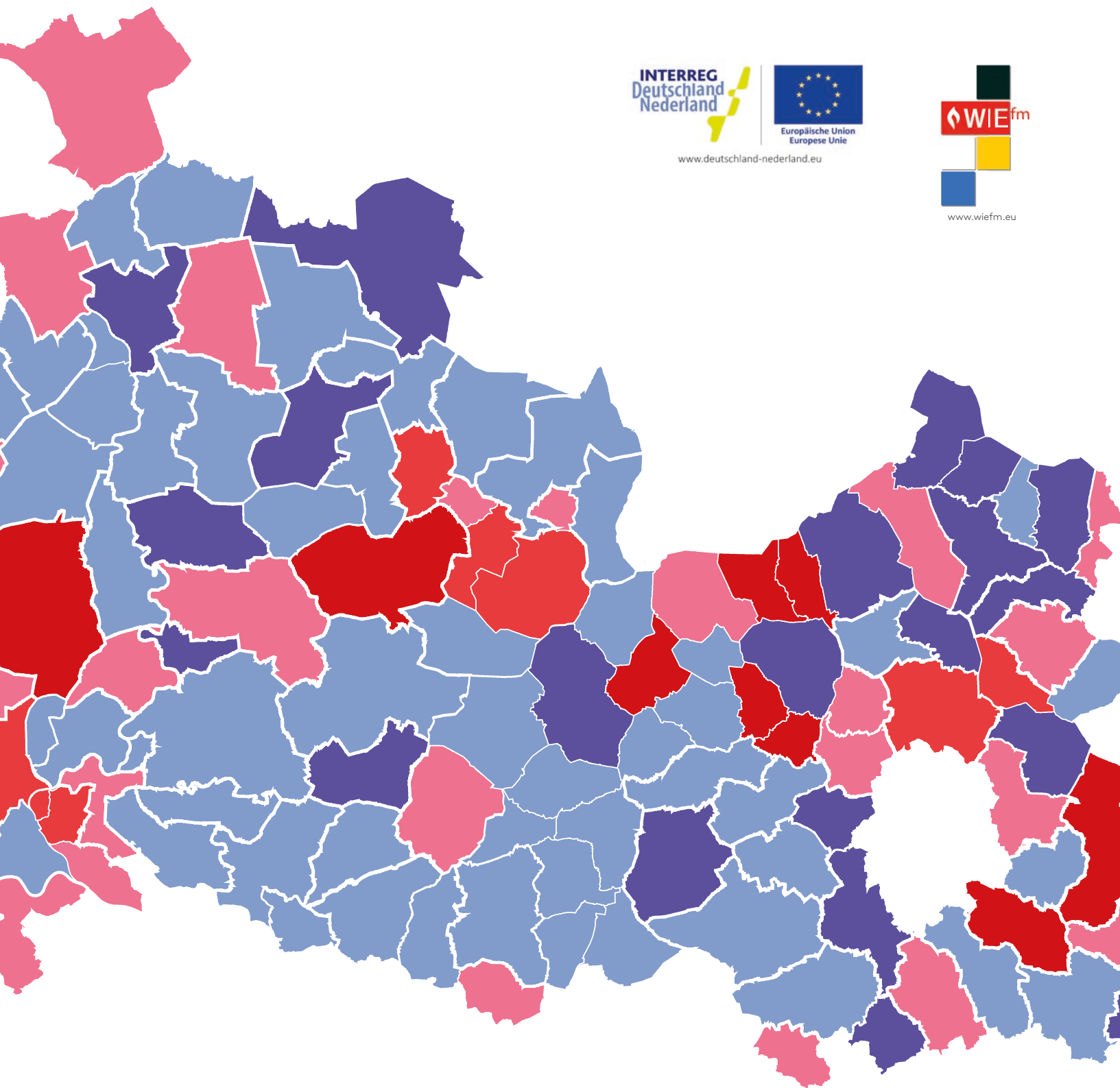




Warmte in de Euregio

focuseren & moderniseren

Colofon

Uitgever
FH Münster
Stegerwaldstraße 39
48565 Steinfurt



FH MÜNSTER
University of Applied Sciences

Oplage: 1.000 stuks

Projectpartners

FH Münster
Prof. Dr.-Ing. Christof Wetter
Stegerwaldstraße 39
48565 Steinfurt
Tel: +49 (0)2551/962-725
Mail: wetter@fh-muenster.de



FH MÜNSTER
University of Applied Sciences

Saxion University of Applied Sciences
Dr. Ir. Richard van Leeuwen
M.H. Tromplaan 28
7513AB Enschede
Tel: +31 (0)610892455
Mail: r.p.vanleeuwen@saxion.nl



Stichting kiEMT
Drs. Bas Grol
Eusebiusbuitensingel 28
6828 HW Arnhem
Tel: +31 (0)26/4461469
Mail: gr@kiemt.nl



Wirtschaftsförderungs- und Entwicklungsgesellschaft
Steinfurt mbH
Dipl. Kfm. Christian Rapien
Tecklenburger Straße 8
48565 Steinfurt
Tel: +49 (0) 2551/69 2704
Mail: christian.rapien@westmbh.de



Wirtschaftsförderungs- und
Entwicklungsgesellschaft
Steinfurt mbH

Abfallwirtschaftsgesellschaft des Kreises Warendorf mbH
Markus Pahlenkemper
Westring 10
59320 Ennigerloh
Tel: +49 (0) 2524/93-07116
Mail: markus.pahlenkemper@awg-waf.de



Wirtschaftsförderung Kreis Coesfeld GmbH
Dipl.-Geogr. Christian Holterhues
Fehrbelliner Platz 11
48249 Dülmen
Tel: +49 (0) 2594/78240-26
Mail: christian.holterhues@wfc-kreis-coesfeld.de



Wirtschaftsförderungsgesellschaft für den Kreis Borken mbH
Dipl.-Spk.-Betriebswirt Ingo Trawinski
Erhardstraße 11
48683 Ahaus
Tel: +49 (0) 2561/97999-90
Mail: trawinski@wfg-borken.de



Het project WiEfm wordt gefinancierd door:



EUROPÄISCHE UNION
Investition in unsere Zukunft
Europäischer Fonds
für regionale Entwicklung

Ministerium für Wirtschaft, Energie,
Industrie, Mittelstand und Handwerk
des Landes Nordrhein-Westfalen



www.deutschland-nederland.eu



Ministerie van Economische Zaken



Projectresultaten in één oogopslag

Vanaf 05/2018



200 Geïdentificeerde warmte-hotspots

Een interactieve cartografische weergave van meer dan 200 gebieden (HotSpots) in Münsterland met warmtebehoeften, waarvan de warmtevraag dichtheid zo hoog is dat het logisch is om deze via een verwarmingsnetwerk te leveren.



20 Nederlands & 12 Duitse Warmtenetten onderzocht

op het gebied van technologie, efficiëntie en milieu-impact.



120 Deelnemers voor de 6 interactieve future workshops

met experts (planners en gemeenten) in de zes regio's (Overijssel, Gelderland, Borken, district Coesfeld, district Steinfurt, district Warendorf).



175 Deelnemers voor de 3 expert workshops

interregionale uitwisseling tussen geïnteresseerden en experts uit de Euregio.



Identificatie van succesfactoren en obstakels

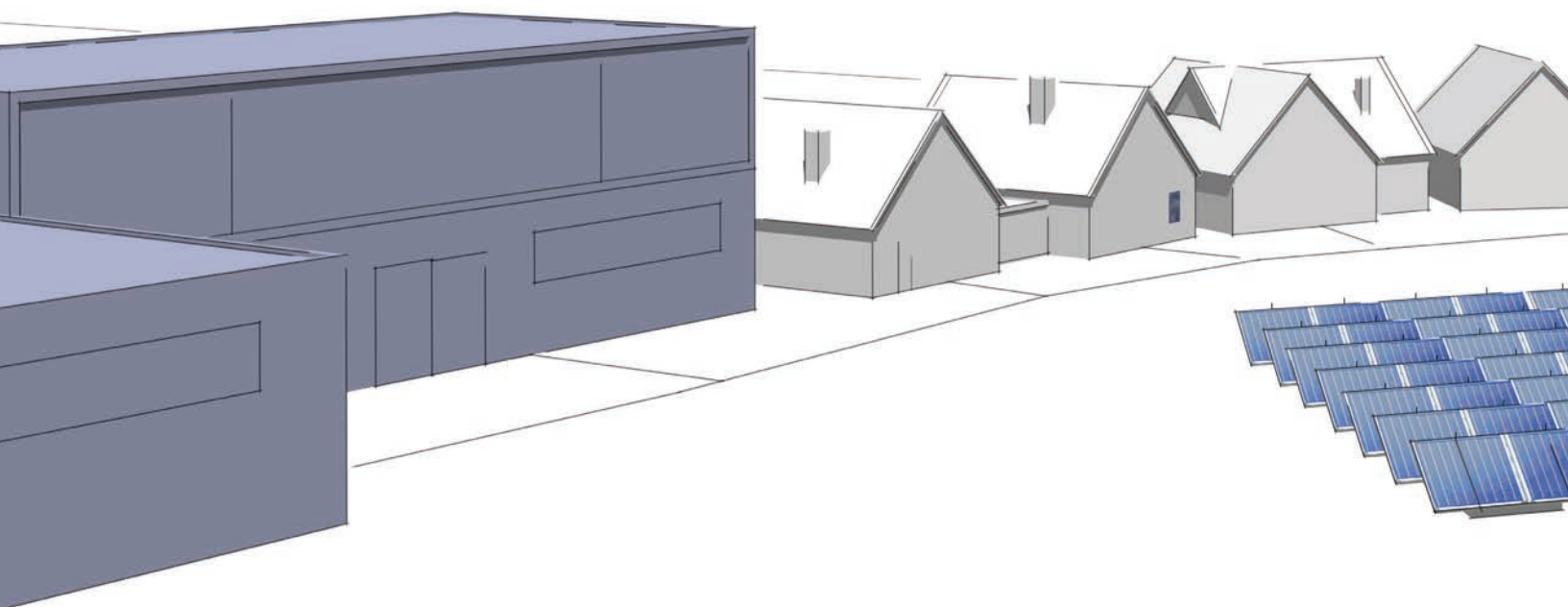


voor het initiëren van collectieve warmtevoorziening, gemeentelijke plannen en het gebruik van warmtenetten in de regio.



17 Warmtevoucher uitgegeven

De voorbereiding van 16 haalbaarheidsstudies op collectieve warmteleveringsprojecten met een totaal volume van **€ 249.280** werd financieel ondersteund in het kader van WiEfm met een dekkingsgraad van 70%. Financiering voor verdere studies is nog steeds in het kader van WiEfm beschikbaar.



Inhoud | Overzicht

02 Colofon

03 Projectresultaten in één oogopslag

04 Inhoud

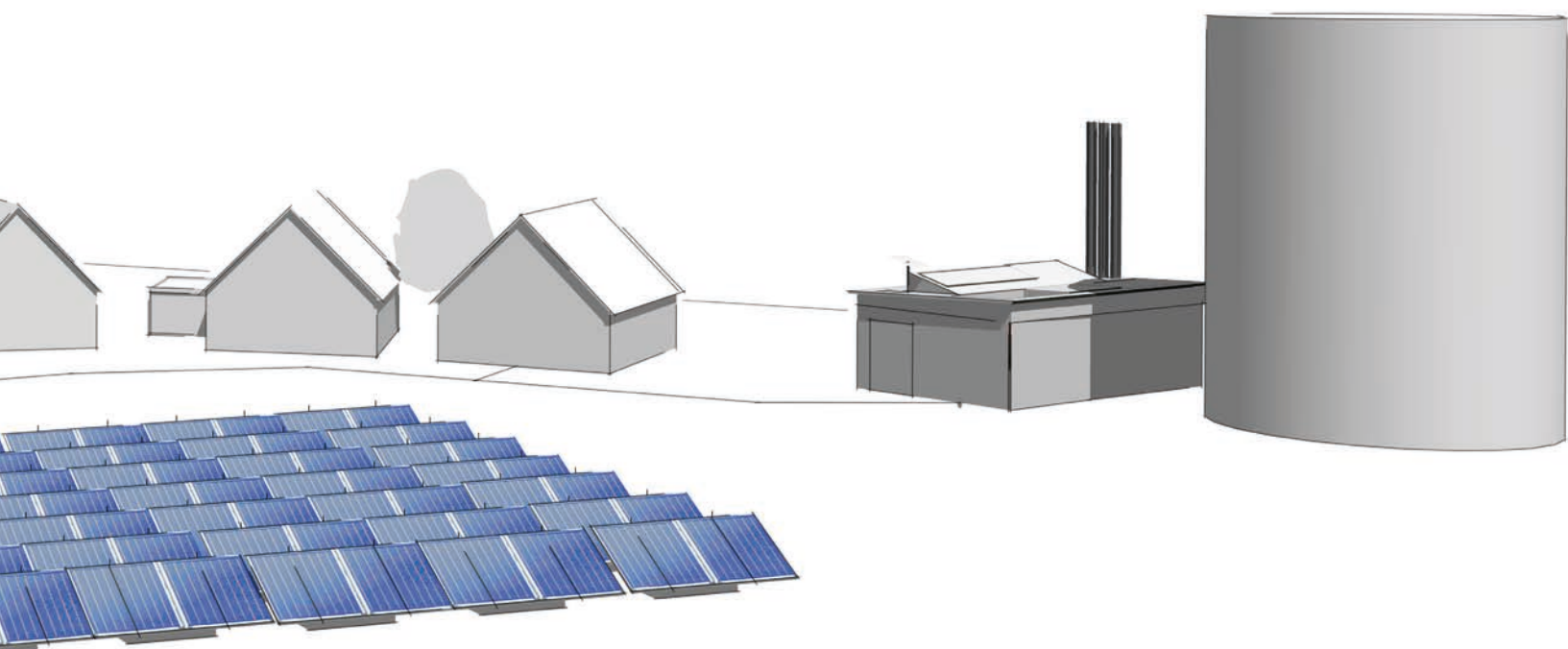
06 EUREGIO als voorbeeld?

Warmtetransitie in Europa

08 Beleidsambities in kaart gebracht

Benutten van warmte in de Euregio

12 Warmtehotspots

**16 Warmtenetbenchmark**

Kwalitatieve vergelijking van
bestaande warmtenetten

**18 Vergelijking van prestatie
warmtenetten in Oost Neder-
land****22 Warmtetransitie model**

voor duurzame energievoorzie-
ning van woonwijken

24 Overzichtskaart Projectregio

Warmtetransitie in Europa - EUREGIO als voorbeeld

De Europese energiemarkt is een warmtemarkt. Als we de transportsector buiten beschouwing laten, wordt bijna 70% van het finaal energieverbruik in de vorm van warmte-energie ingezet voor ruimteverwarming en industriële processen. Slechts 27% wordt gebruikt voor verlichting en elektrische processen, en slechts 3% voor koeling. In Europese huishoudens is het gebruik van de verwarming en warm water verantwoordelijk voor bijna 80% van het totale eindverbruik van energie. In de industrie is ruimteverwarming en de inzet van warmte bij industriële processen goed voor 71% van het energieverbruik [1].

Nog altijd is 84% van de energie die wordt gebruikt voor verwarming en koeling afkomstig van fossiele brand-

stoffen. Om de klimaat- en energie-doelstellingen van de EU te kunnen verwezenlijken, moet het energieverbruik in de verwarmings- en koelingssector sterk worden teruggebracht en moet de sector afstappen van fossiele brandstoffen.

In de in februari 2016 gepubliceerde EU-strategie voor verwarming en koeling formuleert de Europese Commissie de volgende doelstellingen:

“Om onze doelstellingen van een koolstofarme economie te verwezenlijken, moeten gebouwen koolstofarm worden gemaakt. Daartoe moet de bestaande gebouwenvoorraad worden gerenoveerd en moeten meer inspanningen worden geleverd op het gebied van energie-efficiëntie en duurzame energie, waarbij ook koolstofarme

elektriciteit en stadsverwarming een bijdrage moeten leveren. [...] De industriële sector kan dezelfde weg inslaan en gebruikmaken van de economische argumenten betreffende efficiëntie en nieuwe technische oplossingen om meer duurzame energie te gebruiken. In deze sector moet echter wel worden verwacht dat in bepaalde mate vraag naar fossiele brandstoffen blijft bestaan ten behoeve van processen die zeer hoge temperaturen vergen. Industriële processen en infrastructuur zullen afvalwarmte en afvalkoude blijven produceren. Een groot deel daarvan kan in nabij gelegen gebouwen worden hergebruikt. ([2], pagina 2)”

Voor een EU-breed onderzoek uit 2014 werden de plaatselijke omstandigheden in kaart gebracht en energiesystemen gemodelleerd. Hieruit

bleek dat maatregelen voor een betere energie-efficiëntie in stadsverwarmingssystemen aan de aanbod- en vraagzijde en energiebesparing in gebouwen zorgen voor een vergelijkbare CO₂-reductie ten opzichte van alleen energiebesparingen, maar dan met lagere kosten voor het totale energiesysteem. Dit impliceert een verbeterde flexibiliteit van het energiesysteem (door een betere integratie tussen de warmte- en elektriciteitsmarkt, zie [3]). Ook zorgen dergelijke maatregelen voor een breder aanbod van duurzame energiebronnen (zoals aardwarmte, biobrandstoffen, wind- en zonne-energie [ibid.]) en bieden ze veel werkgelegenheid (ontwerp, bouw, exploitatie, onderhoud). Daarnaast ondersteunt dit het economisch concurrentievermogen en duurzame groei in de EU. In zijn onderzoek geeft prof. Urban Persson aan dat het potentiële marktaandeel van blok- en stadsverwarming ongeveer 60% bedraagt [4]. Dat deze waarde realistisch is, blijkt uit een vergelijking met Denemarken: Daar is al twee derde van alle gebouwen aangesloten op een warmtenet. Deze warmtenetten halen op hun beurt 50% van de energie uit duurzame energiebronnen. [5].

Voor het behalen van de klimaatdoelen van Parijs zijn dus zeker veranderingen op de warmtemarkt nodig, die daarnaast ook een grote kans vormen het energiesysteem

geheel te vernieuwen en efficiënter en milieuvriendelijker te maken. En dit is ook noodzakelijk om een andere reden: bijna de helft van alle gebouwen in de EU heeft een verwarmingssysteem dat vóór 1992 is geïnstalleerd ([2], p. 6). Consumenten moeten vaak snel beslissen over de vervanging van hun oude systeem, als de verwarming ineens niet meer werkt en dringend vervanging nodig is. Ze hebben vaak slechte toegang tot prijs- en kwaliteitsvergelijkingen en weten niet altijd of en welke alternatieven er zijn. Hierdoor valt de keus nog steeds regelmatig op oudere en minder efficiënte technologieën (ibid.).

En hier wil het project WiEfm iets aan doen. Hiervoor worden in de euregionale context de kansen en beperkingen van een collectieve warmtevoorziening onderzocht en beschreven. Het project is gebaseerd op twee pijlers: de technisch-economische haalbaarheid en de maatschappelijke haalbaarheid, dus de governance van collectieve warmtevoorzieningen. Nu we halverwege het project zijn, presenteren we in onze derde projectbrochure een selectie van tot dusver behaalde resultaten.

Het team van de FH Münster heeft de bevolkingsstructuur geanalyseerd en daarbij warmtehotspots gevonden in het Münsterland. In deze regio's

is het nu al de moeite waard een warmtenet aan te leggen. De resultaten zijn verbazingwekkend: op een oppervlakte van 1,5% van het Münsterland is 30% van de warmte nodig. Een krachtige hefboom voor klimaatbescherming in de regio. Het team van Hogeschool Saxion heeft een methode ontwikkeld om vast te stellen in hoeverre de gemeenten bereid zijn collectieve warmteoplossingen te ondersteunen en aan te moedigen. De resultaten, gepresenteerd in de vorm van een kaart, ondersteunen de resultaten van de hotspotanalyse.

Tot slot zijn in deze brochure de resultaten beschreven van het onderzoek van warmtenetten in het Münsterland, Twente en de Achterhoek, die duidelijk maken waaraan een milieuvriendelijk en efficiënt net tegenwoordig moet voldoen.

Veel leesplezier,

het WiEfm-team

Literatuurlijst

- [1] EUROPEAN COMMISSION, "Heating and Cooling," 2017. [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/heating-and-cooling>.
- [2] EUROPEAN COMMISSION, "AN EU Strategy on Heating and Cooling," 2016.
- [3] H. Lund, S. Werner, R. Wiltshire, S. Svendsen, J. Eric, F. Hvelplund, and B. Vad, "4th Generation District Heating (4GDH) Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems," *Energy*, vol. 68, pp. 1–11, 2014.
- [4] U. Persson, "District heating in future Europe: Modelling expansion potentials and mapping heat synergy regions," 2015.
- [5] Dansk Fjernvarme, "Årsstatistik 2014/2015," 2015.

Benutten van warmte in de Euregio: Beleidsambities in kaart gebracht

De overgang naar een duurzame energiehuishouding moet niet worden opgevat als een typisch Nederlandse of Duitse opgave. Deze ontwikkelingen vinden plaats tegen de achtergrond van de langetermijnvisie van de Europese Commissie op het gebied van vervoer, energie en klimaatverandering. In de energietransitie zijn voor beide lidstaten de Europese doelstellingen op het terrein van klimaatverandering leidend. De Europese Commissie streeft naar een koolstofvrije concurrerende economie in 2050. Met het formuleren van dit beleidsdoel geeft de Europese Commissie aan dat zij de afspraken die wereldleiders hebben gemaakt tijdens de klimaatconferenties in onder meer Kopenhagen (2009), Cacu (2010) en Parijs (2015) heeft omarmd. Zij hebben zich gecommitteerd aan de verplichting om koolstofarme ontwikkelingsstrategieën uit te denken en ten uitvoer te brengen [1].

Een inventariserende beleidsstudie naar warmteprojecten en warmtenetten

Voor het realiseren van een koolstofvrije concurrerende economie in 2050 is de Europese Commissie afhankelijk van de inspanningen van de lidstaten [1]. In Nederland en Duitsland hebben lokale bestuurders een grote rol toebedeeld gekregen in de energietransitie. In beide landen verwacht men dat als zij op grote schaal projecten initiëren en faciliteren, het aandeel duurzame energie als vanzelfsprekend wordt vergroot. Inmiddels voelen lokale bestuurders de urgentie om stappen te zetten. Zij zijn dan ook naarstig op zoek naar projecten met potentie en de bijbehorende uitrolstrategieën. [2] (Sanders, Heldeweg & Brunnekeef, 2017)

In het Euregio-gebied wordt door bestuurders het benutten van warmte als een kansrijke optie gezien voor het realiseren van duurzaamheidsambities [3] (WIEfm, 2017). Door de inzet van warmte zou de uitstoot van CO₂ verder kunnen worden teruggedrongen en het aandeel hernieuwbare energie kunnen stijgen. Dit roept vrijwel direct de vraag op of, en zo ja, hoe de potentie van warmte ten volle kan worden benut.

Voor het realiseren van een heuse 'wärmewende' moet allereerst sprake zijn van technische haalbaarheid. Warmte moet immers gereed worden gemaakt voor consumptie en worden getransporteerd naar de eindgebruiker. Daarnaast moet politiek-bestu-

urlijk het sein op groen staan. In deze bijdrage wordt dit aspect centraal gesteld. Dat geschiedt door de resultaten van een inventariserende beleidsstudie te beschrijven, waarin de rol die lokale en regionale bestuurders toekennen aan warmte bij het verduurzamen van de energiehuishouding centraal is gesteld¹. Met de studie wordt beoogd inzichtelijk te maken waar het thema 'warmte' op de beleidsagenda staat en hoever men in de regio gevorderd is met het waarmaken van de ambities. Daarbij is vooral gekeken naar het verbinden van projecten aan regionale warmtenetten. Het verbinden van initiatieven aan een regionale infrastructuur moet worden opgevat als een publiek-privaat sturingsvraagstuk waar-

bij uiteenlopende belangen in het geding zijn en die daarom per definitie de beleidsagenda zullen bereiken [2] (Sanders, Brunnekreef & Helde-
weg, 2016).

In total zijn er 144 gemeenten geanalyseerd. Aan de Nederlandse kant van de grens zijn de provincie Overijssel en de provincie Gelderland geanalyseerd. In de studie zijn tevens de gemeenten betrokken die tot het verzorgingsgebied van beide provincies behoren. Aan de Duitse zijde van de grens zijn de gemeenten in de provincie, Borken, Coesfeld, Steinfurt, und Warendorf betrokken (dus de hele regio Münsterland zonder de stad Münster).

In de studie zijn allereerst de beleidsambities op het terrein van hernieuwbare energie geïnventariseerd. Daarvoor zijn per bestuursorgaan onder meer raadstukken, energievissies, en warmteplannen en Klimaschutzkonzepte geraadpleegd. Om de actualiteit van het overzicht te borgen is er voor gekozen om niet verder terug te gaan in de tijd dan 2010. Vervolgens is gekeken of en zo ja, hoe men gebruik wil maken van warmteprojecten en of men deze via warmtenetten met elkaar wil verbinden om duurzaamheidsambities te verwirkelijken. Daarbij is de aandacht ook uitgegaan naar wat bestuurders van dergelijke initiatieven verwachten (bijvoorbeeld in termen van het aantal woningequivalenten) en in welke fase van realisatie een regionale warmte-infrastructuur zich begeeft.

Om de kwaliteit van de inventarisatie te borgen zijn de opgehaalde gegevens aangelegd tegen onderzoeksrapporten en mediaberichten over het gebruik van warmte in het Euregio-gebied. Daarnaast zijn de resultaten gepresenteerd en bedi-

scussieerd tijdens een bijeenkomst van de WIEfm-projectgroep. Tot slot is aan twee 'experts' gevraagd of zij willen beoordelen of initiatieven over het hoofd zijn gezien of dat deze juist onterecht in het overzicht zijn opgenomen. Deze maatregelen hebben geleid tot enkele bijstellingen in de inventarisatie. De resultaten zijn vervolgens verwerkt in een overzichtskaart².

Resultaten beleidsstudie geografisch weergeven

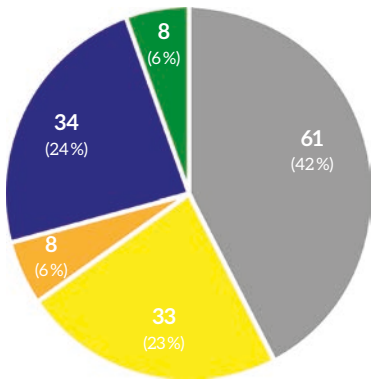
Figuur 2 (volgende pagina) geeft een geografische afbeelding van de provincies Overijssel en Gelderland en van de regio Münsterland. Op de kaart zijn de gemeenten ingetekend die tot het verzorgingsgebied van deze provincies behoren. Om de leesbaarheid van de geografische weergave te borgen, is er de voorkeur aangegeven om niet de gemeentenaam in de kaart te plaatsen, maar gebruik te maken van een nummer. In tabel 1 is terug te vinden welke gemeentenaam met welk nummer correspondeert.

Uit de analyse (fig. 1) blijkt dat slechts 42 van de 144 gemeenten (30%) over een significant warmtenet beschikken. Bijna evenveel, namelijk 31 gemeenten (28%), hebben echter min of meer concrete plannen om een warmtenetinfrastuctuur aan te leggen. In 61 gemeenten (42%) zijn

er momenteel geen plannen en geen warmtenet.

Schlussfolgerung

Als we de resultaten die figuur 1 geeft in ogenschouw nemen, dan kunnen we concluderen dat er in de provincies Gelderland en Overijssel evenals het Münsterland gesproken wordt over warmte. Echter, we moeten ook vaststellen dat warmte in een groot deel van de gemeenten nog niet de beleidsagenda heeft bereikt. Wat verder uit figuur 1 valt op te maken is dat bij gemeenten waar een warmtenet aanwezig is de aangrenzende gemeenten hierover in hun beleid spreken. Uit het figuur kan worden afgeleid dat er een keten is ontstaan van gemeenten die (bijna) aan elkaar grenzen waar wordt gesproken over een net, dan wel een warmtenet aanwezig is, dan wel waar daadwerkelijk plannen zijn voor de realisatie van een warmtenet of tot uitbreiding. Hier zijn enkele uitzonderingen op, welke liggen aan de grenzen van de provincies en mogelijk aansluiten bij warmtenetten van een andere provincie (zie Neerijnen, Bronckhorst, Geldermalsen, Zaltbommel und Oude IJsselstreek). Voor een dergelijke constatering is het echter te vroeg en hiervoor zal nader in kaart gebracht moeten worden waar in de andere provincies dergelijke initiatieven zijn.



Kein Wärmenetz in Aussicht

Kein Netz, aber erste Überlegungen

Kein Netz, aber konkrete Pläne

Wärmenetz vorhanden

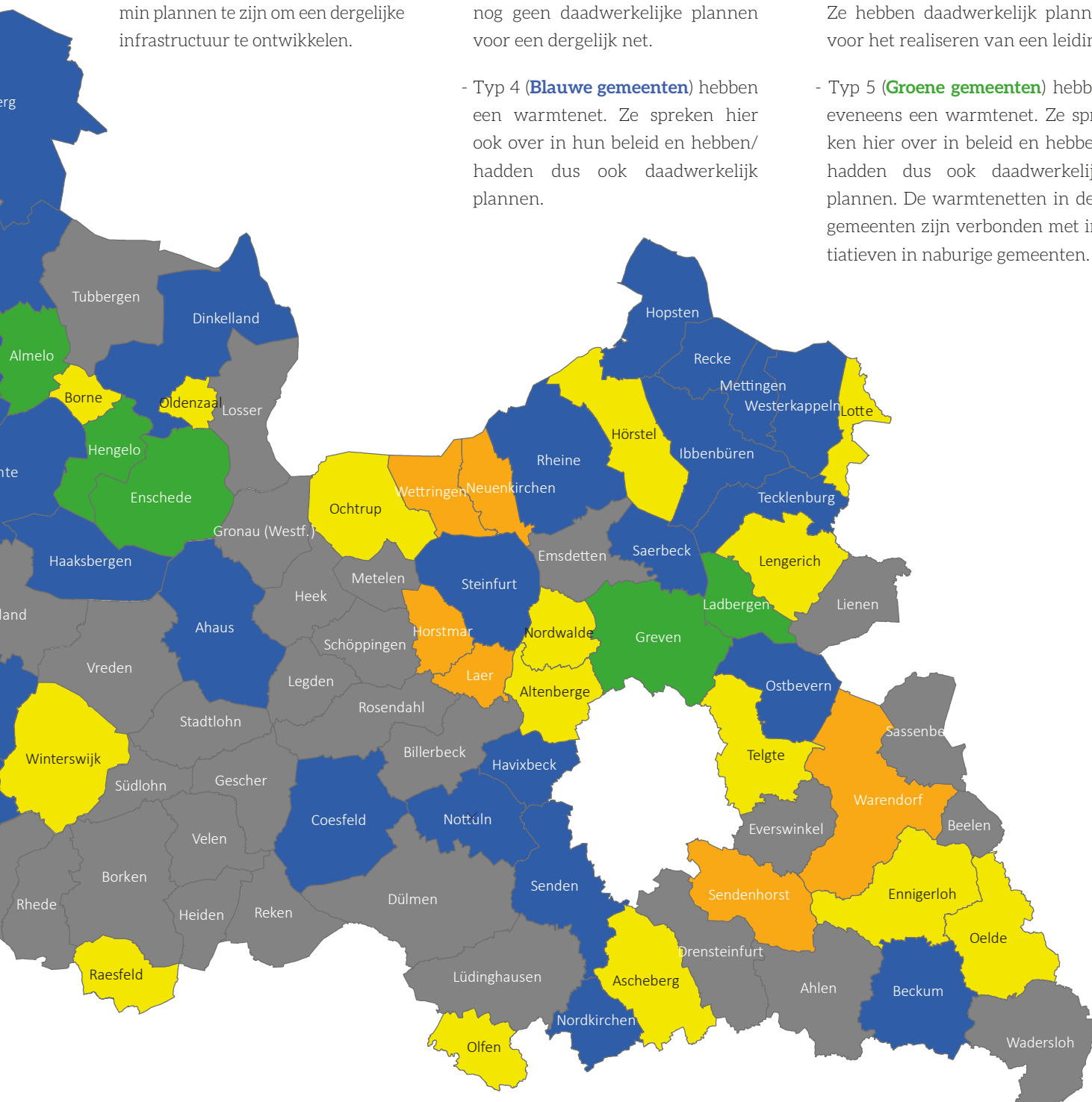
Wärmenetz mit Nachbargemeinden

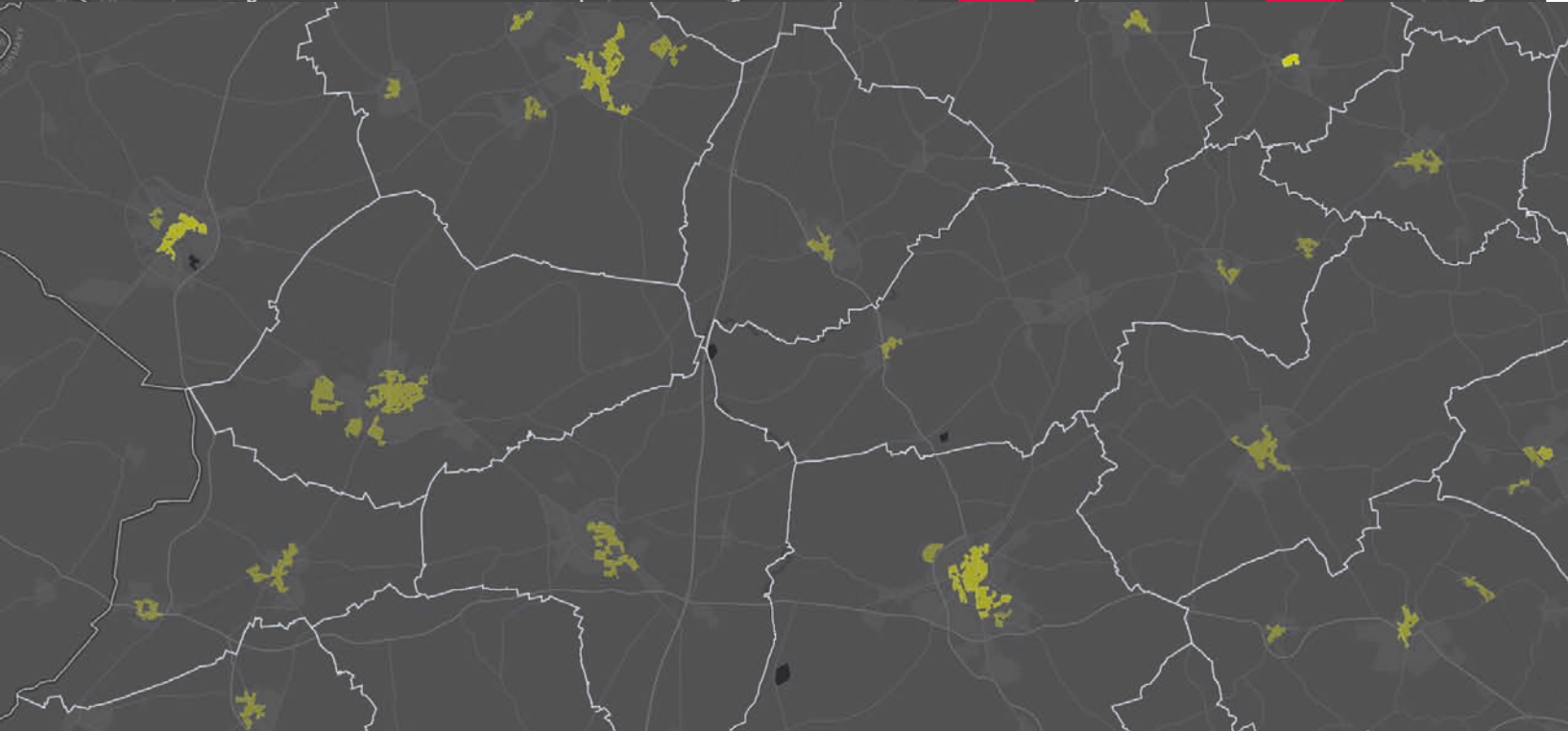
Figuur 1: Warmtenetten in gemeenten van de EUREGIO

Hoewel in het onderzoek de grootste zorgvuldigheid is betracht, kan het zijn dat onverhoopt informatie niet correct wordt weergegeven. In het geval dat onvolkomenheden worden opgemerkt, zouden wij het op prijs stellen als er contact wordt opgenomen met één van de auteurs. Zij zullen er dan voor zorgdragen dat in het vervolg van het WIEfm-project wordt uitgegaan van de correcte gegevens.

Legende

- Typ 1 (**Grijze gemeenten**) hebben geen warmtenet. Hier spreken ze niet over in hun beleid en er lijken evenmin plannen te zijn om een dergelijke infrastructuur te ontwikkelen.
- Typ 2 (**Gele gemeenten**) hebben nog geen warmtenet. Ze spreken hier wel over in beleid, maar hebben nog geen daadwerkelijke plannen voor een dergelijk net.
- Typ 3 (**Oranje gemeenten**) hebben nog geen warmtenet. Ze spreken hier echter wel over in hun beleid. Ze hebben daadwerkelijk plannen voor het realiseren van een leiding.
- Typ 4 (**Blauwe gemeenten**) hebben een warmtenet. Ze spreken hier ook over in hun beleid en hebben/hadden dus ook daadwerkelijk plannen.
- Typ 5 (**Groene gemeenten**) hebben eveneens een warmtenet. Ze spreken hier over in beleid en hebben/hadden dus ook daadwerkelijke plannen. De warmtenetten in deze gemeenten zijn verbonden met initiatieven in naburige gemeenten.





Warmtehotspots

Een van de hoofddoelen van het project WiEfm was en is het vaststellen en beschrijven van mogelijkheden voor een warmtetransitie in de EUREGIO. Hierbij is het van groot belang dat er informatie beschikbaar is die is toegespitst op de lokale situatie. Want alleen als de warmtebehoefte en mogelijke warmtebronnen gelijktijdig worden beschreven, kunnen ruimtelijke verbanden worden gelegd. Die kunnen dan weer leiden tot een concrete planning voor een collectieve warmtevoorziening. In aansluiting op vorige studies over het energiebeleid in steden en gemeenten in het Münsterland (zie bijv. [1]) heeft het onderzoeksteam van de FH Münster onder leiding van prof. dr. ing. Christof Wetter een methode ontwikkeld, om aan de hand van bestaande geografische gegevens zoals kadastrale grenzen, gebouwtypen en het grondgebruik, een ruimtelijke analyse uit te voeren. Deze definieert volgens bepaalde richtlijnen waar de vraag naar warmte in het Münsterland zo groot is dat een collectieve warmteoplossing uitkomst kan bieden.

Dat warmtenetten een belangrijke bouwsteen zijn voor een CO₂-neutraal energiesysteem, is in de Europese context erkend en ze worden dan ook gestimuleerd. Zij vormen de basis voor een grootschalige inzet van duurzame energiebronnen in de warmtemarkt en zorgen dankzij hun vermogen tot sectorkoppeling voor een verbinding tussen de elektriciteits-, warmte- en (bio)gasmarkt [2], [3]. Op een interactieve kaart van de regio zijn bijna 200 plaatsen

– ‘warmtehotspots’ – in het Münsterland te zien, waar het de moeite waard is een warmtenet te installeren. De mogelijkheden zijn groot: Slechts 1,5% van het oppervlak is verantwoordelijk voor een derde van de totale vraag naar verwarming en warm water in het Münsterland.

Warmtehotspots in het Münsterland

In het kader van een uitvoerige analyse van de bevolkingsstructuur van het Münsterland werd specifiek vast-

gesteld welke gebieden mogelijkheden bieden voor de aanleg van nieuwe warmtenetten. Het bewoonde gebied beslaat ongeveer 8% van het Münsterland, waarbij de oppervlakte van de stad Münster niet is meegerekend. De vastgestelde ‘warmtehotspots’ beslaan ‘slechts’ 1,5% van de oppervlakte en zijn daarmee geschikt voor een decentrale infrastructuur van warmtenetten. Toch zijn deze hotspots verantwoordelijk voor ruim een derde van de totale vraag naar

 200
Hotspots
in het Münsterland

verwarming en warm water in het Münsterland. Dit betekent dat technisch en economisch gezien aan een derde van de totale vraag naar warmte CO₂-neutraal kan worden voldaan met warmte afkomstig van biomassa, biogas, zonnewarmte of industriële restwarmte.

Prioriteitszones naar Deens voorbeeld

Denemarken loopt voorop met de uitbreiding van warmtenetten. Dit komt aan de ene kant door de hoge belasting op het gebruik van fossiele brandstoffen. Aan de andere kant houden de Denen bij stadsplanning sterk rekening met milieubescherming en zijn de steden ingedeeld in verschillende prioritaire verwarmingszones, waar de aanleg van en de aansluiting op een warmtenet verplicht is. Dit model met verschillende zones toont specifieke knooppunten, waar een uitbreiding van de warmtenetten met gebruik van duurzame energiebronnen technisch

en economisch zinvol is [zie. „EUREGIO als voorbeeld?“, p. 6].

In Denemarken wordt 63% van de totale vraag naar warmte tegenwoordig al via warmtenetten geleverd, die steeds meer gebruikmaken van duurzame energiebronnen. Het aansluitingspercentage ligt in Kopenhagen al op 98%. En niet alleen in grote steden zijn warmtenetten zinvol, zo blijkt uit vele voorbeelden. Zo wordt de gemeente Vojens, met 7.500 inwoners, van warmte voorzien met 60.000 MWh per jaar blokverwarming afkomstig van blokverwarmingsinstallaties, zonne-energie en power-to-heat-installaties van de plaatselijke exploitant van het warmtenet. In technisch opzicht kan dit systeem ook worden overgenomen in de kleinere plaatsen in het Münsterland en in Nederland.

Naar Deens voorbeeld worden de gebieden hierbij ingedeeld in zones met warmtehotspots, waar de omstandigheden voor een decentrale

warmtevoorziening optimaal zijn. De tool dient hiermee als richtlijn voor betrokken partijen bij de aanleg van een nieuw warmtenet. Deze online tool is voor iedereen beschikbaar via www.wiefm.eu.

Op de kaart zijn alle 65 gemeenten in het Münsterland en de bijna 200 vastgestelde warmtehotspots weergegeven. Geïnteresseerden kunnen inzoomen op een willekeurig gebied en de hotspots en het CO₂-besparingspotentieel bekijken. Bovendien zijn met een klik op de hotspot ook de oppervlakte, het aantal gebouwen en de benodigde hoeveelheid warmte te zien. Dit vormde de basis voor de prioritaire verwarmingszones naar Deens voorbeeld.

De kaart met de hotspots wordt nog aangevuld met de mogelijkheid digitale topografische kaarten en satellietbeelden te tonen en met de mogelijkheid biogasinstallaties in aangrenzende gebieden weer te geven en industriële ondernemin-

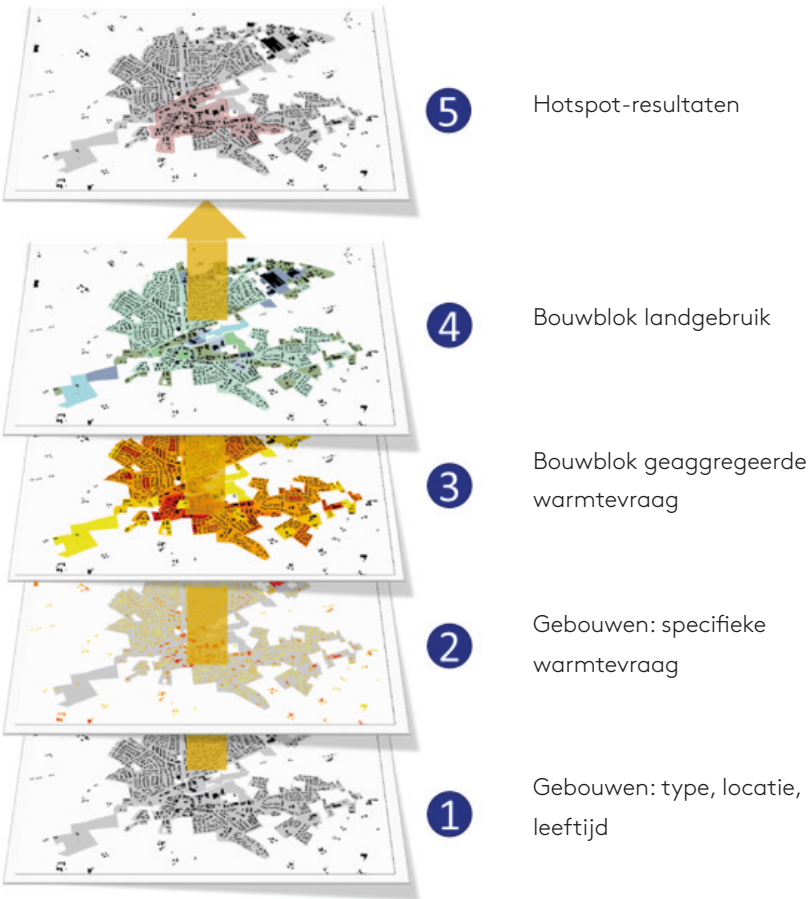


Figuur 1: hotspot in detail

gen die mogelijk restwarmte kunnen leveren. Hiermee worden warmtebronnen en warmtevragers voor het eerst op deze manier samen in beeld gebracht.

Basis voor de weergave

De geografische gegevens van de regio en de gemeenten in Noordrijn-Westfalen vormen de basis voor de resultaten. Deze gegevens zijn sinds begin 2017 beschikbaar als open-source database [4], met informatie over de woongebieden en de gebouwen. Met behulp van speciaal hiervoor ontwikkelde en geprogrammeerde algoritmen in een geografisch informatiesysteem (GIS) zijn de typologie van de gebouwen, de specifieke warmtebehoefte en het grondgebruik onderzocht, met als resultaat een analyse voor de gehele oppervlakte van het Münsterland. Op basis van statistische hypothesen en de bruikbare Oppervlakte is voor elk gebouw in het Münsterland dat



Figuur 2: Methodologie

afhankelijk is van warmte een specifieke warmtebehoefte (verwarming en warm water) per jaar berekend. De totale warmtebehoefte van de individuele gebouwen werd vervolgens weer in blokken geaggregeerd. Om hieruit de warmtehotspots te filteren is de geaggregeerde vraag naar warmte en het gebruik van het blok (zoals 'wonen') met gedefinieerde grenswaarden geanalyseerd. Door gebruik te maken van GIS maakt de tool op de geografische kaart zichtbaar waar synergieën en mogelijkheden aanwezig zijn, waarmee tot dusver niet systematisch rekening werd gehouden.

Analyse van bestaande netten

Bij de evaluatie van de resultaten bleek dat de bestaande netten in het Münsterland precies in de hotspots liggen, wat de betrouwbaarheid van de kaart bevestigt. Verder kon worden vastgesteld dat de afstand tot de dichtstbijzijnde warmtehotspot bij 60% van de ruim 230 biogasinstallaties in het Münsterland (als potentiële warmtebron) maximaal 3km bedraagt, en bij 30% van de installaties slechts maximaal 2km. Omdat over een paar jaar de terugleververgoeding voor de eerste biogasinstallaties vervalt, zijn alternatieve bedrijfsmodellen nodig, evenals flexibilisering en een grootschaliger terugwinning van warmte. De hotspottool helpt de exploitanten van dergelijke installaties bij het maken van beslissingen.

Integratie in de praktijk

Ten opzichte van de bekende warmtekadasters in Duitsland gaat de kaart van het WiEfm-project een stap verder. Deze neemt namelijk ook de warmtedichtheid en het grondgebruik mee in de analyse. De resultaten laten zien waar nu al wordt voldaan aan de voorwaarden om een warmtenet economisch voordelig te exploiteren. De informatiedichtheid is teruggebracht, zodat de daadwerkelijke hotspots centraal staan.

Nu moeten de resultaten nog worden omgezet in de praktijk. De beschikbaarheid van de resultaten in een online en intuïtief GIS levert hieraan een belangrijke bijdrage. In combinatie met het potentieel van restwarmte uit de industrie of afkomstig van bestaande biogasinstallaties kunnen de betrokken partijen plaatselijk snel projecten opzetten die de milieubelasting ter plekke verminderen of bijvoorbeeld zorgen voor toegevoegde waarde op regionaal niveau. Door de inhoudelijke dialoog met het bedrijfsleven en de overheden in de regio voor het project WiEfm is er een nauwe samenwerking met de ontwikkelingsmaatschappijen in het Münsterland en de Nederlandse partners. Samen werken ze aan methodes en instrumenten voor een warmtetransitie in de plattelandsgebieden. De planningstool speelt bij de verdere aanpak een belangrijke rol. De tool wordt aangevuld met de

bevindingen uit het governance-onderzoek (zie [5]).

Situatie in Nederland

In Nederland zijn de omstandigheden voor het uitvoeren van een vergelijkbare analyse van warmtehotspots uitstekend. Er zijn al veel relevante gegevens verwerkt, die ook online in te zien zijn. Handige tools zijn bijvoorbeeld de warmteatlas [6] of de Nationale EnergieAtlas [7].

De gekozen methode voor het selecteren en weergeven van de warmtehotspots kan in principe ook in de rest van Duitsland en in Nederland worden gebruikt, maar dan moeten de geografische gegevens wel up-to-date en vrij toegankelijk zijn. Op basis van deze gegevens en informatie over de bestaande warmtenetten, het potentieel van restwarmte en bijvoorbeeld gegevens over gasnetten kunnen dan goed onderbouwde beslissingen worden genomen in bestemmingsplannen.

**Dipl.-Geogr. Hinnerk Willenbrink,
FH Münster**

Literatuurlijst

- [1] TAFH Münster; infas enermetric GmbH, "Integriertes Wärmenutzungskonzept Gemeinde Neuenkirchen," 2015.
- [2] H. Lund, S. Werner, R. Wiltshire, S. Svendsen, J. E. Thorsen, F. Hvelplund, and B. V. Mathiesen, "4th Generation District Heating (4GDH). Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems," *Energy*, vol. 68, pp. 1–11, 2014.
- [3] H. Lund, B. Möller, B. V. Mathiesen, and A. Dyrelund, "The role of district heating in future renewable energy systems," *Energy*, vol. 35, no. 3, pp. 1381–1390, Mar. 2010.
- [4] Geobasis NRW, "Opengedata.NRW," 2017. [Online]. Available: <https://www.opengedata.nrw.de/produkte/>.
- [5] Steffen Nielsen, Bjarne Lykkemark (2014): Fjernvarmeanalyse i Region Midtjylland, online unter: <https://www.rm.dk/siteassets/regional-udvikling/ru/publikationer/energi/fjernvarmeanalyse-afgraensning.pdf>
- [6] <http://rvo.b3p.nl/viewer/app/Warmteatlas/v2>
- [7] <http://www.nationaleenergieatlas.nl>

Warmtenetbenchmark

Kwalitatieve vergelijking van bestaande warmtenetten

Planologen en gemeenten – met name in de plattelandsgebieden – hebben vaak nog geen ervaring met de succesvolle realisatie van warmtenetten, waardoor ze vaak nog huiverig zijn voor de aanleg ervan. Maar in het Münsterland zijn toch al een paar warmtenetten. De vraag is dus hoe deze netten worden geëxploiteerd. Hoe efficiënt zijn ze eigenlijk? In hoeverre kunnen ze warmteverlies beperken en welke lessen kunnen hieruit worden getrokken voor nieuwe projecten? Om deze vragen te kunnen beantwoorden is in het kader van WiEfm het masteronderzoek 'Wärmenetzbenchmark – qualitativer Vergleich bestehender Wärmenetze' (warmtenetbenchmark – kwalitatieve vergelijking van bestaande warmtenetten) uitgevoerd, waarvan de resultaten hier worden samengevat.

Om de energie-efficiëntie en de gevolgen voor het milieu van blok- en stadsverwarming te kunnen beoordelen, zijn twaalf warmtenetten in het Münsterland in detail onderzocht, geanalyseerd en met elkaar vergeleken. In samenwerking met de exploitanten werden hiervoor gegevens gebruikt waaruit vergelijkbare en breed toepasbare waarden volgen. Die worden ingedeeld in twee categorieën. Enerzijds worden waarden gevormd die het technische systeem zelf beschrijven, zoals de efficiëntie van het systeem, systeemverliezen, aansluitdichtheid, netwerkverliezen en temperatuurspreiding. Anderzijds volgen uit „Primärenergiefaktoren“ (inzet van primaire energie in relatie tot finale energie volgens de Duitse methodologie) en emissiefactoren weer waarden die verder gaan dan het technische systeem zelf en ook rekening houden met de eerdere schakels in de toeleveringsketen van energiedragers. Aan de hand van deze factoren worden de netten met elkaar vergeleken en met een conventionele verwarming.

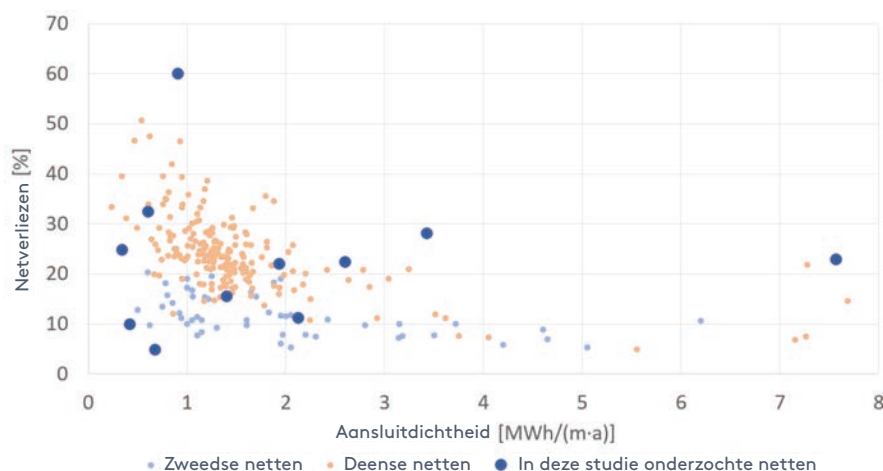
Als het gaat om warmteverlies in het net en de aansluitdichtheid zijn er grote verschillen tussen de

onderzochte netten (figuur 1). Met uitzondering van twee netten hebben ze allemaal een netwerkverlies tot 32% en een aansluitdichtheid tot 3,4 MWh/(m·a) (figuur 1). Voor warmtenetten in Denemarken en Zwitserland zijn de resultaten vergelijkbaar. In die landen hebben de meeste netten een aansluitdichtheid tussen de 0,8 en 1,8 MWh/(m·a) en een netwerkverlies tussen de 10 en 30%.

Uit de vergelijking van de Primärenergiefactor en de systeemefficiëntie (figuur 2) blijkt dat vooral de gebruikte brandstof bepalend is

voor de Primärenergiefactor. Hoewel de efficiëntie van het systeem wel invloed heeft op de berekening telt die duidelijk minder zwaar mee dan de gebruikte brandstof. Vooral warmtenetten die warmte uit duurzame energiebronnen halen, hebben een lagere Primärenergiefactor. Ongeacht de keuze van de brandstof zijn er grote verschillen in de systeemefficiëntie van de netten.

Voor de onderzochte netten is een benchmark ontwikkeld waarin elke waarde wordt vergeleken met een referentiewaarde en een cijfer krijgt voor de afwijking van de benchmark.



Figuur 1: Aansluitdichtheden en netwerkverliezen van de onderzochte warmtenetten en Zwitserse en Deense netten in vergelijkbare onderzoeken

De waarden van het systeem volgen uit de beste waarde van de onderzochte warmtenetten in de betreffende categorie, terwijl de Primärenergiefactoren en de emissiefactoren worden vergeleken met de waarden van conventionele individuele verwarmingssystemen op aardgas. Deze benchmark biedt goede voorbeelden voor de systeemefficiëntie en de primaire energie-efficiëntie. Er is ten slotte nog maar één warmtenet dat voor beide categorieën goede waarden laat zien. Voor alle netten geldt dat er nog ruimte voor verbetering is. De exploitanten hebben daarom aanbevelingen gekregen om de efficiëntie van hun systemen te verbeteren en de Primärenergiefactoren en de emissiefactoren te verlagen.

De resultaten van dit onderzoek bevestigen dat warmtenetten kunnen bijdragen aan een milieuvriendelijke warmtevoorziening. Het is haalbaar om de factoren voor de primaire energie en emissie zo te verlagen, dat ze ver onder die van conventionele alternatieven liggen. Als er restwarmte of duurzame energiebronnen beschikbaar zijn die niet afzonderlijk kunnen worden gebruikt, dan kan met het oog op

deze factoren ook worden gekozen voor blokverwarming. Hoewel blijkt dat warmtenetten zelfs bij een lage aansluitdichtheid in plattelandsgebieden ecologisch zinvol en efficiënt kunnen worden geëxploiteerd, toont het onderzoek echter ook aan dat ze niet per se efficiënter of milieuvriendelijker zijn dan conventionele systemen. Het is daarom belangrijk bij de aanleg en de exploitatie van een warmtenet alle waarden voor de efficiëntie op elkaar af te stemmen, te optimaliseren en gebruik te maken van duurzame energiebronnen, waarbij in alle schakels van de toeleveringsketen zo weinig mogelijk fossiele brandstoffen worden gebruikt.

De belangrijkste bevindingen:

1. Warmtenetten kunnen zeer efficiënt en milieuvriendelijk zijn, maar dat zijn ze niet altijd.

Een echt milieuvriendelijk en efficiënt warmtenet moet goed zijn afgestemd op de specifieke situatie, worden geëxploiteerd door gekwalificeerd personeel dat het net non-stop en met veel betrokkenheid onderhoudt en optimaliseert. Ook moeten hierbij lokale duurzame energiebronnen worden gebruikt. Een traditioneel net op basis van aardgasinstallaties levert geen betere waarden op dan individuele verwarmingen.

2. Voor een efficiënt warmtesysteem is het noodzakelijk de energiestromen systematisch te meten en te documenteren.

De mogelijkheden voor besparingen en optimalisering zijn vast te stellen door de hoeveelheden brandstof, elektriciteit en warmte te meten. De netexploitanten die deze gegevens nog niet verwerken en documenteren wordt aanbevolen dit wel te gaan doen.

3. De Primärenergiefactor wordt in de eerste plaats bepaald door de gebruikte energiebron en minder door de technologie en efficiëntie.

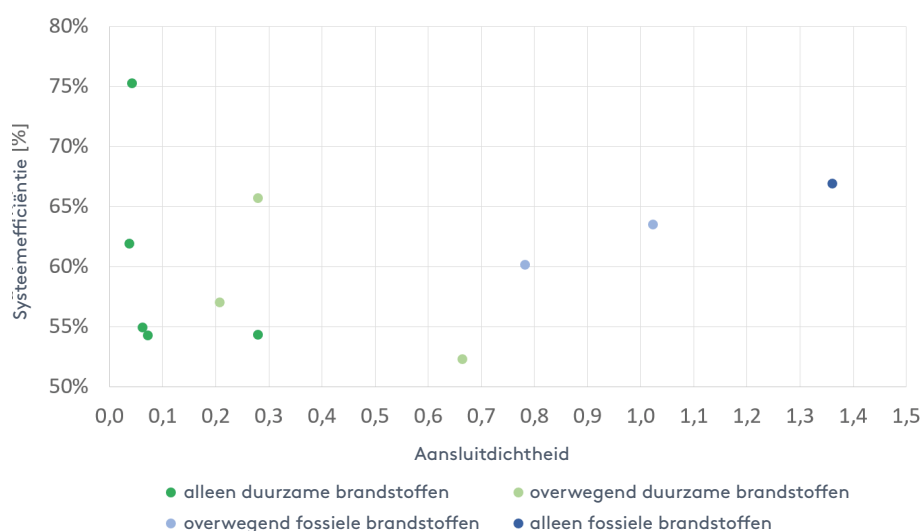
In ecologisch opzicht is warmteopwekking uit fossiele brandstoffen dus niet wenselijk. De keuze voor de brandstof is in dit verband belangrijker dan de effectiviteit van het systeem.

4. Ook in omgevingen met een zeer lage aansluitdichtheid kunnen warmtenetten ecologisch zinvol en efficiënt worden geëxploiteerd.

De heersende gedachte dat warmtenetten alleen in stedelijke gebieden de moeite waard zijn, kan dus niet zomaar worden bevestigd: Het warmtenet dat in dit onderzoek de beste systeemefficiëntie en de beste Primärenergiefactoren heeft, heeft tegelijkertijd ook een van de laagste aansluitdichtheden. Hieruit blijkt dat een efficiënte en milieuvriendelijke exploitatie van warmtenetten ook in plattelandsgebieden mogelijk en zinvol is.

5. Met het oog op de energietransitie zijn warmtenetten een goede optie op plekken waar restwarmte en duurzame energiebronnen beschikbaar zijn die niet afzonderlijk gebruikt kunnen worden.

Restwarmte van biogasinstallaties, industriële restwarmte of grootschalige zonne-energie zijn warmtebronnen die in een warmtenet kunnen zorgen voor een hogere systeemefficiëntie en een lagere Primärenergiefactor dan fossiele alternatieven.



Figuur 2: Primärenergiefactoren en systeemefficiëntie van de onderzochte warmtenetten

Klaus Russell-Wells M.Eng.,
FH Münster

Vergelijking van prestatie warmtenetten in Oost Nederland

Warmtenetten worden veel toegepast om wijken duurzaam te verwarmen. Maar hoe duurzaam zijn deze warmtenetten, hoe kun je de prestatie van een warmtenet bepalen en wat zijn de mogelijkheden om de duurzaamheid van netwerken te verbeteren? Dit is binnen WIEfm onderzocht met behulp van een aantal praktijk cases in Oost Nederland [1]. Dit artikel is gebaseerd op dit onderzoek.

De prestaties van de warmtenetten worden uitgedrukt in energieprestatie- en CO₂ kentallen. De energiestromen zijn in kaart gebracht met behulp van Sankey diagrammen. Deze diagrammen geven inzicht in de energiestromen. De netwerken worden onderling vergeleken en er wordt een aantal conclusies getrokken ten aanzien van de duurzaamheid.

Methodiek

Figuur 1 is een schematische weergave van een warmtedistributiesys-

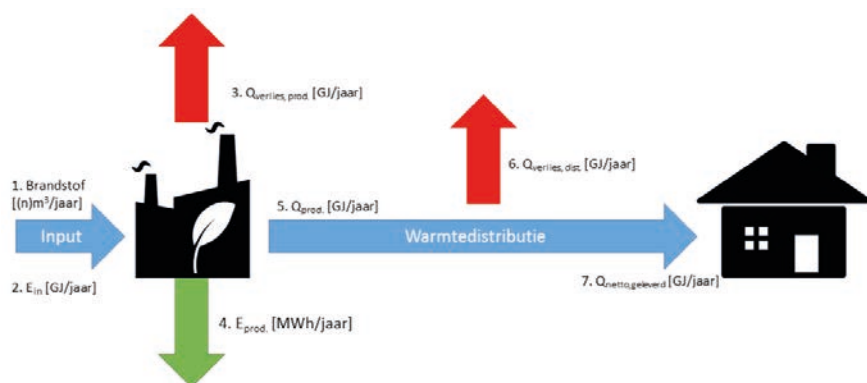
teem. Warmte-input voor een distributiesysteem wordt geleverd door een warmtecentrale. Deze centrale wordt weer aangedreven door een energiebron (1 en 2 in het plaatje). Dit kan bijvoorbeeld een fossiele brandstof zijn, het kan ook een duurzame brandstof zijn, zoals biomassa of een warmtepomp aangedreven door wind of zonne energie. Als er sprake is van een warmtekracht systeem, dan kan er elektriciteit worden geproduceerd (stroom 4). Tijdens dit proces worden er 2 verliesstromen gedefinieerd: het productieverlies

tijdens de warmteproductie (stroom 3) en het distributieverlies (stroom 6). Uiteindelijk wordt er een netto stroom bij de warmtevragers afgeleverd (stroom 7).

De verschillende warmtenetten zijn geanalyseerd volgens het basis schema in figuur 1. Om de diverse prestaties van netten met elkaar te kunnen vergelijken, is een tweetal kentallen berekend. Deze geven de duurzaamheid weer van het warmtenet.

De eerste index is de Primary Energy Ratio (PER), die gedefinieerd is als de geleverde warmte, gedeeld door de totale energie input aan primaire fossiele energie, benodigd om die warmte te leveren. Als er sprake is van elektriciteitsproductie, dan wordt deze elektriciteit omgerekend naar primaire energie en van de input aan primaire energie afgetrokken.

$$PER = \frac{Q_{\text{netto,geleverd}}}{B_{\text{primaire fossiel}} - \frac{E_{\text{prod}}}{\eta_{\text{el}}}} [-]$$



Figuur 1: Overzicht van de warmtedistributie in een warmtenet uit [1]

In de optimale situatie wordt er geen fossiele energie wordt gebruikt, de PER is in dat geval oneindig.

De tweede index is de hoeveelheid CO₂ die het systeem uitstoot gedeeld door de CO₂ uitstoot in de referentiesituatie, voor zowel warmte (Q) als elektriciteit (E). In Nederland is de referentiesituatie de situatie waarbij verwarmd wordt met behulp van individuele HR107-gasketels, en gescheiden elektriciteitsopwekking plaats vindt in een elektriciteit centrale.

$$CO_2index = \frac{CO_{2\text{ for } Q\&E}}{CO_{2\text{ for } Q\&E}^{ref}} [-]$$

Hierbij ligt het optimum zo dicht mogelijk bij het getal 0.

Beschrijving van de warmtenetten

Er zijn 4 wijken met warmtenetten geanalyseerd. De gegevens van deze wijken zijn geanonimiseerd. In Tabel 1 is een overzicht van de wijken opgenomen en zijn de kenmerkende eigenschappen van de wijken en de energie producerende units weergegeven. Deze wijken worden achtereenvolgens behandeld.

Netwerk 1, biogas WKK en houtsnipperketel

Deze wijk betreft een nieuwbouwwijk met woningen die zijn gebouwd tussen 2000 en 2014. Het warmtenet maakt gebruik van drie warmtebronnen. De primaire warmtebron die het net voedt is een biogas-WKK,

hier wordt biogas, afkomstig van de rioolzuivering, verstoekt om elektriciteit op te wekken dat weer gebruikt wordt door de rioolwaterzuivering. Als er elektriciteit over is, wordt dit teruggeleverd aan het elektriciteitsnet. De geproduceerde elektriciteit (zowel intern gebruikt als teruggeleverd aan het net) is bij dit onderzoek niet bekend en wordt daarom niet meegenomen in deze analyse.

Bij de rioolwaterzuivering is het restproduct slib, dit slib wordt vergist en daarbij komt het biogas vrij dat verstoekt wordt in de WKK. Dit is dus een gesloten kring. Naast elektriciteit wordt er ook warmte geproduceerd in de WKK, deze warmte wordt afgevoerd naar het warmtenet. Naast de biogas-WKK zijn er ook twee houtsnipperketels. Voor piekmomenten en als back-upvoorziening zijn er ook nog twee aardgasketels, deze zorgen ervoor dat er een stabiele warmtelevering gegarandeerd kan worden. Om de verschillen tussen warmteproductie en warmtevraag op te kunnen vangen zijn er ook twee warmtebuffers in het systeem opgenomen, die ook helpen om de piekvraag op te vangen. Naast ruimteverwarming wordt het warmtenet ook gebruikt om het tapwater van de aangesloten gebouwen te verwarmen, daarom is de aanvoertemperatuur relatief hoog, 70°C.

Netwerk 2, warmtepomp

Deze nieuwbouwwijk bestaat uit woningen gebouwd tussen 2002-2016. Om de huizen, kantoren en scholen te verwarmen wordt er warmte onttrokken aan drinkwater. Het water wordt op een diepte van 150 meter uit de grond gehaald, het heeft op dat moment een temperatuur van ongeveer 12°C. Met een opvoerpomp vanuit een drinkwaterbasin, wordt een deelstroom door een warmtewisselaar geleid, die is gekoppeld aan een warmtepomp die het drinkwater in het drinkwaterbasin maximaal afkoelt tot 10°C. De onttrokken warmte wordt gebruikt voor het opwarmen van het verwarmingswater. Deze warmtepomp levert hiermee ca 87% van de totale warmtebehoefte van de aangesloten huizen en zakelijke afnemers. De geproduceerde warmte wordt opgeslagen in een buffervat van 50 m3, voor een efficiënter gebruik van de warmtepomp. Er zijn twee gasketels voor de piekmomenten in de winter, deze leveren ongeveer 13% van de jaarlijkse warmtebehoefte. De aanvoertemperatuur varieert gedurende de dag en het jaar en volgt de stooklijn. De aanvoer temperatuur is maximaal 50°C, en daarmee uitsluitend geschikt voor lage temperatuur verwarming. Dit betekent dat het water niet geschikt is voor het verwarmen van tapwater. Hiervoor hebben de huishoudens allemaal een eigen systeem, variërend van een HR-ketel tot booster-warmtepompen.

Netwerk 3, WKK fossiel gas

Deze nieuwbouwwijk wordt verwarmd door een WKK, gestookt op aardgas. De installatie beschikt over buffervaten en voor het piekverbruik, in de winter, zijn er 2 gasketels beschikbaar. De aanvoertempera-

Tabel 1: overzicht van de geanalyseerde netwerken

Netwerk	Installatie	Aantal aansluitingen	Bouwjaar
Netwerk 1	Biogas WKK, houtsnipperketels, gasketels	1700 woningen en utiliteitsgebouwen (groeit naar 2300-2500 woningen)	2000-2016
Netwerk 2	Warmtepomp en gasketels	200 woningen en utiliteitsgebouwen	2002-2016
Netwerk 3	WKK en gasketels	1300 woningen en utiliteitsgebouwen	2005-2007
Netwerk 4	Houtsnipperketels en gasketels	300 woningen	2011-2015

tuur van het water is tussen de 70 en 80°C. Het warmtenet verwarmt de woningen en het tapwater in de woningen. Als het water de huizen heeft verwarmd is de retourtemperatuur ongeveer 55°C.

Netwerk 4, houtsnipperketel

Ook dit betreft een nieuwbouwwijk. Er wordt verwarmd met een houtsnipperketel die 88% van de warmte levert. De piekmomenten worden opgevangen door twee gasketels. Ook is er een buffervat dat vooral tijdens de ochtendpiek de wijk van warmte voorziet. De houtsnippers hebben een vochtpercentage van ongeveer 40% en zijn afkomstig van het snoeihout uit de omgeving. De aanvoertemperatuur van het warmtenet is 70°C, de retourtemperatuur 50°C.

Analyse

De energiestromen in de netwerken zijn geanalyseerd en uitgezet in Sankeydiagrammen. Een overzicht van de energieproductie en duurzaamheidskentallen van de netwerken is te zien in tabel 2. De percentages in de tabel geven de dekkinggraad weer van de betreffende energiebron. Als de cel in de tabel leeg is, dan is er in het netwerk geen warmteproductie met de betreffende bron.

Primary Energy Ratio (PER) en CO₂ index

Hoe hoger de PER ratio is, hoe gunstiger voor de duurzaamheid. Daarnaast is het gewenst dat de CO₂ index zo laag mogelijk is. Voor het referentiesysteem (HR ketels) ligt zowel de PER als de CO₂ index rond de 1. Het blijkt dat alle wijken in meer of mindere mate gunstiger scoren dan de referentiesituatie. Het meest duurzame netwerk is netwerk 4, waarbij warmte geproduceerd wordt met een houtsnipperketel. In deze situatie is het aandeel duurzame energie zeer hoog (bijna 90%). Het netwerk gebruikt circa een factor 5 minder aan fossiele energie dan het referentiesysteem, en de uitstoot van CO₂ ligt als gevolg daarvan ook op circa een factor 5 lager. In figuur 2 is het Sankey diagram weergegeven van netwerk 4. Bij netwerk 1 bedraagt het aandeel duurzame energie, bestaande uit biogas en hout, 76 %. Het netwerk scoort met een PER van 2.5 ook ruim boven het referentiesysteem. Indien het mogelijk zou zijn de dekkinggraad van de duurzame bron te verhogen tot het percentage van 88 % van netwerk 4, zou dit theoretisch resulteren in een PER van circa 5, vergelijkbaar met netwerk 4. De netwerken 2 en 3 zijn qua duurzaamheid vergelijkbaar met het referentiesysteem. Netwerk 3 wordt gevoed

door een WKK installatie op gas (fossiele brandstof). Doordat er sprake is van gecombineerde opwekking van elektriciteit en warmte, is deze situatie toch iets gunstiger dan gescheiden opwekking. Het gunstige effect van gecombineerde opwekking, wordt deels teniet gedaan door het relatieve hoge netverlies van 27 %. Indien het mogelijk is zowel de WKK als de gasketels te stoken op biogas, zal de duurzaamheid van dit netwerk zeer hoog zijn. De warmte in netwerk 2 wordt voor 87 % geleverd door een warmtepomp. Toch scoort dit netwerk qua duurzaamheid slechts iets beter dan het referentiesysteem. Dit wordt deels veroorzaakt door een relatief lage COP van de warmtepomp (gemiddelde COP=3.57). Deze relatief lage COP wordt grotendeels veroorzaakt door het relatief hoge temperatuurverschil waarover de warmtepomp werkzaam is. Dit temperatuurverschil tussen de verdamper en de condensor van de warmtepomp bedraagt, afhankelijk van de stooklijn, maximaal 43 °C. Een andere oorzaak van de tegenvallende duurzaamheid is dat er een mismatch is tussen de capaciteit van de warmtepomp en de capaciteit van de warmtewisselaar en de omliggende pompen. Ook ongunstig is, dat

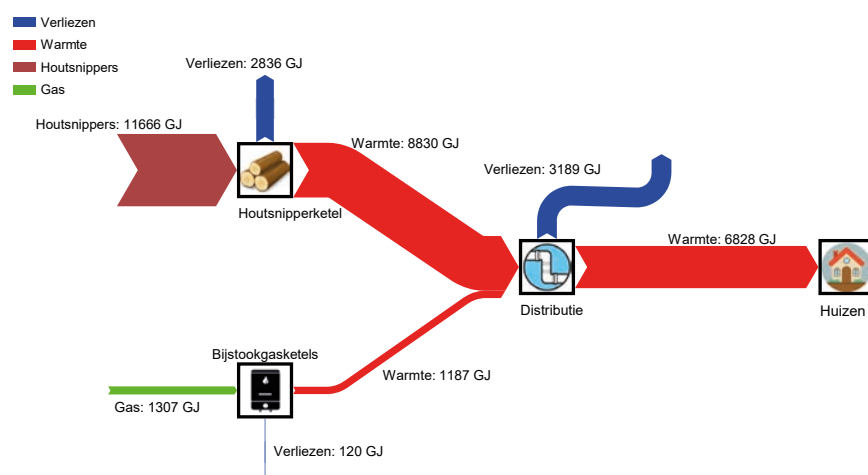
Tabel 2: overzicht energiestromen en kentallen van netwerken

	Netwerk 1	Netwerk 2	Netwerk 3	Netwerk 4	Referentiesituatie (HR ketels)
Productie warmte duurzame bron (hout/biogas)	67260 GJ/a (76%)			8753 GJ/a (88%)	
Productie warmte warmtepomp (electriciteit uit net)		8589 GJ/a (87%)			
Productie warmte energie uit fossiele bron (gas met gasketel en/of WKK)	21600 GJ/a (24%)	1277 GJ/a (13%)	73512 GJ/a (100%)	1177 GJ/a (12%)	100 %
CO ₂ -index [-]	0,39	1,0	0,84	0,18	1,0
PER [-]	2,5	1,1	1,1	5,2	0,96
Netverlies [%]	35 %*	10 %	27 %	33 %	

* in 2016, zal dalen door groei warmtelevering

de elektriciteit die de warmtepomp aandrijft, geleverd wordt door het elektriciteitsnet. Als alle elektriciteit 100% duurzaam zou worden opgewekt dan is een PER van 6.5 en een CO₂ index van 0.15 theoretisch mogelijk. Netwerk 2 zou dan direct zeer duurzaam zijn.

zal de verliezen zeker verlagen. De netverliezen nemen procentueel af, als het netwerk warmte levert aan meer warmtegebruikers. In het geval van netwerk 1 wordt de komende jaren een groei voorzien en zal het netverlies procentueel dus afnemen.



Figuur 2: Sankey diagram netwerk 4 uit [1]

Netverlies

De netverliezen in de bestudeerde systemen liggen rond de 25 à 35 procent. De netwerken waar dit hoge verlies optreedt zijn ook precies de netten met een hoge toevoer en afvoer temperatuur (70-90 oC). Het netwerk waar het netverlies 10 % bedraagt, is tevens ook het netwerk waar een relatief lage temperatuur heerst, van maximaal 52 oC. De temperatuur van het net bepaalt in grote mate het netverlies, daarnaast kunnen er andere oorzaken zijn zoals leidingen die niet optimaal geïsoleerd zijn of leidingen die dicht aan het oppervlak liggen, waardoor ze sterker worden beïnvloed door de buitentemperatuur. Ook de lengte van leidingnetwerken speelt hierbij een rol. Een lagere nettemperatuur

Naast de duurzaamheid van de netten voor de duurzaamheid van verwarming in een wijk, is ook het type bouw nog van belang. Hoe dichter de woningen op elkaar zijn gebouwd, hoe korter de leidingen kunnen te zijn, hoe lager de leiding verliezen. Ook woningen die aan/op elkaar worden gebouwd zijn voordeliger doordat er minder buitenmuren zijn. Het zo laag mogelijk houden van de warmtevraag is de eerste stap naar duurzaamheid.

Conclusie

De volgende aandachtspunten zijn van belang voor een duurzame warmtevoorziening. De genoemde punten staan in willekeurige volgorde.

- Het is belangrijk te kijken naar de mogelijkheden van de omgeving.

Als er bijvoorbeeld restwarmte beschikbaar is, is het een duurzame oplossing om deze energiebron in te zetten (indien mogelijk).

- Het is aan te bevelen zo veel mogelijk duurzame brandstoffen te gebruiken. Dit is weer afhankelijk van de mogelijkheden in de omgeving.
- Het is raadzaam de dekkingsgraad van de duurzame installatie zo hoog mogelijk te maken, zodat de bijstook van fossiele brandstoffen zo laag mogelijk is.
- De temperatuur van het verwarmingswater is van grote invloed op de leidingverliezen. Een lagere temperatuur zorgt voor lagere leidingverliezen. Hierbij moet wel bedacht worden dat lage temperatuur verwarmingswater niet geschikt is om tapwater te verwarmen. Er zal een oplossing gezocht moeten worden om het tapwater dan wel op een duurzame manier te verwarmen.

In dit onderzoek is gebleken dat het netwerk waarbij een collectief warmtenet aanwezig is, gestookt met een houtsnipperketel, het best scoort op duurzaamheid. In dit warmtenet is de dekkingsgraad van de houtsnipperketel hoog, waardoor er weinig gebruik wordt gemaakt van de bijstookgasketels. Het is echter niet mogelijk om deze installatie in elk bebouwd gebied te plaatsen. Soms kan het vergunningstechnisch niet, of zijn de vervoersbewegingen voor de aanvoer van hout te hoog voor een betreffende wijk.

Thomas Hordijk,
 Marieke Janssen,
 Nick Kuipers,
 Ir. Sandra I. Wijnant-Timmerman,
 Saxion Hogeschool

Warmtetransitie model voor duurzame energievoorziening van woonwijken

Binnen het project WIEfm is een model ontwikkeld waarmee systeemopties voor duurzame energievoorziening van woonwijken kunnen worden doorgerekend. Het model gaat uit van maximale zelfconsumptie van lokaal opgewekte, duurzame energie door de woningen en minimaal gebruik van het elektriciteits- of aardgasnet. Het model bevat energie stuuralgoritmen voor de prioritering van lokale energieopwekking en energieopslag en is toegepast binnen een casus waarin vier duurzame energiesysteem concepten worden vergeleken met een referentie energiesysteem. Met het model worden optimale capaciteiten bepaald met minimum operationele kosten als criterium inclusief een toeslag voor CO₂-productie. Verder wordt de aantrekkelijkheid van deze concepten besproken in relatie tot kosten, milieubelasting en toepasbaarheid binnen de context van de Nederlandse energietransitie.

Voor de gebouwde omgeving is de warmtetransitie binnen de energietransitie een dominerend en complex vraagstuk. Om in de warmtevraag op een duurzame manier te voorzien worden binnen WIEfm duurzame routes onderzocht, b.v. warmtepompen of duurzame warmtenetten. Doordat de meeste gebouwen in Nederland met aardgas worden verwarmd, zijn er nog relatief weinig duurzame warmtenetten of mogelijkheden om nieuwe wijken aan te sluiten op bestaande warmtenetten. Er zijn daarom kansen voor nieuwe concepten en voor kleinschalige, lokale warmtenetten. De uitdaging voor zulke concepten, tevens het doel van dit onderzoek, is 100% integratie van duurzame energie zodanig dat vraag en aanbod naar energie op elk moment in balans zijn binnen

een positieve business case. De probleemstelling van dit onderzoek luidt: hoe kan een warmtetransitie model worden ontwikkeld dat inzicht geeft in de integratie van duurzame energie, de momentane balans van vraag en aanbod en de business case? Daarnaast: wat zijn de resultaten met dit model voor de toepassing binnen een casus?

De casus betreft de nieuwbouwwijk Nieuwveenslanden in Meppel [1], maar de resultaten zijn relevant voor veel bestaande en nieuwe woonwijken in Nederland, met of zonder collectieve warmtevoorziening.

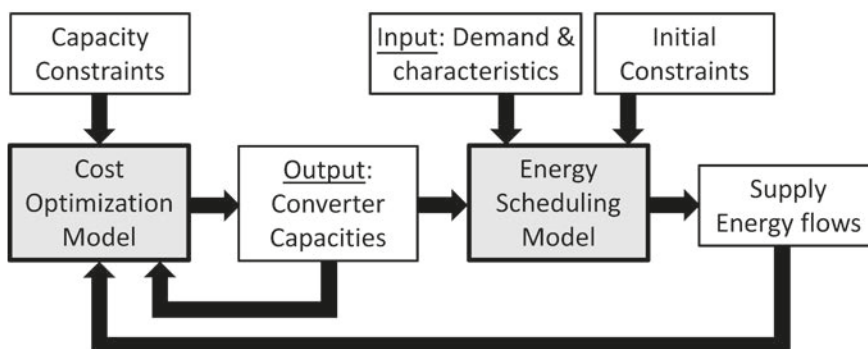
Warmtetransitie model

Gezocht is naar een model waarmee de verduurzaming van Nederlandse woonwijken in relatie tot balance-

ring van lokale netwerken onderzocht kan worden. Wij stellen de volgende criteria aan het model: (1) toegankelijk zonder kosten, liefst open source, (2) aanpasbare wijze van prioritering van opwekkers en opslag (elektrische en thermisch), (3) eenvoudige definitie van inputs (productie- en verbruiksprofielen) en (4) eenvoudige schaalbaarheid (van woning naar wijk tot gebiedsniveau). De toolkit “energietransitie rekenmodellen” [2] geeft een overzicht van de beschikbare Nederlandse modellen. Een belangrijk deel van deze modellen kon niet worden onderzocht omdat zij niet zonder kosten toegankelijk zijn. Het Energie Transitie Model (ETM) voldoet aan een aantal voorwaarden, dat dit model geschikt maakt voor globale gebiedsstudies. Echter, om de prioritering van

opwekkers en opslag aan te passen is een aanpassing van ETM nodig. Daarnaast bevat het overzicht [2] een aantal tools om energieverbruiksprofielen te berekenen. Er is echter voor gekozen om dergelijke profielen zelf op te stellen op basis van bekende wiskundige vergelijkingen en modelparameters verkregen vanuit de casus. Naast de Nederlandse modellen is het model “energyPLAN” [3] het vermelden waard. Deze tool is ontwikkeld door de Universiteit van Aalborg en voldoet aan de meeste van bovengenoemde criteria, met uitzondering van het kunnen aanpassen van de prioriteringsregels. Idealiter zou men de prioritering door een intelligente optimalisatie zelf laten bepalen. Het is echter ook mogelijk om hiervoor zelf de prioriteringslogica te ontwikkelen, wat aanzienlijk eenvoudiger en sneller is qua rekentijden. Voor dat laatste hebben wij gekozen door zelf een model in Excel te ontwikkelen. In een later stadium kunnen de resultaten worden vergeleken met de uitkomsten van b.v. energyPLAN en ETM.

De opbouw van het model is weergegeven in Figuur 1. De prioritering is opgenomen in het blok “Energy Scheduling Model”. Hiervoor zijn de volgende inputs noodzakelijk: energie verbruiksprofielen (warmte, elektrische en koudevraag), productieprofielen van schaalbare, duurzame opwekkers en niet-duurzame opwekkers (indien geconfigureerd). De schaalfactoren zijn afkomstig van een optimaliseringsmodel “Cost Optimization Model” dat de jaarkosten van het energiesysteem minimaliseert. Door bepaalde kosten (b.v. CO₂) een vermenigvuldigingsfactor te geven, kan het doel van de optima-

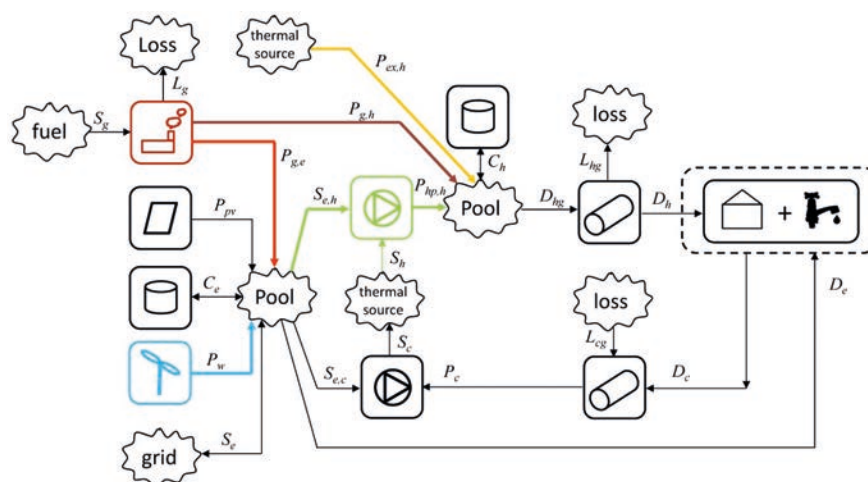


Figuur 1: Modelopbouw

lisatie worden beïnvloed. Dit model bevat de kosten per eenheid (CAPEX en OPEX) van alle in het model opgenomen opwekkers en opslag methoden. Aan de onderzijde van Figuur 1 zijn iteratielussen te zien. Deze zijn nodig om tot het optimum voor een geconfigureerd energiesysteem te komen.

Voor een meer gedetailleerde bespreking van het model alsmede de prioriteringsalgoritmen zie de publicatie [4] en thesis als resultaat van promotieonderzoek [5]. Het model is uitgewerkt in Excel en omvat verschillende tabbladen voor de systeemconfiguratie, kostenparameters, energie verbruiksprofielen, duurzame

me energie productieprofielen, prioriteringsalgoritmen en resultaten (data en grafieken). Het energiemodel dat is gebruikt voor de prioritering is weergegeven in Figuur 2. Dit toont links de energieproductie (P=productie), in het midden de omzetting, distributie en opslag van energie en rechts het energieverbruik (D=verbruik, h=warmte, e=elektriciteit, c=koeling). Voor een gedetailleerde uitleg van dit schema wordt verwezen naar de publicatie [4].



Figuur 2: Energiemodel

Casus Meppel

De nieuwbouwwijk Nieuwveenselanden in Meppel is begin 2017 gegroeid tot 200 woningen. In de wijk is een collectief warmte- en koudenet aangelegd. Belangrijkste reden hiervoor is de wens om lokaal beschikbare bronnen te gebruiken voor warmte (biogas WKK en/of houtsnipperketel en/of warmtepompen per woning) en koeling (ondergronds aquifer), waarvoor een collectief systeem geschikter bleek dan individuele systemen per woning. De bebouwingsdichtheid en specifieke warmte- en koelvraag bleken voldoende hoog om de investering in een collectief systeem economisch te rechtvaardigen. Vanwege de bouwcrisis die in 2016 tot een einde kwam en die zorgde voor een trager bouwtempo dan voorzien, is een tijdelijk energiesysteem geïnstalleerd bestaande uit aardgasketels en elektrische compressiekoeling (het referentieconcept). Daarnaast kwam het oorspronkelijke energieconcept onder druk te staan doordat de beschikbaarheid van biogas wegviel en de (grotere) woningen met een warmtepomp niet werden verkocht. Voor het tijdelijke energiesysteem wordt dus een economisch haalbaar, duurzaam alternatief gezocht.

Voor het samenstellen van concepten is een belangrijk uitgangspunt dat zowel de thermische vraag als de elektrische vraag van de woningen zo goed mogelijk op alle momenten in de tijd, van duurzame energie worden voorzien. Dit uitgangspunt van een "hybride" energiesysteem gaat een stap verder dan vergelijkbare projecten waarbij het ofwel om alleen de thermische vraag ofwel om alleen de elektrische vraag gaat. Daarnaast bieden veel "all-electric"



Figuur 3: Plattegrond van de nieuwbouwwijk Meppel Nieuwveenselanden

projecten met zonPV of windenergie en warmtepompen op dit moment nog geen oplossing voor de onbalans tussen enerzijds de opwekking (in de zomer veel zonPV-energie) en anderzijds de vraag (in de winter veel thermische en dus ook elektrische vraag via de warmtepompen). Interessant binnen dit onderzoek is juist om de complementaire voorziening en de functie van thermische en elektrische opslag te onderzoeken, alsmede de capaciteiten en de invloed op de business case.

De volgende vier duurzame energieconcepten worden onderzocht:

1. Bio-warmte: houtketel, zonPV, wind energie, thermische en elektrische energieopslag, natuurlijke koelbron (zandwinningsmeer).
2. All-electric: zonPV, wind energie, warmtepomp, aquifer WKO, elektrische energieopslag.
3. Gemengd: biogas WKK, zonPV, wind energie, warmtepomp, aquifer WKO, thermische en elektrische energieopslag.
4. Bijna-energie autonoom: zelfde als concept 3, verder doorgevoerd richting autarke energievoorziening op gebiedsniveau.

Resultaten

Achtereenvolgens worden de capaciteiten besproken (vermogens van opwekkers en energie opslagcapaciteiten) die door het model via optimalisatie zijn verkregen, vervolgens de totale, jaarlijkse energiestromen en de kwaliteit van de momentane energiebalans. Als laatste wordt de business case van de energiesystemen vergeleken.

In Tabel 1 zijn de capaciteiten weergegeven, achtereenvolgens van het referentiesysteem en de duurzame systeemconcepten. De kolom “External heat” betreft in alle gevallen een aardgasketel. Voor het referentiesysteem is dit de enige warmte-opwekker, voor de duurzame concepten is dit alleen nodig in geval van piek warmtevraag. De kolom “Biofuel boiler/CHP thermal” moet geïnterpreteerd worden als ofwel de warmte van een biogasketel, ofwel de warmte van een biogas WKK, dus niet beiden. In geval van een WKK heeft de kolom “CHP electric” ook een waarde. In de kolom “Thermal storage” is de opslagcapaciteit van een warm waterbuffer in kWh uitgedrukt, idem in de kolom “Electrical storage”. In de kolom “Objective function” is het resultaat voor de jaarlijkse kosten weergegeven, dit is tevens het doel van de wiskundige minimalisatie. Binnen dit doel gaat het om de CAPEX en OPEX van de opwekkers en opslagsystemen, alsmede de energielasten tegen actuele handelsprijzen. Daarnaast zijn relatief hoge CO₂ kosten van 60 €/ton meegenomen, omdat anders in alle gevallen de referentie als optimum wordt gevonden. Deze prijs voor CO₂ is aanzienlijk hoger dan de huidige handelsprijs, maar is omgerekend nog wel lager dan de huidige energiebelasting op aardgas voor consumenten in Nederland.

De getallen in Tabel 1 zijn weliswaar interessant om een indruk te krijgen van de op te stellen vermogens en opslagcapaciteiten, maar worden besproken in relatie tot de resultaten m.b.t. de duurzaamheid en business case. Voor de duurzaamheid is als eerste de jaarlijkse energieneutraliteit interessant. Deze is voor de elektrische energie af te lezen uit Tabel 2 en 3, voor de thermische energie uit Tabel 4. Voor het elektrische deel valt op dat voor concept 2 (all-electric) vrij veel “Grid import” nodig is vanwege de hogere elektriciteitsconsumptie en een tekort aan zonPV en windenergie op de momenten dat juist productie in de wintermaanden nodig is. Concepten die gebruik maken van bio-energie voor de productie van warmte (concepten 1, 3 en 4) zijn minder afhankelijk van het

landelijke elektriciteitsnet.

Om duurzaam te voorzien in de warmtevraag is er weinig verschil tussen de concepten 1, 2 en 3, hoewel concept 3 uiteindelijk het minste aardgas nodig heeft. Alle concepten zouden met grotere capaciteiten van opwekkers technisch in staat zijn om volledig lokaal en duurzaam in de vraag te voorzien, maar dan zijn aanzienlijk grotere capaciteiten van duurzame opwekkers nodig, wordt het energiesysteem duurder en neemt de onbalans (import en export van elektrische energie) fors toe. Het eenvoudigst is dit te realiseren door concept 3 verder te optimaliseren richting een bijna-autonoom concept (Near autonomous). De onderste regel van de tabellen laat zien hoe goed dit concept in staat is volledig

Tabel 1: Capaciteiten van opwekkers en energie-opslagsystemen

Concept	External heat supply kW	Heat pump kW	Biofuel boiler CHP thermal kW	CHP electric kW	Solar PV m ²	Thermal storage kWh	Electric storage kWh	Objective function €/y
Reference	752							161.073
1	511		241		1570	250	200	146.861
2	532	500			2140	0	180	143.613
3	501	161	90	48	1400	150	0	141.982
Near autonomous	265	169	309	164	2004	1410	1220	172.134

Tabel 2: Jaarlijkse elektrische energietotalen: vraag (-) en productie (+)

Concept	Household electric demand	Cooling electric demand	Wind turbine production	Solar PV production	Direct power to heat	CHP electric production	Heat pump consumption
Reference	-576.449	-61.519					
1	-576.449	-7.690	186.618	351.110			
2	-576.449	-7.690	274.345	345.004			-360.222
3	-576.449	-7.690	183.643	225.704		283.039	-251.986
Near autonomous	-576.449	-7.690	5.647	323.039	-47.658	571.720	-195.416

Tabel 3: Jaarlijkse import (+) en export (-) van elektrische energie

Concept	Grid import (kWh/y)	Grid export (kWh/y)	Peak import (kW)	Peak export (kW)
Reference	637.968		212	0
1	211.821	-67.511	173	-173
2	420.264	-95.342	231	-231
3	209.861	-66.123	167	-167
Near autonomous	2.182	-75.314	142	-164

Tabel 4: Jaarlijkse thermische energietotalen: vraag (-) en productie (+)

Concept	Heat grid demand	Biofuel boiler or CHP production	Heat pump production	Direct power to heat	External heat production
Reference	-1.867.817				1.867.817
1	-1.867.817	1.464.052			403.641
2	-1.867.817		1.368.845		498.973
3	-1.867.817	531.771	957.546		378.452
Near autonomous	-1.867.817	1.074.140	742.582	47.658	3.080

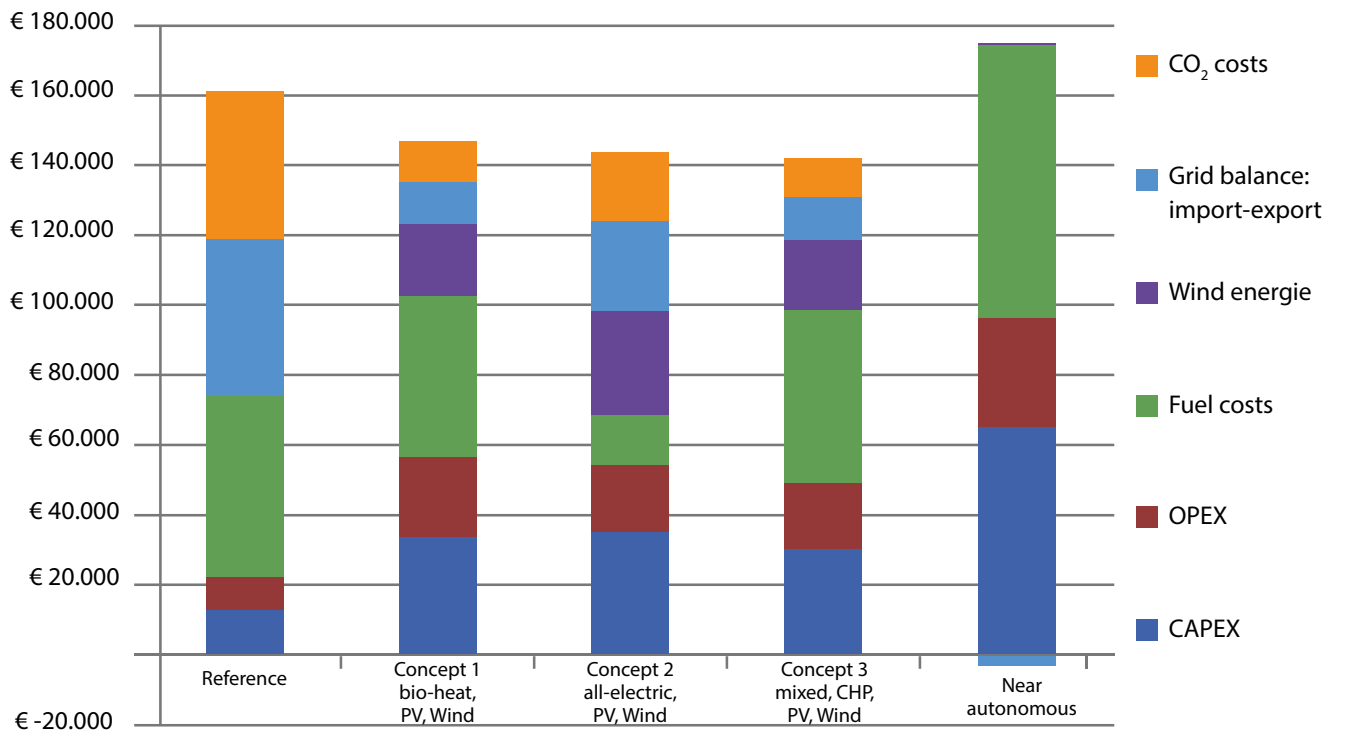
lokaal en duurzaam in de energievraag (elektrisch en warmte) te voorzien. Voor dit concept is nog een vorm van slimme, elektrische energiesturing ingevoerd door elektrische overschotpieken indien daaraan behoefte is, direct in warmte om te zetten (Direct power to heat). Dit resulteert in vrijwel geen elektrische energie import en een zeer laag aardgasverbruik. Door in de praktijk nog iets slimmer te sturen, b.v. vraagsturing (Demandside management) of sturing van energieopslag, zijn beiden waarschijnlijk geheel te voorkomen. Dan resteert nog slechts een relatief klein jaarlijks, elektrisch energie-overschot. In Tabel 1 is echter te zien dat dit bijna autonome concept ca. 18% duurder is dan de andere, duurzame concepten.

De business case vergelijking is weergegeven in Figuur 4. De ver-

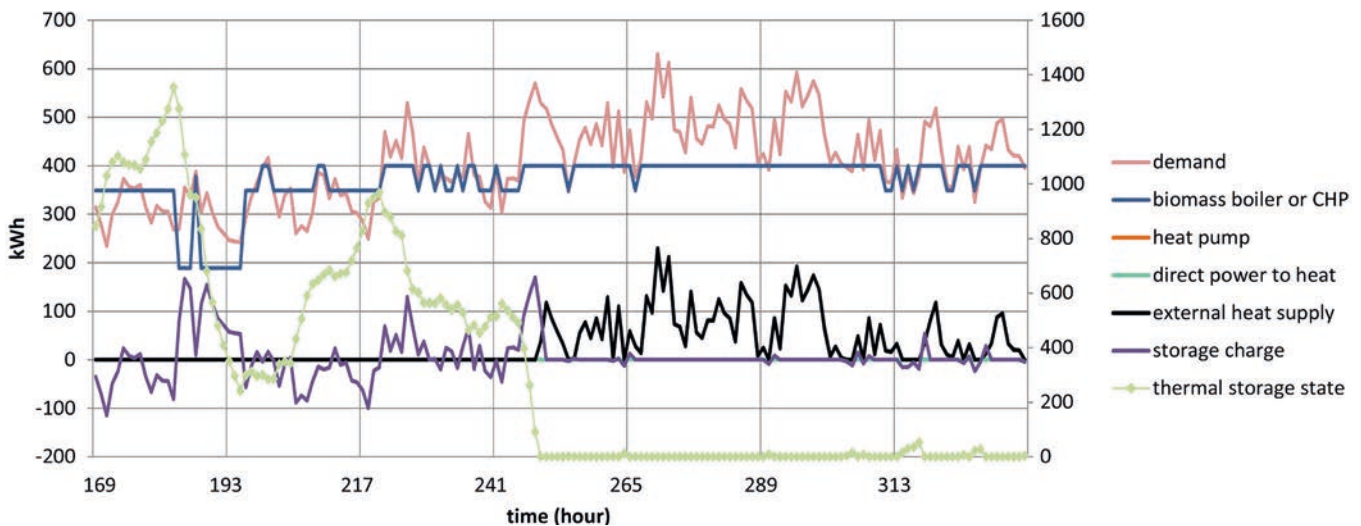
schillende kostenbijdragen zijn voor elk concept bepaald. Dit omvat: OPEX en CAPEX van de opwekkers, brandstofkosten (Fuel costs) voor aardgas en biogas, import van regionaal beschikbare windenergie (Wind energy), de jaarlijkse kostenbalans van elektrische energie import en export (Grid balance) en CO₂ kosten (60 €/ton). De kosten voor windenergie zijn niet via de OPEX en CAPEX verdisconteerd, maar deze energie wordt ingekocht tegen het standaard elektriciteitsstarief. De 200 woningen krijgen prioriteit binnen de productie van een regionale, grote windturbine. Indien voor de CO₂ kosten de huidige, aanzienlijk lagere, handelsprijs wordt genomen, dan is de referentie in alle gevallen het goedkoopste concept, gevolgd door concept 2. Dit is conform de verwachting dat all-electric concepten in belangrijke mate gezien worden als relatief voordelige

vervanging voor de huidige warmtevoorziening. Concept 2 wordt nog wat beter indien de externe stroomvoorziening (vanwege de benodigde import) verder “vergroent”, zodat de CO₂ kosten van concept 2 dan zullen dalen. Opvallend is de relatief hoge prijs voor het bijna autonome concept, echter in dit concept ontbreken wel de CO₂ kosten. Vanuit duurzaamheidsambities is dit concept in de huidige omstandigheden daarom te prefereren.

Een interessant onderdeel van de resultaten is daarnaast de mogelijkheid om alle energiestromen per uur te kunnen laten zien, om daarmee inzicht te krijgen in de kwaliteit van de energiebalans van het lokale energienet. Voor nadere informatie hierover, o.a. grafieken voor de winter en zomersituatie wordt verwezen naar de publicatie [4].



Figuur 4: Business case vergelijking



Figuur 5: output grafiek van de thermische energiestromen in een koude week. In het model is als opwekking gekozen voor een biomassaketel, thermische opslag en een gasketel (external heat supply). Het model berekent de meest optimale capaciteit en inzet hiervan.

Conclusies

In dit artikel zijn de belangrijkste achtergronden en mogelijkheden van het binnen WIEfm ontwikkelde warmtetransitie model toegelicht. Het model is toegepast op een casus (Meppel Nieuwveenselanden) om vier verschillende concepten voor een duurzame energievoorziening te onderzoeken op duurzaamheid, jaarlijkse en momentane energiebalans en de business case. Het model kan worden ingezet voor vergelijkbare omgevingsstudies waarbij sprake is van een elektrische en/of warmtevraag en verschillende vormen van

duurzame opwekkers en opslagcapaciteiten. Voor nog niet opgenomen opwekkers zoals zon thermische systemen moet het model worden uitgebreid. In een vervolg hierop worden de resultaten van dit model vergeleken met andere modellen zoals energyPLAN en ETM (Energie Transitie Model).

De casus Meppel laat zien dat een all-electric concept tegen relatief weinig meerkosten de referentie kan vervangen, maar hiervoor is een relatief grote import van elektrische energie nodig, vooral in de winter-

maanden. Zolang het elektriciteitsnet nog maar beperkt duurzaam is, zijn de CO₂ kosten nog relatief hoog, maar dit verbetert sterk wanneer de duurzaamheid van het net toeneemt. De beste lokale energiebalans gedurende het gehele jaar is te bereiken met een bijna autonoom concept bestaande uit een biogas WKK, warmtepomp, zonPV, windenergie, elektrische en thermische opslagcapaciteiten. Dit concept is nagenoeg 100% duurzaam, is op alle momenten in balans te krijgen, maar heeft wel de hoogste kosten.

Dr. Ir. Richard van Leeuwen,
Saxion Hogeschool

Literatuurlijst

- [1] "Meppel heats new housing development with biogas," RVO, 2012, [Online], <https://www.rvo.nl/sites/default/files/Meppel%20heats%20new%20housing%20development%20with%20biogas.pdf>
- [2] "Energietransitie rekenmodellen", Netbeheer Nederland, [Online], https://www.netbeheernederland.nl/_upload/Files/Rekenmodellen_21_120f7d4ef3.pdf
- [3] "Energyplan advanced energy system analysis computer model," University of Aalborg, 2016, [Online], <http://www.energyplan.eu/training/documentation/>
- [4] R.P. van Leeuwen, J.B. de Wit, en G.J.M. Smit, "Energy scheduling model to optimize transition routes towards 100% renewable urban districts," *International Journal of Sustainable Energy Planning and Management* 13 (2017): 19-46.
- [5] R. P. van Leeuwen, "Towards 100% renewable energy supply for urban areas and the role of smart control", 2017, proefschrift, Universiteit Twente, DOI: 10.3990/1.9789036543460



