

MAAR HOE DAN...?

Een onderzoek naar distributienetwerken voor duurzame energie in de bestaande stedelijke omgeving.

Frank Winkel

Maar hoe dan...?

Een onderzoek naar distributienetwerken voor duurzame energie in de bestaande stedelijke omgeving.

Auteur: F.F.D.A. Winkel
E-mailadres: ffda.winkel@student.avans.nl
Studentnummer: 2098690

Opleiding: Civiele Techniek
Organisatie: Avans Hogeschool
Adres: Onderwijsboulevard 215
5223 DE, 's-Hertogenbosch
Eerste Begeleider: Dhr. F. van Gestel
Tweede Begeleider: Dhr. B. Dankers

Opdrachtgever: Watt-Infra Netinpassingen B.V.
Adres: Laan der Vier Heemskinderen 7
5664 TH, Geldrop
Externe Begeleider: Dhr. E. Achterhuis
Afstudeerperiode: februari tot en met juni 2021

Versie: 1.0
Datum: 17 juni 2021
Locatie: 's-Hertogenbosch

Voorwoord

Voor u ligt de onderzoeksrapportage van Frank Winkel 'Maar hoe dan..?'. Deze onderzoeksrapportage is geschreven in het kader van mijn afstuderen aan de opleiding Civiele Techniek aan Avans Hogeschool te 's-Hertogenbosch en in opdracht van stagebedrijf Watt-Infra. Het afstuderen is een leerzaam proces geweest waarbij ik kennis en vaardigheden die ik heb opgedaan tijdens mijn studie heb kunnen toepassen tijdens mijn onderzoek. Van februari 2021 tot en met juni 2021 ben ik bezig geweest met het onderzoek en het schrijven van de onderzoeksrapportage.

Samen met mijn bedrijfsbegeleider, Ernest-Jan Achterhuis, hebben we de onderzoeksvraag vormgegeven. Het onderzoek dat ik heb uitgevoerd was complex doordat ik niet eerder in aanraking ben gekomen met de ondergrondse infrastructuur. Na uitvoeren van kwantitatief onderzoek heb ik de onderzoeksvraag naar tevredenheid kunnen beantwoorden. Tijdens dit onderzoek stonden mijn bedrijfsbegeleider, Ernest-Jan Achterhuis, en de begeleiders vanuit mijn opleiding, Frans van Gestel en Bart Dankers, altijd voor mij klaar. Zij hebben steeds mijn vragen beantwoord waardoor ik verder kon met mijn onderzoek.

Bij deze wil ik graag mijn begeleiders bedanken voor de fijne begeleiding en hun ondersteuning tijdens dit traject. Zonder hun medewerking had ik dit onderzoek niet kunnen voltooien.

Tevens wil ik mijn collega's bij Watt-Infra graag bedanken voor de fijne samenwerking. Ik heb vaak met hen op effectieve wijze kunnen sparren over mijn onderzoek. Tot slot wil ik mijn moeder in het bijzonder bedanken. Haar motiverende woorden hebben mij geholpen dit onderzoek tot een goed einde te brengen.

Ik wens u veel leesplezier toe.

Frank Winkel

's-Hertogenbosch, juni 2021

Samenvatting

Het afstuderen heeft plaatsgevonden bij Watt-Infra Netinpassingen B.V.

Het tekenen van het klimaatverdrag van Parijs in 2015 zorgt ervoor dat de uitstoot van CO² moet worden teruggedrongen. De Nederlandse overheid heeft in 2019 haar klimaatakkoord gepresenteerd, waarin wordt gesteld dat Nederland in 2050 volledig moet draaien op duurzame en CO²-neutrale energievoorzieningen. Dit betekent dat de, grotendeels van aardgas afhankelijke, warmtevoorziening voor Nederlandse woningen op een andere wijze moet worden voorzien. Watt-Infra wil graag inzicht in duurzame energiedistributienetwerk zodat zij een specifiek netwerk aan haar klanten kan adviseren.

Het primaire doel van het onderzoek is het aan Watt-Infra inzichtelijk maken welke duurzame energiedistributienetwerken kansrijk zijn in het bestaande stedelijke gebied en welke zij het beste kan aanbevelen aan haar relaties. De hoofdvraag van het onderzoek is als volgt geformuleerd:

Wat is het energiedistributiesysteem voor duurzame energie dat Watt-Infra in het bestaande stedelijke gebied moet aanbevelen aan haar opdrachtgevers?

Om tot een beantwoording van deze hoofdvraag te komen zijn als eerste informatie en parameters verzameld en is inzicht vergaard in het dimensioneren van energiedistributiesystemen. Vervolgens is op basis van de uitgangspunten uit het klimaatakkoord vastgesteld welke systemen hiervoor in aanmerking komen. Voor deze varianten is bepaald op welke wijze de dimensionering plaatsvindt en hoe tot een kostenindicatie kan worden gekomen. Vervolgens is deze berekening geautomatiseerd in een 'Calculatie- en dimensioneringstool.' Tenslotte is met behulp van casussen de werking van de tool gevalideerd.

Dit heeft geleid tot de conclusie dat waterstof de energiedrager van de toekomst is voorzien van een eventueel aanvulling van restwarmte. De geprefereerde vorm van energiedistributie is een lagetemperatuurnetwerk gevoed met restwarmte, aangevuld met warmte uit waterstofgas. Er bevindt zich een enorm financieel potentieel in het hergebruiken van het bestaande aardgasnetwerk voor transport van waterstofgas.

Summary

Graduation took place at Watt-Infra Netinpassingen B.V.

The signing of the Paris Climate Agreement in 2015 means that CO² emissions must be reduced. In 2019, the Dutch government presented its own Climate Agreement, which states that the Netherlands must run entirely on sustainable and CO²-neutral energy supplies by 2050. This means that the heat supply for Dutch homes, which are largely depending on natural gas, must be provided in a different way. Watt-Infra would like insight into sustainable energy distribution network so that it can advise its customers for a specific network.

The primary objective is to provide Watt-Infra insight into sustainable energy distribution networks and which ones fits best in the existing urban area and which one is best recommended to its customers. The main research question is formulated as follows:

What energy distribution network should Watt-Infra recommend to its customers in the existing urban area?

In order to answer this main question, information and parameters were collected and insight was gained into the dimensioning of energy distribution systems. Then, based on the principles of the Climate Agreement, it was determined which systems qualifies for this. For these qualified systems it has been determined how the dimensioning takes place and how costs can be determined. This calculation is then automated in a 'Calculation- and dimensioning tool.' Finally, the operation of this tool was validated using case studies.

This has led to the conclusion that hydrogen is the energy carrier of the future, possibly equipped with residual heat as a supplement. The preferred way of energy distribution is low-temperature district heating fed with residual heat, supported with heat from hydrogen gas. There is enormous financial potential in reusing the existing natural gas network for hydrogen gas transport.

Inhoudsopgave

1. Inleiding	8
1.1 Aanleiding.....	8
1.2 Probleemdefinitie	8
1.3 Onderzoeksvraag.....	9
1.4 Deelvragen.....	9
1.5 Aanpak.....	10
1.6 Doelstelling.....	11
1.6.1 Primaire doelstelling.....	11
1.6.2 Secundaire doelstelling	11
1.7 Afbakening.....	13
1.8 Leeswijzer	13
2. Theoretisch kader	14
2.1 Energievraag.....	14
2.1.1 Warmtevraag.....	14
2.1.2 Koudevraag.....	15
2.1.3 Elektriciteitsvraag	15
3. Dimensionering	16
3.1 Inventarisatie energiedistributiesystemen	16
3.1.1 Volledig elektrisch	16
3.1.2 Waterstof.....	17
3.1.3 Warmtenet	17
3.1.4 Warmtenet met opwaardering	18
3.1.5 Kansrijke varianten	18
3.2 Systeemschets	19
3.3 Kwantificering van kansrijke varianten	20
3.3.1 Elektrisch vermogen	20
3.3.2 Variant 1 – Cv op waterstofgas	21
3.3.3 Variant 2 – Brandstofcel	21
3.3.4 Variant 3 – Hoge- of middentemperatuurnetwerk	22
3.3.5 Variant 4 – Lagetemperatuurnetwerk met opwaardering.....	24
3.4 Systeemopbouw	25
3.4.1 Lengtedimensionering op wijkniveau	26
3.4.2 Lengtedimensionering op overkoepelend niveau.....	26
4. Calculatie- & dimensioneringstool	27
4.1 Werking van de tool	27

4.1.1 Bepaling systeemdimensies	27
4.1.2 Kostprijsberekening.....	28
4.2 Toepassen van de calculatie- en dimensioneringstool	30
4.2.1 Invoeren parameters.....	30
4.2.2 Uitvoer	33
4.3 Validatie.....	35
4.3.1 Validatie van de werking	35
4.3.2 Validatie door toepassing.....	36
4.3.3 Validatie met extremen.....	37
4.3.4 Toekomstige ontwikkelingen	38
5. Conclusie	39
5.1 Primaire conclusie	39
5.2 Secundaire conclusie	40
6. Aanbevelingen	42
6.1 Algemeen aanbeveling	42
6.2 Aanbeveling voor Watt-Infra.....	42
6.3 Aanbevelingen voor gemeenten en andere overheidsinstellingen	42
6.4 Aanbevelingen voor andere afstudeerders.....	42
Literatuurlijst	43

Bijlagen

Bijlage I - Bepaling energievraag	
Bijlage II - Inventarisatie van kansrijke varianten.....	
Bijlage III - Kwantificering van varianten.....	
Bijlage IV - Standaardisering.....	
Bijlage V - Calculatie- en dimensioneringstool.....	
Bijlage IV - Validatie.....	

Verklarende woordenlijst

Debiet

Volumesnelheid. Natuurkundige grootte voor een doorstromend medium uitgedrukt als de hoeveelheid van een vloeistof of gas per tijdseenheid.

COP-waarde

De verhouding tussen de hoeveelheid afgegeven warmte tegenover de hoeveelheid verbruikte energie van onder andere een warmtepomp.

DA/DN diameter

Buiten- of binnendiameter

Stakeholder

Belanghebbende. Een persoon of organisatie die invloed ondervindt (positief of negatief) of zelf invloed kan uitoefenen op een specifieke organisatie, een overheidsbesluit, een nieuw product of een project.

Stedelijkheid

Omgevingsadressendichtheid. Het aantal adressen binnen een cirkel van één kilometer rond dat adres.

Sustainable development goals

Door de Verenigde Naties vastgestelde die worden gepromoot als de wereldwijde doelstellingen voor duurzame ontwikkeling.

PE

Polyetheen. De meest gebruikte kunststof.

Warmtenetwerk

Stadsverwarming. Verwarmingssysteem, waarbij gebouwen worden verwarmd via een ondergronds netwerk van warmwaterleidingen.

1. Inleiding

1.1 Aanleiding

In het klimaatverdrag van Parijs is in 2015 door vrijwel alle wereldleiders overeengekomen dat in 2050 de energievoorzieningen moeten zijn overgegaan in duurzame en CO²-neutrale energievoorzieningen. Dit betekent dat er een overgang komt van fossiele brandstoffen naar andere vormen van energie. Om deze andere vormen van energie te transporteren, dienen bestaande netwerken geschikt te worden gemaakt voor deze transitie of dient het netwerk (gedeeltelijk) opnieuw te worden aangelegd. (Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, 2019)

1.2 Probleemdefinitie

Macroniveau

De mensheid heeft ervoor gezorgd dat door haar gebruik van fossiele brandstoffen een te hoge concentratie CO² in het milieu terecht is gekomen. Dit resulteert in klimaatverandering door opwarming van de aarde. De CO²-uitstoot moet worden teruggedrongen door over te stappen op duurzame vormen van energie.

Mesoniveau

Om het energiedistributienetwerk te verduurzamen moet er afscheid worden genomen van fossiele brandstoffen zoals aardgas. Dit vraagt om een aanpassing van de bestaande netwerken zodat eindgebruikers een 'andere' vorm van energie kunnen ontvangen. Aanpassing van het volledige distributienetwerk is een grote operatie en is een enorme uitdaging voor de verantwoordelijke partijen. (Vlerken, 2018)

Microniveau

Watt-Infra is gespecialiseerd in duurzame ondergrondse infrastructuur en levert duurzame warmte- en koudedistributienetwerken in nieuwbouwprojecten. De uitdaging ligt in de bestaande stedelijke omgeving, waar woningen en gebouwen staan die slechts beperkt zijn te isoleren of geen ruimte hebben voor omvangrijke installaties. Wanneer bestaande bebouwing moet worden voorzien van duurzame energie, kan dit niet worden gerealiseerd op eenzelfde wijze als dat in nieuwe woongebieden wordt gerealiseerd. Daarnaast levert aanpassing van het gehele lokale netwerk, grote hinder op voor de omgeving.

Mogelijke oplossingen

In het klimaatakkoord, dat in 2019 is opgesteld door het Nederlandse kabinet, zijn een aantal maatregelen aangekondigd. Deze zijn ingedeeld in een vijftal categorieën. In de categorie 'Gebouwde Omgeving' zijn als alternatieve energiedragers de volgende mogelijkheden benoemd:

- Distribueren van energie met behulp van een warmtenet
- Capaciteit van het elektriciteitsnet vergroten, overstappen op 'all-electric'
- Cv-ketel op waterstof of een vergelijkbare situatie

1.3 Onderzoeksvraag

Aan de hand van de probleemdefinitie is de onderzoeksvraag opgesteld:

Wat is het energiedistributiesysteem voor duurzame energie dat Watt-Infra in het bestaande stedelijke gebied moet aanbevelen aan haar opdrachtgevers?

1.4 Deelvragen

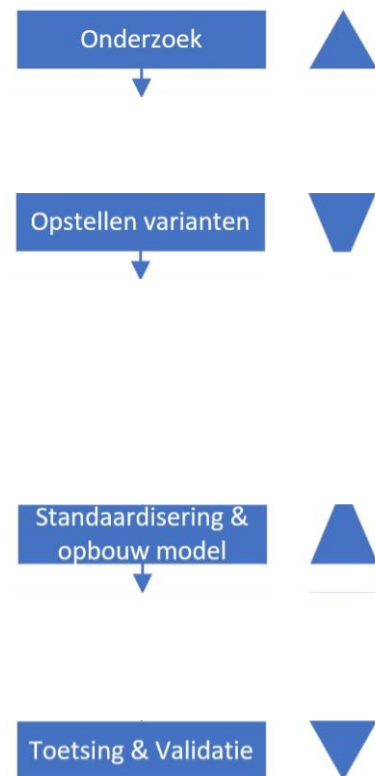
Op deze onderzoeksvraag wordt antwoord gegeven door onderstaande deelvragen te beantwoorden:

1. Welke systemen zijn toepasbaar voor het transport van duurzame energie in binnenstedelijk gebied?
2. Welke varianten zijn kansrijk en hoe dienen deze te worden gedimensioneerd?
3. Welke aanpassingen aan het energienetwerk zijn nodig per variant?
4. Wat zijn de kosten per variant van de realisatie of aanpassing het energienetwerk?

1.5 Aanpak

Het onderzoek is in vier fasen in te delen. De fundering is uitgevoerd als literatuuronderzoek, vervolgens zijn varianten opgesteld en gestandaardiseerd. Aansluitend is er een calculatie- en dimensioneringstool opgesteld en tenslotte de conclusie getrokken door het invoeren en toetsen van de gegenereerde output.

1. In het onderzoek zijn informatie en parameters verzameld en is inzicht vergaard in het dimensioneren van energiesystemen. Onderzoek is uitgevoerd naar relevante karakteristieke eigenschappen van woningen ten behoeve van het ontwerpen van een energiedistributiesysteem.
2. Op basis van de uitgangspunten uit het klimaatakkoord is vastgesteld welke systemen in aanmerking komen. Gebaseerd op dit onderzoek zijn een vijftal voorkeursvarianten vastgesteld. Voor deze varianten is vastgesteld hoe de capaciteitsdimensionering plaatsvindt, welke typen kabel- en/of leiding worden toegepast en welke bijkomende factoren belangrijk zijn bij ontwerpen van het energiedistributiesysteem.
3. Voor elke variant is vervolgens inzichtelijk gemaakt en beredeneerd hoe de lengtedimensionering op straat-, wijk-, en gebiedsniveau plaatsvindt en hoe een kostenindicatie kan worden gegenereerd. Aansluitend is deze berekening gestandaardiseerd en geautomatiseerd in een calculatie- en dimensioneringstool.
4. Vervolgens zijn een drietal casussen gebruikt om de calculatie- en dimensioneringstool te toetsen en te valideren.



Figuur 1 Verschillende fasen van het onderzoek, aan de rechter zijde de hoeveelheid variaties en onbekende parameters per onderzoeksfase.

1.6 Doelstelling

1.6.1 Primaire doelstelling

Het primaire doel van het onderzoek is het aan Watt-Infra inzichtelijk maken welke kansrijke duurzame energiedistributienetwerken er voor het bestaande stedelijke gebied op de markt zijn en welke zij het beste kunnen aanbevelen aan hun relaties. Watt-Infra zal hierdoor een adviserende rol aan kunnen nemen over de keuze van het type netwerk en de opdrachtgever ondersteunen bij hun businesscase: 'Het aardgasvrij maken van een bestaande stedelijke omgeving'

Het resultaat van dit onderzoek is een calculatie- en dimensioneringstool, waarin na het invullen door Watt-Infra van enkele eenvoudige parameters, in zeer korte tijd, de systeemdimensies voor de varianten worden bepaald en voor elke variant een kostenindicatie wordt gegenereerd. Daarnaast volgt op basis van de verkregen resultaten een aanbeveling voor een voorkeursvariant. Dit leidt tot een beantwoording van de hoofdvraag.

1.6.2 Secundaire doelstelling

De secundaire doel is het bijdragen aan de maatschappelijke ontwikkeling, op basis van de uitgangspunten van de Sustainable Development Goals. In de conclusie is de maatschappelijke bijdrage van dit onderzoek behandeld.

7 – Betaalbare en duurzame energie

De doelstelling is door de Stichting Sustainable Development Goals Charter als volgt gedefinieerd:

Verzeker toegang tot betaalbare, betrouwbare, duurzame en moderne energie voor iedereen.



Met deze doelstelling wordt bedoeld dat ieder mens toegang moet hebben tot een betrouwbare en duurzame energie. Dit is in Nederland vanzelfsprekend, maar een vijfde deel van de wereldbevolking heeft op dit moment nog geen toegang tot energie. (Stichting Sustainable Development Goals Charter, z.d.) Betrouwbare en betaalbare energie zorgt voor een grote verbetering in de leefomstandigheden van mensen en geeft daarnaast veel mogelijkheden aan de maatschappij om te ontwikkelen, wat zich zal uiten in een grotere welvaart.

Het probleem is dat veel energie wordt gewonnen uit fossiele brandstoffen, welke uitgeput raken en klimaatverandering teweeg brengen. Om betaalbare, betrouwbare energie te verkrijgen uit duurzame bronnen dient nog veel technologische ontwikkeling en optimalisatie plaats te vinden.

Het doel is om met dit onderzoek een stap te zetten in de ontwikkeling van de distributie van duurzame vormen van energie. De westerse wereld heeft de mogelijkheid om deze technologie te ontwikkelen en door deze kennis met de wereld te delen, wordt bijgedragen aan ontwikkeling van moderne en duurzame energie in ontwikkelingslanden.

13 – Klimaatactie

De doelstelling is door de Stichting Sustainable Development Goals Charter als volgt gedefinieerd:

Neem dringend actie om klimaatverandering en haar impact te bestrijden.



Met deze doelstelling wordt bedoeld dat, om de snel toenemende extreme omstandigheden zoals de stijgende omgevingstemperaturen, overstromingen, droogte en extreme stormen, de mensheid direct in een vermindering van de uitstoot van broeikasgassen moeten voorzien om verdere klimaatverandering op onze planeet te beperken.

Het probleem is dat door de jarenlange uitstoot van broeikasgassen de temperatuur op aarde snel toeneemt. Dit heeft een veranderend klimaat tot gevolg, waardoor het poolijs smelt en het zeeniveau stijgt. Arme mensen, die voornamelijk afhankelijk zijn van landbouw in gebieden die gevoelig zijn voor extreme omstandigheden, krijgen als eerste met deze gevolgen te maken. (Stichting Sustainable Development Goals Charter, z.d.)

Het doel is om met dit onderzoek bij te dragen aan het behalen van de klimaatdoelstellingen zoals gesteld in het klimaatakkoord en de verdere opwarming van de aarde te beperken tot 2 graden. Door de energietransitie naar duurzame en hernieuwbare energie, snel en voorspoedig te laten verlopen, ontstaat een forse vermindering in broeikasgassen.

1.7 Afbakening

Zoals blijkt uit de primaire doelstelling is dit onderzoek voornamelijk gericht op de distributie van duurzame energie. Het gedeelte van de distributie waar dit onderzoek over gaat is het gedeelte vanaf de lokale temperatuurbron of overdrachtpunt van landelijk- naar lokale distributienetwerk. Het onderzoek richt zich op dit netwerk tot aan de huisaansluiting.

De keuze voor de typen energiedistributienetwerken is gebaseerd op de koers van het klimaatakkoord. De energiedistributiesystemen zijn ontworpen op basis van extreme waarden. Zonnepanelen op woningen worden niet meegenomen als reductiefactor van de benodigde capaciteit. Het onderzoek voorziet in een resultaat dat veelzijdig toepasbaar is, gebied specifieke zaken zijn maatwerk.

Het onderzoek is theoretisch opgezet en baseert zich op wetenschappelijke uitgangspunten en kengetallen uit de praktijk. Hierin staan de dimensionering en kostenindicatie centraal, de technische werking van de systemen wordt buiten beschouwing gelaten. Deze theoretische benadering kan afwijken van de praktijk.

1.8 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 vindt u het theoretisch kader, waarin wordt bekeken hoe de energievraag van een woning of gebied kan worden bepaald. In hoofdstuk 3 zijn een vijftal kansrijke varianten gedefinieerd en is de generieke opbouw van energiedistributiesystemen vastgesteld. In hoofdstuk 4 leest u de totstandkoming en onderbouwing van de calculatie- en dimensioneringstool. Aansluitend vindt u de conclusie en aanbevelingen van dit onderzoek.

2. Theoretisch kader

In dit hoofdstuk leest u hoe de energievraag van een woning of gebied kan worden bepaald.

2.1 Energievraag

Om een energiedistributiesysteem te kunnen dimensioneren is het noodzakelijk om de vermogensvraag per individuele woning te bepalen, alvorens de vermogensvraag van een groter gebied kan worden bepaald. De vermogensvraag van een woning bestaat uit verschillende componenten, namelijk: de warmtevraag, koudevraag en de vraag naar elektriciteit. Daarnaast dient rekening te worden gehouden met de verwachte verandering in de vermogensvraag tussen nu en 2030. Het is belangrijk dat de koudevraag wordt meegenomen, gezien deze ten gevolge van klimaatverandering in de komende jaren zal toenemen. De energievraag is gedimensioneerd op piekvermogen. Immers dient het systeem in uitzonderlijke situaties niet overbelast te raken.

In paragraaf 2.1.1 tot en met 2.1.3 leest u een onderbouwing van de energievraag. Voor een uitgebreide onderbouwing kunt u terecht in bijlage I.

2.1.1 Warmtevraag

De warmtevraag van een woning is de hoeveelheid energie die benodigd is voor het verwarmen van de ruimten van een woning en het tapwater. Warmtedistributiesysteem voorzien in warmte voor zowel ruimteverwarming als tapwaterverwarming, echter nooit tegelijkertijd. Voor het piekvermogen voor de warmtelevering wordt het piekvermogen gehanteerd voor de ruimteverwarming. Bij benadering wordt de warmtevraag van een woning bepaald door de woningvloeroppervlakte en de isolatieklasse. De warmtevraag voor een gebied is de cumulatieve warmtevraag van de individuele woningen.

Isolatieklasse	Warmtevraag (w/m ²)	Omschrijving
I	40	Een erg goed geïsoleerde woning met een minimaal ventilatieverlies, gelegen op het zuiden. Het gebouw komt overheen met een energieklassse A+ of A++.
II	60	Een erg goed geïsoleerde woning met een minimaal ventilatieverlies, gelegen op het zuiden. Het gebouw komt overheen met een energieklassse A.
III	80	Een goed geïsoleerde woning, nieuwbouw of renovatie. Het verlies aan warmte door ventilatie is gemiddeld.
IV	100	Een gemiddeld geïsoleerde woning met een groot warmteverlies door ventilatie.
V	120	Een woning met een lage isolatiegraad, bijvoorbeeld een oud gebouw met nieuwe ramen en licht geïsoleerde muren.
VI	140	Een woning met lage of geen isolatiegraad, bijvoorbeeld een oud gebouw met enkel glas en geïsoleerde muren.

Figuur 2 Kengetallen en indicatoren voor bepaling van de warmtevraag. (De Graaff, 2019)

2.1.2 Koudevraag

De koudevraag van de woning is de hoeveelheid energie die benodigd is om de ruimtes in de woning te koelen.

In het verleden zijn systemen voor woningverwarming altijd maatgevend geweest in Nederland. De vraag naar koelte in de steeds warmer wordende zomers neemt naar verwachting de komende jaren toe. Volgens TKI Urban Energy (2018), is de verwachte toename tot 2030 zo'n 229%. In landen ten zuiden van Nederland, waaronder België, wordt een stijging in de koudevraag verwacht van 700%. Als gevolg van deze stijging is de koudevraag in de nabije toekomst een essentieel onderdeel naast verwarming van de woning. Het piekvermogen van de koudevraag werkt op dezelfde wijze als het piekvermogen van de warmtevraag, maar vraagt een net iets hoger piekvermogen. Ook de koudevraag voor een gebied is de cumulatieve koudevraag van de individuele woningen.

2.1.3 Elektriciteitsvraag

De energiebehoefte voor elektriciteit is afhankelijk van de grootte van de woning, het type woning en de mate van stedelijkheid van de omgeving. Voor de elektriciteitsvraag is de verwachting dat deze in de toekomst zal stijgen. Apparaten worden zuiniger, maar de hoeveelheid apparaten neemt toe. Daarnaast worden steeds meer apparaten voorzien met IoT¹-functionaliteit, waardoor veel apparaten gebruik gaan maken van (draadloos) internet. Een voorbeeld hiervan is het 5G netwerk, welke meerdere antennes gebruikt met een hogere dichtheid en relatief hoger vermogen dan het reguliere 3G- en 4G-netwerk. Het finale elektriciteitsverbruik geconsumeerd door 5G-netwerkkapaciteit leidt tot een verwachte stijging van 230%. (Schwartz, 2019)

Daarnaast zorgt de introductie van het thuis opladen van de elektrische auto voor toenemende belasting op het elektriciteitsnetwerk. Wanneer een warmtedistributiesysteem in een gebied wordt gerealiseerd ontstaat de kans om de huisaansluiting voor elektriciteit op te waarderen en klaar te maken voor de toekomst door deze te voorzien van een 3-fase aansluiting. De huisaansluiting en bijbehorende elektriciteitsinfrastructuur dienen te worden uitgebreid, zodat elke woning over een capaciteit beschikt van tenminste 3x25 ampère. Als er grootschalige toename van thuislaadpunten wordt verwacht dient de capaciteit te worden uitgevoerd voor huisaansluitingen 3x35 ampère.

¹ Internet of Things

3. Dimensionering

In hoofdstuk dit hoofdstuk zijn een vijftal kansrijke varianten gedefinieerd. Daarnaast is vastgesteld wat de generieke opbouw is van een energiedistributiesysteem en wat de dimensioneringsvariabelen zijn per variant.

3.1 Inventarisatie energiedistributiesystemen

Als uitgangspunt voor het selecteren van duurzame energiedistributiesystemen is gezocht naar systemen:

- Capaciteit van het elektriciteitsnet vergroten, overstappen op 'all-electric'
- Cv-ketel op waterstof of een vergelijkbare situatie
- Distribueren van energie met behulp van een warmtenet

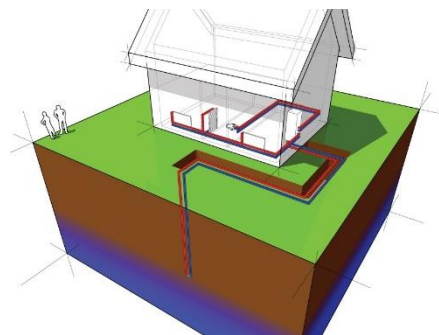
In paragraaf 2.2.1 tot en met 2.2.5 leest u een beknopte versie onderbouwing inventarisatie. Voor een uitgebreide inventarisatie en beschrijving kunt u terecht in bijlage II.

3.1.1 Volledig elektrisch

Voor een volledige elektrische verwarming is keuze uit een warmtepomp of een volledig elektrische radiatoren of vloerverwarming.

Er zijn een vijftal warmtepompsystemen geanalyseerd:

- Lucht/lucht warmtepomp
- Lucht/water warmtepomp
- Water/water warmtepomp
- Bodem/water warmtepomp
- Hybride warmtepomp



Figuur 3 Principe van een water/water warmtepomp. Klimaatexpert.com, z.d.)

Deze installaties zijn geen van alle geschikt voor toepassing in het bestaande stedelijke gebied.

Eenzijds vanwege de monotone geluidsproductie die buitenunits van lucht-warmtepompen produceren. Dit is per april 2021 een maximum van 45 decibel gemeten op de erfgrans. (Ministerie van Binnenlandse Zaken, 2021) Deze buitenunits produceren circa 60 dB en zijn daarom bij een hoge woningdichtheid niet toepasbaar.

Anderzijds vanwege de omvang van de installatie die bodem- of water-warmtepompen behoeven. In het stedelijk gebied is, ten gevolge van de woningdichtheid, onvoldoende ruimte aanwezig om dergelijke systemen te kunnen plaatsen.

Volledig elektrische radiatoren en vloerverwarming hebben een zeer laag rendement en resulteren daardoor in een zeer hoog elektriciteitsverbruik en is daarmee geen langetermijnoplossing.

3.1.2 Waterstof

Bij de keuze voor waterstof zijn een drietal mogelijkheden:

- Cv-ketel op waterstof in de woning
- Brandstofcel in de woning
- Brandstofcel centraal in de wijk

Een Cv-ketel op waterstof in de woning is toepasbaar en het bestaande aardgasnetwerk kan hiervoor worden hergebruikt. Deze installaties zijn nog niet op de reguliere markt verkrijgbaar en bevinden zich in de pilotfase.

Een brandstofcel in de woning is niet toepasbaar door het omvangrijke systeem. De omvang van een dergelijke brandstofcel is vergelijkbaar met de omvang van een grote koelkast. In het stedelijk gebied is ruimte in woningen vaak schaars en daarom is een brandstofcel niet in iedere woning te plaatsen.

Een brandstofcel op wijkniveau is toepasbaar en zorgt voor een (grotendeels) zelfvoorzienende wijk doordat deze voorziet in zowel elektriciteit als in warmte. Het principe is nog niet toegepast in een stedelijke omgeving.



Figuur 4 Brandstofcel voor toepassing in een woning. (Viessmann, z.d.)

3.1.3 Warmtenet

Als er een warmtenet wordt gerealiseerd zijn hierin een viertal opties:

- Hogetemperatuur
- Middentemperatuur
- Lagetemperatuur
- Zeer lagetemperatuur

Een hoge- of middentemperatuurnetwerk is zeer geschikt om grote gebieden te voorzien in zowel de warmte- als koudevraag. Bestaande woningen behoeven bij de keuze voor een hoge- of middentemperatuur warmtenetwerk geen aanpassingen aan de interne warmteafgifte.

Een lage- of zeer lagetemperatuurnetwerk is minder geschikt om toe te passen in het bestaande stedelijke gebied. De lage temperatuur heeft een lager rendement, wat resulteert in zeer grote systeemdimmersies. Niet alle bestaande woningen halen voldoende rendement uit een lagere temperatuurnetwerk. In het bestaande stedelijke gebied is een lagetemperatuurnetwerk zonder booster dus ongeschikt.



Figuur 5 Principe van een warmtenet (Hendriksma, 2020)

3.1.4 Warmtenet met opwaardering

Een laagtemperatuurnetwerk kan in het bestaande stedelijke gebied worden toegepast in combinatie met opwaardering in de woning. Deze opwaardering kan worden uitgevoerd met behulp van elektriciteit in de vorm van een water-waterwarmtepomp of met behulp van een waterstof cv-ketel. Dit is een zeer geschikte oplossing in het bestaande stedelijke gebied.



Figuur 6 Cv-ketel op waterstof (DNV GL, z.d.)

3.1.5 Kansrijke varianten

Op basis van de inventarisatie komen een vijftal kansrijke varianten naar voren:

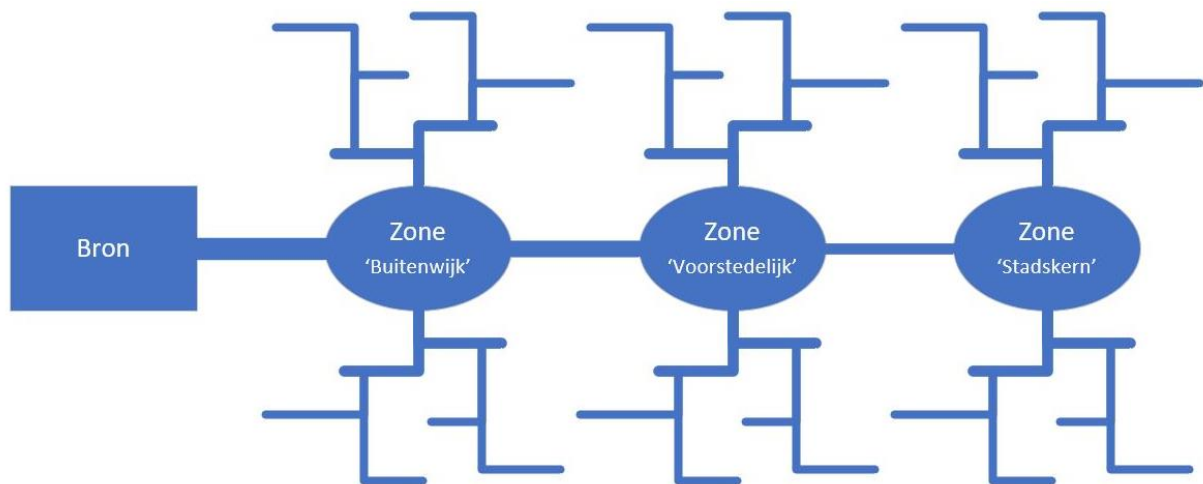
- Behouden van het aardgasnetwerk en gebruiken voor waterstof Cv-ketels
- Waterstof gevoede brandstofcel op wijkniveau.
- Realisatie van een hoge- of middentemperatuur-warmtenet.
- Realisatie van een laagtemperatuur warmtenet met naverwarming door waterstof.
- Realisatie van een laagtemperatuur warmtenet met naverwarming door een warmtepomp.

3.2 Systeemschets

Bij het dimensioneren van een energiedistributiesysteem is het belangrijk om te begrijpen hoe dergelijke systemen zijn opgebouwd. Ongeacht het type systeem werken deze allemaal volgens een 'boom'principe. De bron, bijvoorbeeld een fabriek met restwarmte, bevindt zich aan de rand van de stad. Vanaf de bron loopt een hoofddistributieleiding door en langs de verschillende zones, achtereenvolgend van de buitenwijk, naar voorstedelijk gebied naar de kern. Deze hoofdleiding geeft bij elke stap een gedeelte van haar energie af, waardoor deze steeds in transportcapaciteit, oftewel diameter zal afnemen.

In de individuele zones wordt hetzelfde idee toegepast waarin een grote afstand tot de bron leidt tot een fijnmaziger distributienetwerk. Dit principe is weergegeven in onderstaande figuur 3.

Als voor iedere zone een karakteristieke vermogensvraag voor een representatieve woning is gedefinieerd, wordt bepaald wat de karakteristieke vermogensvraag is voor een straat. Daarna voor een huizenblok, daarna voor de gehele zone.



Figuur 7 Systeemschets volgens een boom-principe

3.3 Kwantificering van kansrijke varianten

De dimensies van het systeem zijn afhankelijk van de vermogensvraag die van het distributiesysteem wordt gevraagd. Voor de verschillende varianten is in paragraaf 3.2.1 tot en met 3.2.5 de werking van het systeem beschreven en het geprefereerde kabel- of leidingtype aangeduid.

Voor deze geprefereerde typen zijn de standaard toegepaste, verkrijgbare leidingdiameters en kabeldoorsneden vastgesteld. Voor deze standaard diameters en doorsneden is vervolgens het maximaal transporteerbare vermogen vastgesteld. Op deze wijze kan de capaciteitsdimensie van de kabel of leiding worden bepaald. Daarnaast zijn bijkomende, voor de variant essentiële systemen, benoemd. Een uitgebreide beschrijving en onderbouwing van de verschillende kabel- en leidingtypen kunt u vinden in bijlage III.

3.3.1 Elektrisch vermogen

Distributie van elektriciteit, tussen het hoogspanningsnetwerk en de huisaansluiting in laagspanning, vindt plaats via het middenspanningsnetwerk. Traditioneel is deze uitgevoerd in een spanning van 10kV. Nieuwe netwerken worden uitgevoerd in 20kV, waardoor een tweevoudig vermogen over dezelfde kabel kan worden getransporteerd.

Woningen worden bij voorkeur aangesloten met een 3x25 ampère aansluiting met een piekvermogen van 17,25 kWp. Het totale piekvermogen van een gebied kan worden verkregen door het piekvermogen van de huisaansluiting te vermenigvuldigen met het aantal woningen. Wanneer grootschalig wordt overgegaan naar elektrisch rijden, is dimensionering met huisaansluitingen van 3x35 ampère noodzakelijk. Het piekvermogen van deze aansluiting is 24,15 kWp. Over de capaciteit van het middenspanningsnetwerk wordt een gelijktijdigheidsfactor aangehouden van 0,7%. (D-Cision B.V. & Ecorys B.V., 2019) Opwaardering van de huisaansluitingen vereist een uitbreiding van het midden- en laagspanningsnetwerk.



Figuur 8 Middenspanningskabel (Prysmian, z.d)

In dit onderzoek is uitgegaan van transport van elektriciteit met behulp van Aluminium Single Core middenspanningsbekabeling. Netbeheerders geven voorkeur aan kabeldoorsneden van 630, 800 en 1000 mm². (D. Eering, persoonlijke communicatie, 20 mei 2021) De middenspanning is uitgevoerd in 3 fasen, waardoor per kabelbundel 3 eenzelfde kabels benodigd zijn. De kabeldoorsneden en bijbehorende vermogens zijn weergegeven in onderstaande figuur 9.

Kabeldoorsnede (mm ²)	Stroomsterkte (A)	Maximaal vermogen bij 10 kV (MW)	Maximaal vermogen bij 20 kV (MW)
630	575	9,96	19,9
800	640	11,1	22,2
1000	705	12,2	24,4

Figuur 9 Gebruikelijke kabeldoorsneden en bijbehorende vermogens op 10kV en 20kV

Naast de kabelconfiguratie dient ook deze middenspanning in de wijk te worden omgevormd naar laagspanning ten behoeve van de huisaansluitingen. Hiervoor worden compactstations geplaatst. Deze worden standaard geleverd in vermogens van 630, 1250 en 2500 kVa. Het aantal compactstations dat benodigd is hangt vast aan de vermogensvraag van de wijk.

3.3.2 Variant 1 – Cv op waterstofgas

Distributie van waterstof kan plaatsvinden via het bestaande aardgasnetwerk. (Kiwa, 2009) De huidige werkdruk van aardgasdistributienetten is 8 bar, nieuwe toekomstige netwerken kunnen ook opereren onder een werkdruk van 16 bar. Met een maximale stroomsnelheid van 20 meter per seconde. (DR Engineering, 2017) Bij cv-ketels op waterstof geldt een rendement van 70%. (Turksma, 2020)

In dit onderzoek wordt transport van waterstofgas uitgevoerd middels standaard diameters PE-gasleidingen. De diameters en bijbehorende vermogens zijn weergegeven in onderstaande figuur 10.

Buitendiameter DA (mm)	Binnendiameter DN (mm)	Debiet (m ³ /h)	Maximaal vermogen (8 bar, 20 m/s) (kW)	Maximaal vermogen (16 bar, 20 m/s) (kW)
32	26	11	264	528
40	32,6	55	1320	2640
50	40,8	90	2160	4320
63	51,4	150	3600	7200
75	61,4	220	5280	10560
90	73,6	320	7680	15360
110	90	460	11040	22080
125	102,2	580	13920	27840
160	130,8	950	22800	45600
200	163,6	1500	36000	72000
250	204,6	2300	55200	110400
315	257,8	3600	86400	172800
355	290,6	4700	112800	225600
400	327,2	6100	146400	292800
450	368	7500	180000	360000
500	409	9500	228000	456000
560	458	12000	288000	576000
630	515,4	15000	360000	720000

Figuur 10 Maximaal transporteerbaar vermogen per standaarddiameter gasleiding

3.3.3 Variant 2 – Brandstofcel

Bij de brandstofcel variant worden meerdere brandstofcellen verspreid opgesteld in de wijk. Het aantal brandstofcellen is afhankelijk van de piekvermogensvraag van het gebied. De brandstofcellen leveren een vermogen van 2 MW per stuk en hebben elk een vloeroppervlakte nodig van 30 vierkante meter. De brandstofcel produceert zowel warmte als elektriciteit en heeft een thermisch rendement van 70%. Transport van waterstof wordt uitgevoerd met dezelfde PE-gasleiding als voor variant 1

zijn gebruikt. Transport van warmte geschiedt middels een middentemperatuur warmtenet, op eenzelfde wijze als het transport bij het middentemperatuur warmtenet in variant 3. Achter elke brandstofcel bevindt zich een klein warmtenet, welke de door de brandstofcel geproduceerde warmte distribueert.



Figuur 11 Principe van brandstofcel op wijkniveau. (Nedstack, 2020)

3.3.4 Variant 3 – Hoge- of middentemperatuurnetwerk

Bij een hoge- of middentemperatuur warmtenet wordt warmte of koude gecirculeerd middels aanvoer en retourleidingen. Bij een warmte net zijn 2 leidingen benodigd, wanneer de koudevraag wordt voorzien vanuit het warmtenet zijn 4 leidingen benodigd.

Voor de verschillende operatietemperaturen geldt: Hoe hoger de aanvoertemperatuur, hoe groter de vrijkomende hoeveelheid energie, hoe groter de warmteafgifte. Dit is weergegeven in onderstaande figuur 12.

	Aanvoer (°C)	Retour (°C)	Verschil (°C)	Energie per m ³ per graad (kWh)	Energie per m ³ (kWh)
HT	90°	72°	18°	1,16204	20,9
MT	70°	59°	11°	1,16204	12,8
LT	50°	43°	7°	1,16204	8,13

Figuur 12 Energie per kubieke meter warmteafgifte

De maximale stroomsnelheid bepaalt het debiet voor een specifieke leidingdiameter en is voor koude- en warmteleidingen in 2019 door RoyalHaskoningDHV als volgt vastgesteld:

Diameter	20	25	32	40	50	65	80	100	125	150	200
Formaat	DN20	DN25	DN32	DN40	DN50	DN65	DN80	DN100	DN125	DN150	DN200
Stroomsnelheid (m/s)	1,0	1,0	1,3	1,5	1,7	1,9	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0

Figuur 13 Toegestane stroomsnelheid in warmteleidingen

3.3.4.1 Variant 3a – Hogetemperatuur warmtenet

Voor een hogetemperatuurnetwerk is in dit onderzoek gekozen voor stalen warmteleidingen met isolatielaag. De maximaal transporteerbare vermogens per leidingdiameter voor een hogetemperatuurnetwerk zijn weergegeven in onderstaande figuur 14.

Buitendiameter DA (mm)	Binnendiameter DN (mm)	Materiaal	Maximaal vermogen (kW)
125	32	ST	77,4
125	40	ST	140
140	50	ST	251
160	65	ST	502
180	80	ST	795
225	100	ST	1464
250	125	ST	2301
280	150	ST	3765
355	200	ST	7112
400	250	ST	11086
450	300	ST	15688

Figuur 14 Maximaal transporteerbaar vermogen per standaarddiameter in HT-net

3.3.4.2 Variant 3b – Middentemperatuur warmtenet

Voor een middentemperatuurnetwerk is in dit onderzoek gekozen voor PE warmteleidingen voor kleine diameters en stalen warmteleidingen voor grotere diameters. De maximaal transporteerbare vermogens per leidingdiameter voor een middentemperatuurnetwerk zijn weergegeven in onderstaande figuur 15.

Buitendiameter DA (mm)	Binnendiameter DN (mm)	Materiaal	Maximaal vermogen (kW)
32	25	PE	21,7
40	32	PE	47,3
50	40	PE	86
63	50	PE	153
160	65	ST	307
180	80	ST	486
225	100	ST	895
250	125	ST	1406
280	150	ST	2301
355	200	ST	4346
400	250	ST	6775
450	300	ST	9587

Figuur 15 Maximaal transporteerbaar vermogen per standaarddiameter in MT-net.

3.3.5 Variant 4 – Lagetemperatuurnetwerk met opwaardering

In dit onderzoek zijn 2 mogelijke lagetemperatuurnetwerken met opwaardering behandeld. Nieuwbouwwoningen zijn goed te verwarmen met een lagetemperatuur netwerk, bestaande woningen vereisen een zeer grote omvang van een LT-netwerk en hebben hierop een aanvulling nodig om te voorzien in de vermogensvraag. In beide situaties wordt warmte voor het warmtenet aangevoerd vanuit een lokale bron.

De distributie van warmte middels een lagetemperatuurnetwerk geschiedt via dezelfde PE- en stalen warmteleidingen. Echter, door een klein temperatuurverschil is een grotere leidingdiameter benodigd. Dit principe is weergegeven in een figuur 12.

De maximaal transporteerbare vermogens per leidingdiameter voor een lagetemperatuurnetwerk zijn weergegeven in onderstaande figuur 16.

Buitendiameter DA (mm)	Binnendiameter DN (mm)	Materiaal	Maximaal vermogen (kW)
32	25	PE	13,8
40	32	PE	30,1
50	40	PE	54
63	50	PE	98
160	65	ST	195
180	80	ST	308
225	100	ST	569
250	125	ST	894
280	150	ST	1463
355	200	ST	2764
400	250	ST	4309
450	300	ST	6098

Figuur 16 Maximaal transporteerbaar vermogen per standaarddiameter in LT-net

3.3.5.1 Variant 4a – Lagetemperatuurnetwerk aangevuld met waterstof cv-ketel

Warmte wordt in elke woning aangeboden via een lagetemperatuurnetwerk. Het lagetemperatuurnetwerk levert een vermogen van 4 kW in elke woning. Dit is een vermogen waarmee moderne woningen met goede isolatiewaarde van voldoende warmte worden voorzien. Deze behoeven dan geen aanvulling met een waterstof cv-ketel. Alle woningen die een groter vermogen behoeven worden aangesloten op het waterstofgasnetwerk, waaruit zij een groter piekvermogen kunnen behalen. Het waterstofgas wordt aangeleverd met een PE-gasnetwerk zoals toegepast voor variant 1.

3.3.5.2 Variant 4b – Lagetemperatuurnetwerk aangevuld met warmtepomp

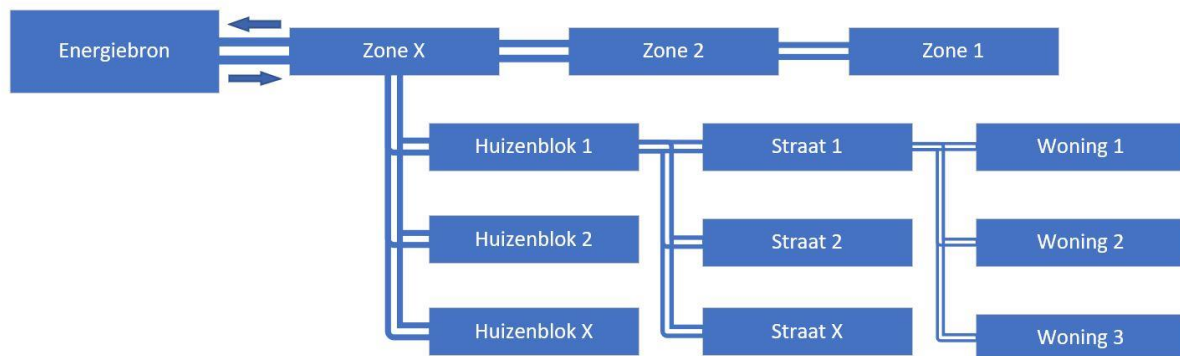
Warmte wordt in elke woning aangeboden via een lagetemperatuurnetwerk. In de woningen is een water-waterwarmtepompgeplaatst, welke een COP-waarde heeft van 5. Dit wil zeggen dat voor de warmteproductie 1/5 deel wordt voorzien vanuit het elektriciteitsnet en 4/5 deel wordt voorzien vanuit het warmtenet. Elektriciteit wordt voorzien middels een 3-fasen huisaansluiting zoals beschreven in hoofdstuk 3.3.1.

3.4 Systeemopbouw

In dit onderzoek is het distributiesysteem opgebouwd in een aantal gestandaardiseerde stappen. Op wijkniveau zijn de capaciteiten van de kabels- en leidingen afgestemd op een veelvoud van modules van 1, 30, 300 woningen.

1 woning is representatief voor een huisaansluiting, 30 woningen zijn representatief voor een straat, 300 woningen zijn representatief voor een huizenblok. De zoneaansluiting moet capaciteit bieden voor het totale aantal woningen in het gebied. Totstandkoming van deze aantallen is beschreven in hoofdstuk 4 van Bijlage III.

Op overkoepelend niveau is de backbone maatgevend. Deze voedt vanuit de energiebron de verschillende zones. Vanaf de bron zijn grote diameters benodigd om de energie van het gehele gebied te transporteren. Dit wordt de backbone genoemd en dient als hoofdverdeler naar de verschillende gebieden. Hoe groter de afstand tot de bron, hoe fijnmaziger het distributienetwerk wordt. Dit principe is weergegeven in onderstaande figuur 17.



Figuur 17 Principeschets systeemopbouw

3.4.1 Lengtedimensionering op wijkniveau

Om de lengtedimensionering op wijkniveau te kunnen bepalen zijn standaard lengten benodigd. Deze standaardlengtes zijn afhankelijk van de woningdichtheid. Door het CBS zijn een vijftal maten van stedelijkheid gedefinieerd, waarvan er in dit onderzoek een drietal relevant zijn. De mate van stedelijkheid in een gebied kan dus worden bepaald door de gebiedsoppervlakte te delen door het aantal woningen. Hoe groter de woningdichtheid, hoe kleiner de onderlinge afstand tussen deze woningen en hoe kleiner de benodigde kabel- en leidinglengten. Aan de mate van stedelijkheid zijn standaardlengtes gekoppeld, welke zijn weergegeven in onderstaande figuur 18. Door het CBS is vastgesteld wat de stedelijkheid is van woongebieden in Nederland. Op basis van door het CBS in een stedelijkheidsklasse geplaatste representatieve woongebieden is de standaardlengte vastgesteld.

Een onderbouwing en totstandkoming van de standaardlengtes is weergegeven in hoofdstuk 2.2.1 van bijlage IV.

Stedelijkheid	Aantal woningen per km ²	Standaardlengte 30 woningen (m)	Standaardlengte 300 woningen (m)
Matig stedelijk	1000 – 1500	206	446
Sterk stedelijk	1500 – 2500	140	415
Zeer sterk stedelijk	>2500	102	355

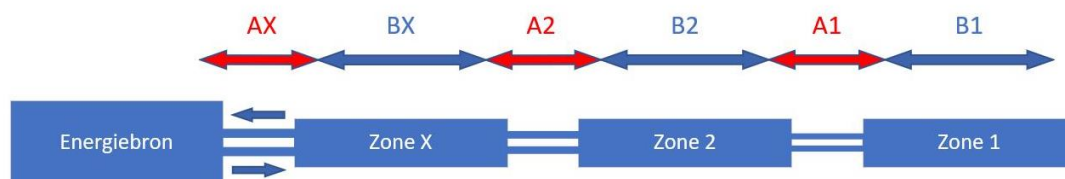
Figuur 18 Overzicht standaardlengtes

3.4.2 Lengtedimensionering op overkoepelend niveau

Op het overkoepelend niveau is de backbone maatgevend. Deze voedt vanuit de energiebron de verschillende zones. Vanaf de bron zijn grote diameters benodigd om de energie van het gehele gebied te transporteren. Hoe groter de afstand tot de bron, hoe fijnmaziger het distributienetwerk wordt. In onderstaande figuur 19 is dit principe weergegeven. Per zone is een afstand 'A' en een afstand 'B'. Deze dienen te voorzien in de capaciteitsvraag van het vermogen dat hierop is aangesloten. 'A1' en 'B1', zijn gedimensioneerd op het piekvermogen van zone 1. 'A2' en 'B2' dienen te voorzien in het piekvermogen van zowel zone 2 als zone 1. Voor iedere opvolgende zone geldt hetzelfde cumulatieve principe. De totstandkoming en uitgebreide onderbouwing is weergegeven in hoofdstuk 2.2.2 van bijlage IV.

Afstand 'A' is de aanvoerafstand. Dit is de afstand tussen de energiebron en de rand van de eerste aangeboorde zone of de onderlinge afstand tussen de verschillende zones. Als deze direct aan elkaar grenzen is deze afstand gelijk aan 0.

Afstand 'B' is de transportafstand en dient voor transport door de zone naar de verschillende aftakkingen en naar een volgende zone. In dit onderzoek is gesteld dat deze transportafstand gelijk is aan de diagonale afstand door het gebied.



Figuur 19 Principeschets aanvoer- en transportafstanden

4. Calculatie- & dimensioneringstool

In dit hoofdstuk leest u de totstandkoming en onderbouwing van de calculatie- en dimensioneringstool.

4.1 Werking van de tool

In deze paragraaf leest u hoe de calculatie- en dimensioneringstool is opgebouwd en hoe de tool tot een resultaat komt.

4.1.1 Bepaling systeemdimensies

De calculatie- en dimensioneringstool bepaalt op basis van de uitgangspunten van paragraaf 3.2 welke vermogens benodigd zijn. Dit doet de tool voor elke zone voor 1, 30, 300 en het totale aantal woningen in de desbetreffende zone.

De capaciteit van het systeem wordt gereduceerd wanneer er reeds een gasleiding of middenspanningskabels aanwezig zijn die hergebruikt worden. Als dat zo is wordt de traditionele spanning van 10kV en/of gasdruk van 8 bar aangehouden. De reeds aanwezige capaciteit kan in mindering worden gebracht op het gevraagde vermogen. Wanneer een systeem wordt ontworpen zonder hergebruik van bestaande capaciteit, kiest de tool voor een systeem op een spanning van 20kV en/of een gasdruk van 16 bar. Op basis van de bepaalde vermogens worden de leidingtype, diameters, doorsneden en aantallen bepaald.

Na bepaling van de benodigde capaciteiten worden de benodigde lengten bepaald. De tool bepaalt met behulp van het opgegeven aantal woningen en de grootte van het gebied wat de mate van stedelijkheid is en gebruikt deze om de juiste standaardlengtes toe te passen. De standaardlengte voor 30 en 300 woningen wordt dan vermenigvuldigd met het aantal keer dat deze benodigd is. In het geval van de standaardlengte voor 30 woningen is dit het totaal aantal woningen in een gebied maal de standaardlengte voor 30 woningen. Vervolgens wordt door de tool de capaciteit van de backbone bepaald volgens het principe in paragraaf 3.3.2.

Tenslotte bepaalt de tool de variant specifieke benodigdheden zoals het aantal benodigde compactstations en het aantal brandstofcellen.

4.1.2 Kostprijsberekening

De kostprijsberekening is opgebouwd in 5 categorieën:

- Materiaalkosten
- Montagekosten
- Realisatiekosten
- Omgevingskosten
- Aansluitkosten

4.1.2.1 Materiaal- en montagekosten

De materiaal- en montagekosten zijn afhankelijk van het kabel- of leidingtype en de diameter of doorsnede. Deze werkt volgens een vast tarief per strekkende meter. De compactstations en brandstofcellen hebben een gecombineerde prijs voor materiaal en montage.

Een overzicht van de door de calculatie- en dimensioneringstool toegepaste bedragen zijn opgenomen in hoofdstuk 3.1 van bijlage IV.

4.1.2.2 Realisatiekosten

De realisatiekosten zijn afhankelijk van sleufbreedte en hinderklasse. De gebruiker van de calculatie- en dimensioneringstool geeft de verwachte hinderklasse aan. De verwachte hinder is afhankelijk van de aanwezigheid van obstakels in de ondergrond zoals andere kabels en leidingen of boomwortels. Daarnaast is de overlast voor de omgeving ten gevolge van het afsluiten van verkeersaders van belang.

De tool bepaalt op basis van de gekozen kabel- en leidingconfiguratie welke sleufbreedte moet worden toegepast en selecteert daarna op basis van de sleufbreedte en hinderklasse de juiste kostprijs voor de realisatie. Een onderbouwing voor deze realisatiekosten en indicatoren voor de hinderklassen zijn opgenomen in hoofdstuk 3.2 van bijlage IV.

4.1.2.3 Omgevingskosten

Omgevingskosten zijn te verdelen in een tweetal factoren; kosten voor omgevingsmanagement en kosten voor verkeersmaatregelen. De omgevingsmanager houdt contact met de omgeving en haar stakeholders en zorgt voor tijdige communicatie. De prijs voor de omgevingsmanager is teruggerekend naar een kostprijs van €9,70 per strekkende meter tracé. Daarnaast zijn in de calculatie- en dimensioneringstool indicatieve kosten voor verkeersmaatregelen opgenomen op basis van de stedelijkheid van een gebied. Deze zijn weergegeven in onderstaande figuur 20. De totstandkoming van deze getallen is toegevoegd in hoofdstuk 3.3 van bijlage IV.

Stedelijkheid	Aantal woningen per km ²	Kosten (€/m)
Matig stedelijk	1000 – 1500	10,30
Sterk stedelijk	1500 – 2500	19,49
Zeer sterk stedelijk	>2500	28,67

Figuur 20 Indicatieve kosten voor verkeersmaatregelen

4.1.2.4 Aansluitkosten

De aansluitkosten voor een woning zijn afhankelijk van de te verwijderen, vernieuwen of aan te brengen energiedrager. Per variant is een vaste aanpassing of vernieuwing van de huisaansluiting benodigd. Een overzicht van de kosten per variant is weergegeven in onderstaande figuur 21. De totstandkoming van variantkosten kunt u terugvinden in hoofdstuk 3.4 van bijlage IV.

Energiedrager	Actie	Tarief (€/woning)	Variant 1	Variant 2	Variant 3	Variant 4a	Variant 4b
Elektriciteit	Vernieuwen	526,61	X	X	X	X	X
Gas	Vernieuwen	553,62	X			X	
Gas	Verwijderen	290,95		X	X		X
Warmte	Aanbrengen	2559,69		X	X	X	X
			€1080,23	€3377,25	€3377,25	€3639,92	€3377,25

Figuur 21 Totale aansluitkosten per woning per variant.

4.2 Toepassen van de calculatie- en dimensioneringstool

In deze paragraaf wordt ingegaan op de toepassing van de calculatie- en dimensioneringstool. Deze is opgesteld op basis van de in dit onderzoek vastgestelde parameters en automatiseert de dimensioneringsberekening. Daarnaast bepaalt de tool welke kosten verwacht kunnen worden. De calculatie- en dimensioneringstool is toegevoegd als bijlage V.

De gebruikersinterface van de tool bevindt zich in het eerste tabblad, de overige tabbladen zijn beveiligd. De gebruikersinterface kan na het invullen direct worden opgeslagen of uitgeprint op A4-formaat.

4.2.1 Invoeren parameters

De calculatie- en dimensioneringstool vraagt aan haar gebruiker om een aantal parameters in te vullen. In deze paragraaf volgt een beschrijving van de parameters, hoe deze te gebruiken en indien relevant de consequenties. Deze parameters in de tool zijn onderverdeeld in een viertal categorieën, namelijk;

- Algemene parameters
- Woning- & gebiedseigenschappen
- Aanvoerafstanden
- Reeds aanwezige kabel- & leidingcapaciteiten

4.2.1.1 Invoer - Algemeen

Wilt u de koudevraag dimensioneren?

Te beantwoorden met ja of nee. Indien ja, zorgt dit voor bijna alle varianten voor een toename van de elektriciteitsvraag en maakt een upgrade van het elektriciteitsnetwerk noodzakelijk. Enkel variant 3 behoeft geen verlichte upgrade van het elektriciteitsnet doordat deze koude krijgt aangeleverd middels een parallel liggend koudenet, 2 maal aanvoer en 2 maal retour, enerzijds voor koude, anderzijds voor warmte.

Wilt u elektrische auto's opladen?

Te beantwoorden met ja of nee. Indien ja, zorgt dit voor een uitbreiding van het elektriciteitsnetwerk zodat alle woningen gebruik kunnen maken van een piekvermogen van 24,15 kWp, horende bij een 3x35 ampère aansluiting.

Wilt u omgevingskosten berekenen?

Te beantwoorden met ja of nee. Indien ja, rekent de tool per strekkende systeemmeter een vaste prijs voor omgevingsmanagement en afhankelijk van het door de tool bepaalde stedelijkheid en sleufbreedte een factor per systeemdeel voor de toe te passen verkeersmaatregelen. Zie paragraaf 4.1.2.3.

Wilt u de huisaansluiting uitrekenen?

Te beantwoorden met ja of nee. Indien ja, rekent de tool per huisaansluiting een vaste prijs per variant. Zie paragraaf 4.1.2.4.

4.2.1.2 Invoer - woning- & gebiedseigenschappen

Gemiddelde woningoppervlakte

Voer een gemiddelde woningoppervlakte, in vierkante meters, in voor een typerende woning in het desbetreffende gebied in.

Gemiddelde isolatieklasse

Kies een isolatieklasse voor een typerende woning in het desbetreffende gebied in. Op basis van de isolatieklassen en het woningoppervlak bepaalt de tool de energievraag van de woning. Keuze uit I tot en met VI, zie paragraaf 2.1.1.

Gebiedsoppervlakte

Voer de oppervlakte in vierkante kilometers van het beoogde gebied in. Op basis van de gebiedsoppervlakte bepaalt de tool welke interne transportafstanden benodigd zijn.

Aantal woningen

Geef aan hoeveel woningen zich bevinden in het gebied. De tool bepaalt wat de woningdichtheid is en welke stedelijkheidsklasse op het gebied van toepassing is.

Hinderklasse

Voer een verwachte hinderklasse in voor obstakels die realisatie van de ondergrondse infrastructuur bemoeilijken. Keuze uit 'Weinig hinder', 'Hinder', en 'Veel hinder'. De tool stelt op basis van de hinderklasse in combinatie met de later te kiezen kabel- en leidingconfiguratie de realisatiekosten vast. Zie paragraaf 4.1.2.2.

4.2.1.3 Invoer - Aanvoerafstanden

Aanvoerafstand Hogetemperatuur

De afstand tussen de randen van de zones in meters ten behoeve van het dimensioneren van de hoofdtransportleiding (backbone). Wanneer deze direct aanliggend zijn is deze afstand gelijk aan 0. De aanvoerafstand van de laatste gebruikte zone is de afstand van de rand van het gebied tot aan de bron.

Aanvoerafstand Middentemperatuur

De aanvoerafstand voor middentemperatuur werkt identiek aan de afstand voor hogetemperatuur.

Aanvoerafstand Lagetemperatuur

De aanvoerafstand voor lagetemperatuur wijkt af omdat de lagetemperatuurbron zich lokaal in het gebied, of op korte afstand daarvan bevindt. De aanvoerafstand in elke zone is de afstand van de rand tot aan de lokale bron. Als de bron zich in het gebied bevindt is deze afstand gelijk aan 0.

Aanvoerafstand Waterstofgas

De aanvoerafstand voor waterstofgas werkt identiek aan de afstand voor hogetemperatuur.

Aanvoerafstand Elektriciteit

De aanvoerafstand voor elektriciteit werkt identiek aan de afstand voor hogetemperatuur.

4.2.1.4 Invoer – Reeds aanwezige capaciteit

Gas – gebiedsniveau

Voer in welke diameters gasleiding en hoeveel voor de gebiedsaanvoer worden toegepast. Wanneer deze volledig worden vervangen is deze waarde gelijk aan 0. Bij een waarde van 0 voor alle bestaande gasleidingen zal het systeem worden ontworpen op 16 bar, in plaats van de traditionele 8 bar. Zie paragraaf 3.3.2.

Gas – wijkniveau

Voer in welke diameters gasleiding op straatniveau aanwezig zijn voor 30 en 300 woningen. Wanneer deze volledig worden vervangen is deze waarde gelijk aan 0.

Elektriciteit – gebiedsniveau

Voer in hoeveel en welke kabeldoorsneden op dit moment het gebied binnen komen. Wanneer deze volledig worden vervangen is deze waarde gelijk aan 0. Bij een waarde van 0 voor de bestaande elektriciteitskabels wordt een spanning van 20 kV toegepast, in plaats van 10 kV. Zie paragraaf 3.3.1.

4.2.2 Uitvoer

Nadat de gebruiker de verschillende parameters heeft ingevuld wordt de uitvoer weergegeven. Allereerst een kostenoverzicht op basis van de door de calculatie- en dimensioneringstool gedimensioneerde varianten. De tool maakt hierin onderscheid tussen de variantspecifieke kosten en de kosten die benodigd zijn voor de opwaardering van het elektriciteitsnetwerk. Een som van deze bedragen is de totale kostprijs van het betreffende energiedistributiesysteem. Een voorbeeld van de uitvoer van de calculatie- en dimensioneringstool ziet u in onderstaande figuur 22.

Het is aan te raden om het elektriciteitsnet ten alle tijden op te waarderen. Immers wordt er bij de realisatie van een nieuw warmte- of koudesysteem toch al gegraven. Het elektriciteitsnetwerk opwaarderen zorgt dat deze klaar is voor de toekomst. Dit is een meekoppelkans.

De realisatie van een opwaardering van het elektriciteitsnetwerk is kostbaar en er kan daarom worden besloten door de opdrachtgever om niet op te waarderen. De tool geeft op basis van de ingevulde parameters aan in welke gevallen het noodzakelijk is voor de werking van het systeem om het elektriciteitsnetwerk op te waarderen.

Variant	Variantspecifieke kosten	Kosten elektriciteitsnet	Systeemkosten
1 - Cv-ketel op waterstof	€ 9.332.782,05	€ 31.280.690,44	€ 40.613.472,50
2 - Brandstofcel in de wijk	€ 783.998.286,32	€ 31.280.690,44	€ 815.278.976,77
3 - HT - Hogetemperatuurnetwerk	€ 21.794.762,63	€ 31.280.690,44	€ 53.075.453,07
3 - MT - Middentemperatuurnetwerk	€ 24.376.250,55	€ 31.280.690,44	€ 55.656.940,99
4a - Lagetemperatuurnet+waterstof	€ 43.206.843,82	€ 31.280.690,44	€ 74.487.534,26
4b - Lagetemperatuurnet+elektriciteit	€ 63.425.063,45	€ 31.280.690,44	€ 94.705.753,90

Figuur 22 Voorbeeld output – Systeemkosten

Vervolgens wordt de variantspecifieke uitvoer weergegeven. Voor elke variant is door de calculatie- en dimensioneringstool bepaald welke kabel- en leidingconfiguraties benodigd zijn op straat-, blok- en gebiedsniveau, voor iedere individuele zone. Als bestaande infra wordt hergebruikt, brengt de tool dat vermogen in mindering op de dimensionering van het aan te brengen systeem. Ook bepaalt de tool op basis van de ingevoerde parameters de woningdichtheid en de benodigde kabel- en leidinglengten in het gebied op basis van de vastgestelde standaardlengtes uit hoofdstuk 3.4. Een voorbeeld van deze output is weergegeven in onderstaande figuur 23.

		Systeemdruk in bar	16
Zone 1	Totaal benodigde lengte (m)	DA diameter (mm)	Aantal
30 woningen	13362	32	1
300 woningen	4970	63	1
Transportleiding	1414	200	1
Aanvoerleiding	1	200	1

Figuur 23 Voorbeeld output: dimensionering

Vervolgens bepaalt de tool op basis van de vastgestelde configuraties de bijbehorende kostenfactoren. De materiaal- en montagekosten worden op een interne lijst door de tool opgezocht. De realisatiekosten zijn worden door de tool vastgesteld op basis van de sleufbreedte en de door de gebruiker opgegeven hinderklasse.

Zone 1	Materiaalkosten (€/m)	Montagekosten (€/m)	Realisatiekosten (€/m)
30 woningen	€ 1,00	€ 6,00	€ 33,50
300 woningen	€ 3,33	€ 9,00	€ 33,50
Transportleiding	€ 30,00	€ 32,00	€ 33,50
Aanvoerleiding	€ 30,00	€ 32,00	€ 33,50

Figuur 24 Voorbeeld output: Bepaling materiaal-, montage- en realisatiekosten

Daarnaast bepaalt de tool, indien gewenst door de gebruiker, de indicatieve kosten voor het omgevingsmanagement en de indicatieve kosten voor het realiseren van huisaansluitingen.

Ten slotte weergeeft de tool de kostenindicatie per zone en de totale kostenindicatie voor de realisatie van het gehele systeem.

	Kosten omgevingsmanagement (€/m)	Kosten huisaansluitingen (€/woning)	Totaalkosten per zone
Zone 1	€ 38,37	€ 1.080,23	€ 5.891.986,83
Zone 2	€ 29,19	€ 1.080,23	€ 17.088.974,71
Zone 3	€ 20,00	€ 1.080,23	€ 23.327.518,57
Zone 4	#N/B	€ 1.080,23	-
Zone 5	#N/B	€ 1.080,23	-
		Totale systeemkosten	€ 46.308.480,11

Figuur 25 Voorbeeld output: Kostenindicatie

4.3 Validatie

In deze paragraaf leest u de validatie van de calculatie- en dimensioneringstool.

Eerst is de werking van de calculatie- en dimensioneringstool getoetst op werking door karakteristieken van casussen in te voeren en de gegenereerde resultaten te analyseren. Tenslotte zijn toekomstige ontwikkelingen met betrekking tot waterstof geanalyseerd. De volledige validatie is toegevoegd als bijlage VI.

4.3.1 Validatie van de werking

In paragraaf 3.3 en bijbehorende bijlage III van dit onderzoek zijn de kabel- en leidingdiameters vastgesteld. In paragraaf 3.4 zijn de systeemdimensies en kabel- en leidinglengten vastgesteld. De calculatie- en dimensioneringstool genereert een kabel- en leidingconfiguratie en bepaalt de benodigde systeemplengtes.

In bijlage III is een modelstad opgesteld op basis van karakteristieken van woongebieden in de stad 's-Hertogenbosch. Hiertoe is handmatig de kabel- en leidingconfiguratie bepaald. In de calculatie- en dimensioneringstool is deze dimensionering geautomatiseerd. De handmatige dimensionering in bijlage III komt bij invoer van dezelfde karakteristieken overeen met de door de tool gegenereerde diameters, doorsneden en lengten. De automatisering van de dimensioneringsberekening is geslaagd.

Tijdens de validatie is geconcludeerd dat variant 2, ten gevolge van de aanschaf van brandstofcellen zeer kostbaar is. Toekomstige prijsdalingen ten gevolge van technologieontwikkelingen zijn essentieel om deze variant financieel te laten concurreren met de overige varianten. De keuze voor een hoge- of middentemperatuur warmtenetwerk is sterk afhankelijk van de beschikbaarheid van een potentiële bron. De hybride varianten, 4a & 4b, combineren een laagtemperatuurnetwerk met een naverwarming door waterstof of met behulp van warmtepompen. Door gebruik te maken van lokale temperatuurbronnen blijven de systeemdimensies beperkt en blijven de systeemkosten laag ten opzichte van andere varianten. Variant 4a maakt voor de toelevering van waterstofgas gebruik van het bestaande aardgasnetwerk. De bestaande waarde van het aardgasnetwerk wordt daardoor behouden.

De tool toont aan dat door het hergebruik van bestaande gasleidingen en elektriciteitskabels, de systeemkosten significant kunnen worden verlaagd. Daarnaast valt op dat zowel de levering van de koudevraag via het elektriciteitsnetwerk als de vraag naar opladen van elektrische auto's een grote toename van de netwerkcapaciteit vereist.

Naast de dimensioneringsberekening dient de kostprijsbepaling te worden geverifieerd. Met behulp van een bedrijfscasus zijn de door de tool gegenereerde leidingdiameters en kostprijs vergeleken met de praktijk. Deze komen overeen waardoor kan worden verondersteld dat de kostprijsbepaling een reële kostenindicatie geeft.

4.3.2 Validatie door toepassing

Om de werking van de tool op grote schaal te valideren is een fictieve praktijkcasus behandeld. Een uitgebreide onderbouwing van de toepassing kunt u lezen in hoofdstuk 4 van bijlage VI.

In september 2020 schreef Bart van Zoelen een artikel in het Parool getiteld: "Heel Amsterdam aardgasvrij krijgen kost 14 miljard euro." In dit artikel wordt de ambitie van de gemeente Amsterdam benoemd van een gasloze gemeente in 2040. De totale begrote kosten voor isolatie en installatie van energiezuinige verwarming is 14 miljard euro meer dan de opbrengsten. Het is opvallend dat waterstof in het artikel geen enkele keer wordt benoemd als alternatief omdat dit een groot potentieel betreft. In Nederland ligt de focus momenteel op installatie van warmtepompen en warmtenetten, terwijl het bestaande aardgasnetwerk zeer van waarde is en een sleutelrol kan spelen in de energietransitie.

De praktijkcasus richt zich het stadsdeel van de stad Amsterdam 'Nooderhof.' Het bevat circa 25.000 hoofdzakelijk jaren 70 woningen in een zeer sterk stedelijke omgeving en ligt direct tegen een industriegebied aan waar warmte, gas en elektriciteit verkrijgbaar zijn.

De output toont aan dat variant 1, het gebruik van cv-ketels op waterstof, een financieel zeer gunstige optie is. Bij het behoud van de netwerkwaarde door hergebruik van het bestaande aardgasnetwerk neemt deze financiële aantrekkelijkheid toe. De toepassing van waterstof voor ruimteverwarming in dit gebied is zeer aantrekkelijk.

Wanneer de uitkomsten van dit specifieke stadsdeel worden vertaald naar de gehele stad Amsterdam kan worden verondersteld dat de gemeente Amsterdam circa 7,5 miljard euro kan besparen door huizen te verwarmen met behulp van waterstof en het bestaande gasnetwerk toe te passen voor transport van waterstof.

Het potentieel van waterstof voor het bestaande stedelijke gebied in Nederland is dus zeer groot.

4.3.3 Validatie met extremen

In deze paragraaf worden met behulp van het de calculatie- en dimensioneringstool een aantal interessante casussen beantwoord.

4.3.3.1 *Kostprijs brandstofcel*

Variant 2 is momenteel een zeer kostbare variant ten gevolge van de hoge aanschafprijs van brandstofcellen. De huidige kostprijs van een brandstofcel van 2 MW is 3 miljoen euro. Om deze variant financieel concurrerend te maken met de overige varianten zal de kostprijs van een brandstofcel moeten dalen of de productiecapaciteit moeten toenemen. De brandstofcellen zijn concurrerend wanneer deze dalen tot 1/15 deel van de oorspronkelijke prijs, naar een kostprijs van €200.000,-.

4.3.3.2 *Belang van isolatie*

In paragraaf 5.2 van bijlage VI is weergegeven wat het belang is van isolatie. In het onderzoek is de verbetering van woningisolatie niet meegenomen. Het belang van goede isolatie kan wel met de calculatie- en dimensioneringstool worden onderbouwd. In het geval van het verbeteren van de isolatieklasse van alle woningen de modelstad met een niveau dan leidt dit tot een beperkte verkleining in de dimensionering. Echter, is dit wel interessant voor de operationele kosten van het netwerk. Wanneer de isolatie verbetert, is er minder energie benodigd om de woning op de gevraagde temperatuur te houden. Dit leidt tot een lager totaalverbruik en vraagt minder capaciteit van de bron van het netwerk.

Het isoleren van woningen voorafgaande aan de realisatie van een energiedistributiesysteem leidt tot kleinere kabel- en leidingdimensies. Isolatie is essentieel voor het drukken van de operationele kosten.

4.3.3.3 *Als geld geen rol zou spelen*

Wanneer geld geen rol zou spelen, is een hybride-lagetemperatuurnetwerk de beste oplossing. Een lagetemperatuurnetwerk volstaat voor woningen met een goede isolatiewaarde. De aanvoer van een lagetemperatuurnetwerk vindt plaats vanuit een lokale bron. Enkel woningen die een grotere vraag naar warmte hebben kunnen via het bestaande aardgasnetwerk gebruikmaken van waterstofgas en deze gebruiken als booster.

Kijkende naar de verwachte dalende prijzen voor groene waterstof wordt enerzijds het lagetemperatuurnetwerk gevoed met restwarmte, anderzijds boosters met waterstof. Deze waterstof wordt geproduceerd door duurzame energiebronnen, wanneer de zon schijnt of wanneer het waait. Door de elektrische energie om te zetten naar waterstof en deze op te slaan tot het moment van gebruik fungeert dit als een buffer. Zie paragraaf 4.3.4.

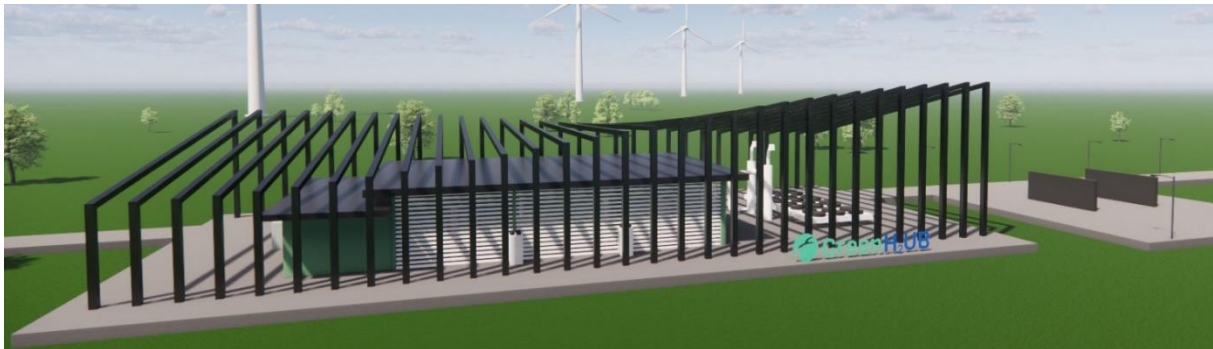
Wanneer elektriciteit moet worden opgeslagen zijn kolossale accucapaciteiten benodigd. Dit is enerzijds zeer inefficiënt, anderzijds zijn de materialen voor deze accu's in dergelijke oplagen niet verkrijgbaar en worden deze gewonnen onder slechte omstandigheden in derdewereldlanden. (Berg, 2019)

4.3.4 Toekomstige ontwikkelingen

Om tot een daadwerkelijke toepassing van waterstof te komen dient de wetgeving aangepast te worden. Netbeheerders zien waterstofgas als een serieus alternatief voor aardgas. Echter is het wettelijk nog niet toegestaan om de bestaande aardgasinfrastructuur te gebruiken voor het transport van waterstofgas. De netbeheerders moedigen de Nederlandse overheid aan om haast te maken en de wetgeving aan te passen. (Lammers, 2021)

Daarnaast is het in het kader van de CO²-reductie van belang dat waterstof op een duurzame en CO²-vrije wijze wordt geproduceerd. Oorspronkelijk wordt waterstof gewonnen op basis van aardgas, waarbij tijdens het productieproces CO² vrijkomt. Onder duurzame waterstofproductie wordt de productie van groene waterstof verstaan. Hierin worden elektriciteit en water omgezet in waterstof en zuurstof. Bij voorkeur wordt duurzame energie gebruikt van wind- of zonneparken, waar de elektrische energie direct kan worden omgezet in waterstof in een waterstoffabriek. Een voorbeeld van een lokale waterstoffabriek is weergegeven in onderstaande figuur 26. De energie wordt niet opgeslagen in grote accu's maar in de vorm van waterstofgas en kan vervolgens worden getransporteerd via het landelijke gasnetwerk. Er kan worden geconcludeerd dat het transportnetwerk al grotendeels aanwezig is in de vorm van het huidige aardgasnetwerk.

Ten gevolge van grootschalige groene waterstofproductie zal de kostprijs voor de eindgebruiker dalen naar een prijsniveau vergelijkbaar met aardgas.



Figuur 26 Concept van een waterstoffabriek (GreenH2UB, 2021)

5. Conclusie

In het onderzoek is gezocht naar een antwoord op de vraag:

Wat is het energiedistributiesysteem voor duurzame energie dat Watt-Infra in het bestaande stedelijke gebied moet aanbevelen aan haar opdrachtgevers?

Hiervoor is een kwalitatief onderzoek uitgevoerd naar distributienetwerken voor duurzame energie in de bestaande stedelijke omgeving.

5.1 Primaire conclusie

Aan de hand van literatuuronderzoek werd de energievraag en de bijhorende parameters vastgesteld. Hieruit is gebleken dat in de komende jaren de koude- en elektriciteitsvraag zal toenemen en de warmtevraag zal afnemen. Op basis van de in het klimaatakkoord genoemde energiedragers is gebleken dat er een vijftal kansrijke varianten zijn:

- Behouden van het aardgasnetwerk en gebruiken voor waterstof Cv-ketels
- Waterstof gevoede brandstofcel op wijkniveau.
- Realisatie van een hoge- of middentemperatuur-warmtenet.
- Realisatie van een lagetemperatuur warmtenet met naverwarming door waterstof.
- Realisatie van een lagetemperatuur warmtenet met naverwarming door een warmtepomp.

Voor elk van deze variant werden de materiaaleigenschappen verzameld en werd de systeemopbouw gedefinieerd. Vervolgens werden capaciteits- en lengtedimensionering gedefinieerd, waarna de methode van kostenprijsberekening werd bepaald. De dimensionerings- en calculatieberekening werden vervolgens geautomatiseerd in een 'Calculatie- en Dimensioneringstool.' Watt-Infra gaat deze tool gebruiken om een advies over duurzame energiedistributienetwerken uit te brengen aan haar opdrachtgevers. Het toepassen van de tool leidde tot een antwoord op de hoofdvraag:

Het netwerk van de toekomst draait op waterstof, eventueel aangevuld met restwarmte die wordt gedistribueerd met een warmtenetwerk. Een hybride-lagetemperatuurnetwerk is de beste oplossing.

Het waterstofgas-netwerk is al aanwezig in de vorm van het huidige aardgasnetwerk. Het verwijderen en niet hergebruiken is kapitaalvernietiging. In het bestaande stedelijke gebied ligt een miljardenpotentieel door het hergebruik van het bestaande gasnetwerk. Daarnaast biedt waterstof de mogelijkheid om energie op een duurzame wijze te bewaren.

Isolatie is essentieel voor het drukken en operationele kosten. Het opwaarderen van het elektriciteitsnetwerk is een zeer kostbare operatie. Toepassing van waterstof-brandstofcellen is momenteel niet rendabel. Bij een daling in prijs van tenminste 1500% is de prijs concurrerend met de overige varianten. De keuze voor een midden- of hogetemperatuurnetwerk is sterk afhankelijk van de beschikbaarheid van een potentiële bron en de kwaliteit van de isolatie van woningen in het beoogde gebied.

5.2 Secundaire conclusie

In de secundaire conclusie is invulling gegeven aan de maatschappelijke ontwikkeling, op basis van de uitgangspunten van de Sustainable Development Goals zoals eerder benoemd in de secundaire doelstelling.

7 – Betaalbare en duurzame energie

De doelstelling ten aanzien van Sustainable Development Goal 7 is als volgt gedefinieerd:

Het doel is om met dit onderzoek een stap te zetten in de ontwikkeling van de distributie van duurzame vormen van energie. De westerse wereld heeft de mogelijkheid om deze technologie te ontwikkelen en door deze kennis met de wereld te delen, wordt bijgedragen aan ontwikkeling van moderne en duurzame energie in ontwikkelingslanden.



Met dit onderzoek is kennis verzameld over duurzame energienetwerken en de toepassing daarvan in het bestaande stedelijke gebied. De conclusie van dit onderzoek is dat waterstof een sleutelrol moet gaan spelen in de energietransitie. Dit leidt hopelijk tot een collectief inzicht dat waterstof de energiedrager van de toekomst is. Wanneer dit besef leidt tot of bijdraagt aan een waterstofrevolutie dan zullen hierin (technische) ontwikkelingen worden doorgemaakt. Dit resulteert in kennis en knowhow over productie, transport en gebruik duurzame energie in de vorm van waterstof.

Als in onze maatschappij een sprong wordt gemaakt in technologische ontwikkeling ten aanzien van duurzame energie, kunnen wij onze kennis en knowhow delen met de rest van de wereld. Daardoor kunnen ook ontwikkelingslanden worden voorzien van betaalbare duurzame energie. Voor een aantal ontwikkelingslanden zou dit zelfs een ontwikkelkans zijn, waarin op grote schaal energie wordt gewonnen in wind- of zonneparken, welke wordt omgezet in waterstof. Deze installaties zijn goed voor de werkgelegenheid en de welvaart in deze gebieden. Deze landen hebben de potentie om de batterij van de wereld kunnen worden.

13 – Klimaatactie

De doelstelling ten aanzien van Sustainable Development Goal 13 is als volgt gedefinieerd:

Het doel is om met dit onderzoek bij te dragen aan het behalen van de klimaatdoelstellingen zoals gesteld in het klimaatakkoord en de verdere opwarming van de aarde te beperken tot 2 graden. Door de energietransitie naar duurzame en hernieuwbare energie, snel en voorspoedig te laten verlopen, ontstaat een forse vermindering in broeikasgassen.



Met dit onderzoek is aangetoond dat waterstof een enorm potentieel heeft en dat het bestaande aardgasnetwerk kan worden hergebruikt voor het transport van waterstof. Door het gebruik van waterstof als energiedrager kan Nederland op relatief eenvoudige manier overstappen op een duurzame vorm van energie. Het zou aangenaam zijn als waterstof, ten gevolge van dit onderzoek, als een serieus alternatief zou worden gezien. Dit zal de energietransitie bespoedigen, doordat waterstof relatief eenvoudige te implementeren is.

Met behulp van waterstof kan Nederland sneller haar klimaatdoelen behalen, zodat de CO²-uitstoot wordt gereduceerd. Daarnaast kunnen we, door grootschalig in te zetten op waterstof, een toonaangevend land worden in de energietransitie.

6. Aanbevelingen

In dit hoofdstuk leest u de aanbevelingen naar aanleiding van het onderzoek.

6.1 Algemeen aanbeveling

Waterstof heeft een grote financiële- en verduurzamingpotentie. Het is belangrijk dat hier meer onderzoek naar uitgevoerd wordt en dat dit op de politieke agenda komt. Waterstof speelt een sleutelrol in transitie naar duurzame energie. Waterstof moet worden gebruikt om duurzaam gewonnen energie op een duurzame wijze op te slaan.

Het isoleren van woningen is een Quick win en bespaart energie, zowel bij verwarmen als koelen. Ongeacht de huidige energiebron van de woning is isolatie essentieel. Ook bij een warmtebron in de vorm van aardgas, leidt isolatie direct tot minder energieverbruik en indirect tot minder uitstoot van CO².

6.2 Aanbeveling voor Watt-Infra

Neem een adviserende rol aan en stimuleer opdrachtgevers om in een breder perspectief te kijken. De tendens in Nederland is het loskoppelen van woningen van het aardgasnetwerk en de woningen volledig elektrisch te verwarmen. Dit is kapitaalvernietiging, aangezien de capaciteit van het elektriciteitsnetwerk buitensporig moet worden vergroot, terwijl het aardgasnetwerk vrijwel volledig geschikt is voor transport van waterstof.

6.3 Aanbevelingen voor gemeenten en andere overheidsinstellingen

Bekijk de energietransitie vanuit het overkoepelend niveau. In Nederland ligt de focus op het aardgasvrij maken van woningen door deze aan te sluiten op een warmtenet, of volledig elektrisch te verwarmen. Dit zijn lokale oplossingen, waardoor de overkoepelende verduurzamingsvisie verloren lijkt te gaan. Het verduurzamen moet de overkoepelende doelstelling zijn, niet het loskoppelen van het aardgasnetwerk.

6.4 Aanbevelingen voor andere afstudeerders

Andere studenten die gaan afstuderen zou ik willen adviseren om een van deze onderwerpen te kiezen:

- Kansen en bedreigingen van een waterstof/lagetemperatuur-hybride-netwerk
- Toepassing en kansen van waterstof in het landelijk gebied
- Potentie van waterstof in ontwikkelingslanden
- Veiligheid en gebruik van waterstof in of rondom een woning
- Omgevingsmanagement bij een grootschalige overstap op een duurzaam energienetwerk
- Het gebruik en continuïteit van lokale lagetemperatuur-bronnen
- De aanpassingen die benodigd zijn om een slecht geïsoleerde woning geschikt te maken voor een lagetemperatuurnetwerk

Literatuurlijst

Achterhuis, E. (2021). *H2 transport per pijpleiding*.
Geraadpleegd op 26 maart 2021.

Afman, M. & Rooijers, F. (2017). *Net voor de Toekomst*.
Geraadpleegd op 5 maart 2021, van
<https://www.ce.nl/publicaties/2030/net-voor-de-toekomst>

Allecijfers. (2020). *Informatie stad Amsterdam*.
Geraadpleegd op 8 juni 2021, van
<https://allecijfers.nl/gemeente-overzicht/amsterdam/>

Allecijfers. (2020). *Informatie buurt Binnenstad Centrum*.
Geraadpleegd op 23 maart 2021, van
<https://allecijfers.nl/buurt/binnenstad-centrum-den-bosch/>

Allecijfers. (2020). *Informatie buurt Deutenen*.
Geraadpleegd op 23 maart 2021, van
<https://allecijfers.nl/buurt/deutenen-den-bosch/>

Allecijfers. (2020). *Informatie buurt Maaspoort*.
Geraadpleegd op 23 maart 2021, van
<https://allecijfers.nl/wijk/maaspoort-den-bosch/>

Allego B.V. (z.d.). *Laadoplossingen, Normaal laden*.
Geraadpleegd op 23 mei 2021, van
<https://www.allego.eu/nl-nl/zakelijk/normaal-laden#>

ANWB. (z.d.). *Wat kost het opladen van een elektrische auto?*
Geraadpleegd op 12 maart 2021, van
<https://www.anwb.nl/auto/elektrisch-rijden/wat-kost-het-opladen-van-een-elektrische-auto>

Autoriteit Consument & Markt. (2021). *Wat mag ik vragen voor het leveren van warmte?*
Geraadpleegd op 31 mei 2021, van
<https://www.acm.nl/nl/warmtetarieven>

Belastingdienst. (2021). *Tabellen tarieven milieubelastingen*.
Geraadpleegd op 9 juni 2021, van
https://www.belastingdienst.nl/wps/wcm/connect/bldcontentnl/belastingdienst/zakelijk/overige_belastingen/belastingen_op_milieugrondslag/tarieven_milieubelastingen/tabellen_tarieven_milieubelastingen

Berg, I. (2019). *Congo betaalt de prijs voor onze accu*.
Geraadpleegd op 12 juni 2021, van
<https://www.parool.nl/nieuws/congo-betaalt-de-prijs-voor-onze-accu~be1184fa/>

Bouwbedrijf Theo Vertelman. (z.d.). *Afbeelding: Compactstation*
Geraadpleegd op 17 mei 2021, van
<http://bouwbedrijf-theovertelman.nl/projecten/trafo-stations-liander>

Bouwend Nederland. (2020). *Afbeelding: Zonder ondergrond geen bovengrond.*

Geraadpleegd op 2 juni 2021, van

<https://www.bouwendnederland.nl/actueel/nieuws/13320/zonder-ondergrond-geen-bovengrond>

Brouwens, R. & de Groot, P. & Kranendonk, W. (2013). Binas: Soortelijke warmte

Geraadpleegd op 2 april 2021.

Centraal Bureau Statistiek. (2019). *Energieverbruik door huishoudens.*

Geraadpleegd op 25 februari 2021, van

<https://www.clo.nl/indicatoren/nl0035-energieverbruik-door-de-huishoudens>

Centraal Bureau Statistiek. (2019). *Energieverbruik particuliere woningen; woningtype en regio's.*

Geraadpleegd op 25 februari 2021, van

<https://www.cbs.nl/nl-nl/cijfers/detail/81528NED?q=amsterdam>

Centraal Bureau Statistiek. (2018). *Energieverbruik van particuliere huishoudens.*

Geraadpleegd op 1 maart 2021, van

<https://www.cbs.nl/nl-nl/achtergrond/2018/14/energieverbruik-van-particuliere-huishoudens>

Centraal Bureau Statistiek. (2020). *Hoeveel personenauto's zijn er in Nederland?*

Geraadpleegd op 12 maart 2021, van

<https://www.cbs.nl/nl-nl/visualisaties/verkeer-en-vervoer/vervoermiddelen-en-infrastructuur/personenautos>

Centraal Bureau Statistiek. (2020). *Kerncijfers wijken en buurten 2020.*

Geraadpleegd op 12 mei 2021, van

<https://www.cbs.nl/nl-nl/maatwerk/2020/29/kerncijfers-wijken-en-buurten-2020>

Centraal Bureau Statistiek. (2016). *Veel auto's in grote steden ondanks laag autobezit.*

Geraadpleegd op 12 maart 2021, van

<https://www.cbs.nl/nl-nl/nieuws/2016/49/veel-auto-s-in-grote-steden-ondanks-laag-autobezit>

Centraal Bureau Statistiek. (2016). *Woon-werkafstanden 2016.*

Geraadpleegd op 12 maart 2021, van

<https://www.cbs.nl/nl-nl/achtergrond/2018/11/woon-werkafstanden-2016>

Convertlive. (z.d.). *Megajoules naar Kilowattuur.*

Geraadpleegd op 29 maart 2021, van

<https://convertlive.com/nl/u/converteren/megajoules/naar/kilowattuur>

Corèl, A. & Kleiwegt, E. & Roos, J. (2017). *Wegwijs in warmte.*

Geraadpleegd op 11 maart 2021.

D-Cision B.V. & Ecorys B.V. (2019), *Verkenning naar de mogelijkheden van flexibilisering van nettarieven.*

Geraadpleegd op 22 maart 2021, van

<https://www.acm.nl/sites/default/files/documents/2019-11/d-cision-ecorys-flexibilisering-nettarieven-23-mei-2019.pdf>

Dagblad van het Noorden. (2020). *Afbeelding: 'Deel binnenstad Groningen zonder water.'*

Geraadpleegd op 25 mei 2021, van

<https://www.dvhn.nl/groningen/stad/Deel-binnenstad-Groningen-zonder-water-25667396.html>

DaytonEasySoft. (z.d.). *TD-Calc II, versie 2.03*.
Geraadpleegd op 25 maart 2021.

De Energieconsultant B.V.. (z.d.) *Omrekening van m3 (n) naar kWh*.
Geraadpleegd op 3 maart 2021, van
<https://www.energieconsultant.nl/energiemarkt/energie-berekeningen-uit-de-praktijk/omrekening-van-m3-n-naar-kwh/>

De Graaff. (2019). *Warmtevraag en verwarmingsvermogen bij elektrische verwarming*.
Geraadpleegd op 18 maart 2021, van
<https://www.gawalo.nl/klimaattechniek/artikel/2019/05/warmtevraag-en-verwarmingsvermogen-bij-elektrische-verwarming-1017347>

De Ruijscher, L. (2006). *Brandstofcel in Woning- en Utiliteitsbouw*.
Geraadpleegd op 10 maart 2021.

DR Engineering. (2017). Voorbeeldberekening van een gasleidingberekening - DR Engineering.
Geraadpleegd op 30 maart 2021, van
<https://www.dr-engineering.nl/wp-content/uploads/voorbeeld-gasleidingberekening.pdf>

Dyka. (z.d.). *PE-100 buis t.b.v. gas*.
Geraadpleegd op 12 mei 2021, van
<https://www.dyka.nl/drukleidingsystemen/pe-drukleidingsystemen/pe-buizen-t-b-v-gastoepassing/pe-100-buis-t-b-v-gas-sdr-17-6-pn6.html?#185=1459&206=1520>

Dyka. (z.d.). *PE-100 buis SDR 11*.
Geraadpleegd op 10 mei 2021, van
<https://www.dyka.nl/drukleidingsystemen/pe-drukleidingsystemen/pe-buizen-t-b-v-riooltoepassing/pe-100-buis-t-b-v-riool-sdr-11-pn16.html?#185=1424&206=1520>

Energieling. (2020). *Warmtenetten: verhoog je kansen met temperatuurverlaging*.
Geraadpleegd op 10 maart 2021, van
<https://energieling.stroomversnelling.nl/warmtenetten/warmtenetten-temperatuurverlaging/>

Engelsman, M. (z.d.) *Hoe geen energie te verspillen aan 5G*.
Geraadpleegd op 15 maart 2021, van
<https://www.tudelft.nl/ewi/actueel/nodes/hoe-geen-energie-te-verspillen-aan-5g>

GasUnie. (2018). *Verkenning 2050*.
Geraadpleegd op 4 maart 2021.

Gemeente Geertruidenberg. (2017). *Handboek Kabels & Leidingen Gemeente Geertruidenberg*.
Geraadpleegd op 25 maart 2021, van
<https://decentrale.regelgeving.overheid.nl/cvdr/XHTMLoutput/Actueel/Geertruidenberg/CVDR471303.html>

Greenh2ub Development B.V. (2021). *GREENH2UB CONCEPT*
Geraadpleegd op 12 juni 2021, van
<https://greenh2ub.nl/>

H2Platform. (2020). *Kostenaspecten van waterstof*.

Geraadpleegd op 12 juni 2021, van

<https://opwegmetwaterstof.nl/kostenaspecten-van-waterstof/>

Hammingh, P. & Hekkenberg, M. & Schoots, K. (2017). *Nationale Energieverkenning 2017*.

Geraadpleegd op 1 maart 2021, van

<https://publicaties.ecn.nl/ECN-O--17-018>

Hendriksma, M. (2020). *Mogelijke bom onder warmtenetten*.

Geraadpleegd op 11 maart 2021, van

<https://www.binnenlandsbestuur.nl/ruimte-en-milieu/nieuws/mogelijke-bom-onder-warmtenetten.13507370.lynkx>

Hermkens, R. & Jansma, S. & Van der Laan, M. & De Laat, H. & Pilzer, B. & Pulles, K. (2018). *Toekomstbestendige gasdistributienetten*.

Geraadpleegd op 4 maart 2021.

Hoeksma, L. & Horlings, E. & Pieters, A. & van der Ven, K. (2020). *SDG's in the Netherlands*.

Geraadpleegd op 25 mei 2021.

Hoograad, W. (2004). *Op weg met Waterstof*.

Geraadpleegd op 26 maart 2021, van

<https://www.ce.nl/publicaties/download/2>

Isoplus. (2021). *Flexible compound systems*.

Geraadpleegd op 10 mei 2021, van

https://www.isoplus-pipes.com/fileadmin/data/downloads/documents/germany/manuals/chapter_3_web.pdf

Isoplus. (2021). *Rigid compound systems*.

Geraadpleegd op 10 mei 2021, van

https://www.isoplus-pipes.com/fileadmin/data/downloads/documents/germany/manuals/chapter_2_web.pdf

Kadaster. (2021). *BasisRegistratieGebouwen*.

Geraadpleegd op 16 mei 2021, van

<https://bagviewer.kadaster.nl/>

Klein, T. (2020). *CV-ketel doet het prima op waterstof*.

Geraadpleegd op 28 maart 2021, van

<https://frieschdagblad.nl/2020/11/11/cv-ketel-doet-het-prima-op-waterstof>

Kiwa Nederland. (2019). *Keuringseis 214*.

Geraadpleegd op 27 maart 2021, van

https://www.kiwa.com/nl/nl/service/waterstof-heeft-de-toekomst-nieuwe-keuringseis-214/ke-214-2019_nl.pdf

Kiwa Nederland. (z.d.). *Waterstof in de gebouwde omgeving*.

Geraadpleegd op 8 maart 2021, van

<https://www.kiwa.com/nl/nl/themas/energietransitie-in-nederland/waterstof/gebouwde-omgeving/>

Klimaatexpert. (z.d.) *Elektrische verwarming of warmtepomp.*

Geraadpleegd op 5 maart 2021, van

<https://www.klimaatexpert.com/blog/elektrische-verwarming-of-warmtepomp>

Klimaatexpert. (z.d.) *Principe aardwarmtepomp of grondwaterpomp.*

Geraadpleegd op 8 maart 2021, van

<https://www.klimaatexpert.com/warmtepomp/soorten/aardwarmtepomp-of-grondwarmtepomp>

Koezjakov, A. (2019). *Haalbaarheid Omgevingswarmte Centrum De Groote Wielen.*

Geraadpleegd op 26 februari 2021.

Lammers, J. (2021). *Netbeheerders roepen kabinet op haast te maken met waterstof: mogelijk goed alternatief voor aardgas, maar het mag nog niet.*

Geraadpleegd op 11 juni 2021, van

<https://eenvandaag.avrotros.nl/item/netbeheerders-roepen-kabinet-op-haast-te-maken-met-waterstof-mogelijk-goed-alternatief-voor-aardgas-maar-het-mag-nog-niet/>

Legius, M. (2020). *De ombouw van een cv-installatie op aardgas naar waterstof in de praktijk.*

Geraadpleegd op 8 maart 2021, van

<https://www.gawalo.nl/energie/nieuws/2020/06/de-ombouw-van-een-cv-installatie-op-aardgas-naar-waterstof-in-de-praktijk-1018822>

Legius, M. (2020). *Waterstof als alternatief voor aardgas in cv-ketels.*

Geraadpleegd op 9 maart 2021, van

<https://www.gawalo.nl/klimaattechniek/artikel/2020/06/waterstof-als-alternatief-voor-aardgas-in-cv-ketels-1016734>

Leguijt, C. & Schepers, B.L. (2011). *Functioneel ontwerp Vesta.*

Geraadpleegd op 27 mei 2021.

Liander N.V. (z.d.). *Typen aansluitingen.*

Geraadpleegd op 22 maart 2021, van

<https://www.liander.nl/consument/aansluitingen/typen>

Liander N.V. (z.d.). *Verschil tussen 1-fase en 3-fasen.*

Geraadpleegd op 22 maart 2021, van

<https://www.liander.nl/consument/aansluitingen/typen/doorlaatwaarde>

Limburgs Installatietechniek. (z.d.). *Buitenunit van een lucht/water warmtepomp.*

Geraadpleegd op 8 maart 2021, van

<https://www.limburginstallatietechniek.nl/html/>

Menkveld, M. (2009). *Kentallen warmtevraag woningen.*

Geraadpleegd op 3 maart 2021.

LME-prijzen.nl. (2021). *Historie Aluminiumprijs per kilo vanaf 2011 t/m heden.*

Geraadpleegd op 4 juni 2021, van

<https://www.lme-prijzen.nl/aluminiumprijs/>

Millieucentraal. (z.d.) *Gemiddeld energieverbruik*.

Geraadpleegd op 1 maart 2021, van

<https://www.milieucentraal.nl/energie-besparen/inzicht-in-je-energierekening/gemiddeld-energieverbruik/#:~:text=Een%20Nederlands%20huishouden%20verbruikt%20jaarlijks,en%20%E2%82%AC%20620%20aan%20stroom>.

Millieucentraal. (z.d.) *Warmtenet zonder aardgas*.

Geraadpleegd op 11 maart 2021, van

<https://www.milieucentraal.nl/energie-besparen/aardgasvrij-wonen/warmtenet-zonder-aardgas/>

Ministerie van Binnenlandse Zaken. (2021). *Wijziging regeling bouwbesluit 2012*.

Geraadpleegd op 13 maart 2021, van

https://www.eigenhuis.nl/docs/default-source/downloads/wijziging-regeling-bouwbesluit-2012---consultatieversie---22-april-2020.pdf?sfvrsn=d5c4bc96_0

Nedstack Fuel Cell Technology BV. (z.d.). *Built Environment 'Energie-erf'*.

Geraadpleegd op 9 maart 2021, van

<https://nedstack.com/en/application-support/built-environment>

Nedstack Fuel Cell Technology BV. (2019). *PEM Fuel Cells*

Geraadpleegd op 27 maart 2021

Noordsij, H. (2019). *Businesscase 'Stoken op aardgas, waterstof of warmtepomp'*.

Geraadpleegd op 10 juni 2021, van

<https://www.linkedin.com/pulse/businesscase-stoken-op-aardgas-waterstof-warmtepomp-hans-noordsij/>

Papa, T.J.G. & Van Leeuwen, R.P. & Wijnant-Timmerman, S.I. (2019). *Regeltechnische aspecten van warmtenetten*. Saxion: Lectoraat Duurzame Energievoorziening.

Planbureau voor de Leefomgeving. (2019). *Klimaat- en Energieverkenning 2019*.

Geraadpleegd op 25 februari 2021.

Prysmian Cables and Systems B.V.. (z.d.). *Medium Voltage Cables*.

Geraadpleegd op 7 april 2021.

Rijksdienst voor ondernemend Nederland. (2021). *Laadpunten voor elektrisch vervoer*.

Geraadpleegd op 12 maart 2021, van

<https://www.rvo.nl/onderwerpen/duurzaam-ondernemen/energie-en-milieu-innovaties/elektrisch-rijden/laadpunten>

Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu. (2019). *Klimaatakkoord*.

Geraadpleegd op 17 februari 2021.

Rijksoverheid. (2014). *Toelichting op AVOI*.

Geraadpleegd op 25 maart 2021.

Royal Haskoning DHV. (2019). *Basis ontwerp warmtenet*.

Geraadpleegd op 31 maart 2021, van

<https://cooperatiewow.nl/wp-content/uploads/2019/11/Rapport-RHDHV.pdf>

Schaffels, P. (2020). *Bestaande aardgasnet en woningen voor het eerst in Nederland overgezet naar waterstof*.

Geraadpleegd op 8 maart 2021, van

<https://www.dnvgl.nl/news/bestaande-aardgasnet-en-woningen-voor-het-eerst-in-nederland-overgezet-naar-waterstof-192549>

Scholten, T. & Van der Niet, S. & Nieuwenhuijsen, I. & Vendrik, J. (2020). *Energiegebruik 5G-netwerk*.

Geraadpleegd op 15 maart 2021, van

<https://www.ce.nl/publicaties/download/2972#:~:text=Voor%202019%20is%20de%20inschatting,du%20toe%2C%20mogelijk%20zelfs%20fors.>

Schwartz, K. (2019). *Dataverkeer is een energieslurper van formaat*.

Geraadpleegd op 15 maart 2021, van

<https://www.trouw.nl/cs-ba324d45>

Servicepunt Duurzame Energie. (2019). *Duurzame warmte*.

Geraadpleegd op 25 februari 2021, van

Stichting Sustainable Development Goals Charter. (z.d.). *Wat zijn de SDG's?*

Geraadpleegd op 25 mei 2021, van

<https://www.sdg Nederland.nl/sdgs/>

Technische Unie. (z.d.). *Welke soorten warmtepompen zijn er?*

Geraadpleegd op 5 maart 2021, van

<https://www.technischeunie.nl/categorie/soorten-warmtepompen>

TKI Urban Energie. (z.d.). *Koudevraag in Nederland en Europa*.

Geraadpleegd op 25 februari 2021, van

<https://www.topsectorenergie.nl/tki-urban-energy/kennisdossiers/factsheets-koudetechnieken/koudevraag-in-Nederland>

TKI Urban Energie. (2020). *Warmtenetten*

Geraadpleegd op 11 maart 2021, van

<https://www.topsectorenergie.nl/tki-urban-energy/kennisdossiers/warmtenetten>

TS24 B.V. (z.d.). *Hoeveel BTU heb je nodig voor een airco?*

Geraadpleegd op 22 maart 2021, van

https://www.ts24.nl/product_info.php/info/140120/hoeveel-btu-heb-je-nodig-voor-een-airco-bereken-het-koelvermogen/

Vakbeurs Energie. (2020). *Waterstof Wijkcentrales voor Warmtenetten*.

Geraadpleegd op 8 maart 2021, van

<https://www.vakbeursenergie.nl/nl/nieuws-item/Waterstof-Wijkcentrales-voor-Warmtenetten/>

Vakblad Warmtepompen. (2020). *Mini-warmtenet als alternatief voor buitenunit warmtepompen*.

Geraadpleegd op 12 maart 2021, van

<https://www.vakbladwarmtepompen.nl/bronnen/artikel/2020/01/mini-warmtenet-als-alternatief-voor-buitenunit-warmtepompen-1015488>

Van de Lockand, D. & Zanfrisco, M. (2018). *The Big BENG*.

Geraadpleegd op 4 maart 2021.

Van den Dikkenberg, B. (2019). *5G-antenne op elke lantaarnpaal: meer kans op enge ziektes?*

Geraadpleegd op 15 maart 2021.

<https://www.rd.nl/artikel/896413-5g-antenne-op-elke-lantaarnpaal-meer-kans-op-enge-ziektes>

Van der Zee, T. (2018). *Bosch gaat Bluegen-brandstofcel voeren onder Buderus-merk.*

Geraadpleegd op 10 maart 2021, van

<https://www.installatie.nl/nieuws/bosch-gaat-bluegen-brandstofcel-voeren-onder-buderus-merk/>

Van der Zee, T. (2015). *Brandstofcel in Utrechtse woning levert warmte en warm water.*

Geraadpleegd op 10 maart 2021, van

<https://tijdoevanderzee.com/2017/06/14/brandstofcel-in-utrechtse-woning-levert-warmte-en-warm-water/>

Van der Zee, T. (2019). *Koudevraag meenemen in klimaatplannen.*

Geraadpleegd op 4 maart 2021, van

<https://www.installatie.nl/nieuws/koeltevraag-meenemen-in-klimaatplannen/>

Van Vlerken, J. (2019). *Cv-ketel met brandstofcel waardevolle toevoeging energiesysteem.*

Geraadpleegd op 10 maart 2021, van

<https://www.gawalo.nl/klimaattechniek/artikel/2019/01/cv-ketel-met-brandstofcel-waardevolle-toevoeging-energiesysteem-1017065>

Viessmann. (z.d.). *Afbeelding brandstofcel 'Vitovalor PT2'.*

Geraadpleegd op 10 maart 2021, van

<https://m2b.store/Viessmann-Vitolator-300-P>

Voortgangsoverleg Klimaatakkoord. (z.d.). *Afspraken voor Gebouwde omgeving.*

Geraadpleegd op 17 februari 2021, van

<https://www.klimaatakkoord.nl/gebouwde-omgeving>

Waterstof-Info.nl. (z.d.). *Kan ik al een cv-ketel op waterstof kopen?*

Geraadpleegd op 11 juni 2021, van

<https://waterstof-info.nl/waterstof-cv-ketel/#:~:text=In%202025%20zou%20een%20productieprijs,1%20%3D%2024%2C3%20eurocent>

Watt-Infra B.V. (2021). *Offerte Brunssum De Eggen*

Geraadpleegd op 29 mei 2021

Watt-Infra B.V. (2020). *Offerte District E.*

Geraadpleegd op 29 mei 2021

Watt-Infra B.V. (2021). *Offerte EntreDeux.*

Geraadpleegd op 29 mei 2021

W/E adviseurs. (2018). *Ontwikkeling van koudevraag van woningen.*

Geraadpleegd op 4 maart 2021.

Wikipedia. (z.d.). *Akkoord van Parijs.*

Geraadpleegd op 16 februari 2021, van

https://nl.wikipedia.org/wiki/Akkoord_van_Parijs

Wilms, T. (2019). *Brandstofcel op Nederlandse markt met steun Europa*.

Geraadpleegd op 9 maart 2021, van

<https://www.gawalo.nl/klimaattechniek/artikel/2019/04/brandstofcel-op-nederlandse-markt-met-steun-europa-1017237>

Wilms, T. (2018). *Inspiratiesessies hybride warmtepompen en verduurzaming woningvoorraad*.

Geraadpleegd op 5 maart 2021, van

<https://www.gawalo.nl/energie/nieuws/2018/02/inspiratiesessies-hybride-warmtepompen-en-verduurzaming-woningvoorraad-1015734>

Zandee, J. (2020). *Afbeelding: Medewerkers van Enexis en aannemers zijn hard aan de slag in een 8 meter brede gleuf aan de Overstortweg*.

Geraadpleegd op 24 mei 2021, van

<https://www.bd.nl/haalwijk-heusden-e-o/monsterklus-29-kilometer-aan-kabels-verleggen-langs-de-a59-bij-waalwijk~a1009125/176140452/>

Zuidema, T. (2008). *Japanners krijgen brandstofcellen in woningen*.

Geraadpleegd op 10 maart 2021, van

<https://www.technischweekblad.nl/nieuws/japanners-krijgen-brandstofcellen-in-woningen>

Zoelen, van, B. (2020). *Heel Amsterdam aardgasvrij krijgen kost 14 miljard euro*.

Geraadpleegd op 9 juni 2021, van

<https://www.parool.nl/amsterdam/heel-amsterdam-aardgasvrij-krijgen-kost-14-miljard-euro~b842e314/>