- Welke aanbeveling kan er gegeven worden gericht op verduurzaming van een warmtenet op basis van de getoetste duurzaamheid van de reeds gebruikte of toekomstige warmtebronnen in vergelijking tot de warmtevraag in warmtenet-regio's?

2. Methode

2.1. Systematisch literatuuronderzoek

Om het eerste deel van de onderzoeksvraag te beantwoorden heeft het team een Systematic Literature Review (SLR) uitgevoerd (Gerlak, 2017). De literatuuurdatabase van Web of Science (WoS) en ScienceDirect (SD) zijn gebruikt om relevante peer-reviewed artikelen te selecteren. Deze databases bevatten veel informatie over warmtenetten, warmtebronnen en duurzaamheidscriteria en bijkomende natuurwetenschappelijke artikelen. Naast de algemene zoektermen in Tabel 2.1 werden extra zoektermen gebruikt voor het verzamelen van extra literatuur over specifieke deelonderwerpen.

Naast WoS en SD is Google Scholar gebruikt voor de zogenaamde 'grijze' literatuur, voor de analyse van de case studies naar de warmtenet-regio's en extra relevante informatie. Zowel Nederlands- als Engelstalige artikelen dragen bij aan het onderzoek, om nationale en internationale kennis te verkrijgen. Om de nieuwste beschikbare kennis te garanderen en een restrictie te leggen op het aantal artikelen, zijn artikelen gebruikt die zijn uitgebracht vanaf 2010. De richtlijn was vijf tot tien literatuurbronnen per duurzaamheidsaspect te vinden.

Tabel 2.1. Algemene zoektermen die zijn gebruikt in het literatuuronderzoek

Nederlands	Engels
Warmtenet	District heating
Ecologie	Ecology, ecosystems
CO ₂ uitstoot	CO ₂ emission
Leveringszekerheid	Energy or heat supply security
Duurzaamheid	Sustainability
Duurzame warmtebron	Sustainable heating source
Veiligheid	Safety, security
Hernieuwbare energie	Renewable energy
Warmte aanbod	Heat supply
Restwarmte	Waste heat, residual heat
Geothermie	Geothermal

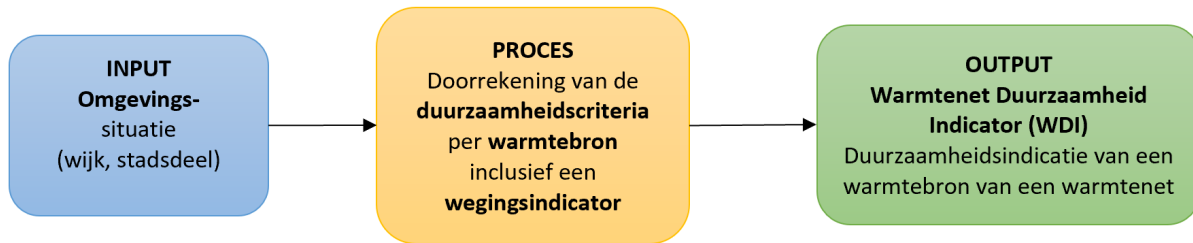
Extern experts

Om de duurzaamheidscriteria te kunnen beoordelen en wegen is een vragenlijst opgesteld per warmtebron en uitgestuurd naar drie experts van de warmtebronnen: geothermie, aquathermie en restwarmte, waarbij het veiligheidsaspect ook in de vragenlijsten is opgenomen. Deze vragenlijst is opgenomen als bijlage A. De vragenlijst bestaat uit open en gesloten vragen om enerzijds de informatie van criteria per warmtebronnen te kunnen vergelijken en anderzijds extra inzichten van de experts te krijgen. Er zijn drie vragenlijsten uitgegeven, voor elke expert één voor de eigen warmtebron. Alle drie de vragenlijsten zijn beantwoord terugontvangen. De informatie van de experts is meegenomen in het Decision Support System.

2.2. Ontwerp van het Decision support system

Om een warmtenet te kunnen beoordelen op duurzaamheid, worden de duurzaamheidscriteria gebruikt voor het ontwerp van een Decision Support System (DSS). Het DSS is opgesteld in Excel, zodanig dat de warmtebronnen getoetst worden op duurzaamheid voor de verschillende duurzaamheidsaspecten (ecologie, uitstoot, leveringszekerheid en veiligheid). Hiermee kan een antwoord op de tweede deelvraag gegeven worden. Er is een wegingsfactor meegenomen om de criteria van de vier duurzaamheidsaspecten evenredig te kunnen vergelijken.

Het DSS krijgt input over een warmtebron in een omgevings situatie, waarna er door middel van een beoordeling van de duurzaamheidscriteria een warmtenet-duurzaamheidsindicatie als output verkregen wordt. Dit proces is in Figuur 2-1 schematisch weergegeven.



Figuur 2-1. Procesweergave van de werking van het Decision Support System voor het bepalen van de Warmtenet-Duurzaamheid Indicator (WDI), waarbij met de invoergegevens van een wijk door het DSS de duurzaamheidsbeoordeling plaatsvindt.

2.3. Casestudies

Om het laatste deel van de onderzoeksvraag te beantwoorden wordt het DSS getoetst op een (potentieel) warmtenet. In overleg met de opdrachtgever zijn drie warmtenet-regio's aangewezen die geschikt zijn voor het uitvoeren van een analyse, namelijk: Leeuwarden, Eindhoven-Helmond en Twente.

Het startpunt van onderzoek naar de warmtenet-regio's is het verzamelen van beschikbare data via de Transitievisie Warmte, de Regionale Energie Strategie regio (RES), Stichting Warmtenetwerk, regionale energiebedrijven en informatie van Ennatuurlijk. Deze data zal grotendeels een kwantitatief onderzoek zijn (Saunders, 2019). Voor een kwalitatief onderzoek gebruikt elk teamlid kennis van de regio door middel van regiobezoek of internet. Het kwantitatieve en kwalitatieve onderzoek wordt samen gezien als mixed onderzoeksmethode, zodat een realistisch beeld van de huidige situatie in de regio ontstaat (Saunders, 2019). Door het samenvoegen van de omgevingsituatie, duurzaamheidscriteria en warmtebronnen kan beoordeeld worden of er verbetering mogelijk is in het kader van verduurzaming van de warmtebronnen van warmtenetten. Het resultaat geeft een antwoord op de onderzoeksvraag.

Regio Leeuwarden

In Leeuwarden zijn momenteel twee warmtenetten. De bron van het ene warmtenet is een warmtekrachtkoppeling (WKK) in Camminghaburen voor de warmte in deze wijk met 1.800 huishoudens en 4 bedrijven. In Zuidlanden is biogas van de koeien van Dairy Campus de bron van het warmtenet voor verwarming van 750 huishoudens (Ennatuurlijk, 2021b). Leeuwarden werkt hard aan het gebruik van geothermie in de toekomst. Het warmtenet in Camminghaburen wordt momenteel nog voor 100% verwarmt door middel van aardgasverbranding, wat een goede mogelijkheid op verduurzaming biedt.

Regio Eindhoven/Helmond

In deze regio zijn meerdere warmtenetten in gebruik en is de thuisbasis van opdrachtgever Ennatuurlijk. Dit gebied valt onder de energieregio Eindhoven (RES Metropoolregio Eindhoven, 2021).

Omdat in Helmond het grootste deel van de huizen verwarmd wordt met aardgas, en ook het warmtenet op een niet-duurzame bron is aangesloten, is gekozen voor het toetsen van een warmtebron in deze woonplaats. Het warmtenet is aangesloten op een warmtekrachtcentrale, waarvan 96% van de warmte is afkomstig van 2 stoom- en gasturbines (STEG's). De overige 4% van een gasgestookte piek- en backup-ketel. Het plan is om dit warmtenet te verduurzamen (Ennatuurlijk, 2021b).

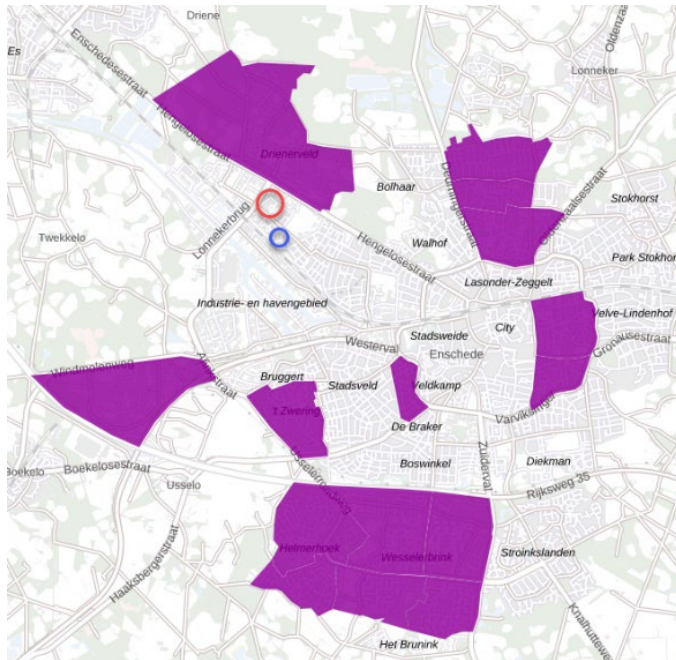
Twee mogelijke toekomstige warmtebronnen worden genoemd: de Zuid-Willemsvaart als aquathermiebron (oppervlaktewater, TEO) die Noord-Zuid langs de stad loopt, en een rioolwaterzuiveringsinstallatie (RWZI) in het Noorden van de stad als aquathermiebron (afvalwater, TEA). Deze RWZI is gekozen als warmtebron voor de casestudie, in combinatie met de direct zuidelijk gelegen wijk, De Eeuwseis.



Figuur 2-2. Situatieschets van de rioolwaterzuiveringsinstallatie en de nabijgelegen woonwijk De Eeuwseis. Bron: (WarmingUp, 2022)

Regio Twente

In Enschede wordt 93% van de warmte afgenomen van een afval energiebedrijf dat warmte opwekt uit sloop- en afvalhout met een bio-energiecentrale en afvalverbrandingsinstallaties. Er wordt naast afvalverbranding en biomassa gebruik gemaakt van biogas, aardgas en restwarmte. Voor de toekomst wordt gekeken naar mogelijkheden voor het gebruik van geothermie en aquathermie. Ook doet men onderzoek naar het gebruik van e-boilers op zon en wind en afvangen van CO₂.



Voor de casestudie in de warmtenet-regio Twente wordt ingezoomd op de stad Enschede. Aangezien het paarse vlak in Figuur 2-3 al is aangesloten op een warmtenet, is het interessant te onderzoeken wat de verduurzaming mogelijkheden zijn voor de wijk Bruggenmors (rood omcirkeld) en een nieuwbouwwijk (blauw omcirkeld). In de buurt van deze wijken liggen diverse mogelijkheden, zoals een RWZI, het Twentekanaal voor aquathermie, een datacentrum en een ijsbaan die met het DSS onderzocht zullen worden.

Figuur 2-3. Plattegrond van de omgeving voor de casestudie in Twente. Er is ingezoomd op de wijk Bruggenmors uit 1930 (rood omcirkeld) en de nieuwbouwwijk uit 2019 (blauw omcirkeld). Het paarse vlak is reeds voorzien van een warmtenet. (Bron: EnergieAtlas (2021))

3. Resultaat: Literatuuronderzoek

In dit hoofdstuk worden de resultaten van het literatuuronderzoek besproken. De volgende paragrafen beschrijven de belangrijkste kenmerken van het effect van warmtenetten op ecologie, de uitstoot van warmtenetten en de leveringszekerheid van de warmtebronnen geothermie, aquathermie en restwarmte. De bevindingen in dit hoofdstuk leveren de basis voor het decision support system, beschreven in hoofdstuk 4.

3.1. Ecologische duurzaamheidscriteria

De ecologische criteria ter toetsing van duurzaamheid uit systematische literatuuranalyse worden achtereenvolgens beschreven voor geothermie, aquathermie en restwarmte. De reden hiervoor is dat de gevonden effecten telkens slechts gelden voor één van de drie warmtebronnen.

3.1.1. Geothermie

Temperatuurverschil

Temperatuurschommelingen binnen een ecosysteem zijn een natuurlijk fenomeen, bijvoorbeeld bij het dag-nacht ritme of in de verschillende seizoenen. Ecosystemen zijn hier op ingesteld en vinden hierin constant hun balans. Permanente antropogene temperatuurverschillen veroorzaakt door het gebruik van geothermische bronnen verstoren deze balans en zijn daarom belangrijk om in kaart te brengen.

Grondwatervoorraden die worden gebruikt voor drinkwaterproductie bevinden zich op dieptes tot zo'n 300 meter in de bodem. Het kan daarom voorkomen dat geothermische warmte onder zo'n grondwatervoorraad gewonnen wordt. Hierbij wordt er door de grondwatervoorraad geboord naar de juiste diepte, wat risico's als vervuiling met zich meebrengt (Algemene Rekenkamer, 2021). Daarnaast kunnen warmtenetten bij het oppompen van het water, warmte aan omliggend grondwater afgeven. Tissen et al. (2019) hebben de antropogene warmte bij warmtebronnen als ondergrondse parkeergarages, zwembaden en warmtenetten onderzocht. Bij de drie in de studie gebruikte warmtebronnen werd een gemiddelde toename van 4,2°C in het grondwater gemeten. Het meetpunt lag op 3,5 meter afstand van de warmtebron. Benz et al. (2015) laten in een soortgelijk onderzoek eenzelfde resultaat zien. In hun studie naar antropogene warmtebronnen in de steden Karlsruhe en Keulen meten zij een antropogene warmte toename van 60W/m² veroorzaakt door warmtenetten. Wanneer een geothermische warmtebron jarenlang dag en nacht warmte oppompt, kan dat een grote warmtetoename in het grondwater temperatuur met zich meebrengen.

In zijn studie naar de gevolgen van de opwarming van de aarde laat Riedel (2019) zien dat een temperatuurtoename van grondwater van 1K is gekoppeld aan een afname van 4% in zuurstofverzadiging en een pH-daling van 0,02 door ophoping van kooldioxide. Riedel (2019) concludeert dat deze veranderingen het voor de in het grondwater levende fauna lastig maken om zich aan te passen en te overleven. Een snellere en grotere temperatuursverandering door het gebruik van geothermie kan de grondwatervoorraden sneller onleefbaar maken. De opwarming van water door geothermie is niet als criterium in het DSS toegevoegd omdat de effecten moeilijk te kwantificeren zijn. Indirect zijn de gevolgen van temperatuurverschil wel meegenomen onder het kopje verzilting.

Vienken et al. (2019) laten in hun driejarige monitoringsstudie zien dat het gebruik van geothermische warmte voor een warmtenet een effect kan hebben op de temperatuur van het geothermische bron. Voor een relatief kleine woonwijk van 50 aangesloten woningen tonen zij aan dat de temperatuur binnen deze thermische bron met 1,2°C kan dalen. Li et al. (2006) laten door middel van simulaties zien dat de geothermische bron na het gebruik van vijf jaar, waarbij alleen warmte wordt onttrokken, met 6°C kan afkoelen. Beide studies brengen geen ecologische effecten in beeld. Afkoeling van geothermiebronnen wordt daarom ook niet meegenomen in het DSS, maar grootschalig onderzoek om eventuele gevolgen van deze bronafkoeling in kaart brengen wordt geadviseerd.

Verzilting

van Lopik et al. (2015) laten in hun studie zien dat er bij een temperatuurverschil van 40°C tussen de geothermiebron en de omgeving interactie tussen de beide watersystemen kan ontstaan. Door de omhoogstuwende werking van de geothermiepomp wordt water in de omgeving 'meegezogen', waardoor

het zware, zoute water zich van onder in de aquifer naar boven verplaatst. Dit verschijnsel kan er voor zorgen dat het zoete water, mogelijk drinkwater, verzilt. Doordat de bestaande abiotische omstandigheden veranderen wordt de bestaande balans verstoord en kunnen negatieve ecologische effecten op voorkomende (micro) organismen optreden. Uit de simulaties die (van Lopik et al., 2015) hebben gedaan blijkt dat dit verschil sterker wordt naarmate het temperatuurverschil toeneemt. De simulaties hebben resultaten voor 30 jaar gebruik van de geothermiebron laten zien. Een totale verplaatsing van 3.150 tot 166.000kg zout laat zien dat dit effect serieus genomen moet worden. Nederlandse geothermie-systemen werken met temperaturen van 70°C (aardwarmte) tot boven de 120°C (ultradiepe geothermie), terwijl grondwatertemperatuur gemiddeld 15°C is. Het optreden van de beschreven verzilting is daarom zeer reëel. Verzilting is in het DSS meegenomen voor geothermie (aardwarmte en ultradiepe geothermie) omdat hierbij het temperatuurverschil tussen de geothermiebron en de omgeving meer dan 40°C is.

3.1.2. Aquathermie

Zowel voor TEA als TED zijn in de literatuur geen effecten beschreven. Dit is deels te verklaren doordat er met gesloten systemen gewerkt kan worden. Hierdoor worden geen schadelijke stoffen verplaatst of flora en fauna direct geschaad. Een andere oorzaak van de ontbrekende informatie is het feit dat deze technieken nog jong zijn en wereldwijd minimaal worden toegepast. Bij een open techniek variant van TEA wordt het afgekoelde water, net als bij TEO, geloosd wordt in het oppervlaktewater. De gevonden effecten met betrekking tot deze koudelozing in de volgende paragraaf gelden daarom voor zowel TEO als TEA.

Koudelozing

De eigenschappen van een waterlichaam bepalen de potentiële ecologische effecten. Elbersen et al. (2003) hebben de verschillende wateren in Nederland op eigenschappen geordend en ondergebracht in categorieën. Daarbij zijn onder andere het type waterlichaam, de stroomsnelheid en de diepte van belang. De indeling in categorieën is gebruikt door Kruitwagen et al. (2021) bij het maken van een handreiking, waarmee TEO systemen op potentiële ecologische effecten beoordeeld kunnen worden. In de handreiking wordt eerst uitgelegd hoe de koudepluim zich in verschillende waterlichamen gedraagt. Daarnaast hebben Kruitwagen et al. (2021) per categorie watertype een beoordelingskader gemaakt, waar een weging uit te filteren is. Een watertype als een stilstaand, ondiep meer heeft een grote kans op negatieve ecologische effecten dan een snelstromende brede rivier en wordt daarom strenger beoordeeld.

Blum et al. (2021) komen in hun studie naar gevolgen van en de wetgeving met betrekking tot warmte- en koudelozingen tot de conclusie dat er al enkele studies gedaan zijn naar de afkoelende werking op oppervlaktewater en omliggende grond bij het gebruik van TEO. De resultaten uit deze studies geven geen significant negatief effect. Hierbij moet worden opgemerkt dat het slechts om enkele, relatief kortlopende studies gaat. Een aanbeveling die Blum et al. (2021) daarom zelf doen is om langdurige onderzoeken naar de mogelijke effecten op het microbiële leven, de chemische veranderingen van het afgekoelde water en de functies van ecosystemen op te zetten.

Een minimale afname van temperatuur als gevolg van aquathermie in Zwitserse meren lijkt de ernst van koudelozingen af te zwakken. In zijn studie laten Gaudard et al. (2019) zien dat het gemiddelde temperatuurverschil in het Constance meer maar 0,05°C zakt en in het Zurich meer 0,60°C. In deze studie zijn echter alleen grote meren meegenomen, van meer dan 30 meter diepte en een waterinhoud van 20 miljoen m³. In Nederland voldoen alleen het IJsselmeer en het Markermeer aan deze eisen. De temperatuur toename voor Nederlandse meren bij aquathermie zal hoogstwaarschijnlijk hoger liggen.

Ondanks dat de bovenstaande studies geen significant negatieve effecten rapporteren, treedt er bij het afkoelen van oppervlaktewater wel degelijk een reactie op. Zo is het percentage zuurstof dat kan worden opgenomen hoger in koud water dan in warm water en het percentage koolstofdioxide juist lager (Kosten, 2011). Dit heeft effect op de plantengroei. Naast voldoende zonlicht is koolstofdioxide essentieel in de groei van planten. Bij een koolstofdioxide afname zal de groei minder snel gaan, waardoor er een mismatch kan ontstaan tussen de producenten en de eerste consumenten in de voedselketen. Ook is bekend dat de ontwikkeling van juveniele vissen in het voorjaar langzamer verloopt in koudere dan in warmere omstandigheden en dat er voor veel vissoorten een optimum is (Azaza et al., 2008; Legler et

al., 2010; Watanabe et al., 1993) en wordt ook door de experts onderkend. Dit optimum is door jarenlange evolutie en adaptatie ontstaan. De koudelozing die optreedt bij TEO en TEA veroorzaken kleine veranderingen in temperatuur en oplosbaarheid van het water. Zoals in paragraaf 1.3 is genoemd hebben ecosystemen een voedselketen, waarin alle organismen een plek vervullen van eten of gegeten worden. Wanneer de ontwikkeling van juveniele vissen door antropogene koudelozing in het voorjaar te ver achter blijft, kan een mismatch in de voedselketen ontstaan. Door de daling in de watertemperatuur te beperken wordt dit risico beperkt (Kruitwagen et al., 2021).

In een studie naar de temperatuurtolerantie van drie soorten waterpissebedden laat Mermillod-Blondin et al. (2013) zien dat er binnen het geslacht Proasellus (familie Asellidae) verschillende effecten optreden bij de drie soorten. Bij een temperatuurdaling van 10°C naar 7°C vertoonden twee soorten al enorme sterftcijfers: slechts 67% en 47% overleefden deze verandering. Een derde soort liet juist zien goed om te kunnen gaan met temperatuurschommelingen van 2°C tot 13°C: 90% overleefde. In Nederland komen ook enkele soorten uit de familie Aselidea en het Proasellus geslacht voor. Vergelijkbare verschillen in temperatuurtolerantie mogen verwacht worden bij de Nederlandse soorten.

Een positief effect van de koudelozingen zou het tegengaan van de opwarming van oppervlaktewater als gevolg van de klimaatverandering kunnen zijn. Nederland krijgt steeds meer te maken met invasieve exoten, die zich in het warmer wordende klimaat in Nederland thuis voelen. Het opnieuw afkoelen van het oppervlaktewater zou deze invasieve soorten wellicht kunnen afremmen in hun opmars. De effecten van de koudelozing zijn echter zeer lokaal, zodat een significant effect voor heel Nederland niet te verwachten is.

In het DSS is het criterium 'koudelozing' opgenomen, waarbij parameters van het betreffende waterlichaam ingevuld dienen te worden. Aan de hand van de beschrijvingen van Elbersen et al. (2003) en de beoordelingskaders per watertype van Kruitwagen et al. (2021) zijn in het DSS 18 verschillende watertypen in te vullen. Parameters die meegenomen worden zijn stroomsnelheid, gemiddelde diepte, breedte van het wateroppervlak en/of de oppervlakte van het waterlichaam.

Inzuigen van vissen

Het inzuigen van vissen bij het winnen van water uit een waterlichaam is een bekend risico bij het koelen van industriële processen en bij gemalen en wordt ook door de experts benoemd. Kerkum et al. (2004) hebben in hun rapport beschreven dat vislarven en juveniele vissen waarschijnlijk alleen worden aangezogen bij een stroomsnelheid groter dan drie keer de lichaamslengte (in cm/s). Voor een vis van 2cm zou dat een stroomsnelheid van 6cm/s betekenen. Andere studies beschrijven een maximale stroomsnelheid voor kleine vissen van maximaal 15cm/s (van der Wal et al., 2012) en Bruijs (2007) beschrijft een maximale stroomsnelheid van 7,5 – 15cm/s wanneer er gebruik gemaakt wordt van een Wedge-wire systeem, dat functioneert als een filter. De algemene regel die Bruijs (2007) hanteert is maximaal 30cm/s, zodat de meeste volwassen vissen kunnen ontkomen aan de stroming.

De kleinste, in Nederland veel voorkomende vissoorten zijn het vetje, de driedoornige stekelbaars (beide maximaal 8cm) en de tiendoornige stekelbaars (maximaal 7cm) (RAVON, 2021). Wanneer deze vissen opgezogen worden in een aquathermie installatie ligt het gevaar in het botsen met de buizen en er is een risico op verdrukking. Bruijs (2007) beschrijft vele technische oplossingen om het inzuigen en daarmee de vissterfte tegen te gaan. De eenvoudigste manier blijft echter om per inlaat met een zo laag mogelijke instroomsnelheid te werken. Dit kan gerealiseerd worden door een inlaat met een zo groot mogelijke diameter te gebruiken, of meerdere inlaten op verschillende plekken in het oppervlaktewater te plaatsen. In het DSS is de pompsnelheid van de aquathermie installatie als criterium meegenomen, met verschillende opties in pompsnelheid: 1-15cm/s voor de kleinste vissen, 15-30cm/s zodat middelgrote vissen nog kunnen ontkomen en bij >30cm/s zullen ook grote vissen worden ingezogen, wat als minst duurzaam wordt gescoord.

Monitoringsplan

CLO (2020) laat in een overzicht zien dat al het oppervlaktewater in Nederland matig tot slechte kwaliteit heeft. Negatieve effecten uit aquathermie projecten zullen de ecologische waarde alleen maar laten zakken. Harezlak (2021) bevestigt in een studie naar de ecologische effecten van koudelozingen zien dat er nog veel kennisleemten zijn. Het WATERbeheer en Regionale EnergieStrategieën (WARES)

programma, opgezet door de Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer (STOWA), moet hier verandering in brengen. Het doel van het WARES programma is het inzichtelijk maken van de plek die aquathermie, windmolens, zonnepanelen en energieopslag een plek kunnen krijgen in het huidige waterbeheer (STOWA, 2021). In 2020 verscheen een monitoringsplan om de ecologische effecten van TEO in beeld te brengen (Wortelboer & Harezlak, 2020). Langdurig en op grote schaal monitoren is de enige optie om de effecten van aquathermie daadwerkelijk in beeld te krijgen en om de kwaliteit van het oppervlaktewater niet verder te laten afnemen. In het DSS wordt bij het analyseren van een aquathermiebron het advies gegeven om langdurige monitoring van eventuele gevolgen te doen.

3.1.3. Restwarmte

Zowel in de literatuur als in de grijze literatuur zijn er geen ecologische effecten van het gebruik van warmtebronnen beschreven. Ook indirecte gevolgen zijn tijdens de literatuurstudie niet gevonden en de experts herkennen zich in dit beeld. Een mogelijke oorzaak hiervoor is uit het gesprek met de expert restwarmte van Ennatuurlijk duidelijk geworden. Ennatuurlijk legt een gesloten watersysteem aan, waarmee water van en naar de betreffende warmtebron stroomt. Het water wordt door de geproduceerde hogere temperatuur opgewarmd en naar de warmte afnemer verplaatst. Doordat gebruik gemaakt wordt van een gesloten systeem komen er geen schadelijke stoffen vrij, vindt geen opwarming of afkoeling van oppervlaktewater of bodem plaats en wordt eventuele vervuiling van de industrie ook niet verplaatst naar de warmte afnemer. Op het gebied van ecologie kan restwarmte worden beschouwd als een duurzame warmtebron en worden geen ecologische criteria meegenomen in het DSS.

3.2. Uitstoot

De uitstoot van warmtenetten wordt beschouwd voor de warmtebron zelf (geothermie, aquathermie, restwarmte en de CV-ketel als referentie) en het warmtenet (warmtetransport en eventuele opwaardering), waarbij het elektriciteitsgebruik apart wordt belicht.

3.2.1. Uitstoot bij de warmtebron

Geothermie

Bij het aanboren van diepere aardlagen kunnen verschillende stoffen in de bodem onbedoeld naar de oppervlakte komen, dit speelt niet bij bodemenergie (<500 m) maar wel bij aardwarmte en ultradiepe geothermie (Hellebrand et al., 2012). Of dit gebeurt en welke stoffen dat zijn hangt af van de samenstelling van de bodem en is niet goed te voorspellen. In Nederland gaat het voornamelijk om methaan en aardgas – dat in Nederland voor ca 81% uit methaan en 14% uit stikstof bestaat.

Bijvangst: methaan (CH₄) en aardgas

Dijkstra et al. (2020) vonden een significante hoeveelheid methaan in de bodem die kan vrijkomen bij het boren in lagen uit het Jura/Krijt-tijdperk en het Perm-tijdperk, terwijl de Carboon- en Tertiaire lagen vrijwel geen methaan bevatten. Omdat methaan een sterk broeikaseffect heeft dient dit afgevangen te worden. Deze bijvangst kan ten gunste van het warmtenet worden ingezet of afgefakkeld worden. In beide gevallen levert dit extra CO₂-uitstoot op. Het inzetten van de warmte is de meest duurzame optie, en levert 2,4 kg CO₂ per GJ warmte voor het Perm-tijdperk en 8,9 kg CO₂ per GJ warmte voor het Jura/Krijt-tijdperk, gerekend met de een emissiefactor die is aangepast op de samenstelling van het formatiegas (Dinkelman & Dijkstra, 2020).

H₂S

Uitstoot van waterstofsulfide - H₂S - wordt geassocieerd met geothermielocaties. Het kan in aangeboorde aardlagen zitten maar ook kan H₂S gevormd worden door microbiële processen in verschillende onderdelen van de geothermieput. In Nederland is tot nu toe nog geen H₂S gevonden in aangeboorde aardlagen, maar dat kan nog wel gebeuren en ook is er nog de mogelijkheid dat H₂S in de put wordt gevormd (Geothermie Nederland, 2021). H₂S heeft invloed op verschillende fysiologische processen in het lichaam: het wordt geassocieerd met ademhalingsproblemen en neurologische effecten, maar heeft mogelijk een positieve invloed op bepaalde hart- en vaatziekten. In onderzoeken naar de effecten op omwonenden van geothermie-locaties van Bates et al. (2002) in Nieuw-Zeeland en Bustaffa et al. (2020) in Italië, IJsland en Nieuw-Zeeland werd op alle locaties een verhoogde kans op ademhalingsproblemen gevonden. Maar uit beide onderzoeken komt ook naar voren dat het lastig is om de blootstelling vast te stellen, en om de rol van H₂S tussen een diversiteit van factoren terug te vinden.

CO₂, NO_x, SO_x en fijnstof

Gassen als CO₂, NO_x- en SO_x kunnen opgelost zitten in het bodemwater en vrijkomen bij de geothermieput. Deze broeikasgassen hebben gemeen dat ze bijdragen aan klimaatverandering door het broeikas-effect. Stikstofoxiden (NO en NO₂) kunnen ook luchtwegproblemen veroorzaken bij inademing, en zorgen voor verzuring door ophoping in de natuur (Beer et al., 2014). Als stoffen als NO_x en SO_x samenklonteren worden fijnstofdeeltjes gevormd; fijnstof (in het Engels: particulate matter, PM) is een verzamelnaam voor samengeklonterde moleculen. Er wordt onderscheid gemaakt tussen grotere deeltjes tot 10 micrometer (PM₁₀) en kleinere deeltjes tot 2.5 micrometer (PM_{2.5}). Blootstelling aan fijnstof kan tijdelijke en chronische longaandoeningen veroorzaken, en heeft een mogelijk negatieve impact op hart en bloedvaten (WHO, 2021b). Fijnstof kan vrijkomen in de omgeving van een geothermieput, maar tijdens de warmteproductiefase wordt dit aandeel verwaarloosbaar geacht (Bayer et al., 2013).

Aquathermie

De bronnen van aquathermie worden direct of indirect door de zon en de omgeving opgewarmd en zijn hernieuwbaar. De bronnen van aquathermie veroorzaken zelf geen uitstoot. De uitstoot gerelateerd is aan de warmtewinning en -levering bij aquathermie valt onder de uitstoot van het warmtenet (3.2.2). Als de warmte een bijproduct is van een waterzuivering, bijvoorbeeld bij een fabriek, dan kan dit ook beschouwd worden als restwarmte (Expertise Centrum Warmte, 2021). Maar warmtewinningstechnieken voor rioolwaterzuivering en afvalwaterzuivering (TAE) hebben meer gemeen met bijvoorbeeld thermische energie uit drinkwater (TED) en vallen onder aquathermie.

Restwarmte

Voor restwarmte wordt onderscheid gemaakt tussen restwarmte uit de industrie en restwarmte van datacenters. De uitstoot van de industrie, het bedrijf of datacenter zelf die de warmte levert wordt volgens de definitie van restwarmte uit de NTA 8800¹ (NEN, 2020) buiten beschouwing gelaten. Aftapwarmte van energiecentrales en afvalverbrandingsinstallaties vallen volgens deze definitie niet onder restwarmte, omdat er extra energie wordt gebruikt voor de productie van warmte (NP RES, 2020). De uitkoppeling (het aftappen van warmte op locatie) valt onder de uitstoot van het warmtenet.

Referentie: CV-ketel op aardgas

In dit onderzoek beschouwen we de ketel zelf, dus op de plaats van de warmteafnemer, als de locatie van de warmtebron. De CV-ketel stoot als gevolg van de verbranding van aardgas diverse gassen uit, waaronder CO₂. Dit gebeurt lokaal op elke plek waar een CV-ketel hangt, en wordt door een afvoerpijp naar buiten geleid. Doordat op dit moment zo'n 90% van de huishoudens een CV-ketel gebruikt ontstaat hierdoor een diffuse uitstoot van CO₂ en andere stoffen over een groot landoppervlak.

3.2.2. Uitstoot van het warmtenet

Deels wordt CO₂-uitstoot direct veroorzaakt door de verbranding van bijvoorbeeld aardgas, en deels wordt de CO₂-uitstoot indirect veroorzaakt door het gebruik van elektriciteit, bijvoorbeeld voor warmtepompen. De CO₂-uitstoot wordt dan bepaald door oorsprong van de gebruikte stroom.

Uitstoot door elektriciteitsgebruik

Warmtewinning en transport

Voor de winning van warmte wordt elektriciteit gebruikt. In het geval van restwarmte is dit voor de uitkoppeling, in geval van geothermie en aquathermie is dit voor het oppompen van water. Ook voor het transporteren van de warmte naar de afnemers en weer terug wordt elektriciteit gebruikt, dit valt onder de hulpenergie (Figuur 3-1). Ook de CV-ketel gebruikt hulpenergie in de vorm van elektriciteit.

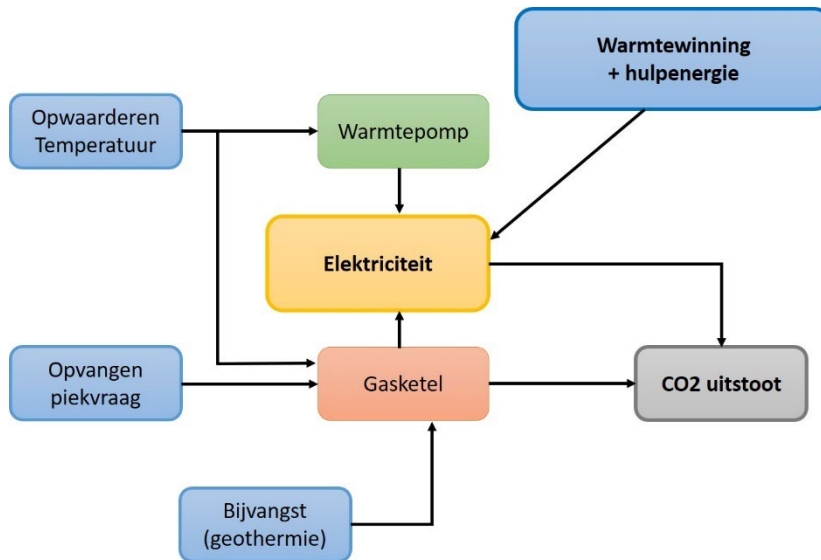
Warmtepompen

Warmtepompen worden gebruikt voor het verhogen van de temperatuur tot de gevraagde temperatuur, deze warmtepompen gebruiken elektriciteit. Het kan gaan om individuele warmtepompen die nodig zijn voor het opheffen van de temperatuur tot de gevraagde temperatuur van de afnemer, dit kunnen ook

¹ Restwarmte is de "Onvermijdelijke thermische energie die als bijproduct in industriële of bedrijfsmatige processen wordt opgewekt en die zonder verbinding met een warmtenet ongebruikt terecht zou komen in lucht of water".

centrale warmtepompen zijn die de temperatuur verhogen voor een (deel van) een wijk, of warmtepompen die dichterbij de bron geplaatst zijn, zoals bij warmte- en koudeopslag (WKO). De keuze voor soort warmtepomp en de plaatsing hiervan is maatwerk, en hangt onder andere af van de warmtebron, de omgeving en eigenschappen van de te verwarmen gebouwen.

De Coefficient of Performance (COP) drukt de efficiëntie van een warmtepomp uit. De COP wordt bepaald door de hoeveelheid geleverde warmte gedeeld door de hoeveelheid benodigde energie om die warmte te leveren. Omdat warmtebronnen zoals oppervlaktewater (aquathermie TEO) niet het gehele jaar door dezelfde temperatuur hebben, wordt vaak de SCOP gebruikt: de Seasonal-COP, waarbij de COP gemiddeld wordt over een jaar. De maximaal theoretisch haalbare COP voor een warmtepomp kan worden berekend met $COP_{max,theoretisch} = T_H / (T_H - T_C)$, waarbij T_H staat voor de warmte(vraag)-temperatuur en T_C voor de koude(bron)-temperatuur, met de temperaturen uitgedrukt in Kelvin.



Figuur 3-1. Oorsprong van CO₂-uitstoot in verschillende onderdelen van het warmtenet. Warmtewinning, transport en opwaarderen van de basistemperatuur dragen bij aan de uitstoot via het elektriciteitsgebruik. Verbranding van aardgas en formatiegas van de bijvangst (indien ingezet voor het warmtenet) in een gasketel zorgen voor CO₂-uitstoot als verbrandingsproduct.

Gasgebruik

Gasgestookte ketels kunnen nodig zijn voor het opvangen van de piekvraag in koude periodes, maar gasketels kunnen ook ingezet worden voor warmteopwaarding. Net als bij warmtepompen kunnen gasketels grotere ketels zijn die de warmte op een centraal punt opwaarderen, maar ook individuele ketels. Er zijn ook hybride warmtepompen met gas als back-up voorziening.

Opwaardering: temperatuurverschil vraag-aanbod

Als de warmtebron een lagere temperatuur levert dan de warmtevraag moet de warmte opgewaardeerd worden; hoe groter het temperatuurverschil, hoe meer energie nodig is om de warmte op te waarderen. Zoals hierboven is beschreven kan warmte met warmtepompen (elektriciteitsgebruik) of gas (aardgasgebruik) opgewaardeerd worden.

In de huidige situatie wordt voor de bestaande huizen doorgaans een temperatuur van 70 °C of hoger gevraagd. In Tabel 1.1 staat een overzicht van de warmtebronnen en de gemiddelde temperatuur (jaargemiddelde).

Als geothermie als enige bron in een warmtenet wordt ingezet, zal deze een hoog piekvermogen moeten hebben om ook de piekvraag op te vangen. Het is technisch beter is om de geothermie zo constant mogelijk te laten draaien; omdat een groot deel van de warmte in de zomer niet gebruikt wordt, is deze

bron het meest geschikt om als basis voor een warmtenet te dienen, waarbij de piekvraag wordt opgevangen door een andere bron (Dijkstra et al., 2020).

Warmteverliezen

Hoe meer warmteverlies in een warmtenet optreedt, hoe meer energie nodig is voor de warmte-opwaardering. Uit onderzoek van de International Energy Agency (Nussbaumer & Thalmann, 2014) naar 831 warmtenetten in 5 Europese landen blijkt dat warmteverliezen variëren tussen 5 en 40 %. De lineaire warmtedichtheid, de warmte per meter pijplengte, wordt genoemd als belangrijkste factor (Dijkstra et al., 2020; Papa et al., 2019). Het grootste deel van het verlies treedt op in de vertakkingen aan het eind van het net; de afstand tot de bron is minder van belang.

3.2.3. Uitstoot door het opwekken van elektriciteit

Naast CO₂ komen met het opwekken van "grijze" elektriciteit meer stoffen vrij. De belangrijkste zijn stikstofverbindingen (NO_x), zwavelverbindingen (SO_x) en fijnstof. Het effect van deze stoffen is beschreven in paragraaf 3.2.1. Als bekend is hoe de elektriciteit is opgewekt, kan bepaald worden hoeveel broeikasgas en fijnstof wordt uitgestoten. Hiervoor zijn standaardfactoren bekend. De uitstoot vindt plaats op de locatie van de elektriciteitscentrale.

Primaire Energie Factor (PEF) en duurzaamheid van elektriciteit

De uitstoot van de huidige elektriciteitsmix kan worden berekend aan de hand van de PEF van de elektriciteitsopwekking. PEF staat voor 'Primaire Energie Factor', en is de verhouding van de benodigde energie uit primaire energiebronnen (input) en de energie van de daaruit geproduceerde elektriciteit (output). Onder primaire energie wordt verstaan de energie uit fossiele bronnen zoals aardgas, kolen en olie. Hoe duurzamer de elektriciteitsmix, hoe lager de PEF en hoe lager de uitstoot. De verduurzaming van de elektriciteitsbranche volgens afspraken in het Klimaatakkoord zorgt ervoor dat de CO₂-uitstoot van het elektriciteitsgebruik de komende decennia gaat afnemen (Rijksoverheid, 2019). Volgens deze afspraken zal steeds meer gebruik gemaakt worden van duurzame bronnen, en zal de CO₂-uitstoot hierdoor afnemen met 50% in 2030, en 95% in 2050 ten opzichte van 1990. Dit betekent dat het aandeel elektriciteit van de warmtenetten bijna geen uitstoot meer veroorzaakt in 2050.

3.2.4. In de literatuur gebruikte duurzaamheidscriteria

Uit de literatuurstudie blijkt dat in veel internationale onderzoeken naar duurzaamheid van warmtelevering de CO₂-uitstoot centraal staat; in multicriteria analyses (MCA) is dit vaak het enige duurzaamheids criterium naast bijvoorbeeld financiële en sociale factoren. Voorbeelden hiervan zijn Ghafghazi et al. (2010), Kecebas (2013). In andere studies wordt de uitstoot van verschillende stoffen zoals CO₂, NO_x, SO₂ en fijnstof berekend aan de hand van het opwekken van elektriciteit, wat geen specifieke waarde geeft voor de warmtebron (bijvoorbeeld Chen et al., 2020; Rutz et al., 2019). Een ander duurzaamheids criterium dat wel beschouwd wordt is het watergebruik (Santin et al., 2020).

In nationaal verband wordt voor duurzaamheidsbepalingen de uitstoot van broeikasgas CO₂ vaak als standaardmaat gebruikt voor het effect op het klimaat. Klimaatdoelen en daaruit volgende maatregelen worden standaard uitgedrukt in het beperken van de CO₂-uitstoot. In het kader van de nieuwe Warmtewet is het warmteleveranciers verplicht te rapporteren over de duurzaamheid van de geleverde warmte (en koude). Hiervoor is een uniforme rekenmethode vastgesteld (Harmelink, 2020).

3.3. Leveringszekerheid

In deze paragraaf zijn de duurzaamheidscriteria van leveringszekerheid beschreven die uit het literatuur onderzoek en de interviews naar voren zijn gekomen. In eerste instantie worden de criteria vanuit de Nederlandse wetgeving beschreven (3.3.1). Vervolgens komen de algemene criteria, die niet warmtebron specifiek zijn aan de orde: diversiteit van warmtebronnen en importafhankelijkheid (3.3.2, 3.3.3). De specifieke duurzaamheidscriteria per warmtebron: temperatuur, capaciteit en levensduur van de bron, worden besproken in paragraaf 3.3.4, 3.3.5, 3.3.6.

3.3.1. Wettelijk eisen aan leveringszekering van warmte

Volgens de huidige Warmtewet (2013, Art. 12) moet de warmtelevering betrouwbaar en duurzaam zijn. Een warmtenet dat in de plaats komt van een gastransport-net moet een volwaardig alternatief zijn uit

het oogpunt van duurzaamheid, kosten en betrouwbaarheid. In de Warmteregeling (2013, Art 4-7) is vastgelegd wat het beleid is in geval van storingen van de levering. Ook is in de Warmteregeling (2013) vastgelegd dat de aflevertemperatuur (T_{aflever}) van de warmte aan de afnemer 70°C moet zijn. Voor de bandbreedte van de temperatuur worden geen waarden gegeven, waardoor het criterium temperatuur voldoet of niet. De classificatie is weergegeven in Tabel 3.1. De brontemperatuur (T_{bron}) wordt bij de warmtebronnen besproken.

Tabel 3.1. Classificatie van het duurzaamheids criterium temperatuur: als de temperatuur van de warmtebron hoger dan of gelijk is aan de gevraagde aflevertemperatuur, dan voldoet het criterium aan de norm (groen). Als de warmtebron temperatuur lager is dan gevraagde aflevertemperatuur, dan presteert het criterium onder de norm (rood).

Verskil tussen brontemperatuur (T_{bron}) en aflevertemperatuur (T_{aflever})	Classificatie	Leveringszekerheid
$T_{\text{bron}} \geq T_{\text{aflever}}$	Boven de norm	Ja, aflevertemperatuur voldoet aan de wet
$T_{\text{bron}} < T_{\text{aflever}}$	Onder de norm	Nee, er moet bijgestookt worden

De capaciteit van het warmtenet – het warmteaanbod (HS-heat supply) (in GJ/jaar) – moet aansluiten bij de warmtevraag (HD-heat demand) (in GJ/jaar). De classificatie is weergegeven in Tabel 3.2.

Tabel 3.2. Classificatie van het duurzaamheids criterium capaciteit: als warmteaanbod groter dan of gelijk is aan de warmtevraag, dan voldoet het criterium aan de norm (groen). Als het warmteaanbod lager is dan warmtevraag, dan presteert het criterium onder de norm (rood).

Verskil tussen warmteaanbod (HS) en warmtevraag (HD)	Classificatie	Leveringszekerheid
$HS \geq HD$	Boven de norm	Capaciteit van de warmtebron dekt de vraag af
$HS < HD$	Onder de norm	Capaciteit van de warmtebron is te laag

De temperatuur en capaciteit worden per warmtebron opgenomen als criteria voor het Decision Support System, waarbij steeds het verschil tussen vraag en aanbod de classificatie van het criterium weergeeft.

3.3.2. Diversiteit en alternatieve bronnen

Zivkovic and Ivezic (2021) melden in hun onderzoek naar warmtenetten in Servië dat diversiteit van warmtebronnen van belang is voor de leveringszekerheid van het warmtenet. Zivkovic and Ivezic (2021) gebruiken hiervoor de Shannon-Wiener diversiteits-index (H), waarbij de index een indicatie voor de robuustheid het systeem. Oorspronkelijk komt deze index uit de ecologie en wordt gebruikt als maat voor diversiteit van soorten (Lo, 2011).

$$H = - \sum_i p_i \ln p_i$$

Waarbij:

H = Shannon – Wiener index

p_i = het aandeel van warmtebron i , in het marktaandeel van leverancier i

In het geval van warmtenetten staat de index (H) voor de warmtebronnen: hoe meer warmtebronnen zijn aangesloten op het warmtenet, des te beter de leveringszekerheid.

De ontwikkeling van warmtenetten toont ook een groei aan diversiteit van warmtebronnen. Rond 1900 gebruikt de 1^e generatie warmtenetten een centrale warmtebron met een hoge temperatuur (200°C) uit restwarmte van stoommachines en kolenverbranding. Sinds 1980 is er een ontwikkeling in de warmtenetten, waarbij meer verschillende bronnen aangesloten zijn en de aanlevertemperatuur aanmerkelijk lager is. Bij deze 4^e en 5^e generatie warmtenetten zijn meer decentrale warmtebronnen in

één warmtenet mogelijk en wordt een extra slag gemaakt in de leveringszekerheid van een warmtenet (Lund et al., 2021a). Een overzicht van deze ontwikkeling is weergegeven in Figuur 3-2.

De diversiteit wordt in het Decision Support System meegenomen in de vorm van de warmtebronnen: geothermie, aquathermie en restwarmte, zodat het is mogelijk een 5^e generatie warmtenet te beoordelen met diverse warmtebronnen.

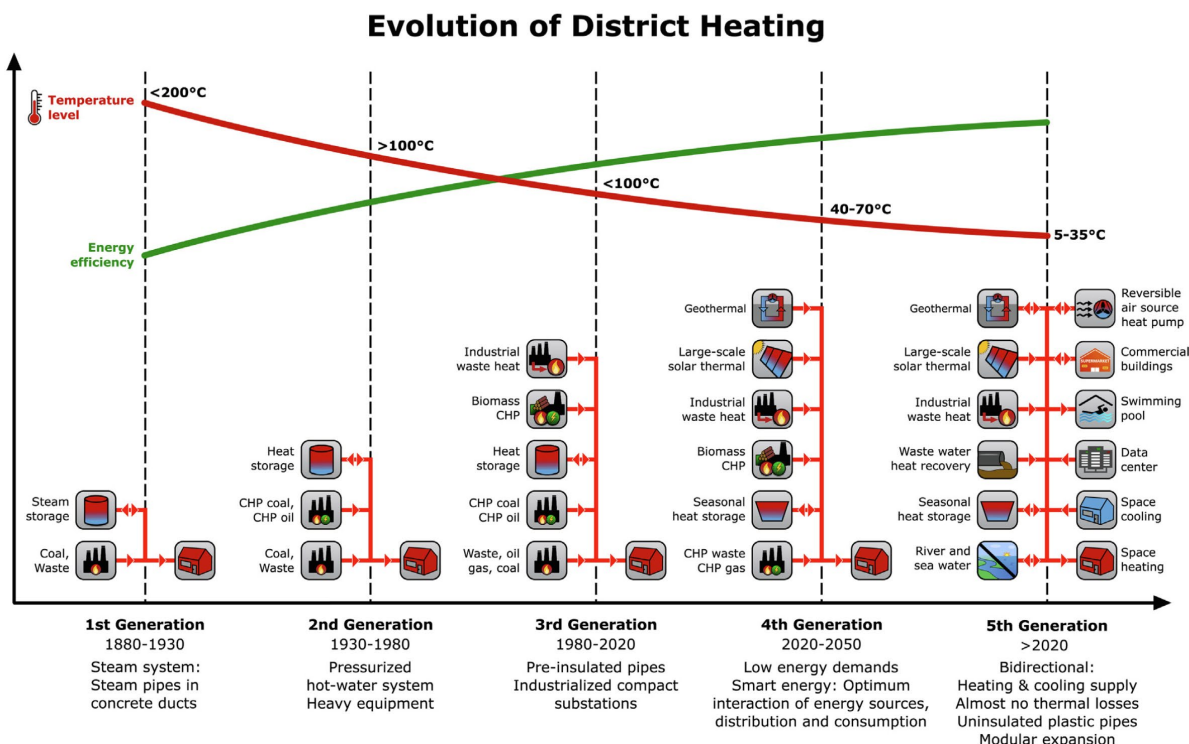


Fig. 1. 5th Generation District Heating and Cooling networks are the latest stage in the evolution of district heating. Illustration adapted from Lund et al. [27].

Figuur 3-2. De ontwikkeling van 1e tot 5e generatie warmtenetten in de periode van 1880-2020. In deze periode neemt met de tijd de efficiëntie toe (groene curve), de warmtebron temperatuur af (rode curve) en het aantal verschillende warmtebronnen stijgt. (Bron: Wirtz et al. (2020))

3.3.3. Importafhankelijkheid

Import afhankelijkheid van energie wordt over het algemeen bepaald op het niveau van nationale energie balans. Zivkovic and Ivezic (2021) berekenen de importafhankelijkheid als ratio van netto import en primaire energie aanbod.

$$I_d = \frac{\text{Netto import}}{\text{Primaire energie aanbod}}$$

Waarbij:

I_d = Import afhankelijkheid

Netto import = Import – Export

Volgens de NAM (2021) wordt in 2015 28% van het Nederlandse aardgas gewonnen op zee, dat is 2,4 miljard m³/jaar. Het aandeel van aardgas uit het Groningse veld is 6,2 miljard m³/jaar, namelijk 72% van de totale aardgas winning. Als de bron in Groningen sluit, is Nederland voor 72% afhankelijk van import van aardgas, zowel voor eigen gebruik als voor de langlopende contracten die Nederland met het buitenland heeft. Dit is de netto import van aardgas. Volgens het CBS (2021b) wordt 42% van de energie gebruikt voor verwarming van de gebouwde omgeving. Nederland is daarmee voor 30% (42% van 72%) afhankelijk van import van aardgas als het Groningse veld.

Importafhankelijkheid speelt een belangrijke rol voor leveringszekerheid als geothermie, aquathermie en restwarmte vergeleken worden met aardgas. Als het Groningse veld sluit is Nederland afhankelijk van de import van gas. Geothermie, aquathermie en restwarmte zijn lokale warmtebronnen waardoor voor deze bronnen geen importafhankelijkheid geldt. Dit duurzaamheidscriteria wordt meegenomen in het DSS om de leveringszekerheid op te beoordelen.

3.3.4. Geothermie

Lund and Toth (2021b) doen elke 5 jaar onderzoek naar het gebruik van geothermie wereldwijd. De afgelopen vijf jaar is het gebruik van geothermie voor directe warmte met 52% toegenomen. Nederland heeft een jaarlijkse warmtevraag van 985 PJ/jaar (CBS-TNO, 2020). De geothermische warmte in Nederland is 8,3 PJ/jaar (Lund & Toth, 2021b). Dat is minder dan 1% van de warmtevraag in Nederland. Geothermie wordt in Nederland voor 55% gebruikt als Warmte-Koude Opslag (WKO) (4,55 PJ/jaar). In warmtenetten wordt geothermie slechts voor 0,75% ingezet (0,063 PJ/jaar). Volgens het onderzoek van Lund and Toth (2021b) staat Nederland 3^e van de wereld in gebruik van geothermie voor glas- en tuinbouw (3,7 PJ/jaar). De potentie van geothermie voor Nederlandse huishoudens is 25%. De glastuinbouw kan voor 50% in warmte worden voorzien door geothermie (EBN, 2021).

In Nederland is nog niet de hele ondergrond voor bodemenergie in kaart gebracht. Om beter beeld te krijgen van de capaciteit van geothermiebronnen onderzoekt het SCAN (2021) programma de 'witte vlekken' op de kaart om het inzicht in de hoeveelheid warmte, de hoeveelheid water in de aquifer en de samenstelling van de bodem te verbeteren. Als de capaciteit van de warmtebron (HS – heat supply) bekend is, kan deze afgezet worden tegen de warmtevraag (HD) in het gebied.

Ondanks de warmteverliezen van gevoelswarmte (sensible heat) (CE-Delft, 2020), geven Mahon et al. (2022) toch de voorkeur aan deze opslagvorm door de grootschalige mogelijkheden in, buffertanks, boorgaten opslag of inkuilen van warmte. De overschot aan warmte in de zomer wordt opgeslagen en in de winter vanuit de opslag gebruikt.

Geothermie levert een stabiele temperatuur aan warmte in een continu proces, maar is niet oneindig beschikbaar. Het Masterplan Aardwarmte in Nederland van EBN (2018) vermeldt dat de levensduur van een geothermie bron 30 jaar is. Daarna heeft de bron enkele decennia nodig om opnieuw op te warmen. De temperatuur van de warmtebron (T_{bron}) is afhankelijk van de diepte van de put. Elke kilometer daling in de bodem levert 30°C temperatuur stijging. Voor bodem energie tot 500 meter komt dit op ongeveer 12°C. De diepe geothermie wordt berekend aan de hand van de diepte, op 4 km diepte wordt 120°C verwacht (EBN, 2018).

3.3.5. Aquathermie

Voor het bepalen van de warmtelevering door aquathermie, wordt gebruik gemaakt van de Aquathermie-viewer van Warming-Up (2021). Bij aquathermie speelt het volume van het waterlichaam, de stroomsnelheid en het oppervlakte van het water een belangrijke rol (Warming-Up, 2021). Aangezien het volume van het waterlichaam in geval van afvalwater (TEA) en drinkwater (TED) kleiner is, hebben deze bronnen lagere capaciteit. H₂O (2020) heeft berekend dat thermische energie uit afvalwater (TEA) in Nederland een potentie heeft van 15% van de totale warmtevraag en uit drinkwater slechts 1,5%. Warmte uit drinkwater (TED) is weliswaar in Nederland overall aanwezig, maar wordt op kleine schaal (< 100 woningen) ingezet bij nieuwbouw woningen in verband met de aansluiting. Thermische energie uit oppervlakte water (TEO) kan voor 40% in de warmtevraag van Nederland voorzien en is tot ver in de toekomst aanwezig.

TNO (2020) noemt 100 jaar als theoretische termijn voor benutting van een warmtebron. Voor aquathermie wordt derhalve 100 jaar als levensduur van de bron aangehouden in het DSS.

STOWA/Rioned (2021) geeft als duurzaamheidscriteria voor leveringszekerheid:

1. stabiele temperatuur
2. continue aanvoer
3. directe beschikbaarheid

Zowel afvalwater als drinkwater hebben een constante temperatuur ($T_{\text{bron}}=12^{\circ}\text{C}$) en een constante aanvoer (24 uur per dag) en zijn daardoor zeer geschikt als warmtebronnen voor een warmtenet. Temperatuur van oppervlakte water is afhankelijk van het seizoen. In de winter is $T_{\text{bron}} 4^{\circ}\text{C}$, terwijl het

zomers opwarmt naar wel 20°C. In alle drie de gevallen van TEO, TEA en TED geldt dat dit zeer lage temperatuur bronnen zijn en moet de temperatuur worden opgevaardeerd met een warmtepomp voordat het afgeleverd wordt.

3.3.6. Restwarmte

van Leeuwen et al. (2017) laten in hun onderzoek zien dat een groot deel van de warmtevoorziening van warmtenetten momenteel geleverd wordt door restwarmte uit elektriciteitsproductie en uit industrie. Restwarmte van elektriciteitsproductie heeft als bron kolen, gas of biomassa. Deze bronnen kunnen in de nabije toekomst door verduurzaming wegvallen, waardoor de restwarmtebron ook komt te vervallen. Volgens Lygnerud and Werner (2018) heeft restwarmte (excess heat = overtollige warmte) uit industrie:

- Grote politiek belangstelling
- Hoge potentieel (25%: 2,5 EJ/jaar van de 10EJ/jaar vraag in EU)
- Nog laag in gebruik (6% van de potentiële restwarmte)
- Hoge winstgevendheid (1-3 jaar terugverdientijd)

Ondanks de mogelijkheden is het warmteaanbod (HS) uit restwarmte slechts 1% in Europa, aangezien er risico is op het beëindigen van de activiteit. In praktijk blijkt dit volgens Lygnerud and Werner (2018) mee te vallen, aangezien in de 40 bestudeerde jaren (1974-2014) slechts 13% van de industriële restwarmte bedrijven is gestopt door economische redenen. Lygnerud and Werner (2018) geven aan dat 0% van de grote bedrijven hun activiteiten hebben gestopt, 46% van de middelgrote bedrijven en 70% kleine bedrijven. Verduurzaming is in dit onderzoek echter niet meegenomen.

Lygnerud and Werner (2018) geven met hun onderzoek aan dat de beschikbaarheid van restwarmte uit industrie afhankelijk is van de operationele duur van de activiteit. De expert van de restwarmte warmtebron gaf aan dat de contractduur een belangrijke indicatie is voor de levensduur van de restwarmtebeschikbaarheid.

Afhankelijk van het type industrie heeft restwarmte verschillen tussen lage en hoge temperatuur. Per situatie wordt bekeken hoe de bron in het warmtenet past.

Volgens Huang et al. (2020) gebruiken datacenters 3% van de wereld elektriciteit aanbod en produceren hierbij veel warmte. Er is wereldwijd een toename in het gebruik van internet, computers en rekenkracht waardoor er een grote leveringszekerheid voor de toekomst is. Huang et al. (2020) gaan uit van een lange termijn beschikbaarheid van 30 jaar met een potentiële warmtelevering van 68% van de restwarmte van datacentra.

De techniek van koeling van datacentra bepaald of de T_{bron} hoge, midden of lage temperatuur is. Huang et al. (2020) noemt hierbij drie technieken:

- Lage T_{bron} : Luchtgekoeld, output temperatuur rond 35°C
- Midden T_{bron} : Watergekoeld, temperatuur 60°C-75°C
- Hoge T_{bron} : Twee-fase met vloeistof pomp of verdampingscompressor, temperatuur output 60°C-90°C, afhankelijk van de vloeistof

Voor het verhogen van de lage temperatuur naar hoge temperatuur is de warmtepomp op hernieuwbare energie een optie. Ook kan bij de bouw van het datacentrum rekening gehouden worden met het type koeling en bijbehorende restwarmte potentieel.

Voor zowel geothermie, aquathermie als restwarmte worden de criteria capaciteit, levensduur en temperatuur meegenomen in het DSS. In Figuur 3-3 is de levensduur als beschikbaarheid op de lange termijn voor de warmtebronnen samengevat, waarbij de gasketel op 0 staat, aangezien het Groningse gasveld in 2022 sluit (Rijksoverheid, 2020a).

Duurzaamheidsaspect		Leveringszekerheid
Duurzaamheidscriteria		Beschikbaarheid lange termijn (jaar)
Warmtebron	Type	
Nulmeting	HR 107 gasketel	0
Geothermie	bodemenergie < 500m	30
	aardwarmte < 4 km	30
	ultradiep > 4 km	30
Aquathermie	TEO - oppervlakte	100
	TEA - afval	100
	TED - drinkwater	100
Restwarmte	industrie	30
	datacenter	30

Figuur 3-3. De lange-termijnbeschikbaarheid van de warmtebron, waarbij de gaskraan in 2022 is dichtgedraaid. De gasketel scoort daardoor onder de norm (rood) en de andere warmtebronnen scoren boven de norm (groen).

3.4. Veiligheid

In deze paragraaf worden de veiligheidsaspecten belicht gerelateerd aan ecologie, uitstoot en leveringszekerheid.

3.4.1. Ecologie en veiligheid

Naast de hierboven genoemde balans-verstorende effecten door temperatuurverschillen en mogelijke verzilting zijn veranderende chemische omstandigheden ook een potentieel risico op een verstoorde balans. García-Gil et al. (2016) laten in een studie naar de chemische reacties die kunnen plaatsvinden bij geothermie zien dat het herinjecteren van afgekoeld water in de aardbodem gevolgen kan hebben voor de chemische toestand van de bodem. Op lange termijn kunnen evaporiete grondbodems zo veranderen en instabiel raken dat bodemdaling of zelfs instortingsgevaar dreigt. Ook Sayed et al. (2021) schrijven over deze gevaren bij het gebruik van geothermie. Sayed et al. (2021) leggen de focus daarbij op de temperatuurverschillen van het verplaatste water, gecombineerd met de druk die gebruikt wordt tijdens het pompen. In de studie wordt gewaarschuwd voor het ontstaan van scheuren in de bodemlagen. Buijze et al. (2019) komen in hun studie naar seismische activiteit als gevolg van geothermie tot de conclusie dat risico's sterk locatie afhankelijk zijn. In de Nederlandse zandsteenlagen lijkt het risico op aardbevingen (groter dan 2.0 op de schaal van richter) klein, terwijl het risico in carbonaatsteenlagen gematigd is. Een goede voorstudie naar de aanwezige grondlagen wordt geadviseerd om de risico's te beperken. Ook het risico op een zogenaamde 'blowout' kan met een goede voorstudie verkleind worden. Een blowout kan plaatsvinden tijdens het boren naar de juiste geothermische diepte. Barberi et al. (2007) beschrijven een blowout in Italië doordat er door een onverwachte gasbel geboord werd, terwijl Rabet et al. (2017) een blowout in Turkije beschrijven, veroorzaakt door een enorme tegendruk tijdens het boren. Bij dergelijke blowouts kunnen schadelijke gassen en vloeistoffen vrijkomen die omliggende ecosystemen schaden. Zowel de kans op bodemdaling als de kans op een blowout is toegevoegd in het DSS en geeft een negatieve score bij zowel de gasketel als bij geothermie.

Oppervlakkige geothermie wordt steeds vaker gewonnen uit aquifers waar ook het drinkwater uit gewonnen wordt. Bonte et al. (2013) laten in hun studie naar de chemische effecten van deze combinatie zien dat er bij een temperatuursverhoging in de aquifer wel degelijk chemische effecten kunnen optreden. Bij een afkoeling van de aquifer (5°C ten opzichte van 11°C) treedt er geen effect op, maar bij een verhoging naar 25°C is een significant hogere dosering van Arsenicum gevonden. 25°C is de momenteel de maximaal toegestane temperatuur voor oppervlaktewater om een goede ecologische toestand te waarborgen. Bij een verdere verhoging tot 60°C vinden Bonte et al. (2013) ook verhoogde waarden van fosfor, kalium, silicium, molybdeen, vanadium, borium en fluor. Ook treedt een daling van de zuurgraad en een toename van opgelost organische koolstof op. Al deze veranderingen kunnen de kwaliteit van het lokale ecosysteem maar ook van het potentiële drinkwater negatief beïnvloeden. Geadviseerd wordt om bij oppervlakkige geothermie de waterkwaliteit te blijven controleren op deze

stoffen. Drinkwatervervuiling is als criterium in het DSS opgenomen wanneer wordt gekozen voor bodemenergie.

3.4.2. Uitstoot en veiligheid

Risico's van koelmiddelen in warmtepompen

Koelmiddelen worden toegepast in warmtenetten door het gebruik in warmtepompen, het koelmiddel brengt transport van warmte teweeg door een hoge verdampingsenergie. Er wordt onderscheid gemaakt tussen de tot nu toe gangbare *synthetische* koelmiddelen (bijvoorbeeld R134A en R410A) en de meer recente *natuurlijke* koelmiddelen (bijvoorbeeld CO₂ en propaan). Een overzicht van bekende koelmiddelen staat in bijlage B.

Het effect van koelmiddelen

Als koelmiddelen vrijkomen hebben ze impact op hun omgeving, het effect hiervan varieert voor de verschillende typen koelmiddelen. Fluorhoudende koolwaterstoffen (HFK's) hebben een sterk broeikaseffect, met opwarming van de aarde en klimaatverandering als gevolg. Een maat voor de sterkte van dit effect is de *Global Warming Potential*, GWP, uitgedrukt in equivalente eenheden CO₂ (de GWP van CO₂ is nul) op een tijdschaal van bijvoorbeeld 20 jaar, 50 jaar of 100 jaar (Green Deal, 2021; Myhre et al., 2017). Naast het broeikas effect kunnen stoffen giftig zijn en/of brandgevaarlijk.

Over het gebruik van koelmiddelen en de transitie naar nieuwe koelmiddelen zijn weinig cijfers bekend, met Duitsland als uitzondering. Geelen and Van Gerwen (2021) stellen dat met deze transitie in Duitsland naar verwachting in 2030 in dertig procent van de nieuwe warmtepompen propaan (R290) wordt gebruikt, en vijftig procent met mengsels HFO's (HFK's met een onverzadigde, dubbele binding met een GWP onder de 150). Een klein deel (3%) werkt met CO₂. Door de lage GWP lijken de HFO's aantrekkelijk, maar uit onderzoek van Holland et al. (2021) blijkt dat de afbraakproducten juist een hoge GWP-waarde hebben. Het afbraakproduct TFA is zeer stabiel en accumuleert in water, organismen en in de atmosfeer. Natuurlijke koelmiddelen hebben dit probleem niet.

Het risico op lekkage van koelmiddelen

Koelmiddelen kunnen gaan lekken in grote of kleine hoeveelheden, geleidelijk of in één keer. Er zijn wettelijke eisen gesteld aan het gebruik van koelmiddelen en het geaccepteerde risico op lekkage. Het jaarlijkse risico in de gebruiksfase kan variëren van 1% tot 30%. Er wordt aangenomen dat dit percentage in Nederland ruim onder de 10% ligt. Dit is anders dan bij de terugname, verwerking, recycling of vernietiging van het koelmiddel: hierbij moet rekening gehouden worden met een eenmalige lekkage van 20% naar de atmosfeer (Geelen & Van Gerwen, 2021).

Naar aanleiding van afspraken in het Klimaatakkoord (Rijksoverheid, 2019) is de wetgeving rondom het gebruik van koelmiddelen aangepast. Vanaf 2030 is het verboden een installatie bij te vullen met een HFK met een GWP groter dan 2500, wordt de productie van HFK's wordt afgebouwd, en gelden voor grootschalige nieuwbouwinstallaties strengere regels. Daarnaast gelden verscherpte regels voor lekcontrole: deze controles moeten eens in de 12 maanden tot eens in de 3 maanden plaatsvinden, afhankelijk van de GWP van het gebruikte koudemiddel (Rijkswaterstaat, 2022).

Koolmonoxide (CO) en gasketels: gezondheidsrisico

In dit onderzoek geldt de HR107-gasketel als referentiesituatie. Een belangrijk risico van de CV-ketel is de lekkage van koolmonoxide (CO). Als koolmonoxide wordt ingeademd bindt het aan hemoglobine in het bloed op de plaats waar normaalgesproken zuurstof bindt. Hierdoor ontstaat zuurstoftekort in het bloed, met als gevolg schade voor met name het hart en de hersenen. Kortdurende blootstelling aan hoge concentraties, maar ook langdurende blootstelling aan lage concentraties leidt tot koolmonoxidevergiftiging waaraan men kan komen te overlijden (Gezondheidsraad, 2019; Onderzoeksraad voor Veiligheid, 2015).

Het risico op CO-lekkage

Het grootste deel van de koolmonoxideongevallen gebeurt met CV-ketels en geisers. Nadat in Nederland lange tijd geen cijfers werden bijgehouden heeft de Onderzoeksraad voor Veiligheid (2015) een schatting gemaakt van het aantal incidenten met koolmonoxide in de periode 2012-2013, de mate van vergiftiging en de gerelateerde blootstelling (Figuur 3-4). Naar aanleiding van dit onderzoek is de wet gewijzigd en

zijn de regels aangescherpt. De registratie en monitoring van incidenten loopt daarbij nog achter. Het aantal gemelde doden door koolmonoxidevergiftiging is steeds tussen de 5 en de 10 per jaar. Een schatting van het NVWA is 10-15 doden per jaar (Nederlandse Voedsel- en Warenautoriteit, 2021), mogelijk ligt dit aantal hoger.

	SEH-behandeling ²³⁷	Ziekenhuis-opname ²³⁸	Ziekenhuis ²³⁹	Doden in registratie VeiligheidNL ²⁴⁰	Doden in database Onderzoeksraad ²⁴¹
2012	380-970	240	144	8	7
2013	150-500	180	155	3	4
2014	nb	nb	97	5	5

Figuur 3-4. Geschatte aantallen slachtoffers van koolmonoxidevergiftiging; dit is tabel 6 uit het rapport van de Onderzoeksraad voor Veiligheid (2015).

3.4.3. Veiligheid en risico's bij leveringszekerheid

Er zijn twee risico's van invloed op leveringszekerheid die beide niet meegenomen worden in het DSS, omdat ze afhankelijk zijn van het type waterlichaam en de gevolgen van klimaatverandering.

Lagere temperatuur stroomafwaarts

ETW (2021c) geeft aan dat bij gebruik van aquathermie uit oppervlaktewater (TEO) er een maximale temperatuur daling van 6°C mag zijn. Dit betekent dat er een koude lozing plaatsvindt terug in het oppervlakte water en de bron afkoelt. Afhankelijk van de eigenschappen en type van de bron, zoals volume van het waterlichaam, stroomsnelheid en oppervlakte, resulteert dit in lagere brontemperatuur stroomafwaarts. In de Aquaviewer van Warming-Up (2021) is hier rekening mee gehouden door het waterlichaam in te delen in segmenten en per segment de capaciteit te bepalen. Bij te veel onttrekking is er een risico dat een volgende partij aan de rivier minder warmte kan onttrekken, waardoor de leveringszekerheid in gevaar komt door een lagere warmtebron temperatuur.

Waterlichaam volumezekerheid door klimaatverandering

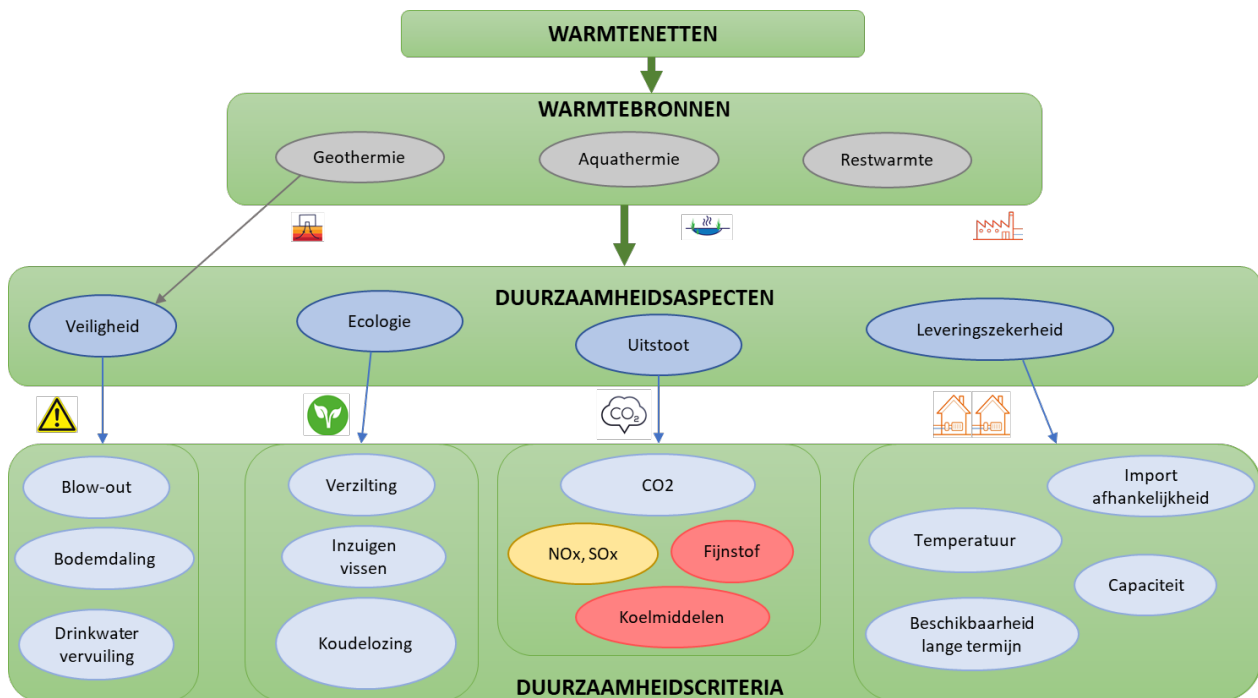
Door de klimaatverandering verandert het weer en klimaat in Nederland. Het KNMI (2021b) laat in het Klimaatsignaal '21 zien dat naast extremen neerslag ook langdurige droogte kan ontstaan. De expert gaf aan dat hierdoor een warmtebron als TEO aan capaciteit kan verliezen en niet meer aan de thermische warmtevraag uit water voldoet. Leveringszekerheid kan dus bij langdurige droogte in gevaar komen.

4. Resultaat: Ontwerp van Decision Support System

Om het tweede deel van de onderzoeksvraag te beantwoorden is een Decision Support System (DSS) opgesteld in Excel. In bijlage C staat een korte handleiding van het DSS en een verwijzing naar het separate Excel bestand.

4.1. Duurzaamheidscriteria

Vanuit het literatuuronderzoek zijn twaalf duurzaamheidscriteria naar voren gekomen, waardoor het projectkader van de probleemanalyse ingevuld kan worden (Figuur 4-1). De details van de duurzaamheidscriteria met hun classificatie die zijn meegenomen in het DSS worden genoemd in Tabel 4.1.



Figuur 4-1. Het projectkader met de duurzaamheidscriteria (lichtblauwe ovalen) die zijn meegenomen in het DSS van de vier aspecten: veiligheid, ecologie, uitstoot en leveringszekerheid (blauwe ovalen). Fijnstof en koelmiddelen (rode ovalen) verdienen extra aandacht bij uitstoot en zijn niet meegenomen in het DSS. Uitstoot van NO_x en SO_x (gele ovalen) is ook niet meegenomen in het DSS.

4.2. Weging van criteria in DSS

De duurzaamheidsaspecten hebben allen een verschillend aantal criteria. Om toch een correcte vergelijking te kunnen maken is een weging van de verschillende criteria van belang. In de vragenlijst van de experts is gevraagd deze weging te geven. Hier kwam echter naar voren alle criteria van belang zijn. Vervolgens heeft het team besloten de weging zo te kiezen dat de aspecten gelijkwaardig meegenomen worden en daardoor goed onderling te vergelijken zijn. Deze weging is doorgevoerd in het DSS. Tabel 4.1 geeft een overzicht van de geformuleerde duurzaamheidscriteria met bijbehorende classificaties.

Tabel 4.1. Duurzaamheidscriteria met bijbehorende classificatie zoals gebruikt in het DSS.

Duurzaamheids-aspect	Duurzaamheids-criterium	Warmtebron	Classificatie
Ecologie	Verziltting	Aardwarmte Ultradiepe geothermie	Ja, indien bron door aquifer gaat
Ecologie	Inzuigen vissen	TEO	Afhankelijk van pompsnelheid (1-15cm/s, 15-30cm/s & >30cm/s)
Ecologie	Koudelozing / type waterlichaam	TEO en TEA	Breedte, diepte en vorm waterlichaam. Stromend of niet stromend. 17 typen met verschillende scores mogelijk.
Uitstoot	CO ₂ -uitstoot in 2020	Alle Aardwarmte/ultradiepe geothermie: met of zonder bijvangst	Score: continue schaal op basis van CO ₂ -uitstoot Groen als ≤ 18,9 kg CO ₂ /GJ (doelstelling warmtesector 2030)
Uitstoot	CO ₂ -uitstoot in 2030	Alle Aardwarmte/ultradiepe geothermie: met of zonder bijvangst	Score: continue schaal op basis van CO ₂ -uitstoot Groen als ≤ 18,9 kg CO ₂ /GJ (doelstelling warmtesector 2030)
Leveringszekerheid	Temperatuur	Alle	$T_{bron} \geq T_{aflever}$ à boven de norm $T_{bron} < T_{aflever}$ à onder de norm
Leveringszekerheid	Capaciteit	Alle	$HS \geq HD$ à boven de norm $HS < HD$ à onder de norm
Leveringszekerheid	Lange termijn beschikbaar	Alle	Geothermie en restwarmte hebben beperkte levensduur, aquathermie is oneindig (in NL)
Leveringszekerheid	Import afhankelijk	Alle	Gas is import afhankelijk en onder de norm, andere warmtebronnen zijn lokaal en boven de norm
Veiligheid	Blowout	Bodemenergie, Aardwarmte Ultradiepe geothermie CV-ketel	Ja, indien bron gebruikt wordt
Veiligheid	Drinkwatervervuiling	Bodemenergie	Ja, indien bron gebruikt wordt
Veiligheid	Bodemdaling	Bodemenergie, Aardwarmte Ultradiepe geothermie CV-ketel	Ja, indien bron gebruikt wordt

Binnen het duurzaamheidsaspect veiligheid wegen de drie criteria 'blowout', 'bodemdaling' en 'drinkwater vervuiling' even zwaar. Deze veiligheidscriteria kunnen optreden bij het gebruik van een warmtebron, maar er is geen kansberekening of voorspellende waarde in de literatuur gevonden, waardoor een verschil in weging niet te maken is.

Binnen het duurzaamheidsaspect ecologie is wel een afwijkende weging gemaakt: verziltting weegt voor 40% mee, terwijl het inzuigen van vissen en gevolgen van koudelozing aan de hand van het type waterlichaam beide voor 30% meewegen. Deze keuze is gemaakt op basis van het effectgebied: gevolgen van koudelozing en het inzuigen van vissen treden (zeer) lokaal op, terwijl verziltting in bodemlagen over grotere oppervlaktes kan verspreiden.

De vier criteria van leveringszekerheid zijn afgewogen naar wettelijke eisen. De temperatuur en capaciteit wegen daardoor beide voor 30% mee, de lange termijn beschikbaarheid en importafhankelijkheid wegen beide voor 20%.

Als duurzaamheidscriterium voor de uitstoot van een warmtebron is de CO₂-uitstoot gebruikt. De uitstoot van CO₂ hangt af van het type warmtebron, de warmtevraag en het elektriciteitsgebruik. De achterliggende tabellen zijn opgenomen in bijlage D.

De uitstoot van warmtebronnen is gebaseerd op waarden uit de recente literatuur (Dinkelman & Menkveld, 2021), hierin zit de warmtewinning en een opwaardering met warmtepompen naar 70 °C: de wettelijk bepaalde leveringstemperatuur. Voor alle warmtebronnen, behalve voor de CV-ketel, wordt warmteverlies van 20% verondersteld. Hierbij wordt een component "hulpenergie" opgeteld: de uitstoot voor het warmtenet (het warmtetransport) of het gebruik van de CV-ketel op basis van elektriciteitsgebruik, gebaseerd op de waarde uit de doorrekening van ketenemissies van Schepers & Scholten (2016). Voor de CO₂-uitstoot van de elektriciteit zijn de rekenregels toegepast van Harmelink (2020); de gegevens over de elektriciteitsmix van 2020 en 2030 komen uit Dinkelman & Menkveld (2021) en de Klimaat- en Energieverkenning van 2021 (PBL, 2021) volgens de "integrale methode", waarbij de directe emissies van groene stroomopwekking met duurzame bronnen (zon, wind, biomassa, water en overig) op nul zijn gesteld. Er volgt een uitstoot voor het jaar 2020 en een prognose voor het jaar 2030. Beide waarden worden meegenomen in de doorrekening tot een duurzaamheidsscore: de CO₂-uitstoot in 2020 is een schatting op basis van de huidige omstandigheden; de waarde van 2030 is relevant om in de planning van het warmtenet rekening mee te houden. De weegfactoren voor 2020 en 2030 zijn respectievelijk 4 en 6.

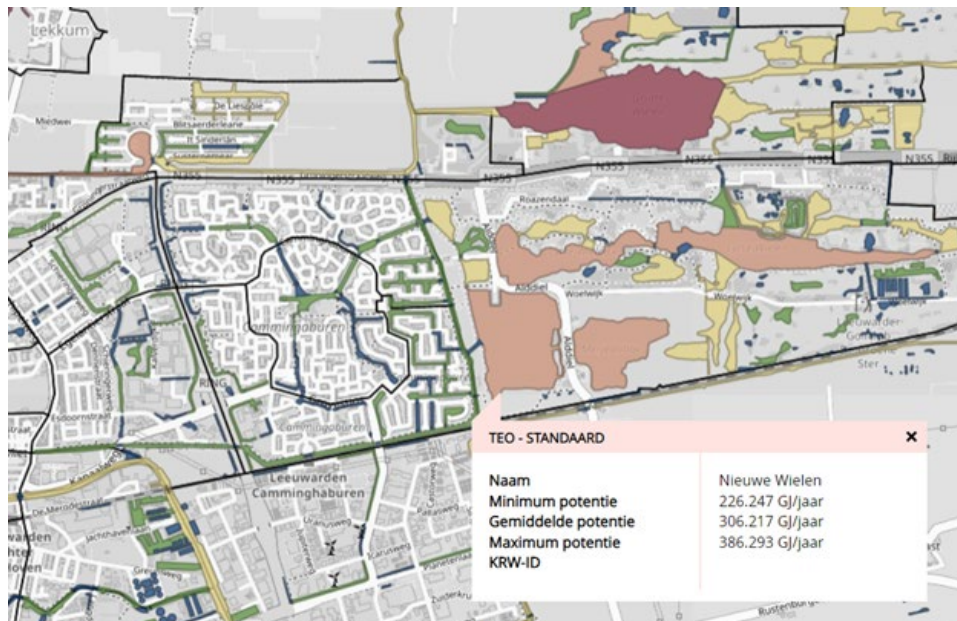
In het invoerveld kan gekozen worden voor het meenemen van de bijvangst van geothermie, en hier kan een tijdperk voor de aardlaag worden ingevoerd. In dat geval wordt verondersteld dat de bijvangst wordt afgevangen en ingezet voor het warmtenet en brengt dit een extra component in de CO₂-uitstoot met zich mee, berekend aan de hand van de cijfers in Dinkelman et al. (2021).

5. Resultaat: Casestudies

Om het derde deel van de onderzoeksvraag te beantwoorden, wordt het DSS getoetst aan drie praktijk situaties in Leeuwarden, Helmond en Enschede. De omgevings- en warmtebroninformatie wordt ingevoerd in het DSS en de duurzaamheidsbeoordeling wordt geanalyseerd. Vanuit het model kan gekeken worden naar meerdere warmtebronnen voor de wijk, maar ook kunnen er aanpassingen voor de wijk naar voren komen.

5.1. Regio Leeuwarden

Voor de casestudie is gekeken naar de Nije Wielen, een waterplas ten oosten van Leeuwarden, grenzend aan de wijk Camminghaburen. Het huidige WKK warmtenet in Camminghaburen levert 48.299GJ warmte per jaar (Ennatuurlijk, 2021a). De Nije Wielen kan 306.217GJ warmte per jaar leveren (Figuur 5-1), waarmee het huidige warmtenet ruim zes keer wordt overtroffen (Warmingup, 2021). De Nije Wielen ligt niet in een Natura 2000 of NNN-gebied, al grenst het aan de noordzijde wel aan een NNN-gebied. Een kritische blik op de instandhoudingsdoelen is daarom wel noodzakelijk. De Nije Wielen is maximaal 10 meter diep, een niet lijnvormige, stilstaande plas van zo'n 270.000m². Het gemiddelde energielabel voor de 1.800 woningen in Camminghaburen is C.



Figuur 5-1. Ligging Camminghaburen ten opzichte van potentiële warmtebron de Nije Wielen met de warmtepotentie uitgedrukt in GJ per jaar. (Bron: (Warming-Up, 2021)).

Wanneer de gevonden gegevens van de regio en de warmtebron in het DSS worden ingevoerd blijkt dat het aansluiten van de Nije Wielen op een warmtenet een interessante optie kan zijn (Figuur 5-2). Op het gebied van ecologie scoort de verbranding via gasketels hoger dan aquathermie uit oppervlaktewater, maar op zowel uitstoot, leveringszekerheid als op veiligheid scoort aquathermie hoger. Dat ecologie zo laag scoort heeft te maken met het feit dat de Nije Wielen een relatief klein, stilstaand water is. Dit verhoogt te kans dat koudelozing een negatief effect op aanwezige flora en fauna heeft. Afhankelijk van de pompsnelheid die gebruikt wordt om het water op te pompen, bestaat er ook een kans dat vissen worden ingezogen. Doordat de Nije Wielen zoveel potentiële warmte bevat, is het wellicht niet noodzakelijk op vol vermogen warmte af te nemen en met een hoge snelheid water in te pompen.

DUURZAAMHEIDSBEOORDELING VAN WARMTEBRONNEN VOOR WARMTENETTEN IN NEDERLAND

Warmtebron	Type	Ecologie	Uitstoot	Leveringszekerheid	Veiligheid	Resultaat
Nulmeting	HR 107 gasketel					
Geothermie	bodemenergie < 500m					
	aardwarmte < 4 km					
	ultradiep > 4 km					
Aquathermie	TEO - oppervlakte					
	TEA - afval					
	TED - drinkwater					
Restwarmte	industrie					
	datacenter					

Figuur 5-2. Resultaat DSS voor Camminghaburen in Leeuwarden. Duurzaamheidsindicatie wordt weergegeven met kleur, waarbij groen het meest duurzaam is en rood het minst duurzaam.

De uitstoot van CO₂ neemt in dit scenario sterk af (Figuur 5-3), wat ervoor zorgt dat dit scenario zeker het overwegen waard is. Met de rekengetallen voor 2020 komt de afname neer op ruim 2,3 miljoen kilogram CO₂ en voor 2030 ruim 4,3 miljoen kilogram CO₂ bij een warmteopwekking van 92.700GJ per jaar.

2020	2030
CO ₂ -uitstoot bij 92700 GJ/jaar (kg)	CO ₂ -uitstoot bij 92700 GJ/jaar (kg)
5.423.000	5.423.000
-	-
-	-
-	-
3.115.000	1.085.000
3.115.000	1.085.000
3.115.000	1.085.000
-	-
-	-

Figuur 5-3. CO₂-uitstoot in kilogram voor de wijk Camminghaburen, met gestookte gasketel (rood) en aquathermie (groen) bij een warmteproductie van 92.700GJ per jaar.

5.2. Regio Eindhoven/Helmond

Invoergegevens

Voor de duurzaamheidsbepaling van de warmtebron is invoer van een aantal gegevens noodzakelijk. Deze gegevens zijn meestal publiek toegankelijk.

Warmtebron RWZI

De warmtebron is een rioolwaterzuiveringsinstallatie in Aarle-Rixtel. De beschikbare relevante gegevens van de warmtebron staan in Tabel 5.1.

Tabel 5.1. Invoergegevens warmtebron RWZI Aarle-Rixtel.

Invoer	Waarde	Herkomst	Toelichting
Type warmtebron	Aquathermie - TEA	Waterschap Aa en Maas	RWZI Aarle-Rixtel
Temperatuur	winter 12,9 °C zomer 21,8 °C	Potentiekaart Aquathermie (WarmingUp, 2022)	Invoer: 17 °C (gemiddelde literatuurwaarde TEA)
Warmteaanbod	223.726 GJ/jaar	Potentiekaart Aquathermie (WarmingUp, 2022)	Directe levering (zonder opslag)

Omgeving

Natuurgebieden

Direct grenzend aan de warmtebron en de beoogde woonwijk ligt natuurgebied "De Bundertjes", dit gebied is geregistreerd in Natuur Netwerk Nederland (Rijksoverheid, 2022). De afstand tot het natuurgebied is 0-500 meter (RVO, 2021b). Het DSS geeft ook 0 meter als optie, maar in dat geval ligt de warmtebron *in* het natuurgebied.

Uitsluiting gebied WKO

Voor enkele gebieden in de omgeving binnen een straal van 1 kilometer van de warmtebron en de woonwijk is het niet toegestaan een WKO (warmtekoude-opslag) te plaatsen (WarmingUp, 2022). Om deze reden is gekozen voor de waarde van warmteaanbod "directe levering" (bovenstaande tabel), en niet "levering met WKO" (beide gegevens zijn beschikbaar).

Warmteafnemers

Direct ten zuiden van de RWZI ligt de woonwijk "De Eeuwsels", gegevens van de wijk staan in onderstaande tabel (Tabel 5.2).

Tabel 5.2. Invoergegevens warmteafnemers: woonwijk De Eeuwsels.

Invoer	Waarde	Herkomst	Toelichting
Type afnemer	Woonwijk	De Eeuwsels	
Aantal huishoudens	1665	Warmteatlas (RVO, 2021b)	
Oppervlakte	Onbekend	-	Niet meegenomen
Energielabel (overwegend)	C	Nationale Energieatlas (RVO, 2021a)	Niet meegenomen
Warmtevraag	76.500		Geldig voor 2020

Resultaat duurzaamheidsbepaling

Het resultaat van de duurzaamheidsbeoordeling staat in Figuur 5-4.

Warmtebron: Aquathermie							Warmtenet Duurzaamheid Indicator (WDI):		
Warmtebron	Type	Ecologie	Uitstoot	Leveringszekerheid	Veiligheid	Resultaat	2020	2030	Doel
							CO ₂ -uitstoot bij 76500 GJ/jaar (kg)	CO ₂ -uitstoot bij 76500 GJ/jaar (kg)	CO ₂ -uitstoot bij 76500 GJ/jaar (kg)
Nulmeting	HR 107 gasketel						4.659.000	4.530.000	1.445.850
Geothermie	bodemenergie < 500m						-	-	
	aardwarmte < 4 km						-	-	
	ultradiep > 4 km						-	-	
Aquathermie	TEO - oppervlakte						2.263.000	702.000	
	TEA - afval						1.651.000	472.000	
	TED - drinkwater						1.651.000	472.000	
Restwarmte	industrie						-	-	
	datacenter						-	-	

Figuur 5-4. Resultaat van RWZI Aarle-Rixtel en woonwijk De Eeuwseis.

Duurzaamheidsscore

De totaalscore "Resultaat" is gebaseerd op de duurzaamheidscriteria van ecologie, uitstoot, leveringszekerheid en veiligheid samen. De deelscore in de kolom "Uitstoot" is gebaseerd op het temperatuurverschil tussen warmtebron en warmteafnemers en de CO₂-uitstoot in 2020 en 2030 op basis van de uitstoot van de dan geldende/geplande elektriciteitsmix. Hoewel het DSS alleen voor een TEA-bron ingevuld werd, komen hier scores van alle aquathermie-typen naar voren. De scores van TEO en TED zijn gebaseerd op gemiddelde waarden en kunnen buiten beschouwing worden gelaten.

CO₂-uitstoot en doelstelling

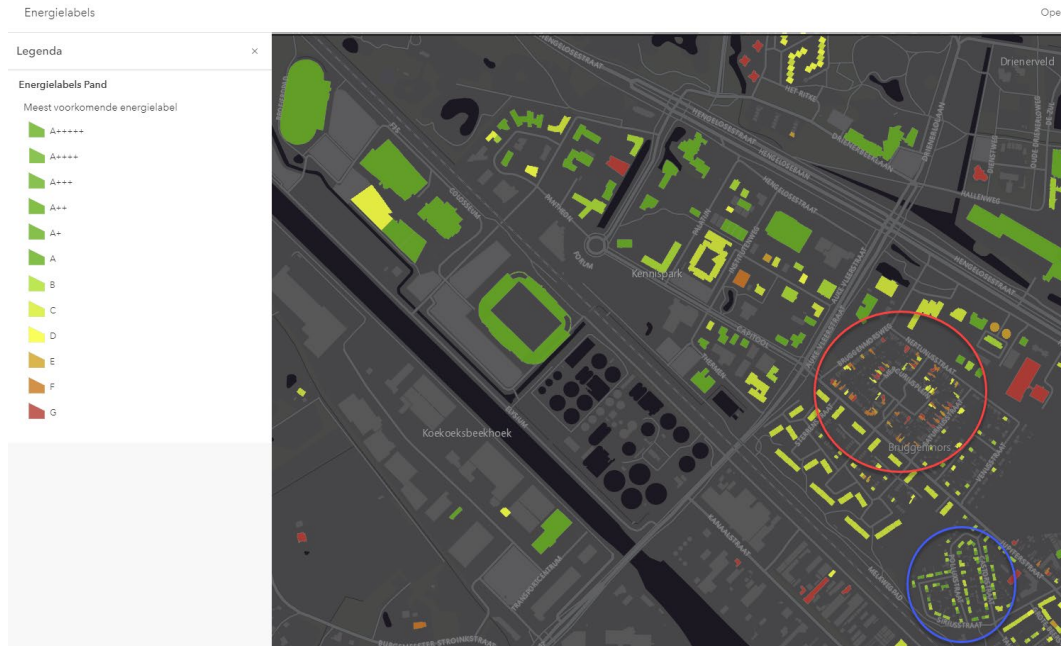
Rechts naast de duurzaamheidsscore staat de CO₂-uitstoot apart afgebeeld. De doelstelling van de warmtesector (18,9 GJ/jaar gemiddeld) staat in de rechterkolom. Deze bron voldoet in 2020 nog niet aan de doelstelling, en is geel gekleurd. In 2030 voldoet deze naar verwachting wel, en is hier groen gekleurd.

Aandachtspunten

In het resultaat komen nog aandachtspunten naar voren. In dit geval is alleen een melding over het NNN-natuurgebied relevant: de aanbeveling dat een voortoets dient te worden uitgevoerd om de effecten op de doelen voor dit natuurgebied uit te sluiten.

5.3. Regio Twente

Voor de casestudie in Twente is ingezoomd op Enschede langs het Twentekanaal en specifiek op de wijk Bruggenmors met 200 woningen met energielabel D t/m G en woningen uit bouwjaar 1930 (rood omcirkeld in Figuur 5-5). Een nieuwbouwwijk uit 2019 heeft 100 woningen met energielabel A en B en is blauw omcirkeld in de figuur. Warmtebronnen binnen 2 km afstand van de woonwijken zijn weergegeven in Tabel 5.3.



Figuur 5-5. Energie labels van de wijk Bruggenmors (rode cirkel) en nieuwbouwwijk (blauwe cirkel) in Enschede (Bron: RVO (2021a))

Tabel 5.3. Type warmtebronnen die binnen 2 km van de wijk Bruggenmors en de nieuwbouwwijk liggen, met de warmtebron capaciteit in GJ/jaar en de literatuurbron.

Warmtebron	Type	Capaciteit (GJ/jaar)	Literatuurbron
Warmteopslagcapaciteit	Geothermie (aardwarmte)	8.452	Aquaviewer (Warming-Up, 2021)
Diepe geothermie	Diepe geothermie	500.000	Schatting naar (Gonzales, 2013; SCAN, 2021)
Twente kanaal	Aquathermie - TEO	120.899	Aquaviewer (Warming-Up, 2021)
RWZI	Aquathermie - TEA	250.000	Warmteatlas (RVO, 2021b)
IJsbaan-Twente	Restwarmte	10.000	Schatting naar (Deerns, 2012)
Datacentrum Equinix	Restwarmte	12.600	Berekend (Equinix, 2022; RVO, 2018)

De informatie van de warmtebronnen geldt voor beide wijken, aangezien de warmtebronnen hetzelfde zijn. De omgevingsinformatie van de wijken Bruggenmors en de nieuwbouwwijk en de warmtebronnen kan in het invoerscherm van het DDS worden ingevuld. Voor Bruggenmors wordt een 'gemiddelde' energielabel F aangehouden en voor de nieuwbouwwijk energielabel B, om het 'worst-case' scenario te schetsen.

Resultaat							Doel		
Lees hier het resultaat van de duurzaamheidscriteria uit.							2020	2030	2030
Warmtebron: Alle warmtebronnen									
Warmtenet Duurzaamheid Indicator (WDI):									
Warmtebron	Type	Ecologie	Uitstoot	Leveringszekerheid	Veiligheid	Resultaat	CO2-uitstoot bij 16700 GJ/jaar (kg)	CO2-uitstoot bij 16700 GJ/jaar (kg)	CO2-uitstoot bij 16700 GJ/jaar (kg)
Nulmeting	CV-ketel (type HR 107)						1.017.000	989.000	315.630
Geothermie	bodemenergie < 500m						511.000	153.000	
	aardwarmte < 4 km						79.000	24.000	
	ultradiep > 4 km						79.000	24.000	
Aquathermie	TEO - oppervlakte						494.000	153.000	
	TEA - afval						360.000	103.000	
	TED - drinkwater						360.000	103.000	
Restwarmte	industrie						149.000	45.000	
	datacenter						461.000	136.000	

Figuur 5-6. Resultaat van duurzaamheidsbeoordeling voor de wijk Bruggenmors (energielabel F, 200 woningen) met het DSS.

De wijk Bruggenmors heeft een warmtevraag van 16.700 GJ/jaar.

Ecologie

Voor geothermie staat de variabele "Door zoetwateraquifer" op "ja", waardoor geothermie in ecologisch opzicht onder de norm scoort. Het Twentekanaal wordt gezien als "Lijnvormig meer" zonder stroming. Door de gekozen pompsnelheid is er risico op inzuig van vissen.

Uitstoot

Qua uitstoot, scoort de gasketel onder de norm met de hoogste CO₂ uitstoot zowel in 2020 als 2030. De andere warmtebronnen scoren aanzienlijk beter, met nog een verwachte verbetering in 2030.

Leveringszekerheid

De leveringszekerheid is voor bodemenergie, aquathermie uit drinkwater en restwarmte onder de norm, aangezien de warmtevraag van de wijk groter is van het warmteaanbod van de individuele bronnen. Als de bronnen in een 5G warmtenet worden samengevoegd, zijn er wel mogelijkheden voor de wijk Bruggenmors. De aquathermie uit oppervlaktewater en afvalwater is ruim voldoende voor de warmtevraag in de wijken. Wel zal de temperatuur opgevaardeerd worden met warmtepompen. Dit is meegenomen in de uitstoot. Van geothermie is een inschatting gemaakt van de beschikbare hoeveelheid warmte uit de bron. Dit moet echter nog geheel onderzocht worden.

Voor de nieuwbouwwijk, met energie label B, is de warmtevraag 4.100 GJ/jaar, waarmee de leveringszekerheid voor bodemenergie en restwarmte nu wel in aanmerking komen.

De uitstoot bij de nieuwbouwwijk is aanzienlijk beter dan van de wijk Bruggenmors zowel in 2020 als in 2030.

DUURZAAMHEIDSBEOORDELING VAN WARMTEBRONNEN VOOR WARMTENETTEN IN NEDERLAND

Resultaat									
Lees hier het resultaat van de duurzaamheidscriteria uit.									
Warmtebron: Alle warmtebronnen									
Warmtenet Duurzaamheid Indicator (WDI):						Doel			
Warmtebron	Type	Ecologie	Uitstoot	Leveringszekerheid	Veiligheid	Resultaat	2020	2030	Doel
							CO2-uitstoot bij 4100 GJ/jaar (kg)	CO2-uitstoot bij 4100 GJ/jaar (kg)	CO2-uitstoot bij 4100 GJ/jaar (kg)
Nulmeting	CV-ketel (type HR 107)						250.000	243.000	77.490
Geothermie	bodemenergie < 500m						125.000	38.000	
	aardwarmte < 4 km						19.000	6.000	
	ultradiep > 4 km						19.000	6.000	
Aquathermie	TEO - oppervlakte						121.000	38.000	
	TEA - afval						88.000	25.000	
	TED - drinkwater						88.000	25.000	
Restwarmte	industrie						37.000	11.000	
	datacenter						113.000	34.000	

Figuur 5-7. Resultaat van duurzaamheidsbeoordeling voor de nieuwbouwwijk (energielabel B, 100 woningen) met het DSS.

6. Discussie en Conclusie

6.1. Discussie

Op basis van systematisch literatuuronderzoek hebben we onderzocht op welke wijze de duurzaamheid van warmtebronnen van warmtenetten getoetst kan worden: van de huidige warmtenetten en van warmtenetten in ontwikkeling. Ook hebben we onderzocht wat deze toetsing betekent voor de huidige warmtenetregio's Leeuwarden, Twente en Eindhoven/Helmond. In deze paragraaf bediscussiëren we onze bevindingen in de bredere context van de energietransitie en de milieuwetenschappen.

Dit onderzoek is uitgevoerd met de warmtebronnen geothermie, aquathermie en restwarmte, waarbij het effect op de ecologie, de uitstoot en de leveringszekerheid zijn meegenomen als duurzaamheidsaspecten. Naast deze als duurzaam beschouwde warmtebronnen wordt de CV-ketel beschouwd ter referentie. Duurzame warmtebronnen zoals biomassa, zonthermie en biogas zijn niet meegenomen, en andere duurzaamheidsaspecten zoals watergebruik, of financiële en sociale aspecten zijn buiten beschouwing gelaten.

De toetsing van warmtebronnen geothermie, aquathermie en restwarmte laat – op basis van systematisch literatuuronderzoek - zien dat ze een duurzaam alternatief zijn voor verwarming met CV-ketels. Het gebruik van deze bronnen in een warmtenet brengt een vermindering van CO₂-uitstoot met zich mee van 80 tot 98% ten opzichte van de CV-ketel in het jaar 2030 (Dinkelman & Menkveld, 2021). Dit past binnen de doelstelling van de warmtesector om gemiddeld maximaal 18,9 kg CO₂ per GJ warmte uit te stoten. Hiermee dragen deze warmtebronnen bij aan de geplande CO₂-reductie van vijftig procent in 2030 en klimaatneutraliteit in 2050 in de Nederlandse en internationale klimaatdoelstellingen. Daarnaast passen deze geothermie en aquathermie in een aardgasvrije samenleving, een beleidsdoelstelling in Nederland.

Voor leveringszekerheid als duurzaamheidsaspect is die beleidsdoelstelling relevant. Doordat het gebruik van Gronings aardgas afgebouwd wordt, zou Nederland voor de verwarming met de huidige CV-ketels afhankelijk worden van de import van buitenlands gas; dit is financieel ongunstig en brengt de leveringszekerheid in gevaar. Internationaal gezien kunnen andere beleidsdoelstellingen gelden. Er is internationaal een discussie gaande over aardgas als duurzame bron (EU Platform on Sustainable Finance, 2022): aardgas is de meest schone fossiele brandstof en is qua uitstoot schoner dan een kolencentrale. Duitsland is in de verduurzamingsslag bijvoorbeeld juist in een transitie van brandolie en steenkool naar aardgas voor de warmteproductie (BWK, 2022). Maar dit is slechts een tussenstap, want om aan de internationale klimaatafspraken te voldoen moet ook Duitsland in 2050 van het gas af zijn. Voor de toetsing van warmtenet (met het DSS) zou het als duurzaam beschouwen van aardgas weinig effect hebben, omdat de CO₂-uitstoot van deze fossiele brandstof nog altijd hoger zal zijn dan die van de niet-fossiele warmtebronnen, en omdat de afhankelijkheid van import van aardgas nog altijd zorgt voor een negatieve impact op de leveringszekerheid.

De duurzaamheid van warmtebronnen van warmtenetten kan getoetst worden op basis van beslisregels op basis van criteria. De CO₂-uitstoot wordt vaak als enige criterium beschouwd in onderzoeken naar duurzaamheid van warmtenetten, of als enige duurzaamheids criterium in multicriteria-onderzoeken naar de meest gunstige warmtenetten waarbij ook financiële en sociale factoren worden meegenomen (paragraaf 3.2.4). De meerwaarde van dit onderzoek ligt in het samenkomen van de ecologische aspecten, de uitstoot, de leveringszekerheid en veiligheidsaspecten van verschillende niet-fossiele warmtebronnen.

Het Decision Support System voor de toetsing van warmtenetten op duurzaamheid is voor drie praktijksituaties getoetst door twee warmtebron/woonwijk-combinaties en één wijk met meerdere warmtebronnen in te voeren. De toepasbaarheid van het model is hiermee geverifieerd: met de publiek beschikbare informatie over de plaatselijke warmtevraag, de omgevingskenmerken en de potentie van de warmtebron is het mogelijk een duurzaamheidsindicatie te krijgen van de warmtebronnen. Indien er geen gegevens zijn over de brontemperatuur en de warmtevraag blijkt het mogelijk om met openbaar beschikbare referentiewaarden te werken om een globale, snelle indicatie te krijgen van welke warmtebronnen potentieel duurzaam zijn.

Het DSS is een flexibel opgezet model om de duurzaamheid van warmtebronnen van warmtenetten te kunnen toetsen. Een warmtebedrijf als gebruiker van het model kan met een aantal toevoegingen aan het DSS een meer genuanceerde duurzaamheidsindicatie opstellen. We hebben met de CV-ketel als referentie al laten zien dat de gebruiker een andere warmtebron kan toevoegen. Andere toevoegingen kunnen zijn:

(1) *wijzigingen in duurzaamheid van de energiemix* -

in de huidige vorm van het DSS wordt de uitstoot door het opwekken van elektriciteit berekend aan de hand van de huidige elektriciteitsmix en een prognose voor 2030. Deze waarde kan desgewenst aangepast worden, bijvoorbeeld met een prognose voor 2050.

(2) *warmtebronnen (bijvoorbeeld biomassa)* -

als een duurzame bron als biomassa toegevoegd zou worden, zou een uitbreiding gemaakt kunnen worden om de uitstoot van meer gassen (NO_x, SO_x) en fijnstof mee te nemen. Bij de huidige warmtebronnen worden deze echter berekend aan de hand van een forfaitaire factor die is vastgesteld voor de Nederlandse elektriciteitsmix, en dit heeft weinig toegevoegde waarde: alleen de duurzaamheid van de elektriciteit wordt hiermee bepaald, niet die van het warmtenet als geheel.

(3) *toetsingscriteria (bijvoorbeeld voor ecologie)* -

voor het huidige DSS geldt voor ecologie dat er in Nederland te weinig gegevens beschikbaar zijn om voor alle warmtebronnen te bepalen of deze een effect hebben op de omgeving. Extra monitoring en onderzoek kunnen nieuwe criteria opleveren.

(4) *uitstoot bij de productie van restwarmte als warmtebron* -

voor restwarmte uit de industrie wordt de uitstoot van de industrie zelf niet meegenomen, slechts het gedeelte dat veroorzaakt wordt door het warmtenet. De redenering is dat de warmte 'over' is en anders verloren zou gaan, maar het leveren van restwarmte zou een duurzaamheidsstap van de industrie waarbij minder warmte verloren gaat in de weg kunnen staan; op een vergelijkbare manier wordt warmte afkomstig van afvalverbrandingsinstallatie niet volledig als restwarmte gezien, omdat er extra gestookt wordt voor de warmteproductie. Hierbij speelt het "green versus green" dilemma mee (paragraaf 1.3).

(5) *de combinatie van warmtebronnen* -

het onderzoek richtte zich op afzonderlijke warmtebronnen; met het Decision Support System (DSS) kunnen losse bronnen in een bestaande situatie worden getoetst op duurzaamheid en kunnen zo met elkaar vergeleken worden. Voor de 5e generatie warmtenetten zal juist ingezet worden op het combineren van lokale lage-temperatuurbronnen zoals aquathermie en bodemenergie (tot 500 m diepte) in een net om zo de efficiëntie en leveringszekerheid te vergroten. Het warmteverlies bij transport in een laagtemperatuur-net is kleiner, dus is het net zuiniger. In de huidige vorm van het DSS worden warmtebronnen apart van elkaar beoordeeld, maar het is mogelijk om het toetsen van combinaties van warmtebronnen als functionaliteit toe te voegen. Als verschillende brontypen gecombineerd worden in een warmtenet kan het effect op de omgeving veranderen; het effect van opwarming van de bodem in het geval van geothermie kan bijvoorbeeld tegengewerkt worden (of teniet worden gedaan) door koudwaterlozingen van aquathermie (TEO), waardoor het effect op ecosystemen vermindert wordt.

(6) *warmte- en koudelevering* -

dit onderzoek richtte zich op warmtenetten. In een warmte-koudenet is het mogelijk om warmte- en koudelevering te combineren in een net. Dat is mogelijk voor de warmtebronnen aquathermie en bodemenergie: hiervoor geldt dat warmte (in de zomer) kan worden opgeslagen in een warmtekoudeopslag (WKO). Warmte-koudenetten zijn niet meegenomen in dit onderzoek, maar het benutten van de koude maakt het efficiënter, zeker als de koude levering als alternatief gezien wordt voor een airconditioninginstallatie die relatief veel energie verbruikt.

Uitbreiding van dit onderzoek richting warmte-koudenetten zou een logische stap zijn. Ook is het mogelijk meer efficiëntiewinst te behalen door slimme netwerken te ontwerpen waarbij elektriciteit, warmte en koude gekoppeld kunnen worden, de zogenaamde *smart grids*. Dit ligt wat verder van dit onderzoek af, maar is zeker een interessante stap richting een energiezuinige samenleving.

6.2. Conclusies

Op de hoofdvraag: 'Op welke wijze kan de duurzaamheid van de warmtebronnen voor huidige en toekomstige warmtenetten getoetst worden?' kan voor de onderzochte warmtebronnen en duurzaamheidsaspecten worden vastgesteld dat er in ieder geval 12 duurzaamheidscriteria te formuleren zijn. Met behulp van de geformuleerde duurzaamheidscriteria en de bijbehorende classificaties (Tabel 4.1) is een DSS opgesteld. Het DSS is een hulpmiddel om de duurzaamheid van warmtebronnen in beeld te brengen. Uit de casestudies blijkt dat het DSS een bruikbare tool is om warmtebronnen op duurzaamheid te schalen.

Op de tweede onderzoeksvraag: 'En wat betekent de uitkomst van deze toetsing voor de verduurzaming van de warmtebronnen in de warmtenet-regio?' kunnen we als antwoord geven dat er in de drie onderzochte regio's nog ruimte is voor verduurzaming van de bestaande warmtenetten, door zowel aquathermie en restwarmte in te zetten in plaats van het huidig gebruikte aardgas en afvalverbranding.

7. Aanbevelingen

7.1.1. Aanbevelingen voor warmtebedrijven met betrekking tot het DSS

Het DSS is opgezet op basis van huidige wetenschappelijke inzichten. Het systeem is flexibel van opzet, zodat warmtebedrijven zelf aanpassingen kunnen doen aan de hand van nieuwe beschikbare literatuur of veranderende wetgeving. Het is warmtebedrijven zeer aan te raden te blijven samenwerken met onderzoeksinstituten en kenniscentra om de meest recente wetenschappelijke kennis in het DSS toe te voegen en toe te passen bij het selecteren van warmtebronnen.

Het huidige DSS is echter incompleet en kan hoogstens dienst doen als basismodel. Om een volledige, op literatuur gebaseerde database van duurzaamheidscriteria te hebben is het van belang ook van de warmtebronnen biogas, biomassa, waterstof en zonthermie de duurzaamheidscriteria op basis van literatuuronderzoek in kaart te brengen. Ook duurzaamheidsaspecten als draagvlak en levenscycli van warmteproductie moeten worden toegevoegd aan het DSS, net als de mogelijkheid om meerdere warmtebronnen in één warmtenet te combineren.

Onderzoek de mogelijkheden en beschikbare literatuur voor sensible heat storage (warmte van chemische processen) en voeg de opties voor warmteopslag toe in het DSS. In het huidige DSS zijn daarnaast het warmteverlies van het warmtenet, het eventuele gebruik van warmtepompen met daarbij kans op lekkage van koelmiddelen en het risico op koolmonoxidevergiftiging en explosiegevaar bij CV-ketels niet meegenomen. Deze punten zullen moeten worden geïntegreerd om een eerlijk duurzaamheidsoordeel te kunnen geven.

7.1.2. Algemene aanbevelingen voor warmtebedrijven

Voorkom warmteverliezen door het gebruik van goed geïsoleerde buizen, zowel verticaal (geothermie) als horizontaal (transport), om verzilting en extra opwaardering van warmte te voorkomen. Kijk bij opwaardering naar andere bronnen dan aardgas, bijvoorbeeld biogas of hoge temperatuur restwarmte, waardoor er minder fossiele brandstoffen nodig zijn en er minder uitstoot plaatsvindt. Bij het centraal opwaarderen in plaats van lokaal bij de afnemers neemt daarnaast het risico op CO-vergiftiging af.

Gebruik bijvangst van methaan bij geothermie en voorkom dat het in de atmosfeer terecht komt. Bij de verbranding van dit methaan kan vrijgekomen warmte gebruikt worden in een warmtenet. Een nadeel van deze verbranding is het vrijkomen van CO₂. Het is belangrijk dat de put nog een geruime tijd (meer dan 30 jaar) ná het verlaten van de locatie in de gaten gehouden wordt in verband met het vrijkomen van mogelijk schadelijke stoffen.

Neem bij het gebruik van restwarmte de uitstoot van de warmtebron meenemen in de afweging en kies voor de minst vervuilende bron. Hierdoor wordt de warmteafname als een extra stimulans om een vervuilende bron in stand te houden vermeden.

7.1.3. Aanbevelingen voor warmtebedrijven, lokale politiek en onderzoekscentra

Werk samen en deel bevindingen en informatie. Informatie uit de praktijk verzamelen en uitwisselen zal de komende jaren cruciaal zijn om op een ecosysteem-vriendelijke manier om te gaan met warmtebronnen. Het STOWA heeft het voortouw genomen in de monitoring als het gaat om aquathermie, maar ook bij geothermie en restwarmte is het aan te raden jarenlange monitoring op te zetten. Bij geothermie kan worden gedacht aan het in beeld blijven brengen van de grondlagen waar de warmte wordt gewonnen, om eventuele inzakkingen vroegtijdig op te merken. SCAN heeft namens de Nederlandse overheid een programma opgezet om de bodem in Nederland in beeld te brengen met het oog op geothermie en ook TNO is bezig met grootschalige onderzoeken. Ook monitoring van de omgeving en de gezondheid van omwonenden in verband met risico's op inademing van fijnstof en H₂S zijn belangrijk. Door alle praktijksituaties jarenlang in kaart te brengen is uiteindelijk een compleet duurzaamheidsoordeel te vellen.

Literatuur

- Algemene Rekenkamer. (2021). *Bescherming drinkwater bij het boren naar aardwarmte*.
- Azaza, M. S., Dhraïef, M. N., & Kraïem, M. M. (2008). Effects of water temperature on growth and sex ratio of juvenile Nile tilapia *Oreochromis niloticus* (Linnaeus) reared in geothermal waters in southern Tunisia. *Journal of Thermal Biology*, 33(2), 98-105.
<https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2007.05.007>
- Babiarz, B., & Blokus, A. (2020). Dependency of technological lines in reliability analysis of heat production. *Energy*, 211. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118593>
- Barberi, F., Carapezza, M. L., Ranaldi, M., & Tarchini, L. (2007). Gas blowout from shallow boreholes at Fiumicino (Rome): Induced hazard and evidence of deep CO₂ degassing on the Tyrrhenian margin of Central Italy. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 165(1-2), 17-31.
<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2007.04.009>
- Bates, M. N., Garrett, N., & Shoemack, P. (2002). Investigation of Health Effects of Hydrogen Sulfide from a Geothermal Source. *Environmental Health: An International Journal*, 57:5, 405-411.
<https://doi.org/10.1080/00039890209601428>
- Bayer, P., Rybach, L., Blum, P., & Brauchler, R. (2013). Review on life cycle environmental effects of geothermal power generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.039>
- Benz, S. A., Bayer, P., Menberg, K., Jung, S., & Blum, P. (2015). Spatial resolution of anthropogenic heat fluxes into urban aquifers. *Science of the Total Environment*, 524-525, 427-439.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.04.003>
- Berjawi, A. E. H., Walker, S. L., Patsios, C., & Hosseini, S. H. R. (2021). An evaluation framework for future integrated energy systems: A whole energy systems approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 145. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111163>
- Blum, P., Menberg, K., Koch, F., Benz, S. A., Tissen, C., Hemmerle, H., & Bayer, P. (2021, May). Is thermal use of groundwater a pollution? *Journal of Contaminant Hydrology*, 239, Article 103791. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2021.103791>
- Bonte, M., van Breukelen, B. M., & Stuyfzand, P. J. (2013, Sep 15). Temperature-induced impacts on groundwater quality and arsenic mobility in anoxic aquifer sediments used for both drinking water and shallow geothermal energy production. *Water Res*, 47(14), 5088-5100.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.05.049>
- Bruijs, M. C. M. (2007). *Bureaustudie naar technische en operationele maatregelen bij koelwaterinlaten om de effecten van visinzuiging te reduceren*.
- Brundtland, G. H., & Khalid, M. . (1987). *Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future*.
- Buijze, L., Van Bijsterveldt, L., Cremer, H., Paap, B., Veldkamp, H., Wassing, B. B. T., Van Wees, J.-D., Van Yperen, G. C. N., Ter Heege, J. H., & Jaarsma, B. (2019). Review of induced seismicity in geothermal systems worldwide and implications for geothermal systems in the Netherlands. *Netherlands Journal of Geosciences*, 98. <https://doi.org/10.1017/njg.2019.6>
- Bustaffa, E., Cori, L., Manzella, A., Nuvolone, D., Minichilli, F., Bianchi, F., & Gorini, F. (2020). The health of communities living in proximity of geothermal plants generating heat and electricity: A review. *Science of The Total Environment*, 706.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135998>

- BWK. (2022). *Stellungnahme der Bundesregierung zur Taxonomie der Europäischen Union*. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz.
- Calise, F. (2012). High temperature solar heating and cooling systems for different Mediterranean climates: Dynamic simulation and economic assessment. *Applied Thermal Engineering*, 32, 108-124. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.08.037>
- CBS-TNO. (2020). *Warmtemonitor 2019*. <https://www.cbs.nl/nl-nl/achtergrond/2020/35/warmtemonitor-2019>
- CBS. (2021). *92 procent woningen op aardgas begin 2019*. <https://www.cbs.nl/nl-nl/nieuws/2021/07/92-procent-woningen-op-aardgas-begin-2019>
- CBS. (2021b). *StatLine, Energiebalans; aanbod, omzetting en verbruik*. Retrieved November 3rd, 2021 from <https://opendata.cbs.nl/statline/#/CBS/nl/dataset/83140NED/table?ts=1635963751879>
- CE-Delft. (2020). *Verkennd onderzoek zonthermie Zuid-Holland*. <https://www.zuid-holland.nl/publish/pages/26786/cedelft200260verkenndonderzoekzonthermiezhindrapportage17nov2020.pdf>
- Chen, Y., Wang, J., & Lund, P. D. (2020). Sustainability evaluation and sensitivity analysis of district heating systems coupled to geothermal and solar resources. *Energy Conversion and Management*, 220, Article 113084. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113084>
- CLO. (2020). *Waterkwaliteit KRW, 2019*. <https://www.clo.nl/indicatoren/nl1438-kwaliteit-oppervlaktewater-krw>
- Deerns. (2012). *Haalbaarheidsstudie naar het gebruik van de restwarmte van Jaap Eden Ijsbanen*. <https://www.greendeals.nl/sites/default/files/downloads/Eindrapport-gebruik-restwarmte-van-Jaap-Eden.pdf>
- Dijkstra, H., Dinkelman, D., Hanegraaf, M., Veldkamp, H., & Van Wees, J.-D. (2020). *Duurzaamheid van geothermie in warmtenetten (whitepaper)*. TNO. <https://www.tno.nl/nl/over-tno/nieuws/2020/12/geothermie-duurzame-energiebron/>
- Dincer, I., & Rosen, M. A. . (2021). *Exergy. Chapter 4 - Exergy, environment, and sustainable development* (Third Edition ed.).
- Dinkelman, D., Dijkstra, H., Simon, L. d., Ros, J., Hanegraaf, M., Veldkamp, H., & Van Wees, J. D. (2021). *Duurzaamheid Geothermie - Factsheet (WarmingUp)*. TNO.
- Dinkelman, D., & Dijkstra, H. E. (2020). *Technische notitie – Berekening duurzaamheid geothermie in warmtenetten*. TNO.
- Dinkelman, D., & Menkveld, M. (2021). *Berekening duurzaamheid van warmtebronnen* (TNO 2021 R12317). TNO.
- Dobson, A., Lodge, D., Alder, J., Cumming, G. S., Keymer, J., McGlade, J., Mooney, H., Rusak, J. A., Sala, O., Wolters, V., Wall, D., Winfree, R., & Xenopoulos, M. A. (2006). HABITAT LOSS, TROPHIC COLLAPSE, AND THE DECLINE OF ECOSYSTEM SERVICES. *Ecology*, 87(8), 1915-1924. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(2006\)87\[1915:hltcat\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(2006)87[1915:hltcat]2.0.co;2)
- Dunne, J. A., Williams, R. J., & Martinez, N. D. (2002). Network structure and biodiversity loss in food webs: robustness increases with connectance. *Ecology Letters*, 5(4), 558-567. <https://doi.org/10.1046/j.1461-0248.2002.00354.x>

- EBN. (2018). Masterplan Aardwarmte in Nederland. <https://www.ebn.nl/wp-content/uploads/2018/05/20180529-Masterplan-Aardwarmte-in-Nederland.pdf>
- EBN. (2021). *Week van de Aardwarmte 2021*. Retrieved December 12th, 2021 from <https://www.ebn.nl/>
- Elbersen, J. W. H., Verdonschot, P. F. M., Roels, B., & Hartholt, J. G. (2003). *Definitie KaderRichtlijn Water (KRW) I. Typologie Nederlandse Oppervlaktewateren*.
- EnergieAtlas. (2021). *Kaarten - Nationale Energie Atlas*. Retrieved January, 31st from <https://www.nationaleenergieatlas.nl/kaarten>
- Ennatuurlijk. (2021a). *Warmtenet Leeuwarden*. <https://ennatuurlijk.nl/warmtenetten/leeuwarden>
- Ennatuurlijk. (2021b). *Warmtenetten van Ennatuurlijk*. Retrieved 2-1-2022 from <https://ennatuurlijk.nl/warmtenetten-van-ennatuurlijk>
- Ennatuurlijk. (2021c). *Wat is stadsverwarming*. <https://ennatuurlijk.nl/warmtenetten/wat-stadsverwarming>
- Equinix. (2022). *Equinix*. Retrieved February, 2nd from <https://www.equinix.nl/data-centers/europe-colocation/netherlands-colocation/enschede-data-centers/en1>
- ETW. (2021c). *Expertiseteam Warmte Noord-Brabant. Potentie aquathermie*. [Youtube]. <https://www.youtube.com/watch?v=Bz3ApzO8Mv4>
- EU Platform on Sustainable Finance. (2022). *Response to the Complementary Delegated Act*.
- Expertise Centrum Warmte. (2021, Juli 2021). *Factsheet Aquathermie*. Expertise Centrum Warmte (ECW). Retrieved 2-1-2022 from <https://expertisecentrumwarmte.nl/themas/technische+oplossingen/techniefactsheets+energiebronnen/aquathermie+nieuw/default.aspx>
- García-Gil, A., Epting, J., Ayora, C., Garrido, E., Vázquez-Suñé, E., Huggenberger, P., & Gimenez, A. C. (2016, Nov). A reactive transport model for the quantification of risks induced by groundwater heat pump systems in urban aquifers. *Journal of Hydrology*, 542, 719-730. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.09.042>
- Gaudard, A., Wüest, A., & Schmid, M. (2019). Using lakes and rivers for extraction and disposal of heat: Estimate of regional potentials. *Renewable Energy*, 134, 330-342. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.10.095>
- Geelen, C., & Van Gerwen, R. (2021). *Natuurlijke koudemiddelen in warmtepompen* (TSE4200018). Infinitus & ENTROPYCS - in opdracht van TKI Urban Energy en RVO. <https://www.topsectorenergie.nl/sites/default/files/uploads/Urban%20energy/publicaties/Natuurlijke%20koudemiddelen%20in%20warmtepompen%20-%208%20juni%202021.pdf>
- Geothermie Nederland. (2020). *Soorten geothermie*. <https://www.geothermie.nl/index.php/nl/geothermie-aardwarmte/wat-is-geothermie/22-geothermie/wat-is-geothermie/84-soorten-geothermie>
- Gerlak, A., Heikkilä, T., Smolinski, S.L., Huitema, D., & Armitage, D. (2017). Learning our way out of environmental policy problems: a review of the scholarship. *Policy Sciences*, 51, 335-371. <https://doi.org/https://dx.doi.org/10.1007/s11077-017-9278-0>
- Gezondheidsraad. (2019). *Gezondheidsrisico's door lage concentraties koolmonoxide. Advies aan de minister van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties* (Nr. 2019/11). Den Haag.

- Ghafghazi, S., Sowlati, T., Sokhansanj, S., & Melin, S. (2010, Apr). A multicriteria approach to evaluate district heating system options [Article]. *Applied Energy*, 87(4), 1134-1140. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.06.021>
- Gonzales. (2013). *Aardwarmte Rapport duurzaamheidsanalyse GWW*. https://geothermie.nl/images/Handboeken/Rapport_duurzaamheidsanalyse_GWW.pdf
- Green Deal. (2021, 22-2-2021). *CO2-emissiefactoren*. Retrieved 2-1-2022 from <https://www.co2emissiefactoren.nl/lijest-emissiefactoren/#warmtelevering>
- H2O. (2020). *Warmte uit water, de grote belofte van de energietransitie*. <https://edepot.wur.nl/524815>
- Hadian, S., & Madani, K. (2015). A system of systems approach to energy sustainability assessment: Are all renewables really green? *Ecological Indicators*, 52, 194-206. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.11.029>
- Harezlak, V. (2021). *Effecten van koudelozingen op het ecologisch functioneren van oppervlaktewatersystemen*.
- Harmelink, M. (2020). *Duurzaamheid van warmte- & koudelevering - Voorstel voor inhoud van de rapportageverplichting onder de Warmtewet (RVO-043-2020/RP-DUZA)*. RVO - in opdracht van het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat. <https://www.rvo.nl/onderwerpen/duurzaam-ondernemen/duurzame-energie-opwekken/verduurzaming-warmtevoorziening/publicaties/warmtewet>
- Hellebrand, K., Post, R. J., & in 't Groen, B. (2012). *Kansen voor ondiepe geothermie in de glastuinbouw*.
- Holland, R., Khan, M. A. H., Driscoll, I., Chhantyal-Pun, R., Derwent, R. G., Taatjes, C. A., Orr-Ewing, A. J., Percival, C. J., & Shallcross, D. E. (2021, Apr). Investigation of the Production of Trifluoroacetic Acid from Two Halocarbons, HFC-134a and HFO-1234yf and Its Fates Using a Global Three-Dimensional Chemical Transport Model. *Acs Earth and Space Chemistry*, 5(4), 849-857. <https://doi.org/10.1021/acsearthspacechem.0c00355>
- Huang, P., Copertaro, B., Zhang, X. X., Shen, J. C., Lofgren, I., Ronnelid, M., Fahlen, J., Andersson, D., & Svanfeldt, M. (2020, Jan). A review of data centers as prosumers in district energy systems: Renewable energy integration and waste heat reuse for district heating [Review]. *Applied Energy*, 258, 20, Article 114109. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114109>
- IRENA. (2017). *Renewable energy in district heating and cooling - A sector roadmap for remap*.
- Johnson, G. D., & Stephens, S. E. (2011). Wind Power and Biofuels: A Green Dilemma for Wildlife Conservation. In (pp. 131-155). Island Press/Center for Resource Economics. https://doi.org/10.5822/978-1-61091-022-4_8
- Kecebas, A. (2013, Jan). Energetic, exergetic, economic and environmental evaluations of geothermal district heating systems: An application. *Energy Conversion and Management*, 65, 546-556. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.07.021>
- Kerkum, L. C. M., Vaate bij de, A., Bijlstra, D., Jong de, S. P., & Jenner, H. A. (2004). *Effecten van koelwater op het zoete aquatische milieu*.
- KNMI. (2021). *Aardbevingen door gaswinning*. <https://www.knmi.nl/kennis-en-datacentrum/uitleg/aardbevingen-door-gaswinning>

- KNMI. (2021b). *Signaal '21*. Retrieved December 23rd, 2021 from <https://www.knmi.nl/kennis-en-datacentrum/achtergrond/knmi-klimaatsignaal-21>
- Kosten, S. (2011). *Een frisse blik op warmer water*.
- Kruit, K., Schepers, B., Roosjen, R., & Boderie, P. (2018). *Nationaal potentieel van aquathermie: analyse en review van de mogelijkheden* (18.5S74.116). CE Delft.
- Kruitwagen, G., Phernambucq, I., & Ypma, E. (2021). *Kader voor vergunningverlening koudelozingen*.
- Lake, A., Rezaie, B., & Beyerlein, S. (2017). Review of district heating and cooling systems for a sustainable future. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 417-425. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.061>
- Leefmilieu Brussel. (2019). *Gids Koelinstallaties*.
- Legler, N. D., Johnson, T. B., Heath, D. D., & Ludsin, S. A. (2010). Water Temperature and Prey Size Effects on the Rate of Digestion of Larval and Early Juvenile Fish. *Transactions of the American Fisheries Society*, 139(3), 868-875. <https://doi.org/10.1577/t09-212.1>
- Li, B., Wu, S., Zhou, S., Wang, T., & Chen, H. (2017). Quantifying and mapping threats to soil biodiversity in Nanjing, China. *European Journal of Soil Biology*, 82, 72-80. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2017.08.007>
- Li, X., Chen, Z., & Zhao, J. (2006). Simulation and experiment on the thermal performance of U-vertical ground coupled heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*, 26(14-15), 1564-1571. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2005.12.007>
- Lo, L.-h. (2011). Diversity, security and adaptability in energy systems; a comparative analysis of four countries in Asia. *World Renewable Energy Congress*. <https://doi.org/https://doi.org/10.3384/ecp110572401>
- Lund, H., Østergaard, P. A., Nielsen, T. B., Werner, S., Thorsen, J. E., Gudmundsson, O., Arabkoohsar, A., & Mathiesen, B. V. (2021a). Perspectives on fourth and fifth generation district heating. *Energy*, 227. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120520>
- Lund, J. W., & Toth, A. N. (2021b). Direct utilization of geothermal energy 2020 worldwide review. *Geothermics*, 90. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2020.101915>
- Lygnerud, K., & Werner, S. (2018). Risk assessment of industrial excess heat recovery in district heating systems. *Energy*, 151, 430-441. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.047>
- Mahon, H., O'Connor, D., Friedrich, D., & Hughes, B. (2022). A review of thermal energy storage technologies for seasonal loops. *Energy*, 239. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122207>
- Menkveld, M., Matton, R., Segers, R., Vroom, J., & Kraemer, A. M. (2017). *Monitoring warmte 2015*.
- Mermillod-Blondin, F., Lefour, C., Lalouette, L., Renault, D., Malard, F., Simon, L., & Douady, C. (2013). Thermal tolerance breadths among groundwater crustaceans living in a thermally constant environment. *Journal of Experimental Biology*, 216(9), 1683-1694. <https://doi.org/10.1242/jeb.081232>
- Milieu Centraal. (2022). *Cv-ketel onderhoud en instelling*. Retrieved 6-2-2022 from <https://www.milieucentraal.nl/energie-besparen/verwarmen-op-gas-of-hout/cv-ketel-onderhoud-en-instelling/>

- Myhre, G., D. Shindell, F.-M. Bréon, W. Collins, J. Fuglestvedt, J. Huang, D. Koch, J.-F. Lamarque, D. Lee, B. Mendoza, T. Nakajima, A. Robock, Stephens, G., Takemura, T., & Zhang, H. (2017). Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. Greenhouse Gas Protocols: Global Warming Potential Values. In T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. & M. T. Plattner, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (Eds.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Naicker, S. S., & Rees, S. J. (2018). Performance analysis of a large geothermal heating and cooling system. *Renewable Energy*, 122, 429-442. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.01.099>
- NAM. (2021). *Gas- en Oliewinning*. Retrieved December 13th, 2021 from <https://www.nam.nl/gas-en-oliewinning/aardgaswinning-op-zee.html>
- Nederlandse Voedsel- en Warenautoriteit. (2021). *Koolmonoxidevergiftiging*. NVWA. Retrieved 28-1-2022 from <https://www.nvwa.nl/onderwerpen/gastoeellen/koolmonoxidevergiftiging>
- NEN. (2020). *NTA 8800*.
- NP RES. (2020). *Factsheet Warmte. Achtergrondinformatie per warmtebon*. NP RES.
- Nussbaumer, T., & Thalmann, S. (2014). *Status Report on District Heating Systems in IEA Countries*. Zurich: IEA bioenergytask 32.
- Onderzoeksraad voor Veiligheid. (2015). *Koolmonoxide - onderschat en onbegrepen gevaar*. Onderzoeksraad voor Veiligheid (OVV). Den Haag.
- Papa, T. J. G., Wijnant-Timmerman, S. I., & Van Leeuwen, R. P. (2019). *Warmtenetten: Technische karakterisering* (WIEfm-WP4). Saxion - Lectoraat Duurzame Energievoorziening.
- PBL. (2021). *Klimaat- en Energieverkenning (KEV) 2021* (PBL 4681). PBL.
- Rabet, R. S., Simsek, C., Baba, A., & Murathan, A. (2017). Blowout mechanism of Alasehir (Turkey) geothermal field and its effects on groundwater chemistry. *Environmental Earth Sciences*, 76(1). <https://doi.org/10.1007/s12665-016-6334-6>
- RAVON. (2021). *Soorten*. <https://www.ravon.nl/Soorten/Soortinformatie/category/vissen>
- RES Metropoolregio Eindhoven. (2021). Regionale Energiestrategie 1.0 (RES).
- Riedel, T. (2019, May). Temperature-associated changes in groundwater quality. *Journal of Hydrology*, 572, 206-212. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.02.059>
- Rijksoverheid. (2019). Klimaatakkoord.
- Rijksoverheid. (2020a). *Definitief einde gaswinning Groningen wettelijk geregeld*. Retrieved December 6th, 2021 from <https://www.rijksoverheid.nl/actueel/nieuws/2020/11/24/definitief-einde-gaswinning-groningen-wettelijk-geregeld>
- Rijksoverheid. (2021). *Gaswinning in Groningen*. <https://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/gaswinning-in-groningen>
- Rijksoverheid. (2022). *Natuur Netwerk Nederland (NNN)*. Retrieved 4-2-2022 from <https://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/natuur-en-biodiversiteit/natuurnetwerk-nederland>

- Rijkswaterstaat. (2022). *Ozonlaagafbrekende stoffen en gefluoreerde broeikasgassen*. Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat. Retrieved 14-1-2022 from <https://www.infomil.nl/onderwerpen/lucht-water/lucht/ozon-en-f-gassen/>
- Rus - van der Velde, M. (2021). De Warmtewet 2: Hoofdlijnen. <https://www.omgevingsweb.nl/nieuws/de-warmtewet-2-hoofdlijnen-deel-1-van-3/>
- Rutz, D., Worm, J., Doczekal, C., Kazagic, A., Duic, N., Markovska, N., Batas Bjelic, I. R., Sunko, R., Tresnjo, D., Merzic, A., Doracic, B., Gjorgievski, V., Janssen, R., Redzic, E., Zweiler, R., Puksec, T., Sunko, B., & Rajakovic, N. (2019). Transition towards a sustainable heating and cooling sector - case study of Southeast European countries. *Thermal Science*, 23(6), 3293-3306. <https://doi.org/10.2298/tsci190107269r>
- RVO. (2018). *Warmte uit datacenters*. <https://www.rvo.nl/onderwerpen/duurzaam-ondernemen/duurzame-energie-opwekken/restwarmte/restwamte-datacenters>
- RVO. (2021a, februari 2021). *Nationale Energieatlas: Energielabels van gebouwen*. Retrieved 23-1-2022 from <https://www.nationaleenergieatlas.nl/>
- RVO. (2021b). *Warmteatlas van RVO*. Retrieved 15-1-2022 from <https://rvo.b3p.nl/viewer/app/Warmteatlas/v2>
- Santin, M., Chinese, D., De Angelis, A., & Biberacher, M. (2020). Feasibility limits of using low-grade industrial waste heat in symbiotic district heating and cooling networks. *Clean Technologies and Environmental Policy*(22), 1339–1357. <https://doi.org/10.1007/s10098-020-01875-2>
- Saunders, M., Lewis, P., & Thornhill, A., . (2019). *Research Methods for Business Students* (8th ed.). Pearson Education.
- Sayed, E. T., Wilberforce, T., Elsaid, K., Rabaia, M. K. H., Abdelkareem, M. A., Chae, K. J., & Olabi, A. G. (2021, Apr 20). A critical review on environmental impacts of renewable energy systems and mitigation strategies: Wind, hydro, biomass and geothermal. *Sci Total Environ*, 766, 144505. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144505>
- SCAN. (2021). *Wat is SCAN*. Retrieved December 14th, 2021 from <https://scanaardwarmte.nl/>
- Scheffer, M., Carpenter, S., Foley, J. A., Folke, C., & Walker, B. (2001). Catastrophic shifts in ecosystems. *Nature*, 413, 591-596.
- Schepers, B. L., & Scholten, T. (2016). *Ketenemissies warmtelevering. Directe en indirecte CO2-emissies van warmtetechnieken* (16.3H06.06). CE Delft.
- Segers, R., Niessink, R., van den Oever, R., & Menkveld, M. (2020). *Warmtemonitor 2019*.
- Statista. (2020). *Leading hard coal producing countries worldwide in 2018*. <https://www.statista.com/statistics/264775/top-10-countries-based-on-hard-coal-production/>
- STOWA. (2021). *Waterbeheer en Regionale Energiestrategieën (WARES)*. <https://www.stowa.nl/onderwerpen/energietransitie/productoren-van-energie-om-aquathermie/waterbeheer-en-regionale>
- STOWA/Rioned. (2021). *Onderzoeksrapport: Invloed riothermiesystemen op de afvalwaterzuivering*. <https://edepot.wur.nl/543153>
- Straka, T. M., Fritze, M., & Voigt, C. C. (2020). The human dimensions of a green–green-dilemma: Lessons learned from the wind energy — wildlife conflict in Germany. *Energy Reports*, 6, 1768-1777. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.06.028>

- Tissen, C., Benz, S. A., Menberg, K., Bayer, P., & Blum, P. (2019, Oct). Groundwater temperature anomalies in central Europe. *Environmental Research Letters*, 14(10), Article 104012. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab4240>
- TNO-EBN. (2021). Ondergrondse Energieopslag noodzakelijk voor toekomstig energiesysteem. Opslag garandeert leveringszekerheid en flexibiliteit. <https://klimaatweb.nl/wp-content/uploads/po-assets/595032.pdf>
- TNO. (2020). *Inventarisatie naar potentie van de ondergrond voor Geothermie*. TNO Bouw en Ondergrond.
- UNFCCC. (2018). *Key aspects of the Paris Agreement*. <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement/key-aspects-of-the-paris-agreement>
- UNFCCC. (2021). *The Glasgow Climate Pact – Key Outcomes from COP26*.
- van der Wal, B., Chan, P. M., & van Weeren, B. J. (2012). Gemalen of vermalen worden?
- van Leeuwen, R. P., de Wit, J. B., & Smit, G. J. M. (2017, Oct). Review of urban energy transition in the Netherlands and the role of smart energy management [Review]. *Energy Conversion and Management*, 150, 941-948. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.05.081>
- van Lopik, J. H., Hartog, N., Zaadnoordijk, W. J., Cirkel, D. G., & Raof, A. (2015). Salinization in a stratified aquifer induced by heat transfer from well casings. *Advances in Water Resources*, 86, 32-45. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2015.09.025>
- Vienken, T., Kreck, M., & Dietrich, P. (2019, Mar). Monitoring the impact of intensive shallow geothermal energy use on groundwater temperatures in a residential neighborhood. *Geothermal Energy*, 7(1), Article 8. <https://doi.org/10.1186/s40517-019-0123-x>
- Voigt, C. C., Straka, T. M., & Fritze, M. (2019). Producing wind energy at the cost of biodiversity: A stakeholder view on a green-green dilemma. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 11(6). <https://doi.org/10.1063/1.5118784>
- Warming-Up. (2021). *Aquathermie viewer*. Retrieved December 1st, 2021 from <https://warmingup.geoapps.nl/#8f8334e5-9aaa-4d2e-ad9b-ffefb02888e1>
- Warmingup. (2021). *Potentiekaart aquathermie*. <https://warmingup.geoapps.nl/#8f8334e5-9aaa-4d2e-ad9b-ffefb02888e1>
- WarmingUp. (2022). *Potentiekaart Aquathermie*. Retrieved 15-1-2022 from <https://warmingup.geoapps.nl/#8f8334e5-9aaa-4d2e-ad9b-ffefb02888e1>
- Warmteregeling. (2013). *Warmteregeling*. Retrieved November 29th, 2021 from <https://wetten.overheid.nl/BWBR0033862/2020-01-01>
- Warmtewet. (2013). *Warmtewet*. Wettenbank-Overheid.nl. Retrieved November 29th, 2021 from <https://wetten.overheid.nl/BWBR0033729/2020-10-25#Opschrift>
- Watanabe, W. O., Ernst, D. H., Chasar, M. P., Wicklund, R. I., & Olla, B. L. (1993). The effects of temperature and salinity on growth and feed utilization of juvenile, sex-reversed male Florida red tilapia cultured in a recirculating system. *Aquaculture*, 112(4), 309-320. [https://doi.org/10.1016/0044-8486\(93\)90392-c](https://doi.org/10.1016/0044-8486(93)90392-c)

WHO. (2021a). *Ambient (outdoor) air pollution*. World Health Organization. Retrieved October 9th, 2021 from [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)

WHO. (2021b). *WHO global air quality guidelines*. World Health Organization (WHO).

Wirtz, M., Kivilip, L., Remmen, P., & Müller, D. (2020). Quantifying Demand Balancing in Bidirectional Low Temperature Networks. *Energy and Buildings*, 224. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110245>

Wolf, M., & Loogman, J. (2020). *Inventarisatie duurzaamheid warmtenetten. Normstelling CO2-emissie Wet collectieve Warmtevoorziening (GV20038-EZK)*. Greenvis B.V. in opdracht van Ministerie van Economische Zaken en Klimaat.

Wortelboer, R., & Harezlak, V. (2020). *Monitoringsplan Ecologische Effecten Thermische Energie Oppervlaktewater*.

Zivkovic, M., & Ivezic, D. (2021). Utilizing sewage wastewater heat in district heating systems in Serbia: effects on sustainability [Article; Early Access]. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 15. <https://doi.org/10.1007/s10098-021-02063-6>

Bijlage A: Vragenlijsten Geothermie, Aquathermie, Restwarmte

De vragenlijsten aan de warmtebron experts zijn per warmtebron uitgegeven. De vragenlijsten zijn oorspronkelijk opgesteld in Excel en als pdf-bestand als bijlage "Bijlage A1 - Vragenlijst_leeg.pdf" toegevoegd aan dit adviesrapport.

De door de experts ingevulde vragenlijsten zijn op te vragen bij de auteurs.

Bijlage B: Overzicht van koelmiddelen

Voor de stoffen in onderstaande tabel is de GWP (zie 0) uitgedrukt in kg CO₂ per kg koelmiddel op een tijdschaal van 100 jaar. De gegeven waarden zijn WtW, *Well to Wheel*, waarbij de productiefase en de gebruiksfase wél worden meegenomen, maar de afvalfase (recycling) en indirecte bijdragen, zoals aanleg van de installatie en infrastructuur, niet. De veiligheidsklasse geeft aan of een stof giftig is (B) of niet (A), het getal geeft aan of deze brandbaar is van laag (1) tot hoog (3). De middelen met hoge brandbaarheid (klasse 3: propaan en butaan) hebben bij lekkage naast de impact op het klimaat ook ontploffingsgevaar.

Tabel B.1: Eigenschappen van een aantal veel gebruikte synthetische en natuurlijke koelmiddelen. Bron: (Green Deal, 2021; Leefmilieu Brussel, 2019; Myhre et al., 2017)

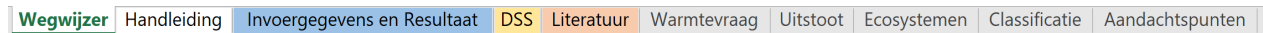
Koelmiddel	Samenstelling/ structuurformule	Veiligheids Klasse	Effect GWP Na 100 jaar, WtW	Toelichting
Synthetische koelmiddelen				
R134A	HFK (C, H en F)	A1	1300 kg CO ₂ /kg	HT-geschikt
R404A	HFK (C, H en F)	A1	3943 kg CO ₂ /kg	Wordt vervangen
R410A	HFK (C, H en F)	A1	1924 kg CO ₂ /kg	Met "glide" Moet ook vervangen, maar alternatief in A1-klasse is niet beschikbaar
R32	HFK (C, H en F)	A2L	677 kg CO ₂ /kg	HFC met lagere GWP-waarde Tot 65 °C favoriet
Natuurlijke koelmiddelen				
Ammoniak (R717)	NH ₃	B2L	0	Geen klimaatteffect, maar wel giftig
Methaan	CH ₄	A3	28 kg CO ₂ /kg	
Propaan (R290)	C ₃ H ₈	A3	3 kg CO ₂ /kg*	HT-geschikt Veel toegepast Grotere schaal
Butaan (R600)	C ₄ H ₁₀	A3	3 kg CO ₂ /kg	HT-warmtepompen
CO₂ (R744)	CO ₂	A1	1 kg CO ₂ /kg	Grotere schaal

Bijlage C: Decision Support System (DSS)

Het Decision Support System voor warmtenetten is toegevoegd als Excel bestand:
Bijlage C - DecisionSupportSystem_warmtenetten.xlsx

Hieronder volgt de handleiding voor het gebruik van het DSS.

Bij het openen van het Excel bestand zijn diverse tabbladen beschikbaar volgens Figuur C-1.



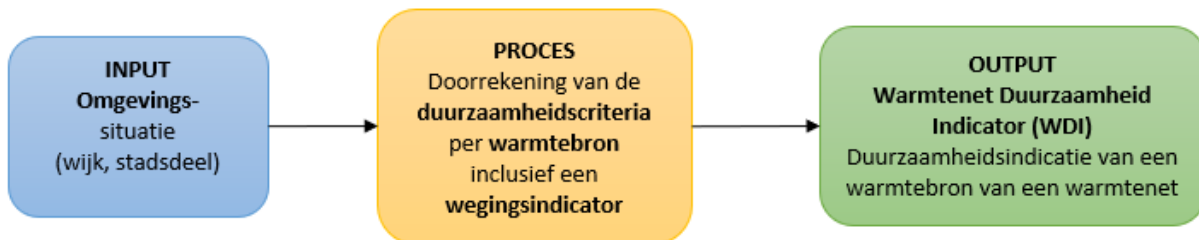
Figuur C-1. Tabbladen van DSS in Excel

In Tabel C.1 worden de tabbladen verklaard.

Tabel C.1. Verklaring van de tabbladen in Excel

Tabblad naam	Verklaring
Wegwijzer	Korte uitleg van het gebruik van het Excel bestand
Handleiding	De handleiding, bijlage C, staat tevens op dit tabblad in het DSS
Invoergegevens en Resultaat	Invoer van omgevingsvariabelen aan de linkerkant in het blauwe deel. Resultaat van de doorrekening in het DSS aan de rechterkant in het groene deel.
DSS	Doorrekening van de variabelen in het model
Literatuur	Verwijzingen naar gebruikte literatuur
Warmtevraag	Overzicht van energielabels met bijbehorende warmtegebruik en warmtevraag per woning
Uitstoot	Detail informatie over uitstoot dat doorgerekend wordt in het model (beschrijving in WP2, LV)
Ecosystemen	Detail informatie over ecologie en waterlichamen die gebruikt wordt in het model (beschrijving in WP1, MB)
Classificatie	De classificatie tabellen die gebruikt worden bij de invoer- en doorrekeningegevens
Aandachtspunten	In sommige gevallen wordt er extra informatie getoond op het resultaten scherm afhankelijk van de warmtebron.

In het DSS kunnen gegevens van de omgeving ingevoerd worden, vervolgens wordt dit doorgerekend en als resultaat getoond. Het resultaat is een Warmtenet Duurzaamheid Indicator (WDI). Het proces heeft de vorm zoals weergegeven in Figuur C-2.



Figuur C-2. Overzicht van de werking van het model dat in het DSS gehanteerd is.

Invoergegevens

Op het tabblad "Invoergegevens en Resultaat" (Figuur C-4) kunnen de omgevingsvariabelen worden ingevuld.

Zo kan bijvoorbeeld aangegeven worden welke warmtebron in deze situatie van toepassing is, hoe groot het warmte aanbod in GJ/jaar de warmtebron heeft en of de bron lage of zeer lage temperatuur (LT of ZLT), midden temperatuur (MT) of hoge temperatuur (HT) aflevert (Figuur C-3).

Temperatuur bron	>
HT (> 75 °C)	75
LT (30-55 °C)	30
MT (55-75 °C)	55
ZLT (< 30 °C)	12

Figuur C-3. Aflevert temperatuur van de warmtebronnen met de indicatie LT, ZLT, MT en HT, met bijbehorende temperatuurschaal. Het > teken staat voor de temperatuur waarmee in het DSS gerekend wordt. Deze tabel staat op tabblad "Classificatie".

De wijknaam kan ingevuld worden met het energie label en het aantal woningen. De gemiddelde woonoppervlakte is 65 m2 in Nederland, maar hier kan een andere waarde ingevuld worden. Met deze informatie wordt aan de hand van het tabblad "Warmtevraag" de warmtevraag in GJ/jaar berekend in als vraag én als warmte aanbod voor de gasketel meegenomen. Hieruit wordt de CO₂ uitstoot bepaald. Dit geldt echter alleen als de indicator 'Energie label meenemen?' Op 'ja' staat. Als deze indicator op 'nee' staat wordt moet de waarde ingevuld worden bij 'Warmtevraag' (veld C32).

Voor geothermie geldt dat er CO₂ bijvangst plaats kan vinden. De hoeveelheid bijvangst van CO₂ is afhankelijk van het tijdperk van de bodemlaag. Voor risico en veiligheid kan aangegeven worden of bij boringen voor geothermie door zoetwater aquifers wordt geboord. Dit kan namelijk gevolgen hebben voor grondwater vervuiling.

Uit de ecologie studie is gebleken dat de afstand tot Natura-2000 gebieden van belang zijn. Door deze afstand in te geven krijgt de gebruiker extra informatie bij het resultaat. Voor aquathermie TEO en TEA is de grootte, de stroomsnelheid en oppervlakte van het waterlichaam van belang om de situatie van de vissen te bepalen. De pompsnelheid waarmee water wordt ingenomen om in het warmtenet te gebruiken bepaalde of bepaalde vissen al dan niet worden meegenomen, het 'inzuigen van vissen'.

Invoergegevens			
Voer in de witte velden de invoergegevens in.			
Warmtebron:		Invoergegevens:	
Temperatuur bron, anders dan standaard		Alle warmtebronnen (Aquathermie, Geothermie, Restwarmte)	
Afstand bron-afnemers		2 km	
Contract afspraak warmtebron		10 jaar	
Warmtebron	Type	Warmte aanbod (GJ/jaar)	Temperatuur warmtebron (°C)
Nulmeting	CV-ketel (type HR 107)	16.700	HT (> 75 oC)
Geothermie	bodemenergie < 500m	8.400	LT (30-55 oC)
	aardwarmte < 4 km	500.000	MT (55-75 oC)
	ultradiep > 4 km	500.000	HT (> 75 oC)
Aquathermie	TEO - oppervlakte	120.000	ZLT (< 30 oC)
	TEA - afval	250.000	ZLT (< 30 oC)
	TED - drinkwater	3.000	ZLT (< 30 oC)
Restwarmte	industrie	20.000	LT (30-55 oC)
	datacenter	10.000	LT (30-55 oC)
Omgevingssituatie			
Naam		Bruggenmors	
Type aansluitingen	Wijk (Wijk, Stad, Buitengebied)		
Energielabel meenemen?	ja ja/nee (nee: warmtevraag invullen)		
Woningen energie label	F (A+++, A++, A+, A, B, C, D, E, F)		
Temperatuur vraag	70 °C		
Gemiddeld woonoppervlak	65 m2		
Aantal sluitingen	200 huishoudens equivalenten		
Warmtevraag obv energielabel en #woningen	16.700 GJ/jaar (berekend!)		
Warmtevraag	16.700 GJ/jaar (=C31 of zelf invullen)		
Afstand tot Natura 2000 of NNN-gebied	0 - 500 m		
Geothermie			
Door zoetwateraquiifer of oppervlaktewater?	ja (ja/nee)		
Tijdperk bodemlaag	Bijvangst niet meenemen (Krijt/Jura, Perm, Overig, Onbekend, Bijvangst niet meenemen)		
Aquathermie - TEO en TEA			
Type waterlichaam	meer (rivier/meer)		
Stroomsnelheid watergang	0 (cm/sec)		
Breedte watergang (rivier)	"nvt" (m)		
Type meer	lijnvormig (lijnvormig/niet lijnvormig)		
Breedte wateroppervlak (meer, lijnvorming)	> 15 (m)		
Wateroppervlak (meer, niet lijnvormig)	< 0,5 (km²)		
Gemiddelde diepte (meer)	> 3 (m)		
Pompsnelheid	> 30 (cm/s)		

Figuur C-4. Het scherm van de invoergegevens van het DSS, zoals dat zichtbaar is in het tabblad "Invoergegevens en Resultaten".

DUURZAAMHEIDSBEOORDELING VAN WARMTEBRONNEN VOOR WARMTENETTEN IN NEDERLAND

Duurzaamheidscriteria per aspect

Nadat de gegevens van de omgeving zijn ingevoerd, wordt de informatie doorgerekend in het tabblad "DSS". De invoergegevens worden verwerkt in de duurzaamheidscriteria die per duurzaamheidsaspect ecologie, uitstoot, leveringszekerheid en veiligheid zijn opgesteld. De classificaties van de duurzaamheidscriteria komen uit het literatuur onderzoek en zijn weergegeven in Figuur C-5.

Duurzaamheidsaspecten		Duurzaamheidscriteria (Vaste Waarde na SLR)												
		Ecologie			Uitstoot			Leveringszekerheid			Veiligheid			
Duurzaamheidscriteria		(Mogelijke) verslitting zoetwater/drinkwater [9]	Inzuigen vissen (pompsnelheid) [6,7,8]	Koudeisolering / type waterlichaam [4,5]	(Gemiddeld) Output Temperatuur warmtebron (°C)	CO2-uitstoot (kg)	CO2 uitstoot 2030 (kg)	Ondergrens Output Temperatuur warmtebron (°C)	Warmteaanbod - Warmtevraag (GJ/jaar)	Beschikbaarheid lange termijn (jaar)	Import afhankelijkheid	Blowout [13,14]	Drinkwater vervulling [20]	Bodemdaling [10,11,12]
Warmtebron	Type													
Nulmeting	CV-ketel (type HR 107)	nee	nee	3	80	1,02E+06	9,89E+05	75	16.700	0	ja	ja	nee	ja
Geothermie	bodemenergie < 500m	nee	nee	3	12	5,11E+05	1,53E+05	30	8.400	30	nee	ja	nee	ja
	aardwarmte < 4 km	ja	nee	3	70	7,93E+04	2,38E+04	55	500.000	30	nee	ja	nee	ja
Aquathermie	luftradijs > 4 km	ja	nee	3	120	7,93E+04	2,38E+04	75	500.000	30	nee	ja	nee	ja
	TEO - oppervlakte	nee	> 30	0,6	15	4,94E+05	1,53E+05	12	120.000	100	nee	nee	nee	nee
Restwarmte	TEA - afval	nee	nee	0,6	17	3,60E+05	1,03E+05	12	250.000	100	nee	nee	nee	nee
	TEO - drinkwater	nee	nee	3	10	3,60E+05	1,03E+05	12	3.000	100	nee	nee	nee	nee
	industrie	nee	nee	3	0	1,49E+05	4,46E+04	30	20.000	30	nee	nee	nee	nee
	datacenter	nee	nee	3	35	4,61E+05	1,36E+05	30	10.000	20	nee	nee	nee	nee

Figuur C-5. Duurzaamheidscriteria van de duurzaamheidsaspecten ecologie, uitstoot, leveringszekerheid en veiligheid

Er vinden enkele doorreken stappen plaats om de duurzaamheidsindicatie te bepalen. Dit gebeurt in de Excel sheet in het tabblad "DSS" en is in Figuur C-6 weergegeven met rode pijlen.

Decision Support System															
Duurzaamheidsaspecten		Duurzaamheidscriteria (Vaste Waarde na SLR)													
Duurzaamheidscriteria		(Mogelijke) verslitting zoetwater/drinkwater [9]	Inzuigen vissen (pompsnelheid) [6,7,8]	Koudeisolering / type waterlichaam [4,5]	(Gemiddeld) Output Temperatuur warmtebron (°C)	CO2-uitstoot (kg)	CO2 uitstoot 2030 (kg)	Ondergrens Output Temperatuur warmtebron (°C)	Warmteaanbod - Warmtevraag (GJ/jaar)	Beschikbaarheid lange termijn (jaar)	Import afhankelijkheid	Blowout [13,14]	Drinkwater vervulling [20]	Bodemdaling [10,11,12]	
Warmtebron	Type														
Nulmeting	CV-ketel (type HR 107)	nee	nee	3	80	1,02E+06	9,89E+05	75	16.700	0	ja	ja	nee	ja	
Geothermie	bodemenergie < 500m	nee	nee	3	12	5,11E+05	1,53E+05	30	8.400	30	nee	ja	nee	ja	
	aardwarmte < 4 km	ja	nee	3	70	7,93E+04	2,38E+04	55	500.000	30	nee	ja	nee	ja	
Aquathermie	luftradijs > 4 km	ja	nee	3	120	7,93E+04	2,38E+04	75	500.000	30	nee	ja	nee	ja	
	TEO - oppervlakte	nee	> 30	0,6	15	4,94E+05	1,53E+05	12	120.000	100	nee	nee	nee	nee	
Restwarmte	TEA - afval	nee	nee	0,6	17	3,60E+05	1,03E+05	12	250.000	100	nee	nee	nee	nee	
	TEO - drinkwater	nee	nee	3	10	3,60E+05	1,03E+05	12	3.000	100	nee	nee	nee	nee	
	industrie	nee	nee	3	0	1,49E+05	4,46E+04	30	20.000	30	nee	nee	nee	nee	
	datacenter	nee	nee	3	35	4,61E+05	1,36E+05	30	10.000	20	nee	nee	nee	nee	
Criteria doorrekening, vergelijk situatie (Invoergegevens) met vaste waarde															
Duurzaamheidsaspecten		Duurzaamheidscriteria (Vaste Waarde na SLR)													
Duurzaamheidscriteria		(Mogelijke) verslitting zoetwater/drinkwater [9]	Inzuigen vissen (pompsnelheid) [6,7,8]	Koudeisolering / type waterlichaam [4,5]	(Gemiddeld) Output Temperatuur warmtebron (°C)	CO2-uitstoot (kg)	CO2 uitstoot 2030 (kg)	Opaardrekening van temp nodig?	Warmteaanbod - Warmtevraag (GJ/jaar)	Beschikbaarheid lange termijn (jaar)	Import afhankelijkheid	Blowout [13,14]	Drinkwater vervulling [20]	Bodemdaling [10,11,12]	
		mm													
		av													
Warmtebron	Type														
Nulmeting	CV-ketel (type HR 107)	nee	nee	3	80	1,02E+06	9,89E+05	nee	5	0	not ok	ja	ja	nee	ja
Geothermie	bodemenergie < 500m	nee	nee	3	12	5,11E+05	1,53E+05	nee	40	120.000	ok	nee	ja	nee	ja
	aardwarmte < 4 km	ja	nee	3	70	7,93E+04	2,38E+04	nee	5	483.300	ok	nee	ja	nee	ja
Aquathermie	luftradijs > 4 km	ja	nee	3	120	7,93E+04	2,38E+04	nee	5	483.300	ok	nee	ja	nee	ja
	TEO - oppervlakte	nee	> 30	0,6	15	4,94E+05	1,53E+05	ja	59	141.100	ok	nee	nee	nee	nee
Restwarmte	TEA - afval	nee	nee	0,6	17	3,60E+05	1,03E+05	ja	58	233.300	ok	nee	nee	nee	nee
	TEO - drinkwater	nee	nee	3	10	3,60E+05	1,03E+05	ja	58	11.700	ok	nee	nee	nee	nee
	industrie	nee	nee	3	0	1,49E+05	4,46E+04	ja	40	5.700	ok	nee	nee	nee	nee
	datacenter	nee	nee	3	35	4,61E+05	1,36E+05	ja	40	4.700	ok	nee	nee	nee	nee
Omzetting doorrekening naar normering (1 = onder de norm, 2 = volgens de norm, 3 = boven de norm)															
Duurzaamheidsaspecten		Duurzaamheidscriteria (Vaste Waarde na SLR)													
Duurzaamheidscriteria		(Mogelijke) verslitting zoetwater/drinkwater [9]	Inzuigen vissen (pompsnelheid) [6,7,8]	Koudeisolering / type waterlichaam [4,5]	(Gemiddeld) Output Temperatuur warmtebron (°C)	CO2-uitstoot (kg)	CO2 uitstoot 2030 (kg)	Opaardrekening van temp nodig?	Warmteaanbod - Warmtevraag (GJ/jaar)	Beschikbaarheid lange termijn (jaar)	Import afhankelijkheid	Blowout [13,14]	Drinkwater vervulling [20]	Bodemdaling [10,11,12]	
		acceptabel	3	3	3	4	6		3	3	2	2	3,33	3,33	
Warmtebron	Type														
Nulmeting	CV-ketel (type HR 107)	3	3	3	3	0,07	0,07		3	3	1	1	1	3	
Geothermie	bodemenergie < 500m	3	3	3	3	0,34	0,47		1	1	3	3	1	1	
	aardwarmte < 4 km	3	3	3	3	0,30	0,60		3	3	3	3	1	3	
Aquathermie	luftradijs > 4 km	3	3	3	3	0,30	0,60		3	3	3	3	1	3	
	TEO - oppervlakte	3	3	0,6	15	0,14	0,47	ja	3	3	3	3	3	3	
Restwarmte	TEA - afval	3	3	0,6	17	0,20	0,69	ja	1	3	3	3	3	3	
	TEO - drinkwater	3	3	3	10	0,29	0,69	ja	1	1	3	3	3	3	
	industrie	3	3	3	0	0,49	1,60	ja	1	1	3	3	3	3	
	datacenter	3	3	3	35	0,36	0,62	ja	1	1	3	3	3	3	
Normering gewogen met wegingsfactor rij 38															
Duurzaamheidsaspecten		Duurzaamheidscriteria (Vaste Waarde na SLR)													
Duurzaamheidscriteria		(Mogelijke) verslitting zoetwater/drinkwater [9]	Inzuigen vissen (pompsnelheid) [6,7,8]	Koudeisolering / type waterlichaam [4,5]	(Gemiddeld) Output Temperatuur warmtebron (°C)	CO2-uitstoot (kg)	CO2 uitstoot 2030 (kg)	Opaardrekening van temp nodig?	Warmteaanbod - Warmtevraag (GJ/jaar)	Beschikbaarheid lange termijn (jaar)	Import afhankelijkheid	Blowout [13,14]	Drinkwater vervulling [20]	Bodemdaling [10,11,12]	
Warmtebron	Type														
Nulmeting	CV-ketel (type HR 107)	3	3	3	3	0,38	0,48		3	3	2	2	3,33	3,33	
Geothermie	bodemenergie < 500m	3	3	3	3	0,36	0,75		3	3	6	6	3,33	3,33	
	aardwarmte < 4 km	3	3	3	3	0,30	0,60		3	3	6	6	3,33	3,33	
Aquathermie	luftradijs > 4 km	3	3	3	3	0,30	0,60		3	3	6	6	3,33	3,33	
	TEO - oppervlakte	3	3	0,6	15	0,14	0,47	ja	3	3	6	6	3,33	3,33	
Restwarmte	TEA - afval	3	3	0,6	17	0,20	0,69	ja	3	3	6	6	3,33	3,33	
	TEO - drinkwater	3	3	3	10	0,29	0,69	ja	3	3	6	6	3,33	3,33	
	industrie	3	3	3	0	0,49	1,60	ja	3	3	6	6	3,33	3,33	
	datacenter	3	3	3	35	0,36	0,62	ja	3	3	6	6	3,33	3,33	
Totaalscore per aspect															
Duurzaamheidsaspecten		Duurzaamheidscriteria (Vaste Waarde na SLR)													
Duurzaamheidscriteria		(Mogelijke) verslitting zoetwater/drinkwater [9]	Inzuigen vissen (pompsnelheid) [6,7,8]	Koudeisolering / type waterlichaam [4,5]	(Gemiddeld) Output Temperatuur warmtebron (°C)	CO2-uitstoot (kg)	CO2 uitstoot 2030 (kg)	Opaardrekening van temp nodig?	Warmteaanbod - Warmtevraag (GJ/jaar)	Beschikbaarheid lange termijn (jaar)	Import afhankelijkheid	Blowout [13,14]	Drinkwater vervulling [20]	Bodemdaling [10,11,12]	
Warmtebron	Type														
Nulmeting	CV-ketel (type HR 107)	3	3	3	3	0,38	0,48		3	3	2	2	3,33	3,33	
Geothermie	bodemenergie < 500m	3	3	3	3	0,36	0,75		3	3	6	6	3,33	3,33	
	aardwarmte < 4 km	3	3	3	3	0,30	0,60		3	3	6	6	3,33	3,33	
Aquathermie	luftradijs > 4 km	3	3	3	3	0,30	0,60		3	3	6	6	3,33	3,33	
	TEO - oppervlakte	3	3	0,6	15	0,14	0,47	ja	3	3	6	6	3,33	3,33	
Restwarmte	TEA - afval	3	3	0,6	17	0,20	0,69	ja	3	3	6	6	3,33	3,33	
	TEO - drinkwater	3	3	3	10	0,29	0,69	ja	3	3	6	6	3,33	3,33	
	industrie	3	3	3	0	0,49	1,60	ja	3	3	6	6	3,33	3,33	
	datacenter	3	3	3	35	0,36	0,62	ja	3	3	6	6	3,33	3,33	
TOTAAL															
Duurzaamheidsaspecten		Duurzaamheidscriteria (Vaste Waarde na SLR)													
Duurzaamheidscriteria		(Mogelijke) verslitting zoetwater/drinkwater [9]	Inzuigen vissen (pompsnelheid) [6,7,8]	Koudeisolering / type waterlichaam [4,5]	(Gemiddeld) Output Temperatuur warmtebron (°C)	CO2-uitstoot (kg)	CO2 uitstoot 2030 (kg)	Opaardrekening van temp nodig?	Warmteaanbod - Warmtevraag (GJ/jaar)	Beschikbaarheid lange termijn (jaar)	Import afhankelijkheid	Blowout [13,14]	Drinkwater vervulling [20]	Bodemdaling [10,11,12]	
Warmtebron	Type														
Nulmeting	CV-ketel (type HR 107)	3	3	3	3	0,38	0,48		3	3	2	2	3,33	3,33	
Geothermie	bodemenergie < 500m	3	3	3	3	0,36	0,75		3	3	6	6	3,33	3,33	
	aardwarmte < 4 km	3	3	3	3	0,30	0,60		3	3	6	6	3,33	3,33	
Aquathermie	luftradijs > 4 km	3	3	3	3	0,30	0,60		3	3	6	6	3,33	3,33	
	TEO - oppervlakte	3	3	0,6	15	0,14	0,47	ja	3	3	6	6	3,33	3,33	
Restwarmte	TEA - afval	3	3	0,6	17	0,20	0,69	ja	3	3	6	6	3,33	3,33	
	TEO - drinkwater	3	3	3	10	0,29	0,69	ja	3	3	6	6	3,33	3,33	
	industrie	3	3	3	0	0,49	1,60	ja	3	3	6	6	3,33	3,33	
	datacenter	3	3	3	35	0,36	0,62	ja	3	3	6	6	3,33	3,33	

Figuur C-6. Het doorreken schema van het DSS van de classificatie van de duurzaamheidscriteria, via de rode pijlen naar een duurzaamheidsbeoordelings

aanleiding van de invoergegevens. In het derde blok worden de waarden gewogen, waarbij er voor gekozen is de drie duurzaamheidsaspecten ecologie, uitstoot en leveringszekerheid even zwaar te wegen. In het vierde blok staat het eindresultaat na doorrekening. Dit resultaat wordt overgenomen naar het tabblad "Invoergegevens en Resultaat".

Resultaat

Na verwerking van de data in het tabblad DSS is in een kleuren schema (groen = boven de norm, geel is rond de norm en rood = onder de norm) een indicatie van de duurzaamheid van het criterium voor de betreffende bron weergegeven. Deze wordt automatisch overgenomen naar het tabblad "Invoergegevens en Resultaat" (Figuur C-7) en hier wordt ook de Warmtebron Duurzaamheid Indicator van de geselecteerd warmtebron(nen) getoond ten opzichte van de CV-ketel type HR 107, die als nulmeting is gebruikt.

De ingevoerde gegevens voor de bronnen en de wijk rekenen de verwacht CO₂ uitstoot in 2020 en 2030, zodat deze waarden met elkaar vergeleken kunnen worden. De kleurenschaal is afgezet tegen de doel waarde van 2030 die voor alle bronnen hetzelfde is weergegeven bij de CO₂ uitstoot van de warmtevraag van de te beoordelen wijk.

Per aspect zijn de kleuren indicaties zichtbaar en in de kolom 'Resultaat' is de uiteindelijke duurzaamheidsindicator te zien. Voor detail informatie kan ingezoomd worden naar het tabblad "DSS".

De invoergegevens en resultaat staan op één tabblad, zodat bij wijziging van de invoergegevens het veranderde resultaat direct zichtbaar is.

Resultaat

Lees hier het resultaat van de duurzaamheidscriteria uit.

Warmtebron:

Warmtenet Duurzaamheid Indicator (WDI):

Warmtebron	Type	Ecologie	Uitstoot	Leveringszekerheid	Veiligheid	Resultaat	2020	2030	Doel
							CO2-uitstoot bij 16700 GJ/jaar (kg)	CO2-uitstoot bij 16700 GJ/jaar (kg)	CO2-uitstoot bij 16700 GJ/jaar (kg)
Nulmeting	CV-ketel (type HR 107)	Green	Red	Yellow	Red	Red	1.017.000	989.000	315.630
Geothermie	bodemenergie < 500m	Green	Yellow	Yellow	Red	Red	511.000	153.000	
	aardwarmte < 4 km	Yellow	Green	Yellow	Red	Green	79.000	24.000	
	ultradiep > 4 km	Red	Green	Green	Red	Green	79.000	24.000	
Aquathermie	TEO - oppervlakte	Red	Yellow	Yellow	Green	Yellow	494.000	153.000	
	TEA - afval	Red	Yellow	Yellow	Green	Yellow	360.000	103.000	
	TED - drinkwater	Green	Yellow	Red	Green	Yellow	360.000	103.000	
Restwarmte	industrie	Green	Yellow	Yellow	Green	Green	149.000	45.000	
	datacenter	Green	Yellow	Red	Green	Yellow	461.000	136.000	

Aandachtpunten:

Aquathermie

Monitoring effecten op temperatuur oppervlaktewater

De CO2-uitstoot van de verschillende vormen van aquathermie (TEO, TEA en TED) is in dit model gelijk, er wordt gerekend met dezelfde factor. In werkelijkheid kan deze verschillen.

Natura 2000 of NNN

Aquathermie & Geothermie: voortoets uitvoeren om effecten op instandhoudingsdoelen uit te sluiten

Geothermie

Het verschil tussen aardwarmte (tot 4 km) en ultradiepe geothermie (>4 km) komt niet naar voren in waarden van de CO2-uitstoot. Wel wordt dit meegenomen in de score doordat de temperatuur van ultradiepe geothermie hoger is krijgt deze een hogere score.

Voor aardwarmte (<4 km) en ultradiepe geothermie (>4km) is aangenomen dat de bijvangst (gas, methaan) wordt afgevangen en ingezet voor het warmtenet. Affakkelen is ook mogelijk, maar zorgt voor een afwijkende CO2-uitstoot.

Restwarmte

Restwarmte kan door verschillende typen processen worden geproduceerd, en de brontemperatuur kan sterk verschillen. Op één locatie kunnen mogelijk meerdere warmtestromen met verschillende temperaturen worden afgetapt.

Warmtepompen

De keuze en plaatsing van warmtepompen heeft effect op de efficiëntie van een warmtenet. Dit is maatwerk, en niet meegenomen in het model.

Referentie: HR107-gasketel

Een veiligheidsissue van de referentiesituatie is koolmonoxidevergiftiging.

Figuur C-7. In het resultaatscherm van het DSS zijn de doorgerekende gewogen waarden meegenomen vanuit het tabblad "DSS". De kleurenschaal geeft weer: rood = boven de norm, geel = rond de norm en groen = onder de norm en wordt als positief gewaardeerd.

Bijlage D: Toelichting tabblad uitstoot van het DSS

De uitstoot van warmtebronnen is gebaseerd op waarden uit de recente literatuur, Dinkelman and Menkveld (2021). In onderstaande tabel staat de uitstoot van de bron aangegeven. In deze getallen zit de warmtewinning, een opwaardering met warmtepompen naar 70 °C (wettelijk bepaald). Voor alle warmtebronnen, behalve de CV-ketel, wordt warmteverlies van 20% verondersteld. Er is gerekend met de rekenregels van (Harmelink, 2020).

Uitstoot per GJ warmte		CO2-uitstoot 2020 kg per GJth	CO2-uitstoot 2030 kg per GJth	herkomst
Warmtebron	Type			
Nulmeting	CV-ketel (type HR 107)	58,50	58,50	[2] [3] [24]
Geothermie	bodemenergie < 500 m	30	9	[24]
	aardwarmte < 4 km	4,17	1,25	[2] [24]
	ultradiep > 4 km	4,17	1,25	[2] [24]
Aquathermie	TEO - oppervlakte	29	9	[2] [24]
	TEA - afval	21	6	[2] [24]
	TED - drinkwater	21	6	[2] [24]
Restwarmte	industrie	8,33	2,5	[2] [24]
	datacenter	27	8	[2] [24]
Doelstelling Sector	warmtesector 2030 *		18,9	[1]
*	warmtesector gemiddeld 18,9, per systeem max 25 kg/GJth			

[1] (Wolf & Loogman, 2020)

[2] (Harmelink, 2020)

[3] (Schepers & Scholten, 2016)

[24] (Dinkelman & Menkveld, 2021)

De bijvangst van geothermie kan worden meegenomen, en als bekend is uit welke tijdperk de aan te boren aardlaag wordt hier ook een specifieke waarde aan verbonden.

Ingevoerd:	Krijt/Jura	Perm	Overig **	Onbekend ***	
Krijt/Jura	CO2-uitstoot bijvangst kg per GJth	CO2-uitstoot bijvangst kg per GJth	CO2-uitstoot bijvangst kg per GJth	CO2-uitstoot bijvangst kg per GJth	herkomst
Geothermiebron			[23]		
bodemenergie < 500 m	0	0	0	0	[21]
aardwarmte < 4 km	8,9	2,4	0	3,77	[24]
ultradiep > 4 km	8,9	2,4	0	3,77	[24]
**	Overig: bijvoorbeeld Carboon, Tertiair - er wordt geen bijvangst verondersteld [23]				
***	Onbekend: er wordt gerekend met een gemiddelde van kolommen G, H en I				

[21] (Hellebrand et al., 2012)

[23] (Dijkstra et al., 2020)

[24] (Dinkelman & Menkveld, 2021)

		Hulpenergie warmtenet (of HR-ketel)		
		aandeel elektriciteit	Hulpenergie	
Uitstoot per GJ warmte		Hulpenergie GJe/GJth	CO ₂ -uitstoot 2020 kg per GJth	CO ₂ -uitstoot 2030 kg per GJth
Warmtebron	Type	[3]	[3] [26]	[3] [26]
Nulmeting	CV-ketel (type HR 107)	0,0288	2,40	0,72
Geothermie	bodemenergie < 500 m	0,006912	0,58	0,17
	aardwarmte < 4 km	0,006912	0,58	0,17
	ultradiep > 4 km	0,006912	0,58	0,17
Aquathermie	TEO - oppervlakte	0,006912	0,58	0,17
	TEA - afval	0,006912	0,58	0,17
	TED - drinkwater	0,006912	0,58	0,17
Restwarmte	industrie	0,006912	0,58	0,17
	datacenter	0,006912	0,58	0,17

[3] (Scheepers & Scholten, 2016)

[26] KEV 2021 (PBL, 2021)

De hulpenergie (elektriciteit) dit nodig is voor het transport in het warmtenet respectievelijk voor de CV-ketel is gebaseerd op de waarde van Scheepers and Scholten (2016).

Voor de CO₂-uitstoot van de elektriciteit worden de rekenregels van Harmelink (2020) gebruikt, en de gegevens over de elektriciteitsmix van 2020 en 2030 komen uit Dinkelman and Menkveld (2021) en de Klimaat- en Energieverkenning (KEV) van 2021 (PBL, 2021) volgens de "integrale methode".

[2] (Harmelink, 2020)

[24] (Dinkelman & Menkveld, 2021)

[26] KEV 2021 (PBL, 2021)

elektriciteitsmix 2020 ****			Herkomst
1 kWh =>	0,30	kg CO ₂	[24] [26]
1 GJe =>	83,33	kg CO ₂ /GJe	
kg CO ₂ /GJp	58,80	kg CO ₂ /GJp	[2] [24]
rendement PF	0,705		
GJp/GJe	1,42		
elektriciteitsmix 2030 ****			Herkomst
1 kWh =>	0,09	kg CO ₂ /kWh	[24] [26]
1 GJe =>	25,00	kg CO ₂ /GJe	
kg CO ₂ /GJp	41,80	kg CO ₂ /GJp	[2] [24]
rendement PF	1,672		
GJp/GJe	0,60		
****	berekend volgens "integrale methode"		

Alle componenten worden bij elkaar opgeteld tot de totale CO₂-uitstoot per geleverde GJ warmte, voor het jaar 2020 en het jaar 2030.

Uitstoot per GJ warmte		CO ₂ -uitstoot 2020 kg per GJth	CO ₂ -uitstoot 2030 kg per GJth
Warmtebron	Type		
Nulmeting	CV-ketel (type HR 107)	60,90	59,22
Geothermie	bodemenergie < 500 m	30,58	9,17
	aardwarmte < 4 km	4,75	1,42
	ultradiep > 4 km	4,75	1,42
Aquathermie	TEO - oppervlakte	29,58	9,17
	TEA - afval	21,58	6,17
	TED - drinkwater	21,58	6,17
Restwarmte	industrie	8,91	2,67
	datacenter	27,58	8,17
Doelstelling Sector	warmtesector 2030 *		18,9



InCompany **Milieuadvies**

faculteit Management, Science & Technology,
Vakgroep Science
Open Universiteit
Postbus 2960
6401 DL Heerlen, NL
tel. +31 45 576 2877
secretariaat.mst@ou.nl
www.ou.nl/nw
www.Incompany-milieuadvies.nl



Vragenlijst	GEOTHERMIE
Naam:	
Bedrijf:	
Datum:	

Duurzaamheids-aspecten	Duurzaamheids-criteria	Vraag	Antwoord (ja/nee) of bij extra opmerkingen in geval van open vragen			Extra opmerkingen bij antwoord	Wegingsfactor 1 = onbelangrijk, 2 = neutraal, 3 = zeer belangrijk				
			GEOTHERMIE				GEOTHERMIE				
			Bodemenergie (<500 meter)	Aardwarmte (500 meter - 4 km)	Ultradiepe Geothermie (> 4km)		Bodemenergie (<500 meter)	Aardwarmte (500 meter - 4 km)	Ultradiepe Geothermie (> 4km)		
Duurzaamheids-aspecten	Duurzaamheids-criteria	WARMTEBRON									
		Onderverdeling									
		Locatie buizen	Hoe wordt bepaald waar warmtebuizen van de bron naar afnemer komen? In hoeverre spelen de omgevingsfactoren, type grond (zand, klei, veen) of andere aspecten een rol?								
		Pompsnelheid	Met welke snelheid wordt warmte (water) onttrokken (m3/uur) vanaf de bron? Wat is de invloed van deze onttrekking op de temperatuursverandering van bron tot gebruik?								
		Temperatuur buizen	Wat is de temperatuurrange van de warmte in de transportbuizen?								
		Warmte verlies %	Welk percentage warmte gaat verloren bij onttrekking van de bron tot aan het de ingang bij het warmtenet? Welk percentage warmte gaat verloren bij transport van begin van het warmtenet tot aan de afnemer (woning)?								
			Zijn er ecologische gevolgen bekend van mogelijk temperatuur verschil? Zo ja, welke gevolgen en hoe groot is de impact?								
		Ecologie	Opwarming omgeving	Wordt gemeten hoeveel de omgeving (ondergrond, grondwater, lucht) opwarmt bij gebruik van de warmtebron? Zo ja, wat is de maximaal toelaatbare waarde van de opwarming? Zo ja, wat is de impact van de opwarming op de omgeving?							
				Afkoeling omgeving	Is er sprake van afkoeling van de omgeving (oppervlakte water, bodem, lucht) bij onttrekking van deze warmtebron? Zo ja, wat is de maximaal toelaatbare waarde van de afkoeling? Zo ja, wat is de impact van de afkoeling op de omgeving?						
		Flora & fauna	Risiko's drinkwater	Wordt rekening gehouden met flora en fauna bij het oppompen van oppervlaktewater of bodemwarmte (filter, pompsnelheid?) of bij het gebruik van restwarmte? Zo ja, welke aspecten worden meegenomen en hoe worden ze beoordeeld?							
Worden risico's met betrekking tot stilstaand water bij TED in beeld gebracht? Is er sprake van CO2-uitstoot bij deze bron?											
Atmosferische Uitstoot	CO2	Zo ja, wat is het mechanisme van deze CO2-uitstoot? Hoe wordt de CO2-uitstoot gemeten of bepaald bij warmtewinning uit deze bron?									
		Overige stoffen	Wordt atmosferische uitstoot van andere stoffen dan CO2 beschouwd voor gebruik van deze bron? Zo ja, welke stoffen worden meegenomen? (SOx, NOx, fijnstof (PM), methaan, verschillende koelvlloeistoffen, of andere?)								
	Kenmerken van de uitstoot	Worden variaties meegenomen bij bepalen van de uitstoot? Zo ja, naar welke kenmerken wordt gekeken? (maximum, tijdelijk/permanent, incidenteel/regelmatig of geldt een gemiddelde?)									
		Uitstoot bij voorbereiding (opbouw)	Wordt bij het meten van CO2-uitstoot of CO2-besparing ook rekening gehouden met opbouw van de installatie aan de winningskant en aanleg van het netwerk? Zo ja, wat is een indicatie van de impact van deze CO2 uitstoot op het uiteindelijk gebruik van de warmtebron?								
	Afvvalproducten	Wordt bij bepalen van impact op het milieu gekeken naar afvalproducten/levensduur? Zo ja, welke afval producten spelen een rol? Zo ja, wat is een indicatie van de levensduur?									
		Aanlever temperatuur	Is de aanlever temperatuur vanuit de warmtebron constant? Wat is de temperatuur range van de aanlevering vanuit de warmtebron? Moet er bijverwarmd / gekoeld worden voor gebruik bij de afnemer? Zo ja, met welke technologie?								
Warmte zekerheid	In hoeverre is er sprake van warmte zekerheid uit de warmtebron? Wat is de maximale efficiënte afstand tussen de bron en de afnemer ivm warmteverlies? Is de warmte per direct beschikbaar?										
	Beschikbaarheid Korte termijn	Is er sprake van een constante aanvoer van warmte?									
Beschikbaarheid Lange termijn in de toekomst		Is de warmtebron in de toekomst op lange termijn beschikbaar? In hoeverre is er risico van dat de bron eindigt is?									
	Leveringszekerheid	Opslag mogelijkheden	Zijn er opslag mogelijkheden voor de warmte uit de warmtebron? Zo ja, met welke technologie? Is deze technologie beschikbaar?								
Combinatie met andere vormen van energie			Is combinatie met andere bronnen van hernieuwbare energie noodzakelijk voor de warmtevoorziening? Is combinatie met andere bronnen van hernieuwbare energie mogelijk? Welke andere bronnen spelen hierbij een rol?								
Warmte conversie	Plekvaag opvangen	Moet de warmte uit de bron omgezet worden voor gebruik bij de afnemer? Zo ja, met welke technologie? Wat is de levensduur van deze technologie?									
		Kan de plekvaag opgevangen worden? Zo ja, met welke technologie?									
Veiligheid	Risiko's drinkwater	Is er een risico bij het gebruik van de warmtebron? Welke risico's spelen een rol? En waarom?									
		Geluidsoverlast	Hoe worden risico's met betrekking tot stilstaand water (bij TED) in beeld gebracht? Is er sprake van geluidsoverlast bij de voorbereiding en opbouw van de warmtebron? Zo ja, hoe wordt hiermee omgegaan?								
	Bodemdaling		Is er sprake van geluidsoverlast bij het gebruik van de warmtebron? Zo ja, hoe wordt hiermee omgegaan en wat is de maximaal toegestane waarde op lange termijn? Is er door deze warmtebron kans op bodemdaling?								
		(Grond)water vervulling	Zo ja, wat zijn de maatregelen om de bodemdaling te minimaliseren of te voorkomen? Wat zijn de gevolgen op lange termijn? Is er bij deze warmtebron kans op (grond)water vervulling of onttrekking? Zo ja, wat zijn de maatregelen om dit te voorkomen?								

Vragenlijst	AQUATHERMIE
--------------------	--------------------

Naam:	
Bedrijf:	
Datum:	

Duurzaamheids-aspecten	Duurzaamheids-criteria	Vraag	Antwoord (ja/nee) of bij extra opmerkingen in geval van open vragen			Extra opmerkingen bij antwoord	Wegingsfactor 1 = onbelangrijk, 2 = neutraal, 3 = zeer belangrijk			
			AQUATHERMIE				AQUATHERMIE			
			TEO	TEA	TED		TEO	TEA	TED	
		WARMTEBRON Onderverdeling								
Ecologie	Locatie buizen	Hoe wordt bepaald waar warmtebuizen van de bron naar afnemer komen? In hoeverre spelen de omgevingsfactoren, type grond (zand, klei, veen) of andere aspecten een rol?								
	Pompsnelheid	Met welke snelheid wordt warmte (water) onttrokken (m ³ /uur) vanaf de bron? Wat is de invloed van deze onttrekking op de temperatuurverandering van bron tot gebruik?								
	Temperatuur buizen	Wat is de temperatuurrange van de warmte in de transportbuizen?								
	Warmte verlies %	Welk percentage warmte gaat verloren bij onttrekking van de bron tot aan het de ingang bij het warmtenet? Welk percentage warmte gaat verloren bij transport van begin van het warmtenet tot aan de afnemer (woning)? Zijn er ecologische gevolgen bekend van mogelijk temperatuur verschil? Zo ja, welke gevolgen en hoe groot is de impact?								
	Opwarming omgeving	Wordt gemeten hoeveel de omgeving (ondergrond, grondwater, lucht) opwarmt bij gebruik van de warmtebron? Zo ja, wat is de maximaal toelaatbare waarde van de opwarming? Zo ja, wat is de impact van de opwarming op de omgeving?								
	Afkoeling omgeving	Is er sprake van afkoeling van de omgeving (oppervlakte water, bodem, lucht) bij onttrekking van deze warmtebron? Zo ja, wat is de maximaal toelaatbare waarde van de afkoeling? Zo ja, wat is de impact van de afkoeling op de omgeving?								
	Flora & fauna	Wordt rekening gehouden met flora en fauna bij het oppompen van oppervlaktewater of bodemwarmte (filter, pompsnelheid?) of bij het gebruik van restwarmte? Zo ja, welke aspecten worden meegenomen en hoe worden ze beoordeeld?								
	Risico's drinkwater	Worden risico's met betrekking tot stilstaand water bij TED in beeld gebracht?								
	Atmosferische Uitstoot	CO2	Is er sprake van CO2-uitstoot bij deze bron? Zo ja, wat is het mechanisme van deze CO2-uitstoot? Hoe wordt de CO2-uitstoot gemeten of bepaald bij warmtewinning uit deze bron?							
		Overige stoffen	Wordt atmosferische uitstoot van andere stoffen dan CO2 beschouwd voor gebruik van deze bron? Zo ja, welke stoffen worden meegenomen? (SOx, NOx, fijnstof (PM), methaan, verschillende koelvoelstoffen, of andere?)							
Kenmerken van de uitstoot		Worden variaties meegenomen bij bepalen van de uitstoot? Zo ja, naar welke kenmerken wordt gekeken? (maximum, tijdelijk/permanent, incidenteel/regelmatig of zelfs een semi-daglig?)								
Uitstoot bij voorbereiding (opbouw)		Wordt bij het meten van CO2-uitstoot of CO2-besparing ook rekening gehouden met opbouw van de installatie aan de winningskant en aanleg van het netwerk? Zo ja, wat is een indicatie van de impact van deze CO2 uitstoot op het uiteindelijk gebruik van de warmtebron?								
Afvalproducten		Wordt bij bepalen van impact op het milieu gekeken naar afvalproducten/levensduur? Zo ja, welke afval producten spelen een rol? Zo ja, wat is een indicatie van de levensduur?								
Leveringszekerheid		Aanlever temperatuur	Is de aanlever temperatuur vanuit de warmtebron constant? Wat is de temperatuur range van de aanlevering vanuit de warmtebron? Moet er bijverwarmd / gekoeld worden voor gebruik bij de afnemer? Zo ja, met welke technologie?							
	Warmte zekerheid	In hoeverre is er sprake van warmte zekerheid uit de warmtebron? Wat is de maximale efficiënte afstand tussen de bron en de afnemer t/m warmteverlies? Is de warmte per direct beschikbaar?								
	Beschikbaarheid Korte termijn	Is er sprake van een constante aanvoer van warmte?								
	Beschikbaarheid Lange termijn in de toekomst	Is de warmtebron in de toekomst op lange termijn beschikbaar? In hoeverre is er risico van dat de bron eindigt is?								
	Opslag mogelijkheden	Zijn er opslag mogelijkheden voor de warmte uit de warmtebron? Zo ja, met welke technologie? Is deze technologie beschikbaar?								
	Combinatie met andere vormen van energie	Is combinatie met andere bronnen van hernieuwbare energie noodzakelijk voor de warmtevoorziening? Is combinatie met andere bronnen van hernieuwbare energie mogelijk? Welke andere bronnen spelen hierbij een rol?								
	Warmte conversie	Moet de warmte uit de bron omgezet worden voor gebruik bij de afnemer? Zo ja, met welke technologie? Wat is de levensduur van deze technologie?								
	Piekvraag opvangen	Kan de piekvraag opgevangen worden? Zo ja, met welke technologie?								
Veiligheid	Risico's drinkwater	Is er een risico bij het gebruik van de warmtebron? Welke risico's spelen een rol? En waarom? Hoe worden risico's met betrekking tot stilstaand water (bij TED) in beeld gebracht?								
	Geluidsoverlast	Is er sprake van geluidsoverlast bij de voorbereiding en opbouw van de warmtebron? Zo ja, hoe wordt hiermee omgegaan? Is er sprake van geluidsoverlast bij het gebruik van de warmtebron? Zo ja, hoe wordt hiermee omgegaan en wat is de maximaal toegestane waarde op lange termijn? Is er door deze warmtebron kans op bodemdaling?								
	Bodemdaling	Zo ja, wat zijn de maatregelen om de bodemdaling te minimaliseren of te voorkomen? Wat zijn de gevolgen op lange termijn?								
	(Grond)water vervuiling	Is er bij deze warmtebron kans op (grond)water vervuiling of onttrekking? Zo ja, wat zijn de maatregelen om dit te voorkomen?								

Vragenlijst	RESTWARMTE
Naam:	
Bedrijf:	
Datum:	

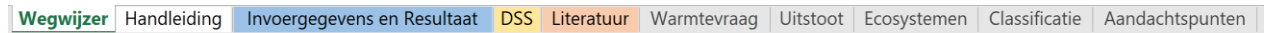
Duurzaamheids-aspecten	Duurzaamheids-criteria	Vraag	Antwoord (ja/nee) of bij extra opmerkingen in geval van open vragen			Extra opmerkingen bij antwoord	Wegingsfactor 1 = onbelangrijk, 2 = neutraal, 3 = zeer belangrijk		
			RESTWARMTE				RESTWARMTE		
			Industrie	Datacenters	Overige		Industrie	Datacenters	Overige
Ecologie	Locatie buizen	WARMTEBRON							
		Onderverdeling							
	Pompsnelheid	Hoe wordt bepaald waar warmtebuizen van de bron naar afnemer komen? In hoeverre spelen de omgevingsfactoren, type grond (zand, klei, veen) of andere aspecten een rol?							
		Met welke snelheid wordt warmte (water) onttrokken (m3/uur) vanaf de bron?							
	Temperatuur buizen	Wat is de invloed van deze onttrekking op de temperatuurverandering van bron tot gebruik?							
		Wat is de temperatuurrange van de warmte in de transportbuizen?							
	Warmte verlies %	Welk percentage warmte gaat verloren bij onttrekking van de bron tot aan het de ingang bij het warmtenet?							
		Welk percentage warmte gaat verloren bij transport van begin van het warmtenet tot aan de afnemer (woning)?							
	Opwarming omgeving	Zijn er ecologische gevolgen bekend van mogelijk temperatuurverschil?							
		Zo ja, welke gevolgen en hoe groot is de impact?							
Afkoeeling omgeving	Wordt gemeten hoeveel de omgeving (ondergrond, grondwater, lucht) opwarmt bij gebruik van de warmtebron?								
	Zo ja, wat is de maximaal toelaatbare waarde van de opwarming?								
Flora & fauna	Zo ja, wat is de impact van de opwarming op de omgeving?								
	Is er sprake van afkoeling van de omgeving (oppervlakte water, bodem, lucht) bij onttrekking van deze warmtebron?								
Risico's drinkwater	Zo ja, wat is de maximaal toelaatbare waarde van de afkoeling?								
	Zo ja, wat is de impact van de afkoeling op de omgeving?								
Atmosferische Uitstoot	CO2	Wordt rekening gehouden met flora en fauna bij het oppompen van oppervlaktewater of bodemwarmte (filter, pompsnelheid?) of bij het gebruik van restwarmte?							
		Zo ja, welke aspecten worden meegenomen en hoe worden ze beoordeeld?							
	Overige stoffen	Worden risico's met betrekking tot stilstaand water bij TED in beeld gebracht?							
		Is er sprake van CO2-uitstoot bij deze bron?							
	Kenmerken van de uitstoot	Zo ja, wat is het mechanisme van deze CO2-uitstoot?							
		Hoe wordt de CO2-uitstoot gemeten of bepaald bij warmtewinning uit deze bron?							
	Uitstoot bij voorbereiding (opbouw)	Wordt atmosferische uitstoot van andere stoffen dan CO2 beschouwd voor gebruik van deze bron?							
		Zo ja, welke stoffen worden meegenomen? (SOx, NOx, fijnstof (PM), methaan, verschillende koelbevloeistoffen, of andere?)							
	Afvvalproducten	Worden variaties meegenomen bij bepalen van de uitstoot?							
		Zo ja, naar welke kenmerken wordt gekeken? (maximum, tijdelijk/permanent, incidenteel/regelmatig of geldt een gemiddelde?)							
Leveringszekerheid	Aanlever temperatuur	Wordt bij het meten van CO2-uitstoot of CO2-besparing ook rekening gehouden met opbouw van de installatie aan de wintingskant en aanleg van het netwerk?							
		Zo ja, wat is een indicatie van de impact van deze CO2 uitstoot op het uiteindelijk gebruik van de warmtebron?							
	Warmte zekerheid	Wordt bij bepalen van impact op het milieu gekeken naar afvalproducten/levensduur?							
		Zo ja, welke afval producten spelen een rol?							
	Beschikbaarheid Korte termijn	Zo ja, wat is een indicatie van de levensduur?							
		Is de aanlever temperatuur vanuit de warmtebron constant?							
	Beschikbaarheid Lange termijn in de toekomst	Wat is de temperatuur range van de aanlevering vanuit de warmtebron?							
		Moet er bijverwarmd / gekoeld worden voor gebruik bij de afnemer?							
	Opslag mogelijkheden	Zo ja, met welke technologie?							
		Is deze technologie beschikbaar?							
Combinatie met andere vormen van energie	In hoeverre is er sprake van warmte zekerheid uit de warmtebron?								
	Wat is de maximale efficiënte afstand tussen de bron en de afnemer ivm warmteverlies?								
Warmte conversie	Is de warmte per direct beschikbaar?								
	Is er sprake van een constante aanvoer van warmte?								
Plekvaag opvangen	Is de warmtebron in de toekomst op lange termijn beschikbaar?								
	In hoeverre is er risico van dat de bron eindigt is?								
Veiligheid	Risico's drinkwater	Zijn er opslag mogelijkheden voor de warmte uit de warmtebron?							
		Zo ja, met welke technologie?							
	Geluidsoverlast	Is combinatie met andere bronnen van hernieuwbare energie noodzakelijk voor de warmtevoorziening?							
		Is combinatie met andere bronnen van hernieuwbare energie mogelijk?							
	Bodemdaling	Welke andere bronnen spelen hierbij een rol?							
		Moet de warmte uit de bron omgezet worden voor gebruik bij de afnemer?							
	(Grond)water vervulling	Zo ja, met welke technologie?							
		Wat is de levensduur van deze technologie?							
	Risico's drinkwater	Kan de plekvraag opgevangen worden?							
		Zo ja, met welke technologie?							
Geluidsoverlast	Is er een risico bij het gebruik van de warmtebron?								
	Welke risico's spelen een rol? En waarom?								
Bodemdaling	Hoe worden risico's met betrekking tot stilstaand water (bij TED) in beeld gebracht?								
	Is er sprake van geluidsoverlast bij de voorbereiding en opbouw van de warmtebron?								
(Grond)water vervulling	Zo ja, hoe wordt hiermee omgegaan?								
	Is er sprake van geluidsoverlast bij het gebruik van de warmtebron?								
Geluidsoverlast	Zo ja, hoe wordt hiermee omgegaan en wat is de maximaal toegestane waarde op lange termijn?								
	Is er door deze warmtebron kans op bodemdaling?								
Bodemdaling	Zo ja, wat zijn de maatregelen om de bodemdaling te minimaliseren of te voorkomen?								
	Wat zijn de gevolgen op lange termijn?								
(Grond)water vervulling	Is er bij deze warmtebron kans op (grond)water vervuiling of onttrekking?								
	Zo ja, wat zijn de maatregelen om dit te voorkomen?								

Bijlage C: Handleiding Decision Support System

Deze bijlage is een handleiding in het gebruik van het DSS.

Het Decision Support System (DSS) is ontwikkeld in Excel en als bijlage (DecisionSupportSystem_warmtenetten.xlsx) toegevoegd aan het adviesrapport "Duurzaamheidsbeoordeling van verschillende typen bronnen voor warmtenetten in Nederland".

Bij het openen van het Excel bestand zijn diverse tabbladen beschikbaar volgens Figuur 1.



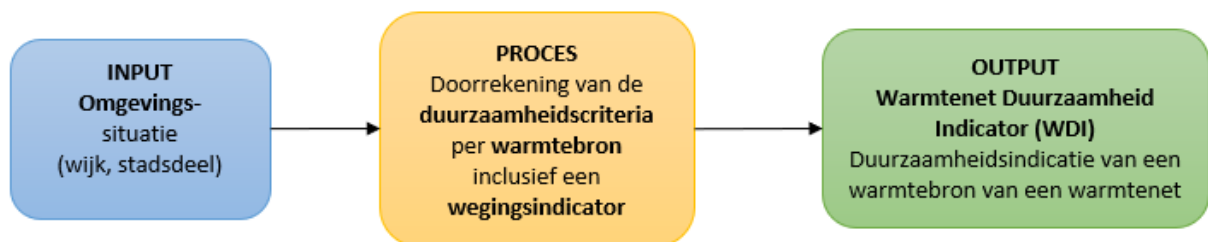
Figuur 1. Tabbladen van DSS in Excel

In Tabel 1 worden de tabbladen verklaard.

Tabel 1. Verklaring van de tabbladen in Excel

Tabblad naam	Verklaring
Wegwijzer	Korte uitleg van het gebruik van het Excel bestand
Handleiding	De handleiding, bijlage C, staat tevens op dit tabblad in het DSS
Invoergegevens en Resultaat	Invoer van omgevingsvariabelen aan de linkerkant in het blauwe deel. Resultaat van de doorrekening in het DSS aan de rechterkant in het groene deel.
DSS	Doorrekening van de variabelen in het model
Literatuur	Verwijzingen naar gebruikte literatuur
Warmtevraag	Overzicht van energielabels met bijbehorende warmtegebruik en warmtevraag per woning
Uitstoot	Detail informatie over uitstoot dat doorgerekend wordt in het model (beschrijving in WP2, LV)
Ecosystemen	Detail informatie over ecologie en waterlichamen die gebruikt wordt in het model (beschrijving in WP1, MB)
Classificatie	De classificatie tabellen die gebruikt worden bij de invoer- en doorrekengegevens
Aandachtspunten	In sommige gevallen wordt er extra informatie getoond op het resultaten scherm afhankelijk van de warmtebron.

In het DSS kunnen gegevens van de omgeving ingevoerd worden, vervolgens wordt dit doorgerekend en als resultaat getoond. Het resultaat is een Warmtenet Duurzaamheid Indicator (WDI). Het proces heeft de vorm zoals weergegeven in Figuur 2.



Figuur 2. Overzicht van de werking van het model dat in het DSS gehanteerd is.

Invoergegevens

Op het tabblad "Invoergegevens en Resultaat" (Figuur 4) kunnen de omgevingsvariabelen worden ingevuld.

Zo kan bijvoorbeeld aangegeven worden welke warmtebron in deze situatie van toepassing is, hoe groot het warmte aanbod in GJ/jaar de warmtebron heeft en of de bron lage of zeer lage temperatuur (LT of ZLT), midden temperatuur (MT) of hoge temperatuur (HT) aflevert (Figuur 3).

Temperatuur bron	>
HT (> 75 °C)	75
LT (30-55 °C)	30
MT (55-75 °C)	55
ZLT (< 30 °C)	12

Figuur 3. Aflevert temperatuur van de warmtebronnen met de indicatie LT, ZLT, MT en HT, met bijbehorende temperatuurschaal. Het > teken staat voor de temperatuur waarmee in het DSS gerekend wordt. Deze tabel staat op tabblad "Classificatie".

Voor de wijk kan de naam ingevuld worden met het energie label en het aantal woningen. De gemiddelde woonoppervlakte is 65 m² in Nederland, maar hier kan een andere waarde ingevuld worden. Met deze informatie wordt aan de hand van het tabblad "Warmtevraag" de warmtevraag in GJ/jaar berekend in als vraag én als warmte aanbod voor de gasketel meegenomen. Hieruit wordt de CO₂ uitstoot bepaald. Dit geldt echter alleen als de indicator 'Energie label meenemen?' Op 'ja' staat. Als deze indicator op 'nee' staat wordt moet de waarde ingevuld worden bij 'Warmtevraag' (veld C32).

Voor geothermie geldt dat er CO₂ bijvangst plaats kan vinden. De hoeveelheid bijvangst van CO₂ is afhankelijk van het tijdperk van de bodemlaag.

Voor risico en veiligheid kan aangegeven worden om bij boringen voor geothermie door zoetwater aquifers wordt geboord. Dit kan namelijk gevolgen hebben voor grondwatervervuiling.

Uit de ecologie studie is gebleken dat de afstand tot Natura-2000 gebieden van belang zijn. Door deze afstand in te geven krijgt de gebruiker extra informatie bij het resultaat. Voor aquathermie TEO en TEA is de grootte, de stroomsnelheid en oppervlakte van het waterlichaam van belang om de situatie van de vissen te bepalen. De pompsnelheid waarmee water wordt ingenomen om in het warmtenet te gebruiken bepaalde of bepaalde vissen al dan niet worden meegenomen, het 'inzuigen van vissen'.

Invoergegevens			
Voer in de witte velden de invoergegevens in.			
		Invoergegevens:	
Warmtebron:	Alle warmtebronnen (Aquathermie, Geothermie, Restwarmte)		
Temperatuur bron, anders dan standaard			°C
Afstand bron-afnemers		2	km
Contract afspraak warmtebron		10	jaar
Warmtebron	Type	Warmte aanbod (GJ/jaar)	Temperatuur warmtebron (°C)
Nulmeting	CV-ketel (type HR 107)	16.700	HT (> 75 oC)
Geothermie	bodemenergie < 500m	8.400	LT (30-55 oC)
	aardwarmte < 4 km	500.000	MT (55-75 oC)
	ultradiep > 4 km	500.000	HT (> 75 oC)
Aquathermie	TEO - oppervlakte	120.000	ZLT (< 30 oC)
	TEA - afval	250.000	ZLT (< 30 oC)
	TED - drinkwater	3.000	ZLT (< 30 oC)
Restwarmte	industrie	20.000	LT (30-55 oC)
	datacenter	10.000	LT (30-55 oC)
Omgevingsituatie			
Naam	Bruggenmors		
Type aansluitingen	Wijk (Wijk, Stad, Buitengebied)		
Energielabel meenemen?	ja ja/nee (nee: warmtevraag invullen)		
Woningen energie label	F (A+++ , A++ , A+ , A , B , C , D , E , F)		
Temperatuur vraag	70 °C		
Gemiddeld woonoppervlak	65 m ²		
Aantal sluitingen	200 huishoudens equivalenten		
Warmtevraag obv energielabel en #woningen	16.700 GJ/jaar (berekend!)		
Warmtevraag	16.700 GJ/jaar (=C31 of zelf invullen)		
Afstand tot Natura 2000 of NNN-gebied	0 - 500 m		
Geothermie			
Door zoetwateraquifer of oppervlaktewater?	ja (ja/nee)		
Tijdperk bodemlaag	Bijvangst niet meenemen (Krijt/Jura, Perm, Overig, Onbekend, Bijvangst niet meenemen)		
Aquathermie - TEO en TEA			
Type waterlichaam	meer (rivier/meer)		
Stroomsnelheid watergang	0 (cm/sec)		
Breedte watergang (rivier)	"nvt" (m)		
Type meer	lijnvormig (lijnvormig/niet lijnvormig)		
Breedte wateroppervlak (meer, lijnvorming)	> 15 (m)		
Wateroppervlak (meer, niet lijnvormig)	< 0,5 (km ²)		
Gemiddelde diepte (meer)	> 3 (m)		
Pompsnelheid	> 30 (cm/s)		

Figuur 4. Het scherm van de invoergegevens van het DSS, zoals dat zichtbaar is in het tabblad "Invoergegevens en Resultaten".

Duurzaamheidscriteria per aspect

Nadat de gegevens van de omgeving zijn ingevoerd, wordt de informatie doorgerekend in het tabblad "DSS". De invoergegevens worden verwerkt in de duurzaamheidscriteria die per duurzaamheidsaspect ecologie, uitstoot, leveringszekerheid en veiligheid zijn opgesteld. De

classificaties van de duurzaamheidscriteria komen uit het literatuur onderzoek en zijn weergegeven in Figuur 5.

Duurzaamheidsaspecten		Duurzaamheidscriteria (Vaste Waarde na SLR)												
		Ecologie			Uitstoot				Leveringszekerheid				Veiligheid	
Duurzaamheidscriteria		(Mogelijke) verzanding zee/sterftedrinkwater [9]	Inzuigen vissen (pompsnelheid) [6,7,8]	Koudebevoorziening / type waterlichaam [4,5]	(Gemiddeld) Output Temperatuur warmtebron [°C]	CO2-uitstoot (kg)	CO2 uitstoot 2030 (kg)	Ondergrens Output Temperatuur warmtebron [°C]	Warmteaanbod Warmtevraag (GJ/Jaar)	Beschikbaarheid lange termijn (jaar)	Import afhankelijkheid	Blowout [13,14]	Drinkwater vervuiling [20]	Bodemdaling [10,11,12]
Warmtebron	Type													
Nuïmeting	CV-ketel (type HR 107)	nee	nee	3	80	1,02E+06	9,89E+05	75	16.700	0	ja	ja	nee	ja
Geothermie	bodembedpte < 500m	nee	nee	3	12	5,11E+05	1,53E+05	30	8.400	30	nee	ja	ja	ja
	afdiepte < 4 km	ja	nee	3	70	7,93E+04	2,38E+04	55	500.000	30	ja	nee	ja	ja
Aquathermie	afdiepte > 4 km	ja	nee	3	120	7,93E+04	2,38E+04	75	500.000	30	nee	ja	nee	ja
	TED - oppervlakte	nee	> 30	0,6	15	4,94E+05	1,53E+05	12	120.000	100	nee	nee	nee	nee
Restwarmte	TEA - afval	nee	nee	0,6	17	3,60E+05	1,03E+05	12	250.000	100	nee	nee	nee	nee
	TED - drinkwater	nee	nee	3	10	3,60E+05	1,03E+05	12	3.000	100	nee	nee	nee	nee
	industrie	nee	nee	3	0	1,49E+05	4,46E+04	30	20.000	30	nee	nee	nee	nee
	datacenter	nee	nee	3	35	4,61E+05	1,36E+05	30	10.000	20	nee	nee	nee	nee

Figuur 5. Duurzaamheidscriteria van de duurzaamheidsaspecten ecologie, uitstoot, leveringszekerheid en veiligheid

Er vinden enkele doorrekenen stappen plaats om de duurzaamheidsindicatie te bepalen. Dit gebeurt in de Excel sheet in het tabblad "DSS" en is in Figuur 6 weergegeven met rode pijlen.

Decision Support System																			
Duurzaamheidsaspecten		Duurzaamheidscriteria (Vaste Waarde na SLR)																	
Duurzaamheidscriteria		(Mogelijke) verzanding zee/sterftedrinkwater [9]	Inzuigen vissen (pompsnelheid) [6,7,8]	Koudebevoorziening / type waterlichaam [4,5]	(Gemiddeld) Output Temperatuur warmtebron [°C]	CO2-uitstoot (kg)	CO2 uitstoot 2030 (kg)	Ondergrens Output Temperatuur warmtebron [°C]	Warmteaanbod - Warmtevraag (GJ/Jaar)	Beschikbaarheid lange termijn (jaar)	Import afhankelijkheid	Blowout [13,14]	Drinkwater vervuiling [20]	Bodemdaling [10,11,12]					
Warmtebron	Type																		
Nuïmeting	CV-ketel (type HR 107)	nee	nee	3	80	1,02E+06	9,89E+05	75	16.700	0	ja	ja	nee	ja					
Geothermie	bodembedpte < 500m	nee	nee	3	12	5,11E+05	1,53E+05	30	8.400	30	nee	ja	ja	ja					
	afdiepte < 4 km	ja	nee	3	70	7,93E+04	2,38E+04	55	500.000	30	ja	nee	ja	ja					
Aquathermie	afdiepte > 4 km	ja	nee	3	120	7,93E+04	2,38E+04	75	500.000	30	nee	ja	nee	ja					
	TED - oppervlakte	nee	> 30	0,6	15	4,94E+05	1,53E+05	12	120.000	100	nee	nee	nee	nee					
Restwarmte	TEA - afval	nee	nee	0,6	17	3,60E+05	1,03E+05	12	250.000	100	nee	nee	nee	nee					
	TED - drinkwater	nee	nee	3	10	3,60E+05	1,03E+05	12	3.000	100	nee	nee	nee	nee					
	industrie	nee	nee	3	0	1,49E+05	4,46E+04	30	20.000	30	nee	nee	nee	nee					
	datacenter	nee	nee	3	35	4,61E+05	1,36E+05	30	10.000	20	nee	nee	nee	nee					
Criteria doorrekening, vergelijk situatie (Invoergegevens) met vaste waarde																			
Duurzaamheidsaspecten		Duurzaamheidscriteria (Vaste Waarde na SLR)																	
Duurzaamheidscriteria		(Mogelijke) verzanding zee/sterftedrinkwater [9]	Inzuigen vissen (pompsnelheid) [6,7,8]	Koudebevoorziening / type waterlichaam [4,5]	(Gemiddeld) Output Temperatuur warmtebron [°C]	CO2-uitstoot (kg)	CO2 uitstoot 2030 (kg)	Ondergrens Output Temperatuur warmtebron [°C]	Warmteaanbod - Warmtevraag (GJ/Jaar)	Beschikbaarheid lange termijn (jaar)	Import afhankelijkheid	Blowout [13,14]	Drinkwater vervuiling [20]	Bodemdaling [10,11,12]					
Warmtebron	Type	nee	nee	3	80	1,02E+06	9,89E+05	75	16.700	0	ja	ja	nee	ja					
Nuïmeting	CV-ketel (type HR 107)	nee	nee	3	12	5,11E+05	1,53E+05	30	8.400	30	nee	ja	ja	ja					
Geothermie	bodembedpte < 500m	ja	nee	3	70	7,93E+04	2,38E+04	55	500.000	30	ja	nee	ja	ja					
	afdiepte < 4 km	ja	nee	3	120	7,93E+04	2,38E+04	75	500.000	30	nee	ja	nee	ja					
Aquathermie	afdiepte > 4 km	ja	nee	3	120	7,93E+04	2,38E+04	75	500.000	30	nee	ja	nee	ja					
	TED - oppervlakte	nee	> 30	0,6	15	4,94E+05	1,53E+05	12	120.000	100	nee	nee	nee	nee					
Restwarmte	TEA - afval	nee	nee	0,6	17	3,60E+05	1,03E+05	12	250.000	100	nee	nee	nee	nee					
	TED - drinkwater	nee	nee	3	10	3,60E+05	1,03E+05	12	3.000	100	nee	nee	nee	nee					
	industrie	nee	nee	3	0	1,49E+05	4,46E+04	30	20.000	30	nee	nee	nee	nee					
	datacenter	nee	nee	3	35	4,61E+05	1,36E+05	30	10.000	20	nee	nee	nee	nee					
Omzetting doorrekening naar normering (1= onder de norm, 2= volgens de norm, 3= boven de norm)																			
Duurzaamheidsaspecten		Duurzaamheidscriteria (Vaste Waarde na SLR)																	
Duurzaamheidscriteria		(Mogelijke) verzanding zee/sterftedrinkwater [9]	Inzuigen vissen (pompsnelheid) [6,7,8]	Koudebevoorziening / type waterlichaam [4,5]	(Gemiddeld) Output Temperatuur warmtebron [°C]	CO2-uitstoot (kg)	CO2 uitstoot 2030 (kg)	Ondergrens Output Temperatuur warmtebron [°C]	Warmteaanbod - Warmtevraag (GJ/Jaar)	Beschikbaarheid lange termijn (jaar)	Import afhankelijkheid	Blowout [13,14]	Drinkwater vervuiling [20]	Bodemdaling [10,11,12]					
Warmtebron	Type	nee	nee	3	80	1,02E+06	9,89E+05	75	16.700	0	ja	ja	nee	ja					
Nuïmeting	CV-ketel (type HR 107)	nee	nee	3	12	5,11E+05	1,53E+05	30	8.400	30	nee	ja	ja	ja					
Geothermie	bodembedpte < 500m	ja	nee	3	70	7,93E+04	2,38E+04	55	500.000	30	ja	nee	ja	ja					
	afdiepte < 4 km	ja	nee	3	120	7,93E+04	2,38E+04	75	500.000	30	nee	ja	nee	ja					
Aquathermie	afdiepte > 4 km	ja	nee	3	120	7,93E+04	2,38E+04	75	500.000	30	nee	ja	nee	ja					
	TED - oppervlakte	nee	> 30	0,6	15	4,94E+05	1,53E+05	12	120.000	100	nee	nee	nee	nee					
Restwarmte	TEA - afval	nee	nee	0,6	17	3,60E+05	1,03E+05	12	250.000	100	nee	nee	nee	nee					
	TED - drinkwater	nee	nee	3	10	3,60E+05	1,03E+05	12	3.000	100	nee	nee	nee	nee					
	industrie	nee	nee	3	0	1,49E+05	4,46E+04	30	20.000	30	nee	nee	nee	nee					
	datacenter	nee	nee	3	35	4,61E+05	1,36E+05	30	10.000	20	nee	nee	nee	nee					
Normering gewogen met wegingsfactor rij 38																			
Duurzaamheidsaspecten		Duurzaamheidscriteria (Vaste Waarde na SLR)													Totaalscore per aspect				TOTAAL
Duurzaamheidscriteria		(Mogelijke) verzanding zee/sterftedrinkwater [9]	Inzuigen vissen (pompsnelheid) [6,7,8]	Koudebevoorziening / type waterlichaam [4,5]	(Gemiddeld) Output Temperatuur warmtebron [°C]	CO2-uitstoot (kg)	CO2 uitstoot 2030 (kg)	Ondergrens Output Temperatuur warmtebron [°C]	Warmteaanbod - Warmtevraag (GJ/Jaar)	Beschikbaarheid lange termijn (jaar)	Import afhankelijkheid	Blowout [13,14]	Drinkwater vervuiling [20]	Bodemdaling [10,11,12]	Ecologie	Uitstoot	Leveringszekerheid	Veiligheid	Overall Resultaat
Warmtebron	Type	3	3	3	0,97	0,07		3	3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3,33
Nuïmeting	CV-ketel (type HR 107)	3	3	3	0,97	0,07		3	3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3,33
Geothermie	bodembedpte < 500m	3	3	3	0,97	0,07		3	3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3,33
	afdiepte < 4 km	3	3	3	0,97	0,07		3	3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3,33
Aquathermie	afdiepte > 4 km	3	3	3	0,97	0,07		3	3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3,33
	TED - oppervlakte	3	3	3	0,97	0,07		3	3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3,33
Restwarmte	TEA - afval	3	3	3	0,97	0,07		3	3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3,33
	TED - drinkwater	3	3	3	0,97	0,07		3	3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3,33
	industrie	3	3	3	0,97	0,07		3	3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3,33
	datacenter	3	3	3	0,97	0,07		3	3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3,33

Figuur 6. Het doorrekeningschema van het DSS van de classificatie van de duurzaamheidscriteria, via de rode pijlen naar een duurzaamheidsbeoordelingswaarde.

Het eerste blok in Figuur 6 geeft de classificatie van de duurzaamheidscriteria die uit het literatuuronderzoek naar voren zijn gekomen. In het tweede blok zijn deze waarde doorgerekend naar aanleiding van de invoergegevens. In het derde blok worden de waarden gewogen, waarbij er voor gekozen is de drie duurzaamheidsaspecten ecologie, uitstoot en leveringszekerheid even zwaar te wegen. In het vierde blok staat het eindresultaat na doorrekening. Dit resultaat wordt overgenomen naar het tabblad "Invoergegevens en Resultaat".

Resultaat

Na verwerking van de data in het tabblad DSS is in een kleuren schema (groen = boven de norm, geel is rond de norm en rood = onder de norm) een indicatie van de duurzaamheid van het criterium voor de betreffende bron weergegeven. Deze wordt automatisch overgenomen naar het tabblad "Invoergegevens en Resultaat" (Figuur 7) en hier wordt ook de Warmtebron Duurzaamheid Indicator van de geselecteerd warmtebron(nen) getoond ten opzichte van de CV-ketel type HR 107, die als nulmeting is gebruikt.

Resultaat									
Lees hier het resultaat van de duurzaamheidscriteria uit.									
Warmtebron: Alle warmtebronnen									
Warmtenet Duurzaamheid Indicator (WDI):									
Warmtebron	Type	Ecologie	Uitstoot	Leveringszekerheid	Veiligheid	Resultaat	Doel		
							2020	2030	2030
							CO2-uitstoot bij 16700 GJ/jaar (kg)	CO2-uitstoot bij 16700 GJ/jaar (kg)	CO2-uitstoot bij 16700 GJ/jaar (kg)
Nulmeting	CV-ketel (type HR 107)						1.017.000	989.000	315.630
Geothermie	bodemenergie < 500m						511.000	153.000	
	aardwarmte < 4 km						79.000	24.000	
	ultradiep > 4 km						79.000	24.000	
Aquathermie	TEO - oppervlakte						494.000	153.000	
	TEA - afval						360.000	103.000	
	TED - drinkwater						360.000	103.000	
Restwarmte	industrie						149.000	45.000	
	datacenter						461.000	136.000	
Aandachtpunten:									
Aquathermie									
Monitoring effecten op temperatuur oppervlaktewater De CO2-uitstoot van de verschillende vormen van aquathermie (TEO, TEA en TED) is in dit model gelijk, er wordt gerekend met dezelfde factor. In werkelijkheid kan deze verschillen.									
Natura 2000 of NNN									
Aquathermie & Geothermie: voortoets uitvoeren om effecten op instandhoudingsdoelen uit te sluiten									
Geothermie									
Het verschil tussen aardwarmte (tot 4 km) en ultradiepe geothermie (>4 km) komt niet naar voren in waarden van de CO2-uitstoot. Wel wordt dit meegenomen in de score doordat de temperatuur van ultradiepe geothermie hoger is krijgt deze een hogere score. Voor aardwarmte (<4 km) en ultradiepe geothermie (>4km) is aangenomen dat de bijvangst (gas, methaan) wordt afgevangen en ingezet voor het warmtenet. Affakkelen is ook mogelijk, maar zorgt voor een afwijkende CO2-uitstoot.									
Restwarmte									
Restwarmte kan door verschillende typen processen worden geproduceerd, en de brontemperatuur kan sterk verschillen. Op één locatie kunnen mogelijk meerdere warmtestromen met verschillende temperaturen worden afgetapt.									
Warmtepompen									
De keuze en plaatsing van warmtepompen heeft effect op de efficiëntie van een warmtenet. Dit is maatwerk, en niet meegenomen in het model.									
Referentie: HR107-gasketel									
Een veiligheidsissue van de referentiesituatie is koolmonoxidevergiftiging.									

Figuur 7. In het resultaatscherm van het DSS zijn de doorgerekende gewogen waarden meegenomen vanuit het tabblad "DSS". De kleurschaal geeft weer: rood = boven de norm, geel = rond de norm en groen = onder de norm en wordt als positief gewaardeerd.

De ingevoerde gegevens voor de bronnen en de wijk rekenen de verwacht CO₂ uitstoot in 2020 en 2030, zodat deze waarden met elkaar vergeleken kunnen worden. De kleurenschaal is afgezet tegen de doel waarde van 2030 die voor alle bronnen hetzelfde is weergegeven bij de CO₂ uitstoot van de warmtevraag van de te beoordelen wijk.

Per aspect zijn de kleuren indicaties zichtbaar en in de kolom 'Resultaat' is de uiteindelijke duurzaamheidsindicator te zien. Voor detail informatie kan ingezoomd worden naar het tabblad "DSS".

De invoergegevens en resultaat staan op één tabblad, zodat bij wijziging van de invoergegevens het veranderde resultaat direct zichtbaar is.