De waarde van de hybride warmtepomp voor de warmtetransitie

Een technisch-economische verkenning van maatschappelijk efficiënte verduurzamingskeuzes

Opdrachtgever: Ministerie van Economische Zaken & Klimaat

Rotterdam, 14 maart 2021

De waarde van de hybride warmtepomp voor de warmtetransitie

Een technisch-economische verkenning van maatschappelijk efficiënte verduurzamingskeuzes

Opdrachtgever: Ministerie van Economische Zaken & Klimaat

Alexander Oei
Freek Akkermans
Kurt Kreulen
Maurice Thijsen

Rotterdam, 14 maart 2021

ECORYS

Inhoudsopgave

Samenvatting 7

1 Inleiding 11
1.1 Op weg naar een duurzaam verwarmde gebouwde omgeving 11
1.2 Onderzoeksvragen 12
1.3 Opbouw van dit rapport 13

2 Rekenen aan de warmtetransitie: aanpak en belangrijkste uitgangspunten 15
2.1 Gevolgde aanpak en inkadering 15

3 De nationale meerkosten van de hybride warmtepomp 21
3.1 Introductie 21
3.2 Definities 22
3.3 De kosten van de hybride warmtepomp op nationaal niveau 26
3.4 De kosten van de hybride warmtepomp op buurtniveau 29
3.5 De kosten van de hybride warmtepomp op gebouwniveau 36
3.6 Conclusies: de nationale meerkosten van de hybride warmtepomp 38

4 De eindgebruikerskosten van de hybride warmtepomp 41
4.1 Introductie 41
4.2 Opbouw van de kosten voor de eindgebruiker 42
4.3 Vergelijking van kosten per warmtetechniek voor de eindgebruiker 46
4.4 Conclusies: eindgebruikerskosten van de hWP 47

5 De impact van de inzet van de hybride warmtepomp 49
5.1 Introductie 49
5.2 De lange termijn inzet (2030) van de hybride warmtepomp 51
5.3 De korte termijn inzet (2020) van de hybride warmtepomp 56
5.4 De invloed van de inzet van de hWP op isolatiemaatregelen en lock-in effecten 58
5.5 Conclusies: de impact van inzet van de hybride warmtepomp 60

6 Referenties 62

Bijlage A: Aanpak opstellen buurttypologie 63

Bijlage B: Beschrijving kostenallocatie 71

Bijlage C: CAPEX & OPEX (Utiliteitsgebouwen) 73

Bijlage D: CAPEX & OPEX (Woningen) 75

Bijlage E: Overzicht gebouwcategorieën 77

Bijlage F: CO_2-uitstoot en reductiekosten per buurtcategorie 81

Bijlage G: Eindgebruikerskosten 83

Samenvatting

De transitie op weg naar een duurzaam verwarmde gebouwde omgeving is in volle gang. Ingewikkeld aan de warmtetransitie is het veelvoud aan kansrijke technieken die van gebied tot gebied verschillen in zowel potentie als in kosten. In dit onderzoek is in de context van de aanwezigheid van de variëteit aan alternatieve warmtetechnieken onderzocht welke rol één van deze technieken zou kunnen spelen: de hybride warmtepomp.

De hybride warmtepomp, een alternatieve warmte-oplossing met voor- én nadelen

De hybride warmtepomp – een combinatie van een lucht-water warmtepomp en een traditionele hr-ketel[1] – kent voordelen ten opzichte van een standalone traditionele hr-ketel en andere alternatieve warmteoplossingen. Zo is deze energetisch gezien efficiënter, gebruikt deze minder aardgas/groen gas en vereist deze techniek geen vergaande isolatie van de woning, waar lage temperatuuroplossingen als een volledige elektrische warmtepomp of een LT-warmtenet dit wel vergen. Er zijn echter ook nadelen aan deze techniek: de investeringskosten zijn hoger dan de traditionele hr-ketel, het is nog steeds nodig om (duurzaam) gas in te zetten en het is hierdoor dus ook vereist om twee energie-infrastructuren naast elkaar in stand te houden.

Rekenen aan de warmtetransitie

In dit onderzoek zijn de voor en nadelen van de hybride warmtepomp integraal bekeken door middel van een technisch-economische kosten- en scenario-analyse van verschillende paden richting een duurzaam verwarmde gebouwde omgeving. Basis voor deze analyse was de bestaande studie 'Startanalyse aardgasvrije buurten 2020' van het Planbureau voor de Leefomgeving en de inzet door Ecorys van het rekenmodel dat voor genoemde studie is gebruikt, het Vesta MAIS-model. Met dit model analyseren we hoe de hybride warmtepomp zich verhoudt tot andere warmtetechnieken wanneer de hybride warmtepomp wordt ingezet als tussenoplossing of als eindoplossing.

De hybride warmtepomp, een concurrerend alternatief voor de traditionele hr-ketel in termen van nationale meerkosten

De analyse van de detailinformatie voortkomend uit de Startanalyse leert ons dat de hr-ketel op groen gas vrijwel overal in Nederland de goedkoopste optie voor verduurzaming van de verwarmingsvraag is in 2030. De hr-ketel wordt echter op de voet gevolgd door de hybride warmtepomp. De nationale meerkosten van de hybride warmtepomp op groen gas in 2030 zijn nauwelijks hoger dan de nationale meerkosten van de hr-ketel op groen gas in 2030. Wanneer de kosten elkaar zo weinig ontlopen, zou men zich af kunnen vragen of inzet van de hybride warmtepomp de voorkeur zou moeten krijgen boven inzet van de hr-ketel op groen gas. Immers, de hybride warmtepomp is energie-efficiënter en verbruikt daardoor minder gas (dankzij het benutten van omgevingswarmte middels de warmtepomp). De hogere energie-efficiëntie stelt de hybride warmtepomp in staat om *i)* bij een beperkt aanbod van groen gas méér woningen en gebouwen te kunnen verwarmen dan mogelijk zou zijn met een hr-ketel en *ii)* direct CO_2-emissiereductie te realiseren – ook wanneer er nog voornamelijk gebruik wordt gemaakt van fossiel aardgas.

Voor de eindgebruiker is de hybride warmtepomp veelal het goedkoopst, dankzij energie-efficiëntie, belastingen en beschikbare subsidies

Naast het gegeven dat de hybride warmtepomp in termen van nationale meerkosten concurrerend is met de hr-ketel voor de meeste buurten, geldt dat voor de eindgebruiker de hybride warmtepomp in

[1] In de praktijk bestaan er verschillende configuraties onder dezelfde noemer "hybride warmtepomp". In dit onderzoek volgen wij de technische specificaties zoals gehanteerd in de studie 'Startanalyse aardgasvrije buurten 2020' van het Planbureau voor de Leefomgeving.

onze doorrekeningen vrijwel altijd *goedkoper* is dan de hr-ketel. Dit hangt samen met een aantal uitgangspunten. Allereerst wordt er aangenomen dat er een investeringssubsidie beschikbaar is voor de aanschaf van de hybride warmtepomp die vergelijkbaar is met de huidige ISDE. Daarnaast leidt de inzet van de hybride warmtepomp tot een daling van de variabele energielasten ten opzichte van de inzet van de hr-ketel. De relatieve besparing op de variabele energielasten komt voort uit twee bronnen: (1) het gebruik van elektriciteit – in plaats van aardgas – leidt tot minder energieverbruik dankzij een hogere conversie-efficiëntie, en, (2) over de benodigde elektriciteit wordt minder belasting geheven dan hetzelfde warmte-equivalent aan aardgas. In onze doorrekening volgen we namelijk het voorstel van het definitief klimaatakkoord waarin er wordt gesteld dat richting 2030 de belasting op elektriciteit zal dalen met een gelijktijdig toenemende belasting op aardgas[2]. Deze belastingschuif pakt positief uit voor de inzet van de hybride warmtepomp ten opzichte van de hr-ketel.

De hybride warmtepomp als instrument voor een betaalbare warmtetransitie

In termen van nationale meerkosten én eindgebruikerskosten biedt de hybride warmtepomp een aantrekkelijk alternatief voor de relatief dure all-electric oplossingen. Dit is met name interessant voor die plekken in Nederland waar collectieve warmtetechnieken niet kosteneffectief toegepast kunnen worden. Dit betekent dat inzet van de hybride warmtepomp voorkomt dat op deze plekken duurdere oplossingen zoals de volledige warmtepomp (inclusief de noodzakelijke vergaande isolatie) ingezet moeten worden. Een investering in de hybride warmtepomp is het meest aantrekkelijk voor de wat oudere vrijstaande woningen of twee-onder-een-kap woningen. Hierdoor kan met name in ruim opgestelde oude woonwijken in buitengebieden, maar ook in stedelijke gebieden waar geen collectieve warmteopties in nabijheid beschikbaar zijn, de hybride warmtepomp een efficiënte oplossing bieden om de warmtevraag te verduurzamen.

Inzet van de hybride warmtepomp op de korte termijn veroorzaakt géén lock-in voor het kiezen van kosteneffectieve eindoplossingen

Naast dat de hybride warmtepomp als eindoplossing in 2030 kan fungeren, kan de hybride warmtepomp ook op korte termijn ingezet worden als tussenoplossing. Een deel van het onderzoek betrof om te analyseren of de inzet van de hybride warmtepomp op de korte termijn als tussenoplossing niet tot een lock-in zou leiden voor het kiezen van een kosteneffectieve eindoplossing. Een lock-in zou kunnen optreden wanneer investeringen in de hybride warmtepomp zouden leiden tot een voordeel of juist een nadeel in de toepassing van een andere duurzame warmteoplossing. Onze analyse laat echter zien dat hier geen gevaar voor is: de inzet van de hybride warmtepomp vereist namelijk geen additionele investeringen in de schilisolatie van het gebouw ten opzichte van andere warmtetechnieken. Ook is het zo dat door de relatief lage elektrische vermogensvraag er enkel in beperkte mate sprake is van ‘verzonken’ investeringen in het verzwaren van de elektriciteitsinfrastructuur. Door het uitblijven van additionele investeringen in de schilisolatie en de enkel beperkt benodigde investeringen in de elektriciteitsinfrastructuur treden er geen substantiële voor- of nadelen op voor specifieke warmte oplossingen.

Op de korte-termijn biedt de hybride warmtepomp kansen voor CO_2-emissiebesparingen

In plaats van een lock-in biedt de hybride warmtepomp als tussenoplossing juist kansen om op korte termijn direct CO_2-emissies te besparen. Het maximale technisch-economisch potentieel voor emissiereductie bij inzet van de hybride warmtepomp op aardgas en elektriciteit in de huidige situatie ramen wij op 6,6 miljoen ton CO_2 per jaar. Hierbij wordt wel uitgegaan van de inzet van de hybride warmtepomp in alle Nederlandse gebouwen (woningen en utiliteit) waar nu een hr-ketel hangt. Hoewel in de praktijk niet alle gebouwen geschikt zullen zijn voor (directe) inzet van de hybride

[2] Tevens wordt er nog geen uitzondering gemaakt voor groen gas in de energiebelasting en wordt dit in de huidige grondslag als “vervanger van aardgas” gezien waardoor voor groen gas dezelfde belastingtarieven van toepassing zijn als voor aardgas.

warmtepomp geeft deze raming wel een duiding van de bijdrage die de inzet van de hybride warmtepomp op de korte termijn zou kunnen leveren in het reduceren van CO_2-emissies.

Tegen een kostenniveau van 524 euro per ton CO_2-emissiereductie kan men met de hybride warmtepomp gemiddeld 27% CO_2-emissiereductie bewerkstelligen ten opzichte van het gebruik van de hr-ketel, uitgaande van de huidige CO_2-intensiteit van het Nederlandse elektriciteitsverbruik. Het aardgasverbruik specifiek daalt met 50 tot 70 procentpunten. Inzet van de hybride warmtepomp op de korte termijn is echter wel relatief duur in vergelijking met het kostenniveau van inzet op de langere termijn. Richting 2030 dalen de jaarlijkse nationale meerkosten per ton CO_2 van de inzet van de hybride warmtepomp stevig dankzij aangenomen kostenontwikkelingen in de investeringskosten van de hybride warmtepomp en vanwege de toepassing van het CO_2-neutrale groen gas. De jaarlijkse nationale meerkosten van de hybride warmtepomp zijn in 2030 gemiddeld 338 euro per ton CO_2-emissiereductie.

Bij een beperkt aanbod van groen gas leidt maximale inzet op de hybride warmtepomp in combinatie met maatschappelijk kostenefficiënt isoleren tot een beter betaalbare warmtetransitie.

De inzet van de hr-ketel is in ongeveer de helft van de Nederlandse buurten nét iets goedkoper dan de inzet van de hybride warmtepomp. In met name oude woonwijken met voornamelijk vrijstaande woningen en twee-onder-een-kap woningen, maar ook in een belangrijk deel van de oude woonwijken met voornamelijk rijwoningen is het echter juist de hybride warmtepomp die de laagste nationale meerkosten heeft. Wanneer men bij een beperkt aanbod van groen gas het groen gas zou alloceren op die plekken waar inzet van het groen gas het meest waardevol is wordt het groen gas vrijwel uitsluitend ingezet in buurten waarin de hybride warmtepomp het goedkoopst is. Dit is gunstig omdat de hybride warmtepomp substantieel minder groen gas gebruikt dan de hr-ketel voor het opwekken van dezelfde hoeveelheid warmte (dankzij de bijdrage van de elektrische warmtepomp). Door inzet van de hybride warmtepomp in plaats van de hr-ketel kan een groter aandeel van de warmtevraag worden voorzien met het beperkte aanbod van groengas. Dit gegeven in combinatie met het maatschappelijk kostenefficiënt isoleren van de gebouwenvoorraad in plaats van het isoleren tot enkel de keuze voor energielabel B of D is gunstig voor de betaalbaarheid van de warmtetransitie. Wij rekenden uit dat de jaarlijkse nationale meerkosten van de warmtetransitie ongeveer 12% lager uitvallen wanneer men maximaal inzet op de hybride warmtepomp in combinatie met een maatschappelijk kostenefficiënt isolatieniveau. Netto dalen de jaarlijkse nationale meerkosten van gemiddeld 401 per ton CO_2-emissiereductie in de Startanalyse 2020 naar 353 per ton CO_2-emissiereductie in onze doorrekening.

Discussie

De lessen uit het onderhavige onderzoek volgen uit een uitgebreide data-analyse van de detailinformatie die de Startanalyse 2020 biedt én een aanvullende scenario-analyse met behulp van het technisch-economische rekenmodel Vesta MAIS. De scenario-analyses bieden concrete handvatten voor beleidskeuzes rondom het stimuleren van duurzame warmte-alternatieven en de waarde van scenario's zonder hr-ketels.

Tegelijkertijd zien wij ook dat het rekenen aan de warmtetransitie een complexe opgave is. In vervolgonderzoek zou men kunnen onderzoeken hoe een gevoeligheidsanalyse op belangrijke parameters zoals het gehanteerde beleidsscenario en met name de investeringskosten en 'seasonal performance factor' van de hybride warmtepomp invloed hebben op de onderzoeksresultaten. Ook de beschikbaarheid van groen gas en de maatschappelijke haalbaarheid van een scenario zonder de hr-ketel zouden nader onderzocht kunnen worden.

In dit onderzoek staan wij niet stil bij de praktische beperkingen bij de inzet van de hybride warmtepomp. De hybride warmtepomp zal namelijk in de praktijk niet in alle gebouwen in Nederland

kunnen worden ingezet. Praktische beperkingen kunnen bijvoorbeeld voortkomen uit een beperkte ruimte in het gebouw, de (on)mogelijkheid van het plaatsen van de buiten-unit van de warmtepomp, alsook uit beperkingen vanuit regelgeving voor monumentale panden en het behoud van het aangezicht van de gevel.

Een laatste onderwerp waar wij in ons onderzoek niet bij stilstaan betreft het onderzoeken van alternatieve momenten van investeren in de hybride warmtepomp. Wij kijken enkel naar twee investeringsmomenten waarbij verondersteld wordt dat de investeringen beiden plaatsvinden op een “natuurlijk” vervangingsmoment. Het formuleren van beleidskeuzes zou verder geïnformeerd kunnen worden door de impact van verschillende investeringsmomenten en de inzet van beleidskeuzes te onderzoeken. Op deze manier kan een adaptieve strategie ontwikkeld waarin doelbereik, inzet van middelen en mogelijk praktische haalbaarheid onderdeel worden van de analyse. Ook zijn er nog kansen om verdieping te vinden in een verder gespecificeerde en idealiter lokaal-verrijkte geografische analyse: waar precies in Nederland zou je moeten beginnen, en waar in Nederland zou je mogelijk beter wat later kunnen starten?

1 Inleiding

1.1 Op weg naar een duurzaam verwarmde gebouwde omgeving

De warmtetransitie van de traditionele aardgasketel naar duurzamere verwarmingsalternatieven in de gebouwde omgeving is in volle gang. Er zijn een groot aantal duurzame warmte alternatieven voor de aardgas hr-ketel[3] welke afhankelijk van het type gebouw, de staat van dit type gebouw en het gebied in meer of mindere mate aantrekkelijk kunnen zijn. Zo zijn er naast de hr-ketel op aardgas, de hybride warmtepomp, de elektrische warmtepomp en legio uitvoeringen van collectieve warmtenetten met warmte uit verschillende mogelijke bronnen. Een van de grote uitdagingen in de warmtetransitie is dan ook het maken van maatschappelijk efficiënte keuzes: welke technologie zet je waar en wanneer in de tijd in?

Eén van de duurzame warmte alternatieven waar veel aandacht naar uit gaat is de hybride warmtepomp. De hybride warmtepomp combineert een traditionele hr-ketel (voor m.n. de tapwatervraag & piekruimteverwarmingsvraag) met een kleine elektrische warmtepomp (voor m.n. de reguliere ruimteverwarmingsvraag). De investeringskosten van de hybride warmtepomp zijn lager dan die van een volledige elektrische warmtepomp. Ook is het zo dat omdat het piekvermogen van de hybride warmtepomp groter is dan de volledige elektrische warmtepomp het niet nodig is om de woning of het utiliteitsgebouw vergaand te isoleren (tot bijvoorbeeld energielabel B). Dit is belangrijk omdat hierdoor de hybride warmtepomp relatief eenvoudig is in te zetten ten opzichte van andere duurzame warmte alternatieven. Op deze manier kunnen er op korte termijn direct CO_2-emissiereducties worden bereikt. Op de langere termijn biedt de hybride warmtepomp een perspectief naar een volledig duurzame verwarming van gebouwen wanneer de resterende aardgasvraag duurzaam wordt ingevuld met bijvoorbeeld groen gas of waterstof.

Toch kleven er ook nadelen aan de hybride warmtepomp. Allereerst is het geen volledig duurzame verwarmingsoptie wanneer er nog aardgas wordt ingezet voor het hybride gedeelte van de warmtepomp. Ook is het zo dat voor een hybride warmtepomp, in tegenstelling tot de volledig elektrische warmtepomp, twee infrastructuren naast elkaar in stand moeten worden gehouden: de aardgasinfrastructuur én de elektriciteitsinfrastructuur. Wanneer welke verwarmingsoptie maatschappelijk gezien kostenefficiënter is dan de ander verschilt per situatie.

Het ministerie van Economische Zaken en Klimaat en het ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties hebben gezamenlijk een werkgroep ingesteld om de waarde van de hybride warmtepomp voor de warmtetransitie in de gebouwde omgeving nader in kaart te brengen. Doel van deze werkgroep is om de voor- en nadelen van de techniek te wegen en tot een visie te komen waar de technologie een efficiënte tussen- dan wel eindoplossing kan bieden voor de verduurzaming van de warmtevraag van de gebouwde omgeving. Dit rapport is in opdracht van de werkgroep hybride warmtepomp opgesteld om nader inzicht te verschaffen in de taakstelling van de werkgroep.

Lessen uit bestaande literatuur

Een belangrijke basis voor deze studie zijn de studies ‘Startanalyse aardgasvrije buurten 2019’ en de update ‘Startanalyse aardgasvrije buurten 2020’ van oktober 2020. In deze studies zijn de

[3] De traditionele cv-ketel (centrale verwarmingsketel) bestaat er in verschillende soorten, waarbij tegenwoordig de term hr-ketel (hoogrendementsketel) vaak gebruikt wordt. In de modelberekeningen is een (gebruikelijke) rendementsfactor aangenomen van 1,04 conform de kengetallen zoals gebruikt in de Startanalyse.

belangrijkste duurzame warmte alternatieven voor de gebouwde omgeving reeds verkend. Als onderdeel van deze studie zijn tevens de nationale kosten van de hybride warmtepomp in kaart gebracht wanneer deze wordt ingezet als eindoplossing voor duurzame warmte in 2030.

Genoemde studies bieden een mooie eerste basis om op buurtniveau inzichten te verkrijgen waar de hybride warmtepomp een kostenefficiënte oplossing is. De analyses uitgevoerd op de beslisinformatie die voorkomt uit de Startanalyse zijn echter beperkt. Enkele kennislacunes zijn:

- Welke kostencomponenten het verschil maken in de aantrekkelijkheid van de hybride warmtepomp;
- Voor welke gebouwtypen en bijbehorende energiekwaliteiten van gebouwen de hybride warmtepomp aantrekkelijk is en voor welke gebouwtypen niet;
- De vraag of de hybride warmtepomp ook een goede tussenoplossing kan bieden of enkel als eindoplossing aantrekkelijk is;
- Of er sprake kan zijn van lock-in effecten die goedkopere technologieën in de weg staan wanneer de hybride warmtepomp als tussenoplossing wordt ingezet.

Het invullen van bovenstaande kennislacunes is noodzakelijk om een integrale visie te kunnen vormen en gericht beleid te formuleren voor waar de ondersteuning van de hybride warmtepomp de nationale kostenefficiëntie van de warmtetransitie kan vergroten. De behoefte hiernaar is sterk, met het oog op de toenemende aandacht voor de vraag waar de wijkaanpak hand-in-hand kan gaan met keuzes voor individuele verduurzamingsopties. Het invullen van genoemde kennislacunes kan ook een bijdrage leveren aan de vormgeving van wenselijke verduurzamingspaden richting duurzame warmte eindoplossingen.

1.2 Onderzoeksvragen

De primaire wens is om de waarde van de hybride warmtepomp nader in beeld te brengen gelet op het streven om een maatschappelijk kostenefficiënte warmtetransitie voor de gebouwde omgeving te kunnen doorlopen. Dit vraagt om inzicht in de nationale meerkosten van de hybride warmtepomp ten opzichte van het huidige dominante alternatief – de traditionele hr-ketel op aardgas – en ook de belangrijkste andere duurzame warmte alternatieven. In de context van het definitief klimaatakkoord zijn niet alleen de nationale kosten van belang, maar is een belangrijke indicator ook in hoeverre de verschillende duurzame warmte-alternatieven CO_2-emissiereducties bewerkstelligen. De hoofdvraag van het onderzoek is daarmee als volgt geformuleerd:

> "Wat zijn de nationale meerkosten per ton CO_2-reductie richting 2030 wanneer, op een natuurlijk vervangingsmoment, wordt gekozen voor een hybride warmtepomp (op elektriciteit en aardgas) in plaats van een hr-ketel (op aardgas) en hoe verhoudt dit zich tot andere duurzame warmte alternatieven?"

Om de kostenefficiëntie van verduurzaming samen te brengen met het doelbereik in termen van CO_2-emissiereducties formuleert de hoofdvraag als hoofdindicator de nationale meerkosten per ton CO_2-emissiereductie om de hybride warmtepomp te vergelijken met andere (duurzame) verwarmingstechnieken. De nationale meerkosten betreffen alle kosten voor het investeren in en opereren van een warmtevoorzieningssysteem exclusief subsidies, belastingen en externaliteiten[4].

[4] Onder de nationale kosten vallen kosten zoals investeringskosten in infrastructuur, warmte installaties en isolatie, maar ook de variabele kosten van het warmtesysteem zoals energiekosten en onderhoudskosten. De nationale kosten verschillen van de tevens bekende term 'maatschappelijke kosten'. In de maatschappelijke kosten definitie worden namelijk in tegenstelling tot de nationale kosten definitie tevens de kosten van externaliteiten (gemonitariseerd) meegenomen. Deze studie betreft

Door alle kosten van een warmtevoorzieningssysteem mee te nemen kan een eerlijke vergelijking worden gemaakt tussen bijvoorbeeld individuele oplossingen en collectieve oplossingen waarbij verschillende schakels in het systeem verschillende kosten maken (denk aan de hybride warmtepomp versus bijvoorbeeld een warmtenet).

De hoofdvraag is verder uitgesplitst in deelvragen. De beantwoording van allereerst de deelvragen en vervolgens de hoofdvraag biedt tevens de geleide bij dit rapport. De deelvragen zijn als volgt geformuleerd:

1. Hoe zijn de nationale meerkosten voor de hybride warmtepomp verdeeld binnen Nederland?
   a. Welke kostencomponenten zijn leidend bij de totstandkoming van deze nationale meerkosten?
   b. Hoe zijn de nationale meerkosten van het implementeren van de hybride warmtepomp in 2030 onderling verdeeld per buurt en per type bebouwing?
   c. Hoe staan de nationale meerkosten van de hybride warmtepomp in verhouding tot alternatieve warmtetechnieken?

2. Wat zijn de kosten voor de eindgebruiker van een hybride warmtepomp?
   a. Welke kostencomponenten zijn leidend bij de totstandkoming van deze eindgebruikerskosten?
   b. Hoe zijn de eindgebruikerskosten van het implementeren van de hybride warmtepomp in 2030 onderling verdeeld per type bebouwing?
   c. Hoe staan de eindgebruikerskosten van de hybride warmtepomp in verhouding tot alternatieve warmtetechnieken?

3. Wat zijn de effecten op de resultaten wanneer er, zowel op de lange als op de korte termijn, grootschalig wordt ingezet op de hybride warmtepomp?
   a. Wat is de invloed van een inzet van de hybride warmtepomp in 2030?
   b. Wat is de invloed van een inzet van de hybride warmtepomp als korte-termijn tussenoplossing, aangesloten op aardgas?
   c. Wat is de invloed van de inzet van de hybride warmtepomp op de inzet van isolatiemaatregelen en alternatieve duurzame warmtetechnieken?
   d. In hoeverre creëert de inzet van de hybride warmtepomp een *lock-in* voor wijken waar het eindbeeld (de kosteneffectieve duurzame warmtetechniek in 2030) geen hybride warmtepomp is.

1.3 Opbouw van dit rapport

De opbouw van dit rapport volgt de structuur van de onderzoeksvragen en -opzet. In hoofdstuk 2 lichten wij onze aanpak nader toe. Vervolgens worden in Hoofdstuk 3 de nationale meerkosten van de hybride warmtepomp uitvoerig bekeken. In Hoofdstuk 4 presenteren we de aantrekkelijkheid van de hybride warmtepomp vanuit het perspectief van de eindgebruiker. Tenslotte presenteren we in Hoofdstuk 5 onze analyse op de vraag of er sprake is van een lock-in wanneer er reeds op de korte termijn wordt ingezet op de hybride warmtepomp als tussenoplossing. Hierbij wordt tevens de aantrekkelijkheid van de hybride warmtepomp als tussenoplossing vergeleken met de situatie waarin deze als eindoplossing wordt ingezet. Wij sluiten elk hoofdstuk af met een paragraaf met conclusies.

daarmee geen maatschappelijke kosten baten analyse, maar een technisch-economische verkenning van alle werkelijke kosten die gemaakt moeten worden in verschillende warmtesystemen.

2 Rekenen aan de warmtetransitie: aanpak en belangrijkste uitgangspunten

In dit hoofdstuk wordt het onderzoeksplan toegelicht. Door middel van een 4-delig stappenplan worden antwoorden geboden op de onderzoeksvragen. Deze stappen en de rationale hierachter worden tevens nader toegelicht.

2.1 Gevolgde aanpak en inkadering

Als leidraad voor de onderzoeksopzet volgen we de sub-onderzoeksvragen (zie inleiding). In de volgende paragrafen schetsen wij hoe wij in een proces van **4 stappen** de onderzoeksvragen beantwoorden. Figuur 2-1 geeft een schematische weergave van de onderzoeksaanpak.

Figuur 2-1: Schematische weergave onderzoeksaanpak

Aan de basis van deze vier stappen staat het gebruik van het Vesta MAIS-model. Dit model is ontwikkeld door het Planbureau voor de Leefomgeving (PBL). Met dit model kunnen de kosten van de warmtetransitie in kaart worden gebracht. Dit model wordt ingezet in de Startanalyse studie van het PBL. In deze studie heeft PBL voor alle gemeenten in Nederland berekend wat de kosten en CO_2 baten zijn van het gebruik van aardgasvrije warmtetechnieken per buurt in 2030. In dit onderzoek gebruiken wij het model (met andere uitgangspunten dan de Startanalyse) en de resultaten van de Startanalyse om de kosten van de hWP (in relatie tot andere alternatieve warmtetechnieken) te berekenen voor de gebouwde omgeving. Zie de blauwe tekst box voor meer uitleg over het Vesta MAIS-model en de Startanalyse.

Box 1. Nadere toelichting Vesta MAIS-model en haar toepassing in de Startanalyse aardgasvrije buurten 2020.

Vesta MAIS-model en Startanalyse

In de komende decennia zal aardgas uitgefaseerd en vervangen worden door duurzame alternatieven. Om gemeenten bij deze opgave te ondersteunen heeft PBL een studie uitgebracht, genaamd de Startanalyse (SA). De SA presenteert de kosten in 2030 voor de warmtetransitie per buurt in de gebouwde omgeving.

Het rekenmodel wat gebruikt is in deze studie om de kosten te berekenen is het Vesta MAIS-model. Vesta MAIS is een technisch-economisch ruimtelijk energierekenmodel. Dat houdt in dat het model de economische kenmerken van de warmtetransitie berekent, en het rekening kan houden met de ruimtelijke aspecten, zoals: “waar in Nederland is restwarmte aanwezig en geothermie mogelijk?”, “welke type woningen (met isolatiekenmerken) staan in de steden en in de provincie?”.

Het Vesta MAIS model rekent twee verschillende aspecten door van de warmtetransitie; de alternatieve aardgasvrije warmtetechniek en het isolatieniveau. In de SA worden de kosten van de volgende warmtetechnieken in overweging genomen:

- All-Electric (elektrische warmtepomp)
- Warmtenetten op basis van hoge-temperatuur of midden-temperatuur (HT/MT) puntbronnen en geothermie
- Warmtenetten op basis van lage-temperatuur (LT) puntbronnen, WKO en Thermische energie uit oppervlakte water (TEO)
- Gebruik van groen gas middels een groen gas hr-ketel of hybride warmtepomp.

De SA gaat er van uit dat woningen ook gaan isoleren in de warmtetransitie richting 2030. Daarom neemt de SA twee verschillende isolatieniveau’s aan:

- Label B+: De SA gaat er van uit dat woningen en utiliteitspanden minimaal isoleren naar schillabel B
- Label D+: De SA gaat er van uit dat woningen minimaal isoleren naar label D, utiliteit gaat minimaal isoleren naar schillabel B.

De Startanalyse en het Vesta MAIS model presenteren hun kosten van de warmtetransitie als ‘nationale meerkosten in 2030’. Allereerst betekent dit dat de kosten worden gepresenteerd als de directe kosten voor de nationale Nederlandse samenleving als geheel. Dit betekent dat belasting en subsidies geen invloed hebben op de nationale kosten. Ook indirecte kosten, zoals maatschappelijke effecten als ‘vermindering leefbaarheid’, worden hier niet in meegenomen. Daarnaast worden de nationale kosten gepresenteerd als meerkosten in 2030. Dat betekent dat de kosten van de warmtetransitie in 2030 worden gepresenteerd die bovenop de referentiekosten in 2030 (de situatie in 2030 waarbij niets wordt ondernomen) komen. Daarmee presenteert de meerkosten de kosten die additioneel zijn om aardgasvrij te zijn.

De nationale meerkosten worden per buurt in Nederland, per warmtetechniek en per isolatieniveau gepresenteerd. De warmtetechniek en het isolatieniveau met de laagste nationale (LN) meerkosten voor een buurt wordt gepresenteerd als de voorkeursoptie van die buurt.

2.1.1 *Stap 1: Vaststellen van uitgangspunten en randvoorwaarden*

Allereerst worden de uitgangspunten voor de berekeningen vastgesteld. Dit is gebeurd in nauwe samenwerking met het ministerie van Economische Zaken en Klimaat (MinEZK) om zo optimale afstemming met het beoogde doel te waarborgen. Als basis van het onderzoek wordt gebruik gemaakt van de Startanalyse (editie 2020) van het Planbureau voor de Leefomgeving (PBL) en het daarin gebruikte Vesta MAIS-model, inclusief de achterliggende informatie en kengetallen. De uiteindelijke afstemming vond plaats door middel van een open dialoog met vertegenwoordigers vanuit MinEZK, PBL en het ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties (MinBZK) de uiteindelijke uitgangspunten en randvoorwaarden definitief zullen worden gemaakt.

Voor een modelstudie waarbij gebruik gemaakt wordt van het Vesta MAIS-model zijn de volgende categorieën van belang voor het vaststellen van relevante uitgangspunten:

- Economische parameters: o.a. prijs- en kostenontwikkelingen voor verschillende energiedragers en technieken.
- Fysieke parameters: potentie en beschikbaarheid van bronnen en energiedragers.
- Institutionele parameters: beleid en belastingen.
- Technische parameters: isolatiekeuzes en -eisen.

Om vergelijkbaarheid en aansluiting met de Startanalyse 2020 optimaal te waarborgen worden economische en fysieke parameters (e.g. prijs-/kostenontwikkelingen en potentie en beschikbaarheid van warmtebronnen en -dragers) onveranderd gelaten ten opzichte van de Startanalyse. In het kader van het onderzoek is er geen belangstelling voor aanpassing of variatie op dit vlak.

Institutionele parameters, bijvoorbeeld de hoogte van energiebelastingen op elektriciteit, beïnvloeden alleen interacties tussen actoren en hebben verder geen effect op de nationale kosten. Wel zijn deze parameters zeer bepalend bij het schatten van de eindgebruikerskosten. De Startanalyse maakt, vanwege de focus op nationale kosten, geen gebruik van deze parameters. De uitgangspunten van dit onderzoek dus al snel afwijken van de Startanalyse. Om de vergelijkbaarheid met de Startanalyse en de laagste-nationale kosten aanpak te waarborgen wordt echter wel bij het bepalen van de voorkeursopties geoptimaliseerd op nationale kosten. Dit betekent dat voor de optimalisatie de institutionele parameters geen effect zullen hebben op de uitkomsten, maar in de analyse in stap 4 (eindgebruikerskosten) zullen de effecten van deze parameters zich voor doen. Er is daarom ervoor gekozen om in stap 4 gebruik te maken van de configuratie zoals gebruikt in de Startanalyse, aangevuld met voorgenomen beleid voor de volgende onderdelen, op basis van de aangegeven bronnen:

- Energiebelasting op gas: Klimaatakkoord
- Energiebelasting op elektriciteit: Klimaatakkoord
- Energiebelastingteruggave: Miljoenennota
- Investeringssubsidies: SEEH
- SDE++: PBL Conceptadvies SDE++ (onrendabele top-model)
- Discontovoeten: Algemeen geaccepteerde discontovoeten (Vesta FO 4.0)[5]

In de Startanalyse worden voor de verschillende warmtetechnieken combinaties met label D of label B (tenzij het huidige label hoger is) doorgerekend alvorens hier een uitkomst met de laagste nationale kosten uit wordt gekozen. Ter bevordering van de optimalisatiemogelijkheden van het model zijn alle mogelijke schillabels meegenomen. Daarbij is er ook voor gekozen om het model te laten rekenen naar de combinatie die maatschappelijk het meest kosten efficiënt is. Dit wil zeggen dat labels A tot

[5] Er wordt onderscheid gemaakt tussen maatschappelijke en private discontovoeten. Als vuistregel liggen maatschappelijke discontovoeten altijd lager dan private discontovoeten.

en met D als optie meegenomen worden en de door Vesta MAIS berekende meest gunstige combinatie per warmte oplossing geselecteerd wordt.

2.1.2 *Stap 2: Kostenanalyse: nationale kosten van de hybride warmtepomp*

Om sub-vraag 1 te beantwoorden volgt een uitgebreide kostenanalyse van de inzet van de hWP. De nationale meerkosten per buurt en per gebouwtype voor de hWP worden in kaart gebracht. Als basis voor deze analyse wordt gebruik gemaakt van de aanpak van de Startanalyse 2020 van het PBL. Er wordt aandacht besteedt aan de volgende elementen per buurt en per type woning:

- Nationale meerkosten per ton CO_2;
- Type woning (type bebouwing en bouwjaar, gecombineerd zijn dit 66 categorieën);
- Isolatiekosten (zowel voor huidig isolatieniveau als het eindbeeld);
- Installatiekosten warmtepomp;
- Kosten voor aanpassing van afgiftesysteem;
- Infrastructuurkosten (bijvoorbeeld verzwaring van het elektriciteitsnet, in stand houden van gasnet);
- Kosten voor onderhoud en (project) management.

De inzichten in nationale kosten worden vervolgens gebruikt om een beeld te schetsen van de kosten voor de hWP. Hiermee worden relaties tussen de nationale kosten van de hWP en karakteristieken zoals de locatie en het woningtype inzichtelijk gemaakt, waardoor in kaart wordt gebracht voor welk type woningen of buurten de hWP voornamelijk of juist niet interessant is. In het bijzonder wordt expliciete aandacht besteed aan het vergelijken van de kosten ten opzichte van de inzet van de hr-ketel, wat gedurende de analyse een belangrijk ijkpunt is voor de vergelijking van de kosten voor de hWP.

2.1.3 *Stap 3: Kostenanalyse: eindgebruikerskosten van de hybride warmtepomp*

Om een volledig beeld in kaart te brengen van de kosten van de hWP worden ook de eindgebruikerskosten in kaart gebracht. De analyse is op gelijke wijze ingestoken als stap 3, waarbij gericht wordt op de verschillende kostencomponenten die relevant zijn voor de eindgebruiker.

De verschillen in kosten voor de eindgebruiker ten opzichte van de nationale kosten zitten veelal in transacties: de “verplaatsing” van geld van een stakeholder naar een ander. Voor een gebouweigenaar gelden bijvoorbeeld belastingen en subsidies (die als “verplaatsing” van kapitaal van eigenaar naar staat of omgekeerd niet gezien worden als kosten op nationaal niveau), alsmede alternatieve rentevoeten die gehanteerd worden in de kostenbepalingen. In deze stap worden dan als volgt ook alternatieve kostencomponenten onderscheiden ten opzichte van stap 3:

- Isolatiekosten voor de eindgebruiker (inclusief relevante transacties);
- Installatiekosten voor de eindgebruiker (inclusief relevante transacties);
- Onderhouds- en operatiekosten voor de eindgebruiker (inclusief relevante transacties);
- Kosten voor energieverbruik (inclusief belastingen en heffingen);
- Subsidie (o.b.v. aangenomen beleid volgende uit stap 1).

De informatie over de eindgebruikerskosten biedt ons vervolgens een helder beeld van de verschillende kosten waar een gebouweigenaar mee te maken krijgt bij de omschakeling naar een hybride warmtepomp. Tevens wordt er beschouwd hoe deze kosten zich over het algemeen verhouden tot die van de alternatieve warmtetechnieken, waarbij specifieke aandacht besteed wordt aan de vergelijking met de hr-ketel welke ook in deze analyse wordt gehanteerd als ijkpunt. Bovendien wordt expliciete aandacht besteed aan hoe de inzichten zich verhouden tot de bevindingen met betrekking tot de nationale kosten die volgen uit stap 2.

2.1.4 *Stap 4: Impactanalyse: de invloed van de inzet van de hybride warmtepomp*

Om te bepalen hoe de hybride warmtepomp als oplossing in verhouding staat tot de andere duurzame warmtetechnieken moeten verschillende scenario's doorgerekend en beschouwd worden. We zijn benieuwd naar 2 vormen van inzet op de hWP: inzet op de lange termijn en inzet op de korte termijn. Onder inzet op de lange termijn verstaan we grofweg de verplichting van de hWP voor gasaansluitingen in het eindbeeld, dat wil zeggen dat in de bepaling van de voorkeursopties in 2030 de hr-ketel geen optie meer is. Onder de korte termijn inzet verstaan we de grootschalige inzet van de hWP in de huidige situatie, dat wil zeggen dat in de huidige omstandigheden (in het jaar 2020) de hWP wordt uitgerold door heel Nederland waarbij nog gebruik wordt gemaakt van de aansluiting van aardgas.

Als startpunt en ter referentie wordt wederom de Startanalyse gebruikt. De volgende scenario's worden van elkaar onderscheiden:

a) Startanalyse (referentie): als referentiescenario wordt gebruik gemaakt van een doorrekening op basis van de Startanalyse. Hierin worden tevens de aanvullende randvoorwaarden zoals bepaald in stap 1 meegenomen.
b) hWP inzet op lange termijn: de configuratie van de Startanalyse vormt de basis van de berekening. Echter wordt de hr-ketel uitgesloten bij de optimalisatie in 2030 en worden gebouwgebonden isolatiemaatregelen geoptimaliseerd op basis van maatschappelijke kostenefficiëntie.
c) hWP inzet op korte termijn: de configuratie van de hWP inzet op de lange termijn vormt de basis van de berekening. Daarop aanvullend wordt een extra tussenstap toegevoegd: de inzet van de hWP in 2020. Hier wordt uitgegaan van de huidige situatie in 2020, waarna in 2030 het eindbeeld wordt gevormd via dezelfde methodiek als genoemd onder b.

In de eerste instantie wordt gekeken naar de invloed van de lange termijn inzet van de hWP door deze resultaten te vergelijken met de resultaten van de Startanalyse. Er wordt gekeken naar veranderingen in voorkeursopties die plaatsvinden, kostenverschillen die optreden en er wordt dieper ingegaan op de achterliggende redenen van deze verschuivingen.

Vervolgens wordt de korte-termijn inzet van de hWP beschouwd. Er wordt gekeken naar de potentiele CO_2-besparing die optreedt bij de inzet van de hWP in de gebouwde omgeving wanneer nog sprake is van aardgasgebruik en de kosten die daarbij om komen kijken. Er wordt hier specifiek gekeken naar de cijfers die volgen uit de Startanalyse in de referentie-situatie (2019) en de resultaten van het korte termijn scenario in het jaartal 2020.

De invloed van de inzet van de hWP op de inzet van isolatiemaatregelen wordt bepaald door de gemiddelde isolatieniveaus van de resultaten per scenario te vergelijken. Hierbij wordt gekeken naar hoe de toegepaste isolatieniveaus van elkaar verschillen en hoe de uitkomsten van zowel de lange als de korte termijn inzet van de hWP zich verhoudt tot de uitkomsten van de Startanalyse.

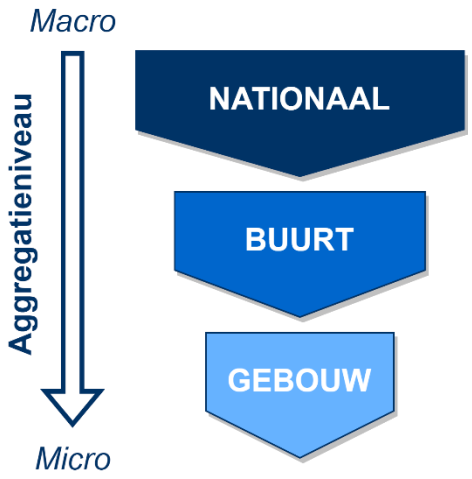
Als laatst wordt er gekeken naar de mate waarin de inzet van de hWP leidt tot een lock-in voor wijken waar de hWP niet het meest kosten efficiënte alternatief is. Dit gebeurt door te kijken naar de verschuivingen die plaats vinden bij alle 3 de verschillende scenario's met een hoofdzakelijke focus op de vergelijking van het korte termijn scenario: leidt de inzet van de hWP op korte termijn tot een lock-in voor bepaalde buurten of technieken? Hierbij wordt aandacht besteed aan verschuivingen in voorkeurstechnieken die optreden bij toevoeging van de "tussenstap" naar de hWP in 2020 en de invloed op isolatiemaatregelen.

3 De nationale meerkosten van de hybride warmtepomp

3.1 Introductie

In dit hoofdstuk wordt er een kostenanalyse gepresenteerd van het implementeren en gebruiken van de hybride warmtepomp als duurzaam alternatief voor het leveren van warmte in de Nederlandse gebouwde omgeving. Om een zo volledig mogelijk beeld te schetsen van de kosten die gemoeid zijn met het uitrollen van de hybride warmtepomp is ervoor gekozen om de analyse uit te voeren op drie schaalniveaus: nationaal-, buurt- en gebouw-niveau (zie Figuur 3-1).

Figuur 3-1: Opbouw kostenanalyse



Tabel 3.1 geeft een overzicht van de opbouw van het huidige hoofdstuk en de vraagstellingen die beantwoord worden per sectie. Het beantwoorden van de vragen in Tabel 3.1 doen wij op basis van een uitgebreide kostenanalyse aan de hand van informatie die de Startanalyse 2020 van het Planbureau voor de Leefomgeving biedt[6].

Tabel 3.1: Beschrijving opbouw kostenanalyse

Sectie	Schaalniveau	Onderzoeksvraag
3.3	Nationaal	• Wat zijn de totale jaarlijkse meerkosten van de hybride warmtepomp op nationaal niveau? • Wat zijn de jaarlijkse meerkosten van de hybride warmtepomp op nationaal niveau met betrekking tot de reductie van een ton CO_2?
3.4	Buurt	• Wat zijn de jaarlijkse meerkosten van de hybride warmtepomp voor verschillende type buurten? • Hoe verhouden de jaarlijkse meerkosten van de hybride warmtepomp voor verschillende type buurten zich tot andere warmtetechnieken?
3.5	Gebouw	• Wat zijn de jaarlijkse meerkosten van de hybride warmtepomp op gebouw niveau en hoe zijn deze opgebouwd?

[6] Planbureau voor de Leefomgeving (2020). Startanalyse aardgasvrije buurten 2020.

		• Hoe verhouden de jaarlijkse meerkosten van de hybride warmtepomp zich tot de kosten van het implementeren en gebruiken van de hr-ketel?

3.2 Definities

3.2.1 Kernbegrippen

In dit hoofdstuk staan een aantal kernbegrippen centraal die we hier vooraf definiëren. Tabel 3.2 geeft een overzicht van de definities van deze kernbegrippen.

Tabel 3.2: Definities kernbegrippen

Term	Afkorting	Omschrijving
Woningequivalent	WEQ	Een woningequivalent (afgekort: WEQ) is een inschatting van de hoeveelheid warmte-energie die nodig is om een gemiddelde Nederlandse woning van ruimteverwarming en warm water te voorzien. In dit rapport wordt aan iedere individuele woning één WEQ toegekend. Voor utiliteitsgebouwen worden WEQs op basis van bebouwingsoppervlakte toegekend waarbij 1 WEQ gelijk staat aan 130 m2.
Gebouwcategorie	GC	Alle gebouwen in Nederland worden in dit rapport gecategoriseerd naar een combinatie van verblijfsfunctie, gebouwtype en bouwperiode. Op deze manier kan er gekeken worden naar de kostenefficiëntie van een warmtetechniek voor verschillende type gebouwen.
Verblijfsfunctie	-	Ieder gebouw in Nederland heeft een verblijfsfunctie die aangeeft wat het doel is van een bepaald gebouw. De verblijfsfuncties die in dit rapport gehanteerd worden zijn: ‘wonen’ of ‘utiliteit’.
Capital Expenditures	CAPEX	Capital Expenditures (CAPEX) zijn in dit rapport vaste kosten die te maken hebben met het installeren van een bepaalde warmtetechniek.
Operational Expenditures	OPEX	Operational Expenditures (OPEX) zijn in dit rapport variabele kosten die te maken hebben met het gebruiken van een bepaalde warmtetechniek.
Jaarlijkse Kosten (annuïtaire kosten)	-	De jaarlijkse kosten van een warmtetechniek worden bepaald door alle kosten van de warmtetechniek te nemen over de technische levensduur ervan en deze te converteren naar een reeks jaarlijks terugkerende kosten van gelijke grootte; dit wordt gedaan middels het toepassen van de *Equivalent Annual Cost* (EAC) methode.
Meerkosten	-	Meerkosten geven het kostenverschil aan tussen twee warmtetechnieken. Meerkosten worden in dit rapport gebruikt om aan te geven hoe de kosten van een warmtetechniek (bijv. de hybride warmtepomp) zich verhouden ten opzichte van de warmtetechniek die geïmplementeerd wordt in een referentiescenario (bijv. een hr-ketel op aardgas)

3.2.2 Scenario’s

Het huidige hoofdstuk bestaat voor een groot deel uit het vergelijken van de kosten van het implementeren en gebruiken van de hWP met die van een aantal andere warmtetechnieken. Alle

scenario's zijn uitgewerkt conform de uitgangspunten van de Startanalyse 2020[7]. Een overzicht van de scenario's waarmee gerekend wordt in dit hoofdstuk staat weergegeven in Tabel 3.3.

Tabel 3.3: Beschrijving scenario's en warmteoplossingen

ID	Scenario	Omschrijving Warmtetechniek
1	Referentie	Dit is de inzet van een *hr-ketel op aardgas in 2030*.
2	Hybride warmtepomp	Dit is de inzet van een *hybride warmtepomp op groengas en elektriciteit in* 2030. Bij deze warmtetechniek wordt er een onderscheid gemaakt tussen twee varianten, namelijk: (i) de hybride warmtepomp onderhevig aan de voorwaarde dat gebouwen minstens geïsoleerd worden tot en met schillabel B (i.e. B+) en (ii) de hybride warmtepomp met de eis dat gebouwen over een isolatiegraad van ten minste schillabel D beschikken (i.e. D+).
3	hr-ketel	Dit is de inzet van een *hr-ketel op groengas in 2030.* Bij deze warmtetechniek wordt er ook een onderscheid gemaakt tussen twee varianten, namelijk: de hr-ketel met schillabel B+ en de hr-ketel met schillabel D+.
4	All-Electric	Dit scenario betreft de implementatie van een geheel *elektrische warmtepomp in 2030*. Doorgerekende varianten betreffen een elektrische luchtwarmtepomp en een elektrische bodemwarmtepomp. Voor beide varianten geldt dat de inzet gepaard gaat met de eis dat gebouwen over een isolatiegraad van ten minste schillabel B beschikken (i.e. B+).
5	Lage Temperatuur (LT) Restwarmte*	Dit scenario betreft de implementatie van een *lage temperatuur warmtenet in 2030*. Er zijn acht verschillende lage temperatuur warmtenet configuraties meegenomen. Voor meer informatie hierover verwijzen we naar de documentatie van de Startanalyse Aardgasvrije Buurten 2020.
6	Midden Temperatuur (MT) Restwarmte*	Dit scenario betreft de implementatie van een *midden tot hoge temperatuur warmtenet in 2030*. Er zijn vier verschillende midden temperatuur warmtenet configuraties meegenomen. Voor meer informatie hierover verwijzen we naar de documentatie van de Startanalyse Aardgasvrije Buurten 2020.

** Het Vesta-MAIS model houdt er rekening mee dat het implementeren van een warmtenet als warmteoplossing in een buurt alleen gedaan kan worden mits zich er in de nabije omgeving een geschikte warmtebron bevindt.*

3.2.3 *De hybride warmtepomp: technische specificaties*

In dit rapport gaan we uit van een 'standaard hybride warmtepomp', dat is in feite een combinatie van een hr-ketel en een elektrische lucht-water warmtepomp. Hierbij wordt de elektrische warmtepomp ingezet ten behoeve van de ruimteverwarming en de hr-ketel ten behoeve van de tapwatervraag én de ruimteverwarmingsvraag indien het vermogen van de elektrische warmtepomp niet toereikend is (dit is met name het geval op koude dagen). Voor de technische aannames van genoemde installatie volgen we de Startanalyse[8], dat houdt in dat er gerekend wordt met de volgende technische gegevens (voor woningen):

- Investeringskosten hWP:
  - Vaste component = €2315,-
  - Variabele component = €250,- per kW
- *Seasonal performance factor* van de hWP voor ruimteverwarming = 320% (gemiddelde *coëfficiënt of performance* van 3,2)

[7] Bron: PBL (2020). Startanalyse aardgasvrije buurten 2020. Zie verder ook Box 1 in Hoofdstuk 2 voor een nadere toelichting op de Startanalyse 2020.

[8] Zie voor meer informatie over de uitgangspunten van het Vesta MAIS model het 'Functioneel Ontwerp 4.0', Planbureau voor de Leefomgeving 2019.

- Een kostenontwikkeling waarin de investeringskosten van de hybride warmtepomp tussen nu en 2030 met 45 procentpunten dalen van index getal 100 naar index getal 55.

3.2.4 Kostencijfers

Alle typen kosten die besproken worden in dit hoofdstuk worden uitgedrukt in *jaarlijkse kosten*. Op deze manier kan er een zinnige vergelijking gemaakt worden tussen verschillende warmtetechnieken ondanks het gegeven dat niet alle warmtetechnieken gekritiseerd zijn door eenzelfde technische levensduur en/of ratio vaste versus variabele kosten. Vaste kosten (i.e. 'CAPEX'), zoals investeringskosten, worden voor alle warmtetechnieken als jaarlijkse kosten gepresenteerd door aan te nemen dat deze kosten worden voorgefinancierd en annuïtair afgeschreven tegen een maatschappelijke rentevoet van 3% over de gehele technische levensduur van iedere specifieke warmteoplossing[9]. Alle kostencijfers die gerapporteerd zijn in het huidige hoofdstuk dienen geïnterpreteerd worden als nationale meerkosten of als CO_2-reductiekosten[10]:

- **Nationale meerkosten:** de nationale meerkosten betreffen alle kosten die direct gemoeid zijn met het implementeren en gebruiken van een specifieke warmtetechniek. Dit omvat alle kostencomponenten die weergegeven staan in Tabel 3.4. Let op dat er uitsluitend gekeken wordt naar directe of 'werkelijke' kosten; d.w.z. dat belastingen en subsidies niet meegerekend worden. Het toegevoegde '*meer*' duidt erop dat dit begrip de nationale kosten van een specifieke warmtetechniek uitdrukt *ten opzichte van* die uit een referentiescenario (zie Tabel 3.3 voor een omschrijving van de gehanteerde scenario's). Meerkosten kunnen dus beschouwd worden als *additionele* kosten[11].

- **CO_2-reductiekosten:** de CO_2-reductiekosten betreffen de kosten die gemoeid zijn met het reduceren van één ton CO_2 middels het implementeren van een bepaalde warmtetechniek. Deze kosten worden berekend door de nationale meerkosten van een warmtetechniek op buurtniveau te nemen en die te delen door de reductie van de CO_2-uitstoot van de buurt in kwestie. De CO_2-reductie is gedefinieerd als het verschil tussen de emissies die gepaard gaan met de inzet van een specifieke warmtetechniek en de emissies in de referentiesituatie (inzet van de hr-ketel op aardgas).

Tevens zoomen wij in dit hoofdstuk in op de *opbouw* van de nationale meerkosten. Hierbij zijn de volgende kostencomponenten[12] van belang:

Tabel 3.4: Beschrijving van kostencomponenten

ID	Kostencomponent	Type	Omschrijving
K1	Infrastructuurkosten*	Vast (CAPEX)	• Het implementeren van een duurzame warmtetechniek vereist vaak dat de omliggende infrastructuur wordt aangepast; denk hierbij aan kosten die gemoeid zijn met verzwaring van het elektriciteitsnetwerk, verwijdering van het gasnetwerk, of de aanleg of uitbreiding van het warmtenet.

[9] Vaste kosten, zoals de kosten die eenmalig gemaakt moeten worden om een warmtetechniek te installeren, worden dus geconverteerd naar *een reeks jaarlijks terugkerende kosten van gelijke omvang*; waarbij de lengte van de reeks bepaald wordt door de technische levensduur van de desbetreffende warmtetechniek.

[10] Er zal bij iedere figuur of tabel steeds aangegeven worden welke van de twee kostentypen er bedoeld wordt.

[11] Let op: meerkosten kunnen ook negatief zijn. Wanneer meerkosten negatief zijn betekent het dat een bepaalde warmtetechniek *lagere* kosten genereerd (i.e. voordeliger is) dan die van de warmtetechniek in een referentiesituatie.

[12] Voor de kostencomponenten K1 (vaste infrastructuurkosten), K5 (variabele infrastructuurkosten) en K4 (energielasten) zijn de data alleen op buurtniveau beschikbaar. Voor de overige kostencomponenten is de data beschikbaar op gebouwniveau. Om deze componenten op gebouwniveau uit te drukken moet er dus kostenallocatie plaatsvinden; i.e. hoe worden de totale kosten van een buurt verdeeld over de gebouwen die zich in een bepaalde buurt bevinden? Een beschrijving van deze kostenallocatieprocedure is te vinden in Bijlage B.

K2	Isolatiekosten	Vast (CAPEX)	• Voor een aantal warmte-oplossingen is een minimale energiekwaliteit van het gebouw van energielabel B vereist. Dit geldt bijvoorbeeld voor lage temperatuur restwarmtelevering of de volledige warmtepomp. Voor andere warmte-oplossingen, zoals de hybride warmtepomp, wordt er uitgegaan in de Startanalyse van een 'basis-isolatieniveau' van energielabel D. Om genoemde isolatieniveaus te bereiken worden er isolatiekosten toegerekend aan de gebouwen waarvoor dat nodig is.
K3	Installatiekosten	Vast (CAPEX)	Dit zijn kosten die te maken hebben met het installeren van een bepaalde warmtetechniek in een bepaald gebouw.
K4	Energielasten*	Variabel (OPEX)	Dit zijn de kosten die te maken hebben met de dagelijkse operatie van een warmtetechniek (e.g. inkoop van gas en/of elektriciteit).
K4	Onderhoudskosten Warmtetechniek	Variabel (OPEX)	Dit zijn de kosten die gemoeid zijn met onderhoud en reparatie van de warmtetechniek over de technische levensduur van de desbetreffende warmtetechniek.
K5	Onderhoudskosten Infrastructuur*	Variabel (OPEX)	Dit zijn de kosten die gemoeid zijn met onderhoud en reparatie van de infrastructuur die de operatie van een warmtetechniek mogelijk maakt.

** Deze kostencomponenten worden door Vesta-MAIS alleen op buurtniveau gegenereerd. Voor het uitdrukken van deze kostencomponenten op gebouwniveau moet een kostenallocatie plaatsvinden; de beschrijving van dit proces staat in Bijlage B.*

De kostenanalyse van de hybride warmtepomp op nationaal niveau wordt uitgevoerd door te kijken naar de jaarlijkse nationale meerkosten van het implementeren van de hybride warmtepomp ten opzichte van het referentiescenario (i.e. de implementatie van de hr-ketel op aardgas in 2030).

De kostenanalyse op buurtniveau wordt uitgevoerd door de meerkosten van de hybride warmtepomp (Scenario 2, zie Tabel 3.3) te vergelijken met de meerkosten van Scenario's 3 t/m 6. Let op dat de 'meerkosten' hier betrekking hebben op een vergelijking met het referentiescenario (Scenario 1); dat wil zeggen dat de gerapporteerde kosten van iedere warmtetechniek aangeven wat de additionele kosten zijn van de desbetreffende warmtetechniek t.o.v. die van het implementeren van de warmtetechniek in het referentiescenario (zie definitie 'meerkosten' aan het begin van de huidige sectie).

De kostenanalyse op gebouwniveau wordt uitgevoerd door de meerkosten van de hybride warmtepomp (Scenario 2, zie Tabel 3.3) te vergelijken met de meerkosten van de hr-ketel op groengas (Scenario 3, zie Tabel 3.3). Er wordt hier voor beide warmtetechnieken onderscheid gemaakt tussen twee varianten: (i) warmtetechniek met schillabel B+ en (ii) warmtetechniek met schillabel D+.

Tabel 3.5 biedt een overzicht van de details omtrent de kostenanalyses.

Tabel 3.5: Details kostenanalyse.

Kostenanalyse	Warmtetechnieken	Kostencijfers*
Nationaal	• Hybride warmtepomp	• Totale jaarlijkse nationale kosten** • Jaarlijkse nationale CO_2-reductiekosten
Buurt	• All-electric • hr-ketel • Hybride warmtepomp • LT-restwarmte	• Totale jaarlijkse nationale kosten** • Jaarlijkse nationale CO_2-reductiekosten

	• MT-restwarmte	
Gebouw	• hr-ketel (schillabel B+, schillabel D+) • Hybride warmtepomp (schillabel B+, schillabel D+)	• Infrastructuurkosten (capex) • Isolatiekosten (capex) • Installatiekosten (capex) • Energielasten (opex) • Onderhoud warmtetechniek (opex) • Onderhoud infrastructuur (opex)

** N.B. alle kosten betreffen meerkosten. Dat wil zeggen dat alle kostencijfers uitdrukken wat het kostenverschil is tussen het implementeren van een bepaalde warmtetechniek t.o.v. van de warmtetechniek die geïmplementeerd wordt in het referentiescenario (i.e. een hr-ketel op aardgas in 2030).*

*** Totale jaarlijkse kosten = Infrastructuurkosten + Isolatiekosten + Installatiekosten + Energielasten + Onderhoud warmtetechniek + Onderhoud infrastructuur.*

3.3 De kosten van de hybride warmtepomp op nationaal niveau

3.3.1 Jaarlijkse totale nationale meerkosten van de hybride warmtepomp

De huidige sectie presenteert de totale nationale kosten die gemoeid zijn met het implementeren en opereren van de hybride warmtepomp ten opzichte van het referentiescenario (Scenario 1, zie Tabel 3.3). De totale nationale meerkosten omvatten zowel CAPEX als OPEX.

Het berekenen van de nationale meerkosten van de hWP gebeurt op twee manieren in het Vesta-MAIS model:

1. Het installeren en de inzet van de hWP gecombineerd met het isoleren van gebouwen *tot en met* **label B** (i.e. schillabel B+)
2. Het installeren en de inzet van de hWP gecombineerd met het isoleren van gebouwen *tot en met* **label D** (i.e. schillabel D+)

Het is belangrijk om het isoleren van gebouwen mee te nemen in de kostenraming van de hWP omdat de isolatiegraad van een gebouw invloed heeft op de effectiviteit, en dus de kostenefficiëntie, van de hWP; immers, een goed geïsoleerd gebouw is goedkoper om te verwarmen met de hWP. Alvorens het construeren van Figuur 3-2 is ervoor gekozen om per buurt[13] te bepalen welke van de twee bovenstaande hWP configuraties (i.e. schillabel B+ of schillabel D+) het goedkoopst is. Dit betekent dat Figuur 3-2 in feite de *laagste* cumulatieve nationale meerkosten van de hWP toont. Er is tevens voor gekozen om de kosten te schalen naar *woningequivalenten* (i.e. afgekort als 'WEQ'); op deze manier corrigeren we voor het feit dat sommige buurten meer woningen bevatten dan anderen wat de kostenverdeling scheef zou trekken. Omdat het een *cumulatieve* curve betreft kan er op de y-as afgelezen worden hoeveel kapitaal er nodig is om een x-aantal woningequivalenten te verduurzamen met behulp van de hWP.

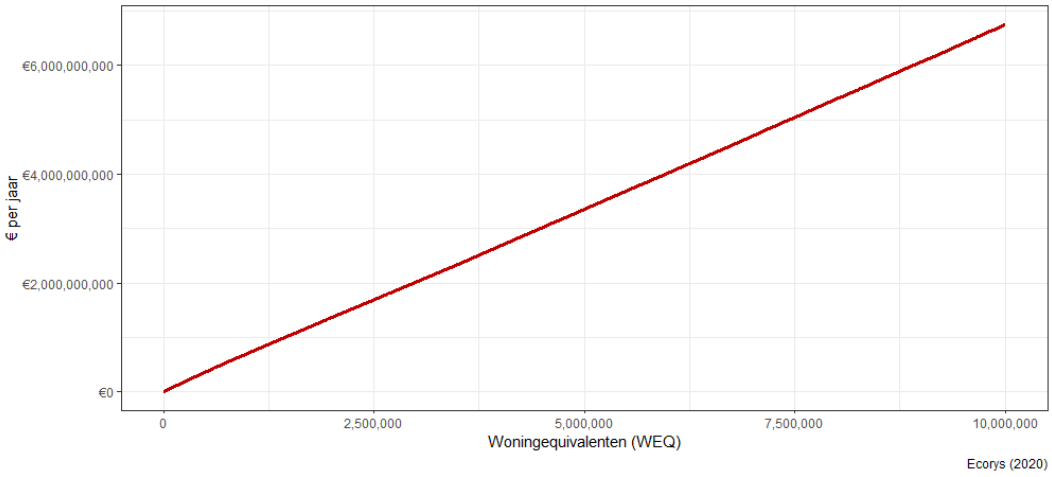
Figuur 3-2 laat zien dat de cumulatieve kosten van de hWP bij benadering lineair verdeeld[14] zijn wanneer deze geschaald zijn naar woningequivalenten. Op basis van de lineaire verdeling van de kosten kan men afleiden dat de kosten van het implementeren van de hWP ongeveer gelijk verdeeld zijn per WEQ; anders gezegd draagt iedere WEQ ongeveer evenveel bij aan het totale kostenplaatje. Let op dat een lineaire verdeling van kosten per WEQ *niet* betekent dat de kosten voor ieder gebouw

[13] Het totaal aantal buurten in Nederland betreft 13,688. Vanwege incomplete data wordt er in de huidige paragraaf gewerkt met een subset van 13.281 buurten.

[14] Let op: de cumulatieve kosten zijn *niet* perfect lineair verdeeld; wanneer men inzoomt op een willekeurig onderdeel van de kostencurve dan wordt het duidelijk dat het verloop van de curve niet glad maar kronkelig is. De kronkels in de curve geven aan dat bepaalde WEQ-eenheden meer (of minder) kosten toevoegen aan het totaalplaatje t.o.v. van de omliggende WEQ-eenheden op de curve. Dit houdt in dat de kosten per WEQ eerder trapsgewijs stijgen dan in een rechte lijn.

hetzelfde zijn; immers voor utiliteitsgebouwen geldt dat dit veelal grote gebouwen kunnen zijn die bestaan uit meerdere WEQs. De jaarlijkse meerkosten voor het implementeren van de hWP voor alle WEQs (circa 10 miljoen) bedragen ongeveer 6,75 miljard euro per jaar. Figuur 3-2 bevat geen negatieve waarden, wat duidt dat de inzet van de hybride warmtepomp altijd even duur of duurder is dan de inzet van de hr-ketel. Belangrijk hierin is wel dat deze figuur is samengesteld op basis van de buurtdata van de Startanalyse 2020. Binnen buurten komt het regelmatig voor dat individuele gebouwen goedkoper kunnen worden verwarmd met een hybride warmtepomp dan met een hr-ketel. Buurten bestaan echter uit zowel gebouwen die met een hybride warmtepomp duurder uit zijn als gebouwen die goedkoper uit zijn. Gezamenlijk leidt dat in de Startanalyse 2020 er toe dat er geen buurten zijn die als geheel goedkoper uit zijn bij een volledige inzet van de hybride warmtepomp in vergelijking met de inzet van de hr-ketel.

Figuur 3-2: Totale jaarlijkse cumulatieve nationale meerkosten van de hybride warmtepomp



3.3.2 *Jaarlijkse nationale CO_2-reductiekosten van de hybride warmtepomp*

Iedere buurt in Nederland kan een totale jaarlijkse CO_2-uitstoot toegekend worden. Deze CO_2-uitstoot wordt uitgedrukt in tonnen CO_2 (tCO_2). Het reduceren van de huidige uitstoot naar 0 ton per buurt kan gedaan worden middels het implementeren van de hWP[15]. De kosten hiervoor zijn niet gelijk verdeeld over buurten; d.w.z. voor sommige buurten zijn de kosten van het reduceren van één ton CO_2 hoger (of lager) dan voor andere buurten[16].

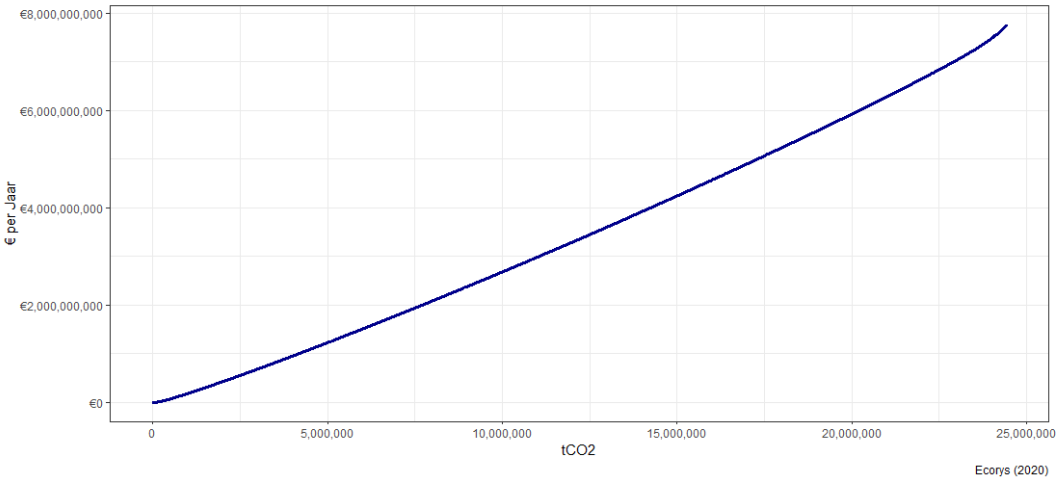
Figuur 3-3 laat de *cumulatieve* kosten zien van het reduceren van de totale CO_2-uitstoot (uitgedrukt als tonnen CO_2) van alle buurten in Nederland[17]. Met deze figuur wordt zichtbaar tegen welke kosten welke CO_2-emissiereductie bereikt kan worden. Uit het bereik van de X-as van Figuur 3-3 is te zien dat de totale uitstoot die toegeschreven kan worden aan het verwarmen van de Nederlandse gebouwde omgeving ongeveer 24 megaton CO_2 in 2019 bedraagt in de referentiesituatie.

15 In dit hoofdstuk volgen we de uitgangspunten van de Startanalyse. De inzet van de hWP gaat in deze studie gepaard met het gebruik van CO_2-neutrale elektriciteit en groengas als energiedragers waardoor de resterende CO_2-emissies bij de inzet van de hWP netto nul zijn.

16 Verder is het ook zo dat er binnen buurten variatie bestaat in de hoogte van de CO_2-reductiekosten per gebouw. In dit hoofdstuk presenteren we de cijfers op basis van gemiddelden voor alle gebouwen tezamen.

17 De CO_2-uitstoot van een buurt in de referentiesituatie waarbij de hr-ketel op aardgas wordt ingezet in het zichtjaar 2030.

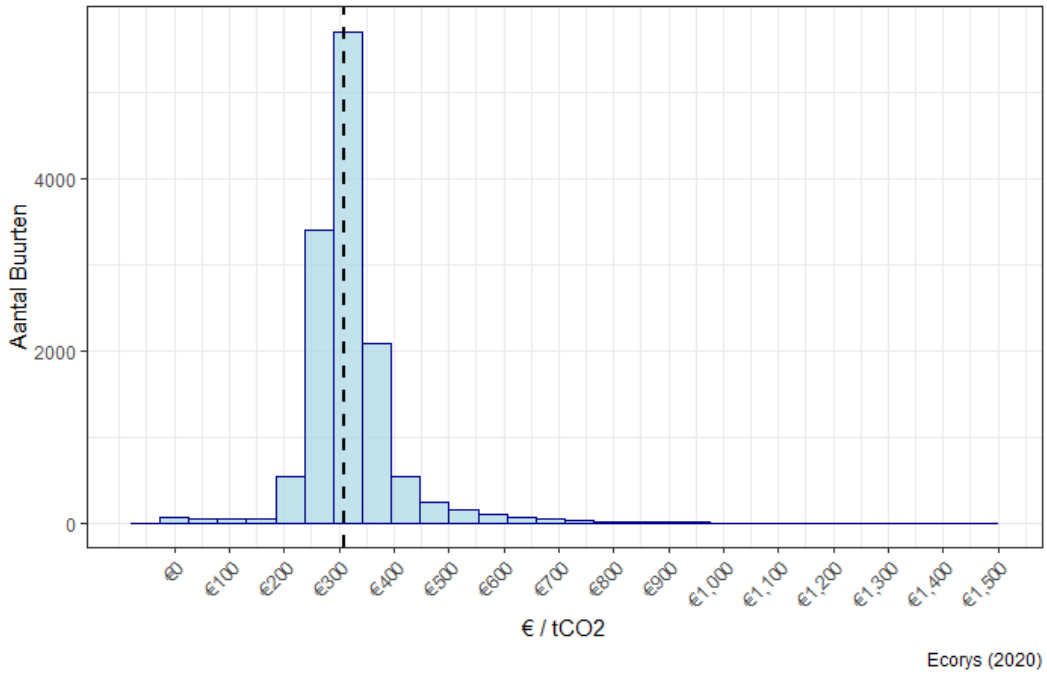
Figuur 3-3: Jaarlijkse cumulatieve nationale meerkosten CO_2-reductie met de hybride warmtepomp



Nota bene: De kostencurve is gerangschikt op basis van een oplopende kostprijs per ton CO_2-emissiereductie per buurt (uitgedrukt als €/tCO_2 per jaar).

De CO_2-reductiekostprijs van de hWP kent een beperkte bandbreedte voor een overgrote meerderheid van de buurten in Nederland, zie Figuur 3-4. De mediaan van de CO_2-reductiekostprijs bedraagt €310,-[18] en wordt aangegeven in Figuur 3-4 middels een zwart gestipte lijn. De conclusie die op basis van deze gegevens getrokken kan worden is dat het reduceren van de CO_2-uitstoot van het grootste gedeelte van de Nederlands gebouwde omgeving gedaan kan worden met de hWP voor een kostprijs van rond de €310,-. Voor een overzicht van de mediaan van de CO_2-reductiekostprijs voor verschillende buurttypen zie Bijlage F.

Figuur 3-4: Verdeling CO_2-reductiekostprijs van de hybride warmtepomp



[18] Het gemiddelde bedraagt €340,53. Wij geven de voorkeur aan de mediaan als centrummaat omdat deze minder sterk beïnvloed wordt door zogenaamde *outliers* (i.e. extreme waarden).

3.4 De kosten van de hybride warmtepomp op buurtniveau

Deze paragraaf presenteert analyse van de kosten van de hWP voor verschillende type buurten in Nederland. Op deze manier wordt een scherper beeld verkregen van de aantrekkelijkheid van de hWP als duurzaam warmte-alternatief. De eerstvolgende sectie presenteert de buurttypologie die vervolgens wordt gebruikt om te onderzoeken in welke buurtcategorieën de hWP als meest kostenefficiënte warmtetechniek naar voren komt.

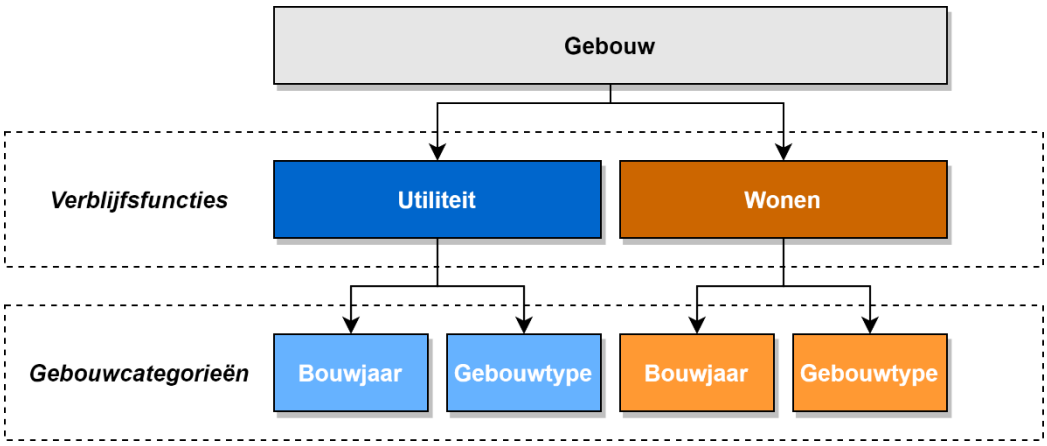
3.4.1 Buurttypologie: aanpak

De gebouwde omgeving van Nederland valt op te delen in ongeveer 13.300 buurten. Deze buurten verschillen qua samenstelling sterk maar er zijn ook overeenkomsten en patronen te identificeren in termen van o.a. de bebouwingsdichtheid en de aanwezigheid van bepaalde typen gebouwen. Om aan te kunnen wijzen waar de hybride warmtepomp het meest (en minst) aantrekkelijk is om te implementeren als duurzame warmteoplossing is het van belang een degelijke classificatie van buurten te gebruiken.

Het bepalen van een buurt-classificatie of typologie is inmiddels veelvuldig eerder gedaan (zie e.g. Wassenberg et al., 2011). Voor de huidige analyse is er eerst gekeken naar welke bestaande typologieën er mogelijk bruikbaar zijn voor het onderzoeken van de aantrekkelijkheid van de hWP. Gebleken is dat de buurttypologieën van CE Delft (2015) en ABF Research (2012) het meest in de buurt komen van een bruikbare classificatie. Bij nader inzien is er toch besloten om een eigen typologie te ontwikkelen. De reden hiervoor is hoofdzakelijk dat de huidige typologie gecreëerd is op basis van statistische en datawetenschappelijke technieken waardoor de subjectiviteit van het opstellen van classificatie-criteria tot een minimum beperkt is gebleven. De ‘data-gedrevenheid’ van de huidige buurttypologie staat in tegenstelling tot de totstandkoming van de typologie van CE Delft (2015) waarbij er geen gebruik is gemaakt van dergelijke statistische technieken. Verder heeft het ontwikkelen van een unieke typologie als voordeel dat deze toegespitst kan worden op de scope van het huidige onderzoek, namelijk: het staven van de relatieve aantrekkelijkheid van alternatieve warmte-oplossingen voor de gebouwde omgeving. Ter illustratie, de typologie van ABF Research (2012) is o.a. gebaseerd op de ‘bereikbaarheid’ van een buurt. Waar dit interessant kan zijn voor vraagstukken omtrent transport & mobiliteit, lijkt het een minder relevante dimensie voor het onderzoeken van de aantrekkelijkheid van de hWP als CO_2-arme warmtetechniek. Kortom, de meerwaarde van de huidige buurttypologie uit zich in het feit dat deze ‘*data-driven & tailored’* is.

Iedere buurt heeft een oppervlakte die toegewijd is aan bebouwing (uitgedrukt in km2). Deze oppervlakte kan op verschillende manieren onderverdeeld worden. De dimensies waarlangs deze oppervlakten onderverdeeld worden bepalen het karakter van een buurttypologie. In deze studie kiezen we ervoor om de gebouwde oppervlakten op te delen over (i) verblijfsfunctie, (ii) bouwperioden en (iii) gebouw typen. Deze drie dimensies worden gecombineerd in zogenaamde ‘gebouwcategorieën’ (zie Figuur 3-5). Een voorbeeld van zo’n gebouwcategorie is “*woningen uit 1930 met het gebouwtype rijwoning*”. Een ander voorbeeld is “*utiliteitsgebouwen uit 1990 met het gebouwtype kantoor*”. In totaal worden er 28 gebouwcategorieën onderscheiden (zie Bijlage E voor een totaaloverzicht).

Figuur 3-5: Overzicht classificatie van gebouwen



Het opdelen van de gebouwde oppervlakte van een buurt in deze gebouwcategorieën leidt ertoe dat iedere buurt een uniek 'oppervlakte-profiel' toebedeeld krijgt. Een oppervlakte-profiel bestaat hiermee dus uit de relatieve verhouding van gebouwsegmenten binnen een buurt uitgedrukt als gebouwsegment-specifieke aandelen (proporties) van het totale buurt-specifieke gebouwde oppervlakte. Onze hypothese is dat deze oppervlakteprofielen een goede voorspeller zijn voor de aantrekkelijkheid van verschillende warmteoplossingen omdat hiermee alle relevante gebouw-specifieke karakteristieken in een buurt in één noemer meegenomen kunnen worden: de verblijfsfunctie, de bouwperiode, het gebouwtype én de oppervlakte van het gebouw.

Wanneer iedere buurt beschikt over een oppervlakte-profiel kunnen zij met elkaar vergeleken worden. Buurten waarvan de oppervlakte-profielen gelijkenis vertonen behoren tot dezelfde categorie. Buurten waarvan de oppervlakte-profielen niet op elkaar lijken behoren tot verschillende categorieën. De statistische techniek die gebruikt is om deze vergelijking te maken is een Principale Componenten Analyse (PCA) gecombineerd met een K-Means Clustering (voor een gedetailleerde beschrijving van deze procedure, zie Bijlage A). Op deze manier zijn de circa 13.000 buurten terug gebracht naar een handzaam aantal buurttypen. Nu kan er gekeken worden naar welke warmtetechniek(en) het meest aantrekkelijk is (zijn) voor een bepaalde buurttype en waarom dit zo is.

3.4.2 Buurttypologie: resultaten

Bovengenoemde aanpak voor het indelen van de buurten in buurtcategorieën heeft ertoe geleid dat er 16 clusters geïdentificeerd zijn die samen een goed beeld geven van de verschillende typen buurten die Nederland kent. Tabel 3.6 geeft de dominante hoofdassen van de 16 clusters weer: het gaat om de combinaties van vier gebouwtypen en vier bouwperioden.

Tabel 3.6: Cluster indexering schema

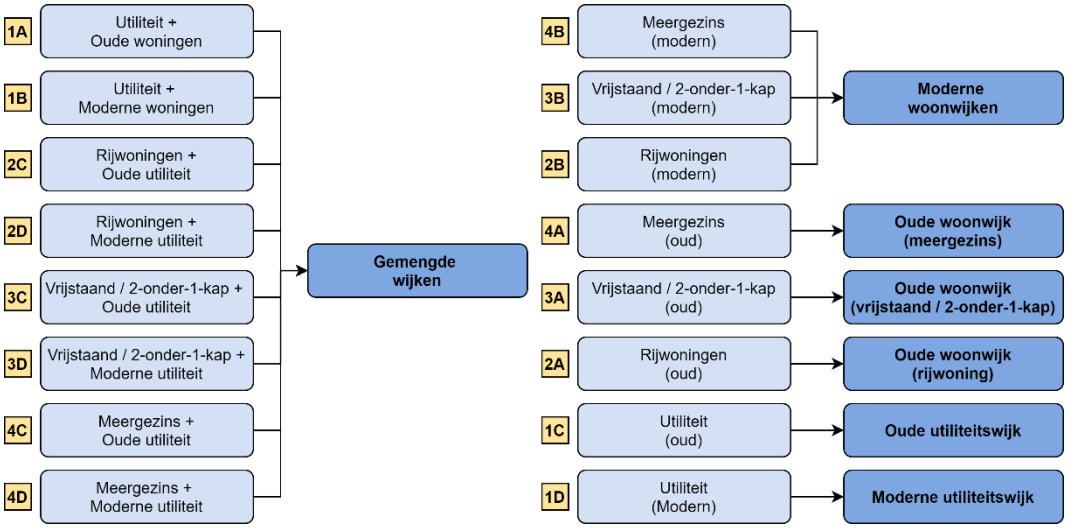
Index	Dominant Gebouw Type*	Index	Dominante Bouwperiode**
1	Utiliteitsgebouw	A	Voor 2000
2	Rijwoningen	B	Na 2000
3	Vrijstaande en twee-onder-een-kap woningen	C	Voor 1990
4	Meergezinswoning	D	Na 1990

** Het Dominante Gebouw Type geeft aan welk gebouw er het meest voorkomt in de buurten die zich in een bepaald cluster bevinden.*

*** De Dominante Bouwperiode geeft aan welke bouwperiode er het meest voorkomt in de buurten die zich in een bepaald cluster bevinden.*

Wanneer men de dominante gebouwtypen combineert met de dominante bouwperioden komt men tot 16 clusters van buurten die samen de Nederlandse gebouwde omgeving beschrijven. Aan de hand van hoe vaak de clusters voorkomen en de logische fit die de clusters hebben ten opzichte van elkaar hebben we de clusters samengevoegd tot 7 hoofd buurtcategorieën. Figuur 3-6 vat deze stap samen.

Figuur 3-6: Overzicht buurtclusters en categorisering



Het beeld dat uit de clusteranalyse naar voren komt is dat er over de grote lijnen 7 type buurten in Nederland zijn (zie de donkerblauwe blokken). Wanneer men kijkt naar de oppervlakte-verdelingen van deze 7 buurt typen dan ziet men de overeenkomstige dominante gebouwtypen bovendrijven. Figuur 3-7 illustreert dit. In deze figuur zijn gebouwtypen met verblijfsfunctie “wonen” rood gemarkeerd, en die met verblijfsfunctie “utiliteit” zijn gemarkeerd in het blauw. De gegevens in Figuur 3-7 zijn berekend als de gemiddelde oppervlakte-aandelen van ieder gebouwtype van alle buurten die tot een bepaalde buurtcategorie horen. Het is te zien dat de namen van de buurtcategorieën goed passen bij het karakter van de oppervlakte-verdelingen. Ter illustratie, de buurten in de buurtcategorie ‘*Oude Woonwijk (Vrijstaand, Twee-onder-een-kap)*’ bestaan (gemiddeld) voor ~65% uit vrijstaande woningen, voor ~12.5% uit twee-onder-een-kap woningen, en voor de resterende ~22.5% uit andere gebouwtypen. Het indelen van de buurten in buurtcategorieën is nuttig wanneer je wilt leren in wat voor type buurten welke warmte-oplossing het goed doet. Zo kun je gericht op zoek gaan naar toepassingsgebieden van warmtetechnieken in een handzaam aantal typen wijken. Deze buurtcategorieën vormen de verdere basis voor de vergelijkende analyse.

Figuur 3-7: Oppervlakte-aandelen van gebouwen per buurtcategorie

Ecorys (2020)

3.4.3 *Jaarlijkse nationale meerkosten en CO_2-reductiekosten hybride warmtepomp per buurttype*

In de vorige sectie is de buurttypologie gepresenteerd die in de huidige sectie wordt gebruikt om te onderzoeken in welke buurtcategorieën de hWP als meest kostenefficiënte warmtetechniek naar voren komt. Figuur 3-8 laat de totale jaarlijkse nationale meerkosten zien van de hWP (linkerdeel van de figuur), en de jaarlijkse nationale meerkosten die gemoeid zijn met het reduceren van één ton CO_2 middels de hWP voor iedere buurtcategorie (rechterdeel van de figuur). De gerapporteerde cijfers betreffen het gemiddelde van de kosten van alle buurten die in een bepaalde buurtcategorie vallen. Voor het berekenen van deze gemiddelde kosten per buurtcategorie is eerst gekeken naar welke van de twee hWP warmteoplossingen (i.e. hWP met schillabel B+ of hWP met schillabel D+) het meest kostenefficiënt is per buurt. Figuur 3-8 laat dus twee dingen zien: (a) hoeveel het per buurtcategorie op jaarbasis *minimaal* kost om de hWP te implementeren, en (b) hoeveel het per buurtcategorie op jaarbasis (gemiddeld) *minimaal* kost om de CO_2-uitstoot van de buurten binnen een bepaalde buurtcategorie met één ton te reduceren middels de hWP[19].

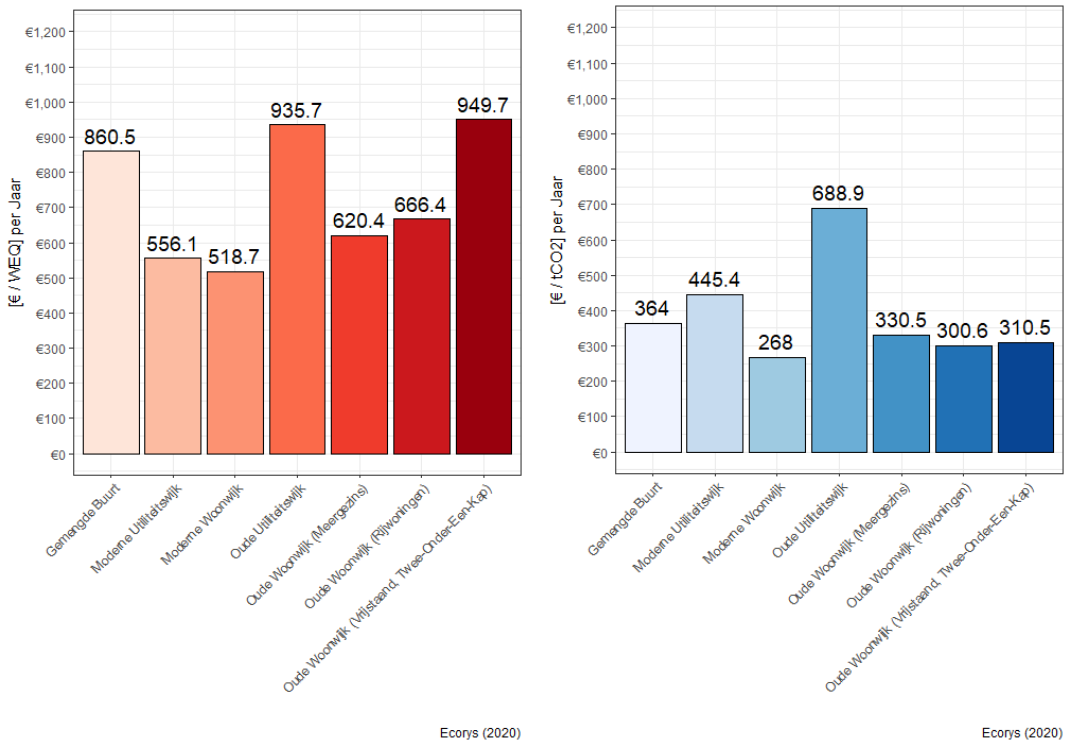
Op basis van Figuur 3-8 kan geconcludeerd worden dat:

- De inzet van de hWP is het goedkoopst in buurten waarin het merendeel aan gebouwen bestaat uit meergezinswoningen. De hWP is tegen relatief lage kosten in te zetten in buurten met een groot aandeel moderne gebouwen. Een verklaring hiervoor is het relatief lage energieverbruik in deze wijken, wat zich vertaalt in lagere installatie kosten (kleinere hWP) en lagere variabele lasten.
- De inzet van de hWP is duurder in buurten met een groot aandeel oude vrijstaande woningen en/of oude utiliteitsgebouwen. Grotere en vrijstaande woningen zijn duurder om te verwarmen, er is een grotere hWP nodig en er is meer energieverbruik.
- Wat opvalt is dat de verschillen tussen de verschillende buurt categorieën kleiner wordt wanneer men de kostenefficiëntie van het reduceren van CO_2-uitstoot meeneemt. Hoewel de kosten voor de inzet van de hybride warmtepomp in oude woonwijken hoger zijn dan in alle andere wijken

[19] Bijlage F laat zien wat de gemiddelde CO_2-uitstoot is van de buurten die zich in een bepaalde buurtcategorie bevinden.

(grafiek links) is er ook meer CO_2 te besparen vanwege het hogere energieverbruik per woning. Dit vertaalt zich in kleinere verschillen in de grafiek aan de rechter zijde.

Figuur 3-8: De jaarlijkse nationale meerkosten van de inzet van de hybride warmtepomp voor zeven verschillende buurttypen. De jaarlijkse kosten worden uitgedrukt in euro per woningequivalent (links) en euro per ton CO_2-emissiereductie (rechts).



3.4.4 *Jaarlijkse nationale meerkosten en CO_2-reductiekosten per warmtetechniek per buurttype*

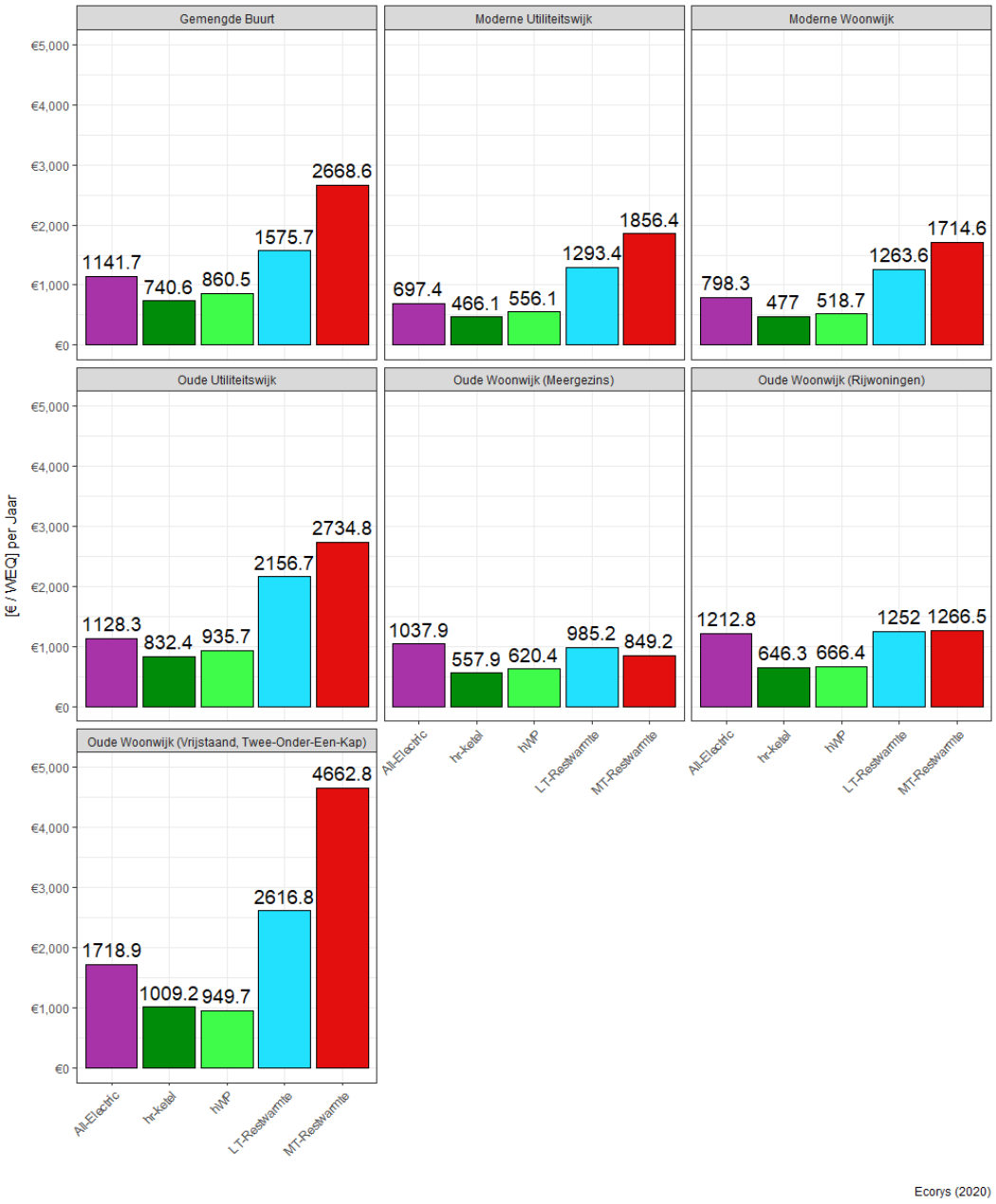
Figuur 3-9 laat zien hoe de jaarlijkse nationale meerkosten per warmtetechniek zijn verdeeld over de verschillende buurtcategorieën. Let op dat ervoor gekozen is om éérst per buurt te kijken wat de goedkoopste variant is van een bepaalde warmteoplossing. Figuur 3-9 laat dus zien wat de *laagst mogelijke* gemiddelde nationale meerkosten zijn per warmtetechniek voor iedere buurtcategorie.

Merk op dat de kosten geschaald zijn naar woningequivalenten (WEQs). Het valt op dat de hr-ketel en hWP doorgaans als meest kostenefficiënte warmteoplossingen naar voren komen. Op basis van Figuur 3-9 kan men de conclusie trekken dat de hWP in termen van totale jaarlijkse nationale meerkosten een concurrerend alternatief is voor de hr-ketel. Tegelijkertijd is de hr-ketel in absolute zin in zes van de zeven buurtcategorieën het goedkoopste alternatief en de hWP in enkel één buurtcategorie het goedkoopst – de categorie oude woonwijken met voornamelijk vrijstaande woningen en twee-onder-een-kap woningen.

Wanneer men Figuur 3-9 bekijkt is het goed om in gedachten te houden dat voor de collectieve warmteopties, de LT- en MT-warmtenetten, geldt dat inzet van deze warmteopties niet overal mogelijk is. Er zijn immers niet overal collectieve warmtebronnen beschikbaar. In Figuur 3-9 tonen we daarom de gemiddelde kosten per buurttypologie voor de deelverzameling van buurten waar de LT/MT-netten wél technisch mogelijk zijn. Een gevolg is dat de gemiddelde kosten van MT-netten doorgaans relatief hoog zijn: sommige buurten zijn in de praktijk relatief goedkoop aan te sluiten op

MT-netten, maar er zijn ook buurten die juist heel erg duur zijn[20]. Vanwege de grote spreiding die aanwezig is in de data is het dus goed om de gerapporteerde gemiddelden met enige voorzichtigheid te interpreteren.

Figuur 3-9: Jaarlijkse totale nationale meerkosten per warmteoplossing per buurtcategorie



Ecorys (2020)

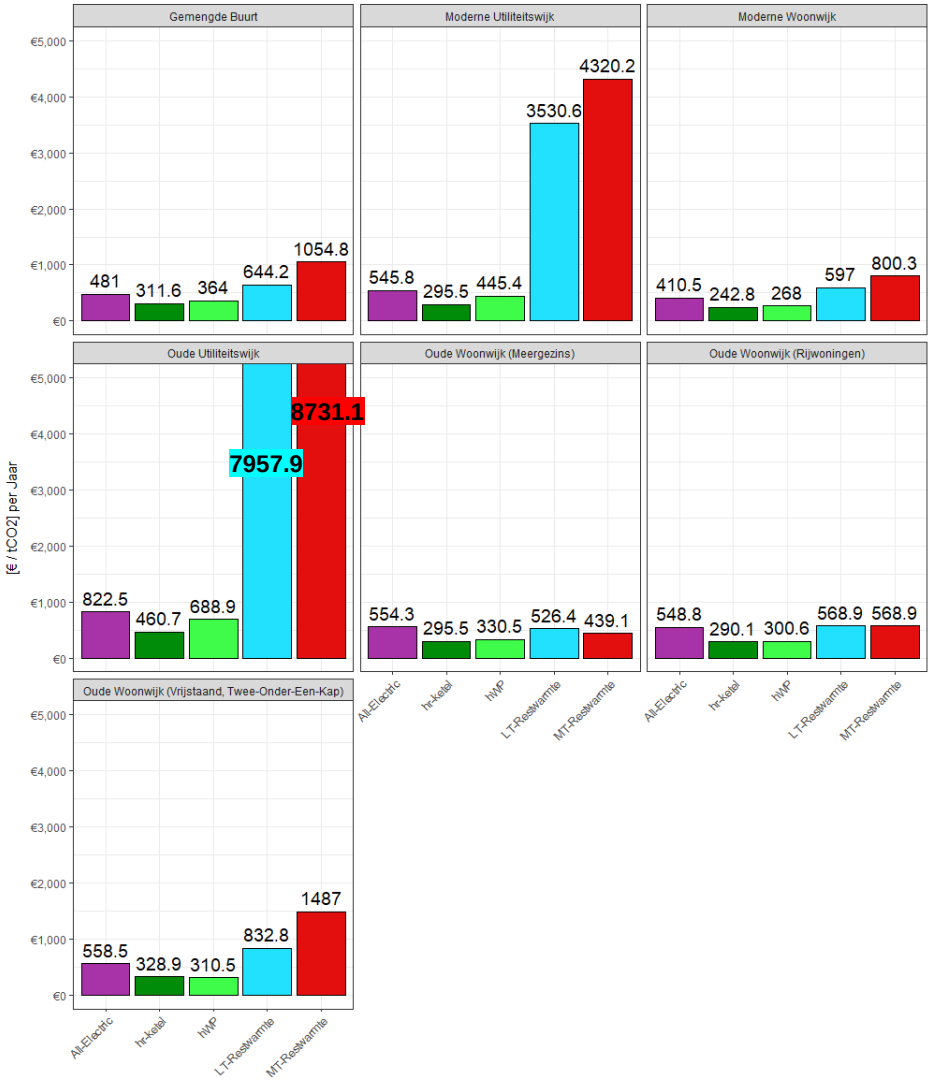
Figuur 3-10 laat de jaarlijkse kosten per ton CO_2-reductie zien per warmtetechniek voor iedere buurtcategorie. De gegevens in Figuur 3-10 zijn berekend als het gemiddelde van de CO_2-reductiekosten per warmteoplossing van alle buurten die in een bepaalde buurtcategorie vallen. We tonen in deze figuur de goedkoopste warmteopties binnen de hoofdcategorie van iedere warmtetechniek; de gerapporteerde gemiddelden hebben dus betrekking op de *laagst mogelijke* jaarlijkse nationale meerkosten die gemoeid zijn met het reduceren van één ton CO_2 voor een bepaalde buurtcategorie.

[20] De kostenefficiëntie van collectieve warmte-opties hangen samen met de bevolkingsdichtheid van een buurt en de nabijheid van faciliteiten die grote hoeveelheden (rest)warmte beschikbaar hebben. Voor sommige buurten is het technisch gezien wel mogelijk om een warmtenet in te zetten voor de warmtevoorziening maar vraagt dit wel om relatief lange transportleidingen met relatief hoge investeringskosten en warmteverliezen tot gevolg.

Op basis van Figuur 3-10 kan het volgende geconcludeerd worden:

- In zes van de zeven buurtcategorieën is gemiddeld gezien de inzet van de hr-ketel de meest kostenefficiënte warmtetechniek in termen van €/tCO_2-reductie. Wel is het zo dat de hybride warmtepomp een concurrerend alternatief biedt voor de hr-ketel gezien de kosten van de hybride warmtepomp en de hr-ketel elkaar relatief weinig ontlopen. Ditzelfde beeld kwam ook naar voren in Figuur 3-9, waar de jaarlijkse nationale meerkosten van de warmtetechnieken in € per WEQ is uitgedrukt.
- Voor oude woonwijken met voornamelijk vrijstaande woningen en twee-onder-een-kap woningen is de hybride warmtepomp de goedkoopste optie om te verduurzamen.
- De kosten voor LT- & MT-warmtenetten zijn gemiddeld gezien hoger dan voor de All-Electric, hr-ketel en hWP warmtetechnieken. Dit komt voort uit een grote kostenspreiding voor deze warmteopties. De reden hiervoor is dat de kosten die gepaard gaan met dergelijke warmtenetten sterk afhankelijk zijn van buurt-specifieke kenmerken als de bebouwingsdichtheid en de afstand t.o.v. een warmtebron. Deze figuur laat goed zien dat de inzet van LT- & MT-warmtenetten zich eigenlijk lastig laten vergelijken met de andere technieken wanneer je het 'gemiddelde' wilt tonen.
- De kosten van LT & MT-Restwarmte zijn met name hoog voor Oude en Moderne Utiliteitswijken. De reden hiervoor is dat er met name in de buurtcategorieën grote uitschieters bestaan in termen van CO_2-reductiekosten.

Figuur 3-10: Jaarlijkse nationale CO_2-reductiekosten per warmteoplossing per buurtcategorie

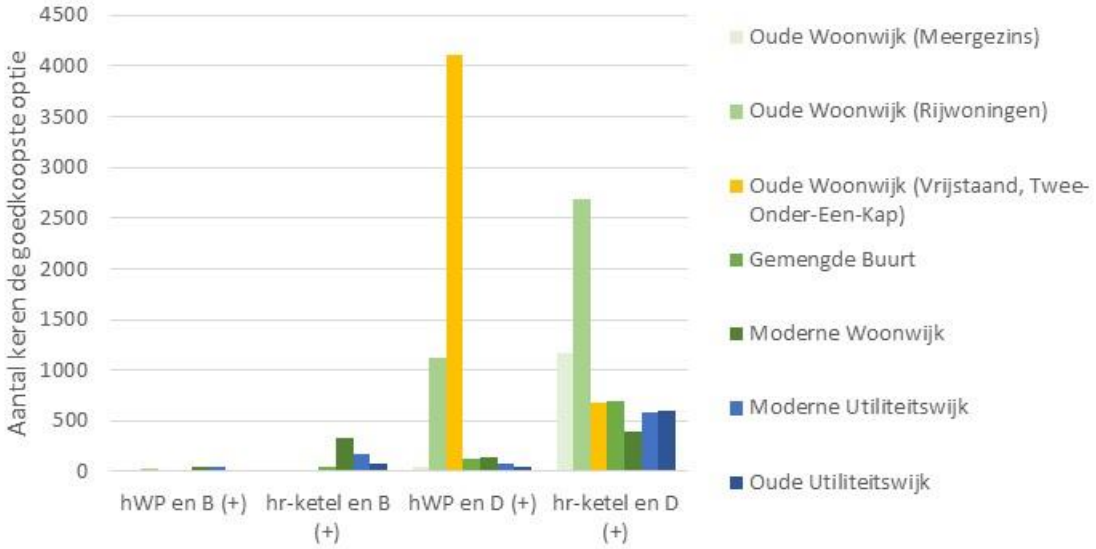


Ecorys (2020)

In deze paragraaf is duidelijk geworden dat de kosten van de hybride warmtepomp en de hr-ketel elkaar gemiddeld gezien weinig ontlopen. Wel is het zo dat voor zes van de zeven buurtcategorieën geldt dat de hr-ketel niet iets goedkoper is, en voor één van de zeven buurtcategorieën de hybride warmtepomp de goedkoopste optie is. Het is belangrijk om hierbij te realiseren dat het gaat om *gemiddelden.* Wanneer men per buurt naar de goedkoopste optie kijkt zal men zien dat het beeld diverser is. In Figuur 3-11 illustreren we dit gegeven: in deze figuur is te zien hoe vaak welke techniek het goedkoopst is per buurtcategorie.

Figuur 3-11 laat goed zien dat de hybride warmtepomp goed presteert in met name de oude woonwijken met voornamelijk vrijstaande woningen en twee-onder-een-kap woningen, maar ook in andere buurtcategorieën de goedkoopste optie kan zijn. Zo is voor een belangrijk aandeel van de oude woonwijken met voornamelijk rijwoningen de hybride warmtepomp tevens de meest kostenefficiënte verduurzamingsoptie. Dit is geen toeval: oudere woningen zijn doorgaans slechter geïsoleerd en hebben daarom een hogere warmtevraag. Deze hogere warmtevraag biedt kansen voor besparingen op de energielasten. De hybride warmtepomp benut deze kans met lagere variabele lasten dankzij de efficiënte inzet van de warmtepomp ten behoeve van de ruimteverwarmingsvraag.

Figuur 3-11: Aantallen buurten waarin de hr-ketel en hwp het goedkoopste alternatief bieden (onafhankelijk van de groengas limiet uit de Startanalyse).



3.5 De kosten van de hybride warmtepomp op gebouwniveau

In deze paragraaf presenteren we de kosten van de installatie en inzet van de hWP voor verschillende type gebouwen. Op basis van deze analyse kan er gekeken welk type gebouwen het meest kosten efficiënt op duurzame wijze verwarmd kunnen worden met de hWP. De kosten worden opgesplitst in een vast (i.e. CAPEX) en in een variabel component (i.e. OPEX). Onder de CAPEX vallen eenmalige investeringen zoals het isoleren van het gebouw waarin de hWP geplaatst wordt (i.e. isolatiekosten), het installeren van de hWP zelf (i.e. installatiekosten), en het aanpassen van de omliggende infrastructuur (i.e. infrastructuurkosten). Onder de OPEX vallen variabele kosten die gemoeid zijn met het opereren (i.e. energielasten) en onderhouden (i.e. onderhoudskosten) van de hWP en de omliggende infrastructuur.

Ieder gebouw wordt gekarakteriseerd door een bepaalde verblijfsfunctie (of gebouwbestemming); deze kan zijn ‘wonen’ of ‘utiliteit’ (e.g. kantoren, scholen, ziekenhuizen, etc.). Daarnaast heeft ieder

gebouw een gebouwtype (e.g. ‘rijwoning’, ‘vrijstaand huis’, ‘kantoor’ of ‘school’) en een bouwjaar (of bouwperiode). Wij presenteren vervolgens de *gemiddelde nationale meerkosten*[21] van gebouwen langs de assen van de verschillende gebouwkarakteristieken om patronen te identificeren in de CAPEX en OPEX.

Let op dat de kostenberekeningen voor de hWP en hr-ketel met schillabel D+ niet zijn meegenomen voor de utiliteitsgebouwen. Het Vesta-MAIS model berekent namelijk geen kosten voor het isoleren van utiliteitsgebouwen tot en met schillabel D.

3.5.1 *Een vergelijking van de CAPEX en OPEX van de hybride warmtepomp met de hr-ketel*

Bijlage C en D laten zien hoe de CAPEX en OPEX van de hybride warmtepomp en de hr-ketel verdeeld zijn langs de verschillende mogelijke combinaties van verblijfsfunctie, gebouwtype & bouwperiode. Op basis van deze grafieken en de gegevens in Tabel 3.7 en Tabel 3.8 kan het volgende geconcludeerd worden:

- Voor alle gebouwen:
  - De energielasten van de hWP zijn voor bijna alle gebouwcategorieën lager dan de energielasten van de hr-ketel. Alleen voor utiliteitsgebouwen met het gebouwtype ‘Winkel’ zijn de energielasten van de hWP hoger dan voor de hr-ketel.
  - De totale kosten van de hWP zijn doorgaans hoger dan die van de hr-ketel vanwege de kosten die gemoeid zijn met de installatie van de hWP.
  - De CAPEX die gemoeid zijn met infrastructuur zijn hoger voor de hWP dan voor de hr-ketel.
- Voor gebouwen met verblijfsfunctie ‘wonen’:
  - Voor drie typen woningen is het inzetten van de hWP goedkoper dan de inzet van de hr-ketel: rijwoningen (hoek), 2-onder-1-kap woningen en vrijstaande woningen.
  - De onderhoudskosten van de hWP liggen iets hoger dan die van de hr-ketel.
- Voor gebouwen met verblijfsfunctie ‘utiliteit’:
  - De onderhoudskosten van de hWP zijn, behalve voor ‘Logies’, lager dan die van de hr-ketel.

De onderstaande tabellen laten voor utiliteitsgebouwen (Tabel 3.7) en voor woningen (Tabel 3.8) zien wat de kostenverschillen zijn tussen de hWP en de hr-ketel voor verschillende kostencomponenten. Let op dat de kostencomponenten die *geen* verschil vertonen tussen de hWP en hr-ketel niet zijn meegenomen in de tabellen. De gerapporteerde kostenverschillen zijn bepaald door eerst de gemiddelde kosten per kostencomponent te berekenen voor ieder gebouwtype per warmteoplossing (i.e. hWP, hr-ketel) en de gemiddelden die betrekking hebben op de hr-ketel vervolgens af te trekken van de gemiddelden die gelinkt zijn aan de hWP. Een positief kostenverschil geeft aan dat de hWP duurder is dan de hr-ketel voor een bepaald kostencomponent. Een negatief kostenverschil geeft aan dat de hWP goedkoper is dan de hr-ketel.

Tabel 3.7: Verschillen in kosten tussen de hybride warmtepomp en hr-ketel voor utiliteitsgebouwen

Gebouwtype	Infrakosten (capex)	Energielasten	Installatiekosten	Onderhoudskosten	Totaal saldo
Bijeenkomst	176,22	-1636,80	1248,25	-92,87	-305,20
Cel	2848,64	-11618,49	15587,41	-2623,69	4193,87
Gezondheidszorg	253,77	-1512,10	1662,49	-151,82	252,34
Industrie	414,33	-868,94	2797,74	-113,03	2230,10
Kantoor	208,59	-440,50	1449,09	-95,10	1122,08

[21] De gerapporteerde kostencijfers betreffen de gemiddelde kosten van *alle gebouwen in Nederland die tot een bepaalde gebouwcategorie behoren.* Een voorbeeld van een ‘gebouwcategorie’ is: alle kantoren in Nederland die voor 1990 gebouwd zijn.

Gebouwtype	Infrakosten (capex)	Energielasten	Installatiekosten	Onderhoudskosten	Totaal saldo
Logies	47,37	-223,27	590,53	43,51	458,14
Onderwijs	705,09	-1494,75	4351,06	-317,00	3244,40
Sport	346,69	-668,18	2243,99	-181,84	1740,66
Winkel	128,42	343,59	1054,06	-1,24	1524,83

Tabel 3.8: Verschillen in kosten tussen de hybride warmtepomp en hr-ketel voor woningen

Gebouwtype	Infrakosten (capex)*	Energielasten	Installatiekosten	Onderhoudskosten	Totaal saldo
Meergezins (Hoog)	12,52	-145,40	161,26	47,44	75,82
Meergezins (Laag & Midden)	12,52	-116,28	160,97	47,31	104,52
Rijwoning (Hoek)	12,52	-285,32	183,24	56,46	-33,10
Rijwoning (Tussen)	12,52	-218,73	181,75	55,86	31,40
2 Onder 1 Kap	12,52	-330,46	188,42	58,45	-71,07
Vrijstaand	12,52	-464,78	194,44	60,89	-196,93

** N.B. omdat de capex die gemoeid zijn met infrastructurele aanpassingen geschaald zijn naar woningequivalenten zijn deze kosten voor verschillende gebouwtypen met de verblijfsfunctie 'wonen' hetzelfde; immers, een woning krijgt altijd slechts één WEQ toebedeeld.*

3.6 Conclusies: de nationale meerkosten van de hybride warmtepomp

In dit hoofdstuk hebben wij middels een 'deep-dive' in de resultaten van de 'Startanalyse aardgasvrije wijken 2020' van het Planbureau voor de Leefomgeving onderzocht wat de jaarlijkse nationale meerkosten zijn van de inzet van de hybride warmtepomp en hoe deze kosten verdeeld zijn. Hierbij is gekeken naar hoe de jaarlijkse nationale meerkosten verdeeld zijn op *buurtniveau*, hoe deze kosten uitvallen voor *verschillende buurttypen* en hoe de kosten uitvallen voor *verschillende gebouwtypen*.

De jaarlijkse nationale meerkosten bij inzet van de hybride warmtepomp in alle buurten in Nederland bedragen gemiddeld 340 euro per ton CO_2-emissiereductie. Belangrijk is bovendien dat de spreiding van de kosten relatief beperkt zijn: dat wil zeggen dat de inzet van de hybride warmtepomp voor de meeste buurten rond dit kostenniveau liggen.

Naast een blik op de spreiding van de jaarlijkse nationale meerkosten van de hybride warmtepomp hebben wij de kosten van de hybride warmtepomp tevens vergeleken met andere verwarmingsalternatieven. Uit deze vergelijking kwam naar voren dat de hr-ketel op groengas – gemiddeld gezien – in zes van de zeven buurtcategorieën de goedkoopste verwarmingsoptie is. De hybride warmtepomp biedt echter een wat wij classificeren als een concurrerend alternatief voor de hr-ketel op groengas: de kosten ontlopen elkaar namelijk relatief weinig ten opzichte van andere verwarmingsalternatieven. In één buurtcategorie biedt de hybride warmtepomp gemiddeld gezien het goedkoopste alternatief voor verduurzaming van de warmtevraag; het gaat hierbij om oude woonwijken met voornamelijk vrijstaande woningen twee-onder-een-kap woningen. Drijvende kracht hierachter is het gegeven dat grotere oudere woningen een grotere energievraag hebben waardoor er meer te besparen is op de energielasten. Hierdoor kunnen de hogere investeringskosten van de hybride warmtepomp ten opzichte van de hr-ketel goed gemaakt worden met een reductie van de variabele energielasten.

In lijn met de resultaten op buurtniveau zagen we tevens op gebouwniveau terug dat de hybride warmtepomp met name kansen biedt voor oudere woningen met een groot energieverbruik. Inzet van de hybride warmtepomp is gemiddeld gezien de goedkoopste verduurzamingsoptie voor vrijstaande woningen, twee-onder-een-kap woningen en hoekrijwoningen.

Gezien de kosten van de inzet van een hr-ketel op groengas en de hybride warmtepomp zo dicht bij elkaar liggen zou men kunnen beargumenteren dat inzet van de hybride warmtepomp bij vergelijkbare kosten om andere redenen mogelijk de preferentie geniet. De hybride warmtepomp biedt namelijk de kans om meer woningen en gebouwen te verwarmen dan dat er mogelijk zou zijn met de hr-ketel bij een beperkte beschikbaarheid van groengas omdat de hybride warmtepomp tot 70 procent[22] minder groengas verbruikt per woning of gebouw (dankzij de efficiënte inzet van de warmtepomp ten behoeve van de ruimteverwarmingsvraag). Wel is het zo dat in de praktijk de inzet van de hybride warmtepomp niet altijd mogelijk zal zijn vanwege praktische beperkingen en de beperkte beschikbaarheid van groengas.

Als positief punt zien wij tenslotte dat de hybride warmtepomp een positieve rol kan spelen in de betaalbaarheid van de warmtetransitie vanwege de geografische verdeling van de wijken waarvoor de hybride warmtepomp de goedkoopste optie biedt; de oude woonwijken met voornamelijk vrijstaande woningen en twee-onder-een-kap woningen. In met name de randstad zien wij vaak een combinatie van aantrekkelijke warmtebronnen en een hoge warmtedichtheid van de vraag. Dit biedt kansen voor kostenefficiënte collectieve warmteoplossingen. De dunner bevolkte gebieden buiten de randstad hebben veel minder vaak zicht op kostenefficiënte inzet van collectieve warmteoplossingen. Hierdoor zijn deze gebieden veelal aangewezen op de doorgaans duurdere gebouwgebonden oplossingen zoals de inzet van de volledige elektrische warmtepomp (waarvoor vergaande isolatie tegen doorgaans relatief hoge kosten benodigd is). Het is echter nu juist in de gebieden buiten de randstad waar relatief veel oude woonwijken met voornamelijk vrijstaande woningen en twee-onder-een-kap woningen te vinden zijn. De hybride warmtepomp kan bij een beperkt aanbod van groengas een zo groot mogelijke bijdrage leveren aan het verwarmen van deze woonwijken. Hiermee kan de hybride warmtepomp op plekken waar er minder verduurzamingsopties voor handen zijn de kosten drukken doordat men dan niet hoeft gebruik te maken van de volledige elektrische warmtepomp.

[22] Op basis van de modeloutput van Vesta MAIS leidt de toepassing van de hWP in plaats van een Hr-ketel bij gelijke isolatiemaatregelen tot 70 procent minder groen gas verbruik in 2030. De werkelijke aardgas / groengas besparingen hangen sterk samen met de isolatiegraad van een woning en varieert tussen de 50 en 70 procent.

4 De eindgebruikerskosten van de hybride warmtepomp

4.1 Introductie

In hoofdstuk 3 hebben we geanalyseerd wat de nationale meerkosten zijn voor de hWP. Hieruit is naar voren gekomen dat de hWP een kosteneffectieve tussen- en eindoplossing is in vergelijking tot de andere strategieën en relatief gezien niet veel verschilt in kosten met de hr-ketel. Ook is hier naar voren gekomen dat de nationale kosten van een hWP sterk samenhangen met de eigenschappen van gebouwen (type en bouwjaar). In dit hoofdstuk wordt beschouwd of dezelfde bevindingen naar voren komen wanneer gekeken wordt naar de meerkosten van de hWP als eindoplossing voor eindgebruikers.

Definities vooraf

De eindgebruikerskosten zijn de kosten die de eigenaar (bijvoorbeeld de bewoner van een gebouw) moet betalen. Dit is anders dan de nationale kosten, die de totale kosten van de maatschappij vertegenwoordigen. Het verschil zit hem in twee componenten; *i)* toespitsing op actoren en *ii)* overdrachten of transacties in de vorm van belastingen en subsidies. Bij de nationale kosten zijn de kosten actor overstijgend en gelden dus voor de gehele maatschappij. Daarin zijn geen belastingen (kosten) en subsidies (negatieve kosten) in opgenomen. Belastingen en subsidies zijn overdachten van de ene actor naar de andere. Netto betekent dit voor de maatschappij dat deze overdachten geen impact hebben op de nationale kosten. Voor de eindgebruikerskosten is dit dus anders: de kosten zijn toegespitst op één actor. Als je op actor niveau naar de kosten kijkt, zullen overdrachten als belastingen en subsidies wel ervaren worden als kosten. De eindgebruikerskosten nemen daarom wel belastingen en subsidies mee.

In dit onderzoek kijken we tevens specifiek naar de *meerkosten* voor de eindgebruikers. Dat zijn de kosten die de eindgebruiker meer moet betalen dan dat de eindgebruiker in de referentiesituatie had moeten betalen. De *referentiesituatie* is hetzelfde als in de overige hoofdstukken; wanneer de bewoner gebruik zou maken van een hr-ketel op aardgas zonder additionele isolatiemaatregelen. Tevens worden ter vergelijking in dit hoofdstuk wederom de meerkosten van de hWP op groen gas met name vergeleken met de meerkosten voor de hr-ketel op groen gas. De hr-ketel met groen gas dient in dit geval als een belangrijk *ijkpunt* voor het onderzoek: door de technieken onder dezelfde omstandigheden met elkaar te vergelijken kunnen we de toegevoegde waarde van de hWP ten opzichte van het traditionele alternatief bepalen.

De hoogte van belastingen en subsidies zijn afhankelijk van toekomstig beleid. Hoe het beleid zich in de toekomst ontwikkelt is moeilijk te voorspellen. Om de eindgebruikersmeerkosten van warmtetechnieken in 2030 te berekenen moeten aannames gedaan worden over hoe het beleid er in 2030 eruit ziet. Voor een deel van de belastingen en subsidies heeft PBL een voorspelling gemaakt op basis van de Klimaat en Energieverkenning 2020. Voor een deel van de belastingen en subsidies ontbreken hier echter nog enkele gegevens in het model. Tabel 4.1 presenteert de in het onderzoek en in de doorrekeningen gehanteerde aannames.

Tabel 4.1 Toegepaste beleidsaannames inclusief bijbehorende bronnen

Beleid	Bron
Energiebelasting (per energiedrager en per type gebruiker)	*KEV2020, PBL 2020*
Energiebelastingteruggave	*Miljoenennota, Min. Financiën 2020*
Percentage van gesubsidieerde investeringskosten bij schilverbetering en hWP	*o.b.v. SEEH; RVO 2020*
SDE++ subsidie	*Conceptadvies SDE++ OT-model, PBL 2020*
Warmteprijs	*Conform NMDA principe; Startanalyse PBL 2020*
Btw-tarieven	*Startanalyse; PBL 2020*

4.2 Opbouw van de kosten voor de eindgebruiker

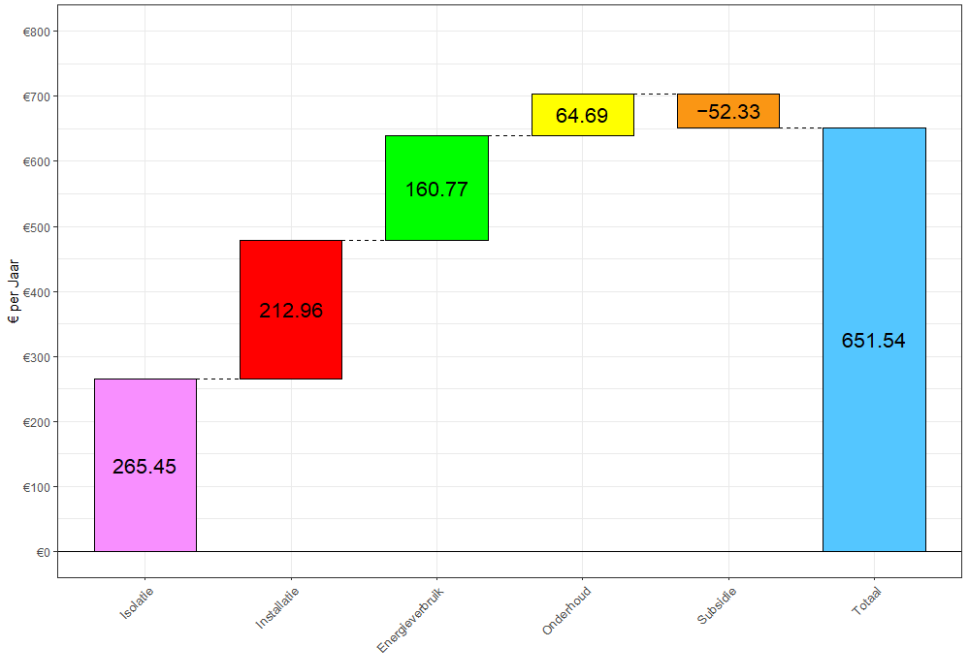
In deze paragraaf kijken we naar de opbouw van de meerkosten voor de eindgebruiker. Figuur 4-1 tot en met Figuur 4-4 presenteren de gemiddelde eindgebruikerskosten van de hWP en de hr-ketel voor wonen en voor utiliteitsgebouwen. Aan de hand van deze figuren zijn de verschillende kostencomponenten goed te onderscheiden. Voor een tabeloverzicht van deze gegevens, zie Bijlage G.

Allereerst zien we dat de eindgebruikerskosten, net als de nationale kosten, in de eindoplossing voor een belangrijk deel bestaan uit isolatiekosten. Deze zijn gelijk voor de hWP en de hr-ketel, er wordt immers dezelfde isolatiegraad verondersteld. De isolatiekosten voor utiliteit zijn aanzienlijk hoger dan die van woningen. Dat is te verklaren aan de hand van het veelal grote oppervlak van utiliteitsgebouwen waardoor de isolatiekosten toenemen.

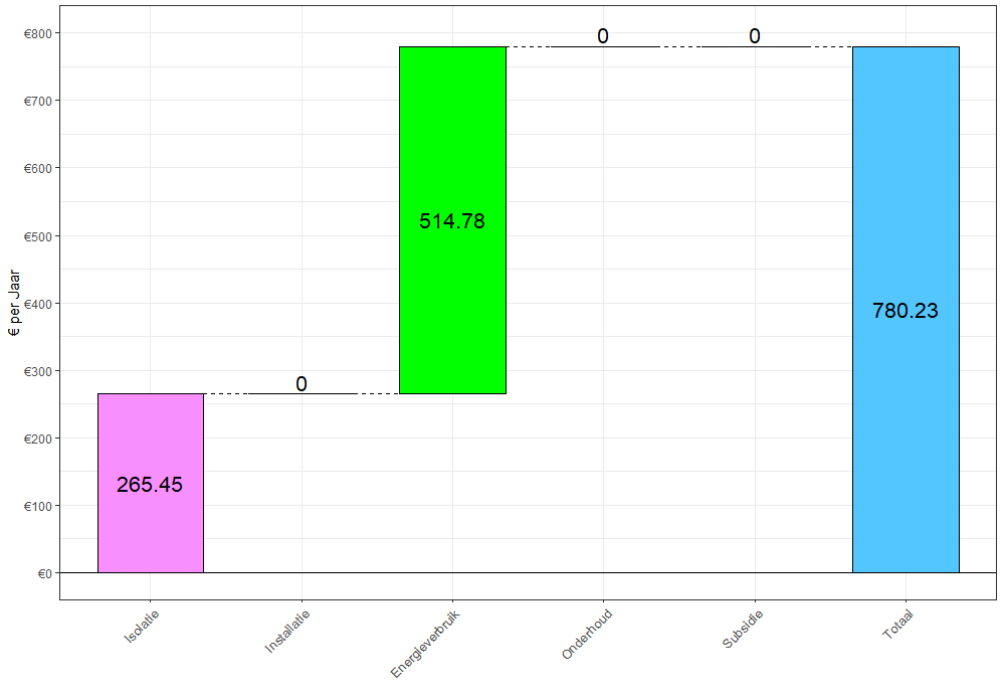
Vervolgens zien we grote verschillen tussen de kostenposten van de hWP en die voor de hr-ketel. Zo zien we dat voor hr-ketel bij woningen een groot deel van de kosten voortkomen uit het energieverbruik. Voor woningen met een hWP zijn de kosten voor het energieverbruik aanzienlijk lager. Dat komt omdat een woning met hWP minder gebruikt maakt van groen gas en meer gebruik maakt van elektriciteit dan een woning met een hr-ketel. De kosten voor groen gas stijgen in de toekomst meer dan de kosten voor elektriciteit (als gevolg van de beoogde toename van belasting op gasverbruik[23] en de afname van belasting op elektriciteitsverbruik). Dit maakt het gebruik van de hWP, die minder groen gas verbruikt en juist meer elektriciteit, goedkoper voor de eindgebruiker. Daar staat wel tegenover dat geïnvesteerd moet worden in een hWP installatie die tevens kosten voor onderhoud en (project)management (O&M) hebben. Wanneer gekeken wordt naar het kostenverschil voor de eindgebruiker ten opzichte van de toepassing van de hr-ketel wanneer als eindoplossing de hWP wordt gekozen blijkt de hWP gemiddeld gezien het meest aantrekkelijk voor woning-eigenaren. Opmerkelijk is dat dit geldt ongeacht er subsidies versterkt worden: zelfs zonder subsidiëring zijn de kosten voor de woningeigenaar een aantrekkelijke en kostenefficiënte eindoplossing (zie Figuur 4-1 en Figuur 4-2).

[23] In de energiebelasting in zijn huidige en beoogde toekomstige vorm wordt geen onderscheid gemaakt tussen grijs gas (aardgas) of groen gas. Dit betekent dat de geplande toename van de belasting voor gasverbruik evenredig blijft gelden in de toekomst, zelfs in het geval van overstap op duurzame gassen. Mogelijke toekomstige, vooralsnog onbekende, wijzigingen in de wet zijn binnen dit onderzoek niet meegenomen.

Figuur 4-1: Uitsplitsing eindgebruikerskosten voor woningen van de hybride warmtepomp (schillabel D+)



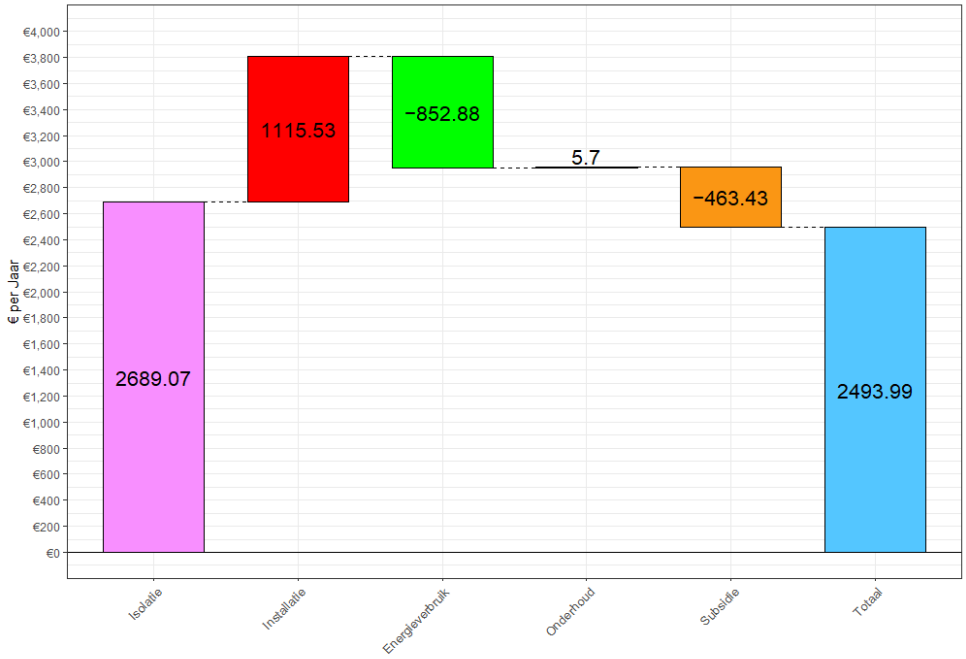
Figuur 4-2: Uitsplitsing eindgebruikerskosten voor woningen van de hr-ketel (schillabel D+)



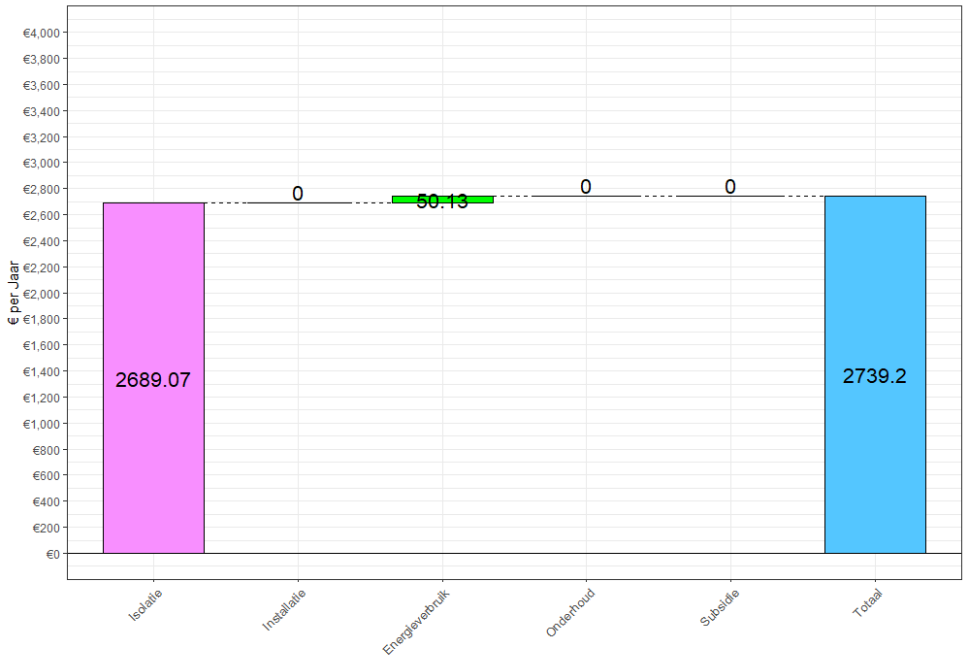
Dezelfde conclusies gelden ook voor de vergelijking tussen de hWP en de hr-ketel voor utiliteit. Hier is iets opvallends te zien: de hWP bij utiliteit heeft negatieve kosten voor energieverbruik. Dit komt doordat de verhouding van het energieverbruik bij utiliteit anders is. Utiliteit maakt in verhouding meer gebruik van elektriciteit en minder gebruik van groen gas in vergelijking met woningen. Dit heeft te maken met de geschatte elektriciteitsvraag van utiliteit voor de in het pand aanwezige apparatuur: deze vraag is gemiddeld gezien voor utiliteitsgebouwen groter. Door de sterke stijging in kosten voor groen gas in tegenstelling tot de beperkte stijging in elektriciteitskosten maakt utiliteit gemiddeld lagere kosten voor het energieverbruik in vergelijking met de referentie (hr-ketel op aardgas). Gemiddeld gezien zorgt dit voor een totale jaarlijkse kostendaling van bijna 10% voor de eindgebruiker wanneer er wordt gekozen voor een hWP als eindoplossing in plaats van een hr-ketel.

Deze kostendaling is wel sterk afhankelijk van subsidies – bij ontbreken van subsidies vallen de jaarlijkse kosten voor de eindgebruiker voor utiliteit iets hoger uit voor de hWP dan voor de hr-ketel (zie Figuur 4-3 en Figuur 4-4). Op basis van het ingestelde beleid (m.b.t. relevante subsidies, belastingen en heffingen) is de hWP dus ook een kostenefficiënte warmtetechniek.

Figuur 4-3: Uitsplitsing eindgebruikerskosten voor utiliteitsgebouwen van de hybride warmtepomp (schillabel D+)



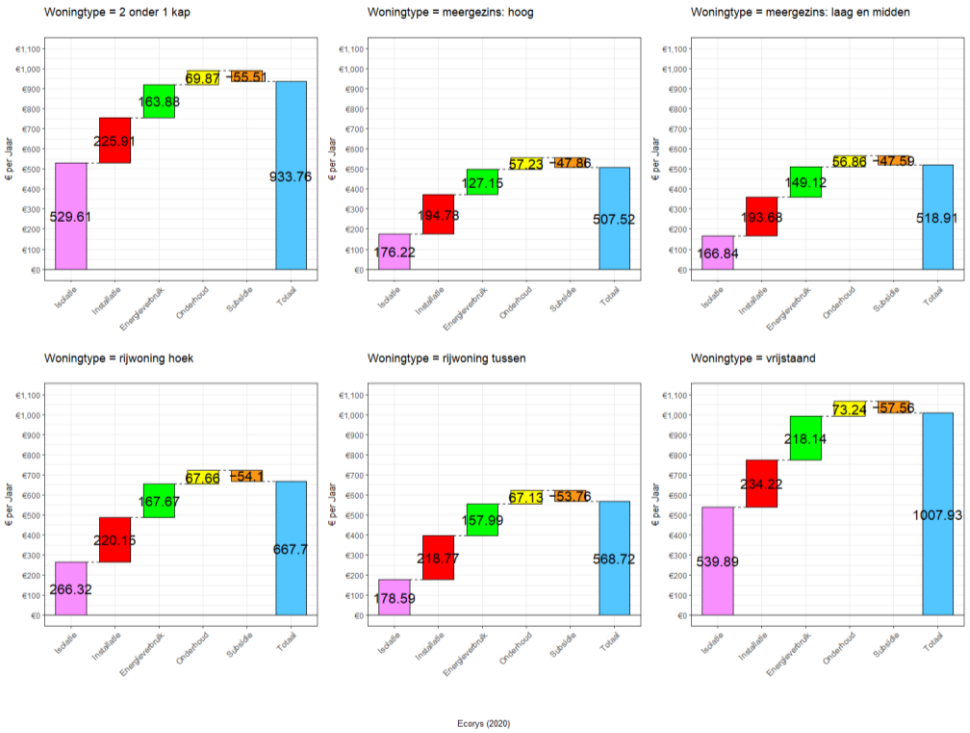
Figuur 4-4: Uitsplitsing eindgebruikerskosten voor utiliteitsgebouwen van de hr-ketel (schillabel D+)



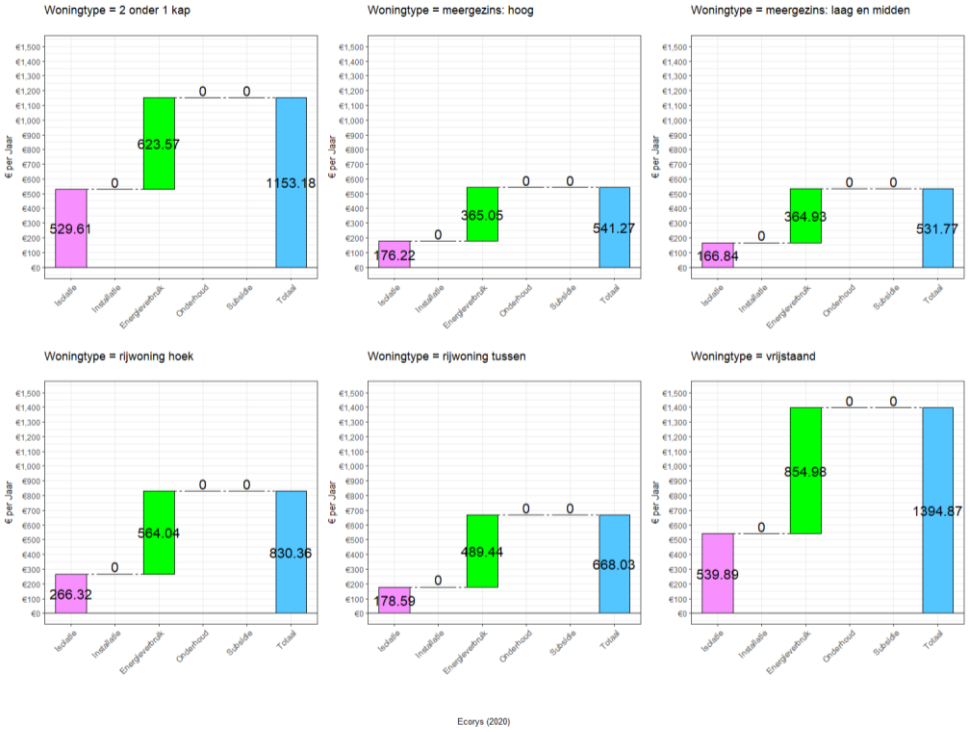
In Figuur 4-5 en Figuur 4-6 kijken we, respectievelijk, naar de gemiddelde eindgebruikersmeerkosten van de hWP en de hr-ketel per type woning. Deze figuren bieden een meer gedetailleerd beeld van hoe de eindgebruikerskosten zijn opgebouwd voor verschillende soorten woningen. De kostencomponenten hebben andere verhoudingen wanneer je verschillende type woningen vergelijkt. Bij een twee-onder-één kap woning en een vrijstaande woning bestaat voor de hWP een

relatief groot deel van de eindgebruikersmeerkosten uit isolatiekosten. Een twee-onder-één kap woning en een vrijstaande woning zijn over het algemeen groter dan een meergezinswoning en een rijwoning, daarnaast hebben deze woningen meer buitenmuren wat tevens kosten voor isolatieverbeteringen omhoog drijft. Voor een tabelweergave van deze kostencijfers, zie Bijlage G.

Figuur 4-5: Uitsplitsing eindgebruikerskosten van de hybride warmtepomp (schillabel D+) voor verschillende woningtypen



Figuur 4-6: Uitsplitsing eindgebruikerskosten van de hr-ketel (schillabel D+) voor verschillende woningtypen



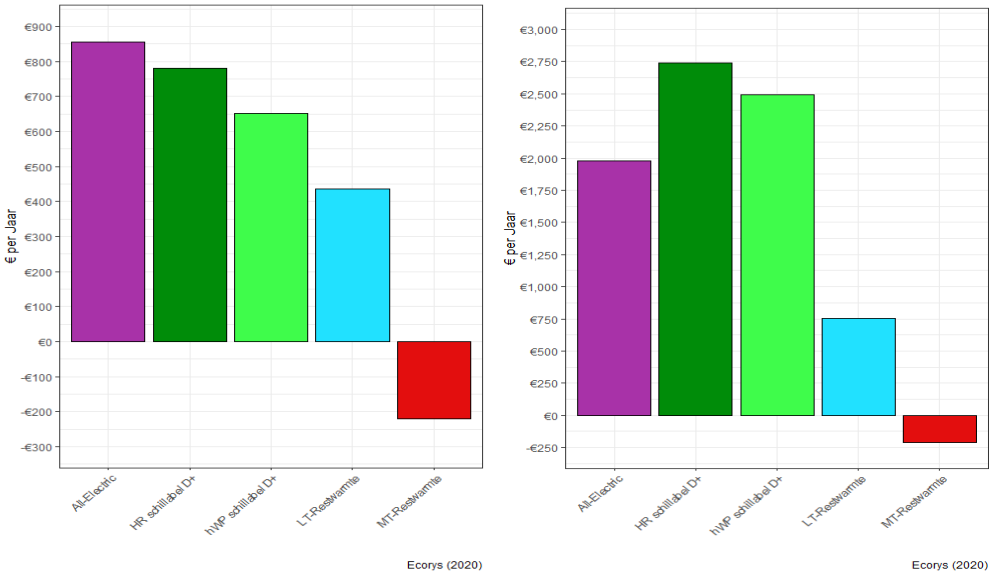
Als we kijken naar de kosten specifiek gerelateerd aan de hWP zien we ook verschillen in de verhoudingen per type woning. De kosten die specifiek gerelateerd zijn aan de hWP zijn de installatiekosten en de kosten voor onderhoud en (project)management. Voor twee-onder-één-kap en vrijstaande woningen zorgen de hWP gerelateerde kosten voor slechts een klein aandeel van de totale eindgebruikersmeerkosten.

Voor meergezinswoningen en rijwoningen is dit anders. Bij meergezinswoningen en rijwoningen zijn de hWP gerelateerde kosten een aanzienlijk deel van de totale eindgebruikersmeerkosten, zelfs groter dan de kosten voor isolatie. Gezien de investering in een hWP voor deze woningen een groot aandeel is van de totale investering, en omdat de hWP relatief minder baten oplevert dan (de andere grote kostencomponent) isolatie, kan de investering in een hWP voor deze type woningen een belemmering vormen. Voor een tabelweergave van deze kostencijfers, zie Bijlage G.

4.3 Vergelijking van kosten per warmtetechniek voor de eindgebruiker

In deze paragraaf bekijken we hoe de eindgebruikersmeerkosten voor de hWP zich verhouden tot ander warmtetechnieken. Figuur 4-7 presenteert de gemiddelde eindgebruikersmeerkosten van alle woningen (links) en utiliteitgebouwen (rechts) in Nederland. Hierbij onderzoeken we welke eindgebruikersmeerkosten alle gebouwen in Nederland gemiddeld moeten betalen per warmtetechniek. De getoonde *meerkosten* representeren het kostenverschil van de toepassing van iedere warmtetechniek ten opzichte van het referentiealternatief: de hr-ketel op aardgas.

Figuur 4-7 Gemiddelde nationale meerkosten voor eindgebruikers per warmtetechniek (wonen links en utiliteit rechts)



In de figuren zijn lagere eindgebruikerskosten te zien voor collectieve warmtetechnieken dan individuele warmtetechnieken. De getoonde vergelijking is echter niet volledig representatief omdat slechts op bepaalde plekken in Nederland MT en LT warmtebronnen beschikbaar zijn. Daarom kan maar een beperkt gedeelte van Nederland daadwerkelijk gebruik maken van deze collectieve warmtetechnieken.

Voor MT warmtenetten is een tegenstrijdig beeld te zien als we de nationale meerkosten (hoofdstuk 3) vergelijken met de eindgebruikersmeerkosten. In tegenstelling tot de kosten voor de eindgebruiker is een MT warmtenet aansluiting één van de duurste warmtetechnieken wanneer je kijkt naar de nationale meerkosten. Dit laat zien dat de eindgebruikerskosten (gebaseerd op het NMDA-principe) niet goed de kosten presenteren van het gehele warmtenetsysteem. Omdat de nationale meerkosten zo hoog zijn is naar verwachting de business case voor de warmteproducent en -leverancier negatief.

Echter, hieruit kunnen we wel concluderen dat indien een warmtebron beschikbaar is in een buurt (met voldoende vermogen), dat het qua eindgebruikerskosten het meest aantrekkelijk is om de woningen in deze buurt op een collectieve warmtetechniek te zetten. Dit kan verklaard worden door het ontbreken van installatiekosten voor de eindgebruiker bij collectieve warmtetechnieken: er wordt direct warmte geleverd aan het gebouw, waardoor de investering in een verwarmingsinstallatie overbodig is. Individuele warmtetechnieken hebben deze kostencomponent wel. Het verschil tussen LT- en MT-warmtenetten wordt verklaard in de kosten voor isolatie. LT-warmtenetten vereisen een hogere isolatiewaarde dan MT-warmtenetten. Dit resulteert in hogere eindgebruikersmeerkosten voor LT-warmtenetten.

Als we kijken naar de individuele opties zien we dat de eindgebruikersmeerkosten voor de hWP het laagst zijn voor woningen. In paragraaf 4.2 zijn we al ingegaan op het verschil in eindgebruikersmeerkosten tussen de hWP en de hr-ketel (kosten in energieverbruik voor groen gas en elektriciteit). Als we voor woningen de hWP vergelijken met de all-electric optie, zien we dat de all-electric optie hogere kosten heeft. Dit is het gevolg van de hogere isolatie eis voor all-electric optie, wat resulteert in hogere isolatiekosten.

Bij de vergelijking tussen warmtetechnieken voor utiliteit zien we een vergelijkbaar patroon. Echter, voor utiliteit heeft de all-electric optie de laagste eindgebruikersmeerkosten. Dit kan verklaard worden doordat utiliteit vaak al hoge schillabels hebben (moderne kantoorpanden en strengere verduurzamingseisen), waardoor additionele investeringen in isolatie in mindere mate noodzakelijk zijn om all-electric toepassingen mogelijk te maken. In paragraaf 4.2 is geconcludeerd dat de kosten voor elektriciteit minder hard stijgen dan de kosten voor aardgas. Omdat de utiliteit (zonder al te veel extra investeringen in isolatie) volledig gebruik kan maken van het relatief goedkopere elektriciteit zijn de kosten voor all-electric lager dan voor de hWP, welke op zijn beurt om dezelfde reden lager liggen dan kosten voor toepassing van de hr-ketel.

4.4 Conclusies: eindgebruikerskosten van de hWP

In hoofdstuk 4 hebben we onderzocht wat de eindgebruikerskosten zijn van de hWP en hoe ze zich verhouden tot andere technieken. Eindgebruikerskosten zijn afhankelijk van het gehanteerde beleid in 2030; welke belastingen en subsidies zijn dan van toepassing. Hierbij zijn we deels uitgegaan van projecties van de Klimaat en Energieverkenning 2020 van PBL. Voor bepaalde belastingen en subsidies die geen projecties hadden zijn we er van uitgegaan dat het huidige niveau van toepassing is in 2030. Met deze projecties en aannames op het beleid kunnen we verschillende conclusies trekken over de eindgebruikersmeerkosten. Ook kunnen we deze eindgebruikersmeerkosten in perspectief plaatsen naast de nationale meerkosten, gepresenteerd in hoofdstuk 3.

Concluderend kunnen we stellen dat de eindgebruikerskosten bij het gebruik van een hWP lager zijn dan voor een hr-ketel als gevolg van een besparing op kosten voor energieverbruik. Wanneer overgestapt wordt van een hr-ketel naar een hWP dan wordt er in verhouding meer elektriciteit verbruikt en minder gas. Gedreven door de energiebelasting zijn de kosten voor gas hoger dan voor elektriciteit. Hierdoor zullen eindgebruikers met een hWP significant lagere kosten ervaren op hun energierekening. Als gevolg zijn de jaarlijkse kosten voor de gebruiker, voor woningen zelfs zonder subsidie, lager na toepassing van de hWP dan wanneer gebruik gemaakt wordt van de hr-ketel.

Daar staat wel tegenover dat een investering gedaan moet worden in de hWP installatie. De investeringskosten voor een hr-ketel zijn een stuk lager dan die voor een hWP. Wanneer we kijken naar de hWP gerelateerde installatiekosten en kosten voor onderhoud en management voor verschillende type woningen zien we dat voor meergezinswoningen en rijwoningen deze kosten een

groot aandeel beslaan van de totale kosten. Dat betekent dat verhoudingsgewijs de hWP een forse vaste investering vereist. Dit kan een investeringsbarrière vormen voor deze woningtypen, wat een argument kan zijn voor (het behoud van) subsidiëring gericht op de kapitaalskosten van de hWP.

Wanneer we de eindgebruikersmeerkosten vergelijken met alle warmtetechnieken, zien we dat de hWP voor woningen vaak de meest kosteneffectieve individuele warmtetechniek is. Dit is anders voor utiliteit. Utiliteitsgebouwen hebben vaak hogere schillabels en worden verondersteld sterker te verduurzamen in de toekomst. Hierdoor hoeft utiliteit slechts beperkt extra te isoleren om lage temperatuur toepassingen te realiseren (bijvoorbeeld all-electric toepassingen). Tegelijkertijd kunnen utiliteitsgebouwen met een volledige elektrische warmtepomp tevens profiteren van lagere energiekosten, omdat de all-electric optie volledig gebruikt maakt van de goedkopere elektriciteit (in vergelijking met groen gas).

Deze conclusies gelden echter alleen als er voor de woningen en utiliteitsgebouwen geen collectieve warmtetechnieken mogelijk zijn in de buurt. In de resultaten zien we dat met een MT- of LT-warmtebron nabij een dichtbebouwde buurt de collectieve warmtetechniek de voorkeur al snel krijgt boven de individuele warmtetechniek. Hierbij is het echter van belang om in acht te nemen dat de business case voor de eindgebruiker niet aansluit op die van warmteproducenten en -leveranciers, te concluderen uit de mismatch tussen de resultaten in nationale kosten (hoofdstuk 3) en eindgebruikerskosten (hoofdstuk 4).

Tot slot kunnen we de meerkosten voor de eindgebruiker vergelijken met de nationale meerkosten (hoofdstuk 3). Wat opvalt is wanneer we de bevindingen tussen hoofdstuk 3 en hoofdstuk 4 vergelijken tegenstrijdige conclusies getrokken kunnen worden: de nationale meerkosten van de hWP zijn hoger dan van de hr-ketel, maar de eindgebruikersmeerkosten van de hWP zijn lager dan van de hr-ketel. De verklaring hiervan zit hem voor woningen met name in het energieverbruik: door de significant hogere kosten voor groen gas ten opzichte van elektriciteit, gedreven door met name de energiebelasting, vallen de totale lasten voor de eindgebruiker gunstiger uit bij toepassing van hWP in een woning. Voor utiliteit is het verschil te verklaren door investeringssubsidies: binnen het geringe verschil in kosten voor de eindgebruiker tussen de hWP en de hr-ketel bieden subsidies genoeg om het tij te keren.

5 De impact van de inzet van de hybride warmtepomp

5.1 Introductie

Het vorige hoofdstuk heeft laten zien hoe kosten van hWP verschillen per type buurt in Nederland. In dit hoofdstuk wordt nader gekeken naar hoe de kosten van de hybride warmtepomp zich verhouden tot andere warmtetechnieken met de specifieke focus op de (onderlinge) effecten van de warmtetechnieken wanneer je aanpassingen doet in tijd en inzet van de hybride warmtepomp. Daarin richten we ons op de gevolgen van de inzet van de hWP op de lange termijn (inzet van hWP in 2030) en op de korte termijn (inzet van hWP in 2020). De volgende specifieke vragen worden beantwoord:

- Wat zijn de gevolgen van de lange termijn inzet van de hWP op de alternatieve duurzame warmtetechnieken?
- Wat zijn de gevolgen van de korte termijn inzet van de hWP op de alternatieve duurzame warmtetechnieken?
- Wat betekent een korte-termijn inzet van de hWP in termen van kosten en CO_2-besparingspotentie?
- Wat zijn de gevolgen van de inzet van de hWP op de isolatiemaatregelen?
- In hoeverre creëert de inzet van de hWP aanvullende kosten of een *lock-in* voor buurten waar het eindbeeld (de optimale duurzame warmtetechniek in 2030) niet een hWP is?

Definities vooraf

Om antwoord te geven op de onderzoeksvragen wordt met het rekenmodel Vesta-MAIS (versie Startanalyse 2020) verschillende scenario's doorgerekend. Omdat we op zoek zijn naar verbanden en invloeden als gevolg van de inzet van de hybride warmtepomp op verschillende termijnen, is het belangrijk om in kaart te brengen hoe nationale kosten en eindbeelden veranderen wanneer er op de korte termijn of op de lange termijn ingezet wordt op de hWP.

- Een *inzet van de hWP* wordt gedefinieerd als een actieve stimulans van de hWP ten opzichte van de hr-ketel. Specifiek wordt dit in het onderzoek, om het totaal aan potentieel te kunnen beschouwen, gesimuleerd door de hWP als absolute vervanger van de hr-ketel te stellen; dat wil zeggen dat de hWP wordt toegepast als enige alternatief met een gasaansluiting.
- De *lange termijn inzet* definiëren we als dat de hWP, in combinatie met groen gas, in 2030 wordt ingezet als warmtetechniek in Nederland.
- De *korte termijn inzet* definiëren we als dat de hWP, in combinatie met aardgas, in 2020 wordt ingezet als warmtetechniek in Nederland.

Er wordt onderscheid gemaakt tussen de volgende situaties: de *huidige situatie*, de *tussenstap* en het *eindbeeld*.

Onder de *huidige situatie* wordt de situatie verstaan zoals hij nu is: de energieprijzen, energiedragers en kostenkengetallen zoals ze op dit moment (in 2020) gelden zijn hier van toepassing. Dit betekent tevens dat voor bevindingen over de *huidige situatie* geldt dat er gebruik gemaakt wordt van aardgas als systeemgas. Als laatst wordt er, tenzij anders vermeld (zie ook de tussenstap) aangenomen dat in de huidige situatie alle gebouwen in Nederland verwarmd worden door middel van een hr-ketel, met uitzondering van de bij het CBS bekende bestaande warmtenet-aansluitingen.

Met de *tussenstap* wordt verwezen naar de landelijke inzet van de hWP onder de *huidige situatie*. Hiervoor geldt dus dat de situatie identiek is aan de hiervoor geschetste *huidige situatie*, met de

enkele uitzondering dat alle gebouwen in Nederland, wederom met enkel de uitzondering van bekende bestaande warmtenet-aansluitingen, verwarmd worden door middel van een hWP.

Onder het *eindbeeld* verstaan we een op nationale kosteneffectiviteit geoptimaliseerde situatie in 2030: het *eindbeeld* is het resultaat van de kostenafweging van de mogelijke warmtetechnieken binnen een bepaald scenario. Dit betekent tevens dat hier een verduurzamingsstap gezet is en er dus sprake is van groen gas als systeemgas en de gebouwde omgeving is volledig klimaatneutraal (geen CO_2-uitstoot als gevolg van de toepassing van duurzame warmtetechnieken). Elk eindbeeld, voor elk scenario en voor iedere warmtetechniek in dat eindbeeld, heeft dus ook per definitie een uitstoot van 0 kg CO_2.

Voor de doorrekeningen wordt gekozen voor een drietal scenario's; een referentiescenario (de Startanalyse) en een tweetal aangepaste scenario's:

- **Startanalyse:** Als referentiescenario wordt de Startanalyse aangehouden. De Startanalyse berekent de nationale meerkosten van verschillende warmtetechnieken door op buurtniveau in 2030. Hierbij wordt aangenomen dat woningen isoleren naar minimaal label D of B. De Startanalyse presenteert de warmtetechniek met de laagste nationale kosten als de 'voorkeursopties' van de buurt.
- **Lange termijn inzet (2030):** In het tweede scenario wordt de inzet van de hWP in 2030 onderzocht naast andere mogelijke warmtetechnieken. Hier wordt dezelfde basis aangehouden als het *Referentiescenario*, die uitrekent welke warmtetechniek de 'voorkeursoptie' is van de buurt. Echter, er wordt een verandering doorgevoerd in de warmtechnieken die het model in overweging neemt en de manier waar isolatiemaatregelen worden doorgerekend voor 2030. Zo behoort de hr-ketel niet meer tot een mogelijke warmtetechniek. Dit betekent dat de hWP de enige warmtetechniek is die op gas werkt in dit scenario. Ook worden isolatiemaatregelen in dit scenario gekozen op basis van nationale kostenefficiëntie in 2030, met een minimum gesteld op schillabel D. Dat houdt in dat een gebouw isoleert naar het hoogste schillabel tussen A, B, C en D dat voor dat gebouw maatschappelijk rendabel is (waarbij de opbrengsten de kosten dekken). Dit is anders dan in het referentiescenario, waarin de keuze wordt gemaakt tussen labels B en D, tenzij het een LT of all-electric toepassing betreft met hogere isolatie-eisen.
- **Korte termijn inzet (2020):** Met het derde scenario wordt de inzet van de hWP in 2020 onderzocht. Dit scenario is in de basis gelijk aan het *lange termijn inzet 2030 scenario*. In dit scenario wordt echter additioneel aangenomen dat op de korte termijn in 2020 ingezet wordt op de hybride warmtepomp. In 2030 worden vervolgens, net als in de andere scenario's, de voorkeursopties bepaald aan de hand van alle mogelijk warmtetechnieken exclusief de hr-ketel. De aangepaste situatie in 2020 in dit scenario wordt gezien als *tussenstap* richting 2030.

Tabel 5.1 toont een overzicht van de door te rekenen scenario's. Door middel van deze scenario's is het mogelijk om de impact van de lange termijn inzet van de hybride warmtepomp te onderzoeken, en om de kosten van de inzet van een hybride warmtepomp op korte termijn en het lange termijneffect hiervan in kaart te brengen.

Tabel 5.1: Overzicht van door te rekenen scenario's

		Doorrekening		
Zichtjaar	**Categorie**	**Startanalyse 2020**	**Lange termijn inzet**	**Korte termijn inzet**
2020	*Systeemgas*	Aardgas	Aardgas	Aardgas
	Installatie	hr-ketel	hr-ketel	Hybride warmtepomp
	Schillabel	Huidig schillabel	Huidig schillabel	Huidig schillabel
2030	*Systeemgas*	Groen gas of waterstof	Groen gas of waterstof	Groen gas of waterstof
	Installatie	Alle warmtetechnieken	Alle warmtetechnieken exclusief hr-ketel	Alle warmtetechnieken exclusief hr-ketel
	Schillabel	Schillabel B+ of D+	Schillabelkeuze D+ o.b.v. maatschappelijk kostenefficiënt	Schillabelkeuze D+ o.b.v. maatschappelijk kostenefficiënt

De gepresenteerde scenario's dienen om op efficiënte wijze effecten van de inzet van de hWP te onderzoeken. Het dient benoemd te worden dat een eindbeeld met een volledige afwezigheid van de hr-ketel niet realistisch is. De keuze voor deze scenario's dienen dan ook niet ter toetsing van potentieel beleid, maar ter verkenning van de uitersten: door de referentiesituatie, de situatie zoals gemodelleerd in de Startanalyse 2020, te vergelijken met een vrij radicale vorm van inzet op de hWP, het compleet uitsluiten van de hr-ketel, biedt dit inzicht in de weerszijden van het speelveld. Hiermee wordt de maximaal mogelijke potentie belicht van de inzet van de hWP.

5.2 De lange termijn inzet (2030) van de hybride warmtepomp

In deze paragraaf onderzoeken we hoe de inzet van de hWP gevolgen heeft op de inzet van andere duurzame warmtetechnieken in 2030. Hierbij maken we een vergelijking van de resultaten uit de Startanalyse en de lange termijn inzet. Wat gebeurt er met de toewijzing van technieken wanneer de hr-ketel geen keuze meer is? Er wordt gekeken naar de invloed van de inzet van de hWP op de inzet van alternatieve technieken en het effect op de kosten van de verschillende warmtetechnieken.

5.2.1 De invloed van de lange termijn inzet van de hWP op het eindbeeld

De Startanalyse (referentiescenario) neemt in de bepaling van het eindbeeld alle mogelijke warmtetechnieken mee en gaat er tevens van uit dat isolatiemaatregelen in de gebouwde omgeving moeten voldoen aan de label B+ of D+ eis. In het geval van de lange termijn inzet worden andere uitgangspunten gehanteerd. De hr-ketel behoort in dit geval *niet* tot een van de warmtetechnieken en er geldt enkel een label D+ eis, waarbij eventuele verdere verbeteringen mogelijk zijn op basis van de laagste nationale kosten. Dit verschil in uitgangspunten tussen de scenario's heeft mogelijk gevolgen voor de groen gas allocatie omdat een hWP tot significant minder gasgebruik leidt.

De beschikbaarheid van groen gas wordt niet oneindig verondersteld in het model. Het model gaat er van uit dat er in 2030 tot 2 miljard m^3 aan groen gas per jaar beschikbaar is voor de gebouwde

omgeving[24]. Het model alloceert groen gas aan buurten in Nederland waar groen gas het meest kosteneffectief kan worden toegepast, en waarbij de tweede voorkeursoptie aanzienlijk duurder is dan de groen gas optie. In buurten met een grote kostenafstand tot de tweede voorkeursoptie heeft het groen gas een hogere waarde; door het gas juist hier in te zetten worden de meeste nationale kosten bespaard (zie box 2 voor een situatieschets).

Box 2: Voorbeeld van de werking van de groen gas allocatie in Vesta-MAIS – een situatieschets

Voorbeeld: groen gas allocatie in Vesta MAIS-model en de Startanalyse

Buurten A en B komen beiden uit op een warmtetechniek met een groen gas aansluiting (hWP óf hr-ketel) als alternatief met de laagste nationale kosten. Er is echter niet genoeg groen gas beschikbaar om beiden te voorzien van het benodigde groen gas.

Buurt A heeft gemiddelde nationale meerkosten per woning voor de toepassing van een hr-ketel van 100 euro per jaar, en nationale meerkosten van 120 euro per jaar voor de toepassing van een elektrische luchtwarmtepomp (de overige technieken vallen nog hoger uit). Het verschil tussen het eerste en het tweede voorkeursalternatief bedraagt voor buurt A zo'n 20 euro per woning per jaar.

Buurt B komt ook uit op gemiddelde nationale meerkosten per woning van 100 euro per jaar maar het tweede goedkoopste alternatief, een aansluiting op het MT-warmtenet, zou tot 150 euro aan nationale kosten per jaar uit komen. Het verschil tussen het eerste en het tweede voorkeursalternatief bedraagt voor buurt B zo'n 50 euro per woning per jaar.

Door het groen gas toe te wijzen aan buurt A wordt 20 euro per woning per jaar aan nationale kosten per jaar bespaard, wat bij buurt B neer komt op een besparing van 50 euro per woning per jaar. De "waarde" van de inzet van het groen gas is dus hoger voor buurt B. Het model stelt het groen gas dus beschikbaar voor buurt B, waarbij buurt A kiest voor de tweede voorkeursoptie, de elektrische luchtwarmtepomp.

De hr-ketel gebruikt meer gas dan de hWP. De inzet van de hWP betekent dus dat het beschikbare groen gas over meer aansluitingen of een grotere warmtevraag per aansluiting kan worden verdeeld. Dit creëert drie mogelijke effecten:

1. De buurten, waarbij in de Startanalyse de hr-ketel de laagste nationale kosten had, moeten overstappen naar een alternatieve warmtetechniek met hogere nationale kosten. Dit heeft dus een verhogend effect op de totale nationale kosten.
2. Verschillende buurten waarvoor de kosten van een gasaansluiting laag waren maar waarvoor geen gas meer beschikbaar was kunnen nu eventueel wél in aanmerking komen voor een gasaansluiting. Dit heeft een verlagend effect op de totale nationale kosten.
3. Buurten waarbij de hWP als voorkeursoptie geldt blijven dezelfde kostenafstand behouden tot het eerstvolgende aardgasloze voorkeursalternatief, terwijl in buurten waarvoor de hr-ketel de voorkeursoptie was deze kostenafstand kleiner wordt. Hierdoor vinden er mogelijk verschuivingen plaats in de groen gas allocatie. Deze verschuivingen leiden tot een mogelijk versterkend effect op de eerstgenoemde effecten.

[24] Aangenomen en gebruikt door het PBL in de Startanalyse 2020. Zie voor een uitgebreide onderbouwing en implicaties van dit getal ook de toelichting van de Startanalyse, sectie 5.5.2: https://www.pbl.nl/sites/default/files/downloads/pbl-2020-Startanalyse-aardgasvrije-buurten-versie_2020-24-september-2020_4038.pdf

In het eindbeeld van de Startanalyse wordt bij zo'n 86% van alle woningequivalenten aangesloten op het beschikbare groen gas de hWP al toegepast. In de situatie van de lange termijn inzet op de hWP is de hr-ketel niet meer toepasbaar, waardoor in deze situatie dus sprake is van 100% hWP in de categorie groen gas. Wat deze wijziging betekent voor het eindbeeld in termen van woningequivalenten, buurten en de verdeling van overige warmtetechnieken onderzoeken we in dit onderdeel.

De effecten zijn terug te zien in Tabel 5.2 en Tabel 5.3. De tabel toont een overzicht van veranderingen in buurtaantallen in resulterende technieken per doorrekening. In beide situaties is de beschikbare 2 miljard m^3 groen gas per jaar in zijn totaal ingezet, wat betekent dat de groen gas limiet in beide gevallen is bereikt. Te zien is dat het leidt tot een toename in aantal woningequivalenten, maar een kleine afname in aantal buurten. Dit duidt op verschuivingen in de groen gas allocatie: de buurten die nu met een hWP toepassing groen gas toegewezen krijgen zijn niet gelijk aan de buurten die in de Startanalyse met een hr-toepassing hiervoor in aanraking komen. In combinatie met de marginale toename die geconstateerd wordt in aantal woningequivalenten wekt het vermoeden dat de inzet van groen gas in de nieuwe situatie het meest waardevol is in buurten met een relatief grote functionele warmtevraag per aansluiting.

Tabel 5.2: Aantal buurten per voorkeurstechniek per scenario

Warmtetechniek	Aantal als voorkeursoptie in de Startanalyse	Aantal als voorkeursoptie bij lange termijn inzet hWP	Verschil
All-Electric	3.601	4.877	+1.276
HT/MT warmtebron	2.145	2.173	+28
LT warmtebron	1.522	220	-1.302
Groen gas	6.150	6.148	-2

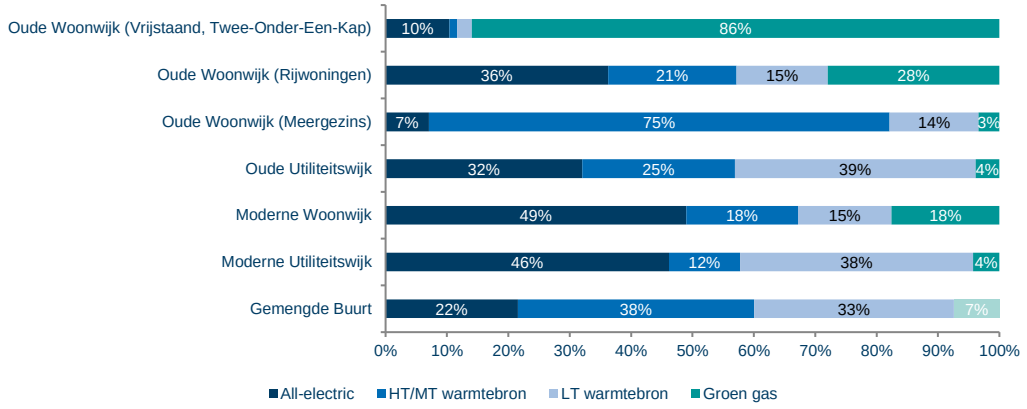
Tabel 5.3: Aantal woningequivalenten per voorkeurstechniek per scenario

Warmtetechniek	Aantal als voorkeursoptie in de Startanalyse	Aantal als voorkeursoptie bij lange termijn inzet hWP	Verschil
All-Electric	2,8 miljoen WEQ	4,1 miljoen WEQ	+1,3 miljoen WEQ
HT/MT warmtebron	3,0 miljoen WEQ	3,0 miljoen WEQ	-0,0 miljoen WEQ
LT warmtebron	1,7 miljoen WEQ	0,2 miljoen WEQ	-1,5 miljoen WEQ
Groen gas	2,6 miljoen WEQ	2,8 miljoen WEQ	+0,2 miljoen WEQ

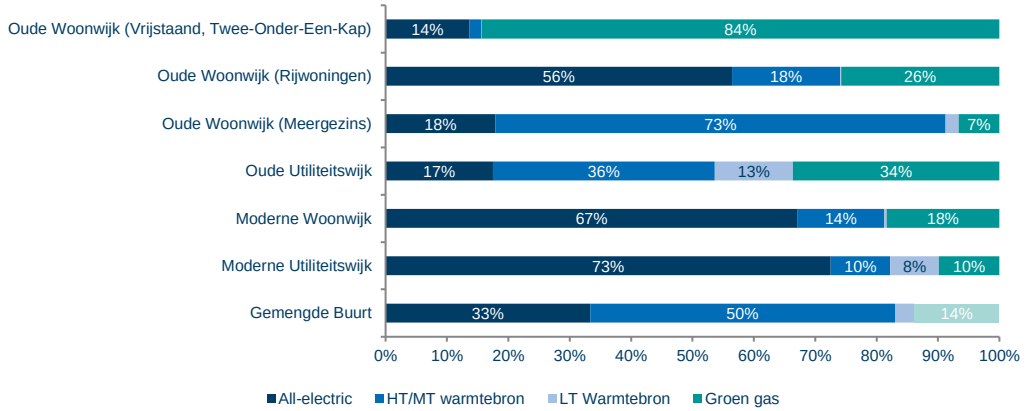
In de verschuivingen valt het op dat er een sterke verplaatsing van lage temperatuur warmte naar all-electric toepassingen optreedt. De verschuivingen in de groen gas allocatie kunnen hier een oorzaak voor zijn, echter heeft dit mogelijk ook te maken met de toepassing van isolatiemaatregelen op basis van maatschappelijke kostenefficiëntie. In paragraaf 5.2.2 wordt verder ingegaan op de gevolgen van de aangepaste schillabelbepaling.

Om meer inzicht te kunnen krijgen splitsen we de uitkomsten verder op naar verschillende buurttypen. In Figuur 5-1 is de verdeling van voorkeursopties in de Startanalyse te zien en Figuur 5-2 toont deze verdeling na de lange termijn inzet van de hWP.

Figuur 5-1: Verdeling van toegepaste warmtetechnieken per buurttype in het eindbeeld van de Startanalyse 2020 (in WEQ)



Figuur 5-2: Verdeling van toegepaste warmtetechnieken per buurttype in het eindbeeld van de scenario doorrekening "lange termijn inzet" (in WEQ)



In zowel het eindbeeld van de Startanalyse als in het eindbeeld na de lange termijn inzet is duidelijk te zien dat het overgrote deel van de oude woonwijken met veel vrijstaande of twee-onder-een-kap woningen een groen gas toepassing als voorkeursoptie heeft. Dit zijn buurten met vooral woningtypen met typisch een relatief grote warmtevraag per aansluiting, welke in hoofdstukken 3 en 4 eerder ook als meest geschikte woningtypen voor de toepassing van de hybride warmtepomp. De meest opvallende verschuiving is echter te zien bij oude (tevens in beperktere mate bij moderne) utiliteitswijken: in het eindbeeld van de lange termijn inzet van de hWP krijgt voor substantieel meer (van 4% naar 34%) oude utiliteitswijken de hWP de voorkeur. Dit sluit aan op eerdere bevindingen:

- Utiliteitsgebouwen (en met name oudere) hebben een doorgaans een relatief hoge warmtevraag per aansluiting, en
- De uitkomsten van de Startanalyse tonen aan dat oude utiliteitswijken over het algemeen de toepassing van een Hr-ketel prefereren boven de hWP (zie paragraaf 3.4).

Inzetten op de hWP op de lange termijn leidt concluderend tot verschuivingen in de groen gas allocatie. Warmtetechnieken die gebruik maken van groen gas hebben gemiddeld gezien de laagste nationale kosten voor de meeste woningen (Hoofdstuk 3) en een nieuwe situatie waarin groen gas wordt toebedeeld aan andere buurten dan wanneer de hr-ketel nog een optie was leidt dan ook tot een ander eindbeeld. Hoge- en midden-temperatuur warmtebron toepassingen zijn sterk afhankelijk van ruimtelijke component (denk hier aan beschikbaarheid van bronnen en bebouwingsdichtheid) wat een verklaring biedt voor de stabiliteit van deze uitkomsten. Binnen de kaderen van dit onderzoek zijn niet alle verschuivingen volledig te herleiden, echter vormt een beeld dat in lijn ligt met de eerdere

bevindingen in dit onderzoek. Het groen gas wordt in de nieuwe situatie niet zozeer toegekend aan significant méér woningen of buurten, maar wel aan andere buurten. Specifiek volgt een eenduidige toekenning aan buurten met woningen met een relatief grote energievraag. De toekomstige inzet van de hWP is het meest aantrekkelijk in oude, vrijstaande of twee-onder-een-kap woningen, en tevens is potentie te zien voor toepassing in oude utiliteitsgebouwen.

5.2.2 *De invloed van de lange termijn inzet van de hWP en isoleren op basis van maatschappelijke kostenefficiëntie op de kosten van de warmtetransitie*

In deze sectie bekijken we de effecten van de aangepaste schillabelkeuze op de nationale kosten per ton vermeden CO_2. De schillabel verdeling van de Startanalyse is getoond in Tabel 5.11. Hieraan toegevoegd is de verdeling van schillabels in de nieuwe situatie na de inzet van de hWP op de lange termijn. De splitsing in B+ en D+ schillabeltoewijzing is terug te zien in de Startanalyse waar hoofdzakelijk labels B en D voorkomen (respectievelijk 42% en 39% van het totaal aantal gebouwen komt hier op uit). Wanneer voor de lange termijn gebruik gemaakt wordt van schillabeloptimalisatie en ingezet wordt op de hWP in 2030 toont dit zich in de resultaten: een toename in labels A en C is te zien (respectievelijk 15% en 16%, ten opzichte van 10% en 10%). In paragraaf 5.2.1 is tevens geconstateerd dat de lange termijn inzet van de hWP leidt tot een toename in All-Electric toepassingen. Dit zien we terug in de afname van aantal keren dat schillabels C en D gezamenlijk terug komen in Tabel 5.4. Dit effect lijkt, op basis van de percentages per schillabel, echter marginaal.

Tabel 5.4: Verdeling van de schillabels in het eindbeeld voor de Startanalyse en het scenario met een lange termijn inzet van de hybride warmtepomp.

	Aantal A	Aantal B	Aantal C	Aantal D
Startanalyse	10%	42%	10%	39%
Lange termijn inzet (toename t.o.v. SA)	15%	39%	16%	29%

De impact van de verschuivingen in isolatiemaatregelen, het weglaten van de hWP, en de resulterende verschuivingen in technieken leiden tot verschillen in nationale kosten van de warmtetransitie. In Tabel 5.5 is een overzicht opgenomen van de verschillen in kosten per techniek in 2030.

Tabel 5.5: Nationale kosten per gereduceerde ton CO_2 in 2030 voor iedere techniek per scenario.

	Startanalyse [Euro/tCO_2 per jaar]	Lange termijn inzet [Euro/tCO_2 per jaar]	Verschil
All-Electric	514	457	-11%
MT/HT Restwarmte	430	375	-13%
LT Restwarmte	496	433	-13%
Groen gas aansluiting	301	260	-14%
Gemiddeld	**401**	**353**	**-12%**

Wat opvalt is dat de nationale kosten per bespaarde ton CO_2 in 2030 voor zowel het geheel als voor alle technieken individueel daalt. De aanpassingen hebben een positief effect op de kosten per vermeden ton CO_2, wat betekent dat er in de uitkomsten van de Startanalyse veel buurten zitten die kostenefficiënter uit kunnen komen met relatief kleine wijzigingen. Omdat de verschillen in schillabels (zie Tabel 5.4) en het verhoogde aandeel hWP onder de groen gas aansluitingen (van 86% naar 100%) beiden bescheiden zijn is het aannemelijk dat er tevens een efficiëntere verdeling van technieken over de buurten plaatsvindt waardoor de kosten kunnen dalen.

Maatschappelijk kostenefficiënt isoleren én inzetten op de hWP leidt tot een beter betaalbare warmtetransitie. De bevindingen tonen dat een efficiëntere en effectievere inzet van het beschikbare groen gas op die manier voor de gebouwde omgeving leidt tot lagere nationale kosten.

5.3 De korte termijn inzet (2020) van de hybride warmtepomp

In hoofdstuk 3 is geïdentificeerd in welke typen buurten de hWP als meest kosteneffectief ingeschat worden in de Startanalyse. In dit hoofdstuk wordt gekeken naar de kosten van de inzet van de hWP op de korte termijn (2020). Daarbij wordt onderzocht welk effect de inzet van de hWP op de korte termijn heeft op de keuze van eventuele andere warmtetechnieken op de lange termijn (2030). Hiermee wordt onderzocht of de inzet van de hWP in 2020 een kansrijke tussenstap kan zijn richting het eindbeeld van 2030.

5.3.1 Nationale kosten en CO_2 besparing bij een korte termijn inzet van de hWP

Vergelijking van de huidige situatie (2020) in de Startanalyse en het korte termijn scenario leert ons de globale effecten van de korte termijn inzet van de hWP. Allereerst bekijken we de nationale cijfers: Tabel 5.6 toont gelijke inzichten over het aardgasverbruik in 2020 en Tabel 5.7 toont de huidige CO_2 uitstoot in 2020, rekening houdende met CO_2-uitstoot uit elektriciteitsverbruik op basis van de huidige energiemix. Beiden tonen het overzicht en de verschillen per scenario.

Tabel 5.6: Jaarlijks aardgasverbruik per scenario

Prestatie-indicator	Eenheid	Waarde
Aardgasverbruik 2020 gebouwde omgeving	GJ / jaar	412 miljoen
Aardgasverbruik 2020 bij inzet hWP in 2020	GJ / jaar	177 miljoen
Aardgasverbruik landelijk bij inzet hWP in 2020	GJ / jaar	-235 miljoen
Vermindering aardgasverbruik gemiddeld per WEQ	*%**	*-58%*

*Aardgasverbruik per woning of woningequivalent kan fors uiteenlopen als gevolg van verschillen in bouwjaren, gebouwtypen en oppervlakten. Vanwege de omvang van deze bandbreedte wordt hier de vermindering van het aardgasverbruik per woningequivalent enkel als percentage gegeven.

Tabel 5.7: Jaarlijkse CO_2-uitstoot per scenario

Prestatie-indicator	Eenheid	Waarde
CO_2-uitstoot 2020 gebouwde omgeving	ton CO_2 / jaar	24,8 miljoen
CO_2-uitstoot 2020 bij inzet hWP in 2020 met aardgas	ton CO_2 / jaar	18,2 miljoen
CO_2-reductie landelijk bij inzet hWP in 2020 met aardgas	ton CO_2 / jaar	-6,6 miljoen
CO_2-reductie gemiddeld per woningequivalent	*%**	*-26,5%*

*CO_2-uitstoot per woning of woningequivalent kan fors uiteenlopen als gevolg van verschillen in bouwjaren, gebouwtypen en oppervlakten. Vanwege de omvang van deze bandbreedte wordt hier CO_2-reductie per woningequivalent enkel als percentage gegeven.

De inzet van de hybride warmtepomp op de korte termijn vermindert het aardgasverbruik met een gemiddelde van 58% per woningequivalent, met een totale reductiepotentie van 235 PJ aardgas per jaar voor de gehele gebouwde omgeving in Nederland. Rekening houdende met de CO_2-intensiteit van het Nederlandse elektriciteitsverbruik in 2020 heeft inzet van de hWP de potentie om jaarlijks een totaal van 6,6 miljoen ton CO_2-reductie te realiseren. Ten opzichte van de totale jaarlijkse uitstoot van 24,8 miljoen ton CO_2 in de gebouwde omgeving betekent dit dat de inzet van de hWP leidt tot een reductie van ruim een kwart van het totaal aan CO_2-uitstoot wanneer de gehele gebouwde omgeving overgaat op de hWP. Omgerekend betekent dit tevens dat er gemiddeld per woningequivalent ongeveer een kwart van de CO_2-uitstoot voorkomen kan worden. De werkelijke CO_2-reductie per woningequivalent hangt af van het bouwjaar, gebouwtype en het oppervlak van een

woning. Tabel 5.8 toont een overzicht van de gemiddelde CO_2-reductie (absoluut en proportioneel) per buurttype.

Tabel 5.8: Verdeling van jaarlijkse CO2-reductie bij de korte termijn inzet op de hWP ten opzichte van de huidige situatie. Cijfers verdeeld over verschillende buurttypen.

Buurttype	CO_2 reductie per WEQ	Proportionele reductie
Gemengde Buurt	-0,68 ton CO_2 per WEQ	-26,2%
Moderne Utiliteitswijk	-0,51 ton CO_2 per WEQ	-26,6%
Moderne Woonwijk	-0,50 ton CO_2 per WEQ	-25,2%
Oude Utiliteitswijk	-0,67 ton CO_2 per WEQ	-26,9%
Oude Woonwijk (Meergezins)	-0,53 ton CO_2 per WEQ	-25,8%
Oude Woonwijk (Rijwoningen)	-0,64 ton CO_2 per WEQ	-26,5%
Oude Woonwijk (Vrijstaand, Twee-Onder-Een-Kap)	-0,88 ton CO_2 per WEQ	-27,7%
Gemiddeld	-0,64 ton CO_2 per WEQ	-26,5%

Het overzicht toont een duidelijk beeld van de verdeling. Zowel absoluut als proportioneel gezien wordt de meeste CO_2-reductie per woning gerealiseerd bij buurten met veel oude gebouwen en met buurten waarin veel woningtypen te vinden zijn met typisch een hoge energievraag: vrijstaande en twee-onder-een-kap woningen en utiliteitsgebouwen. Deze trend wordt tevens versterkt wanneer gekeken wordt naar waar de minste reductie plaatsvindt: buurten met veel moderne bouw en met veel meergezinswoningen.

Tabel 5.9 toont de huidige nationale kosten in 2020 per scenario en de verschillen hierin. Wanneer op korte termijn maximaal ingezet wordt op de hWP op aardgas leidt dat tot totale nationale meerkosten van 3,4 miljard. Dit resulteert in gemiddelde nationale meerkosten van 524,53 per gereduceerde ton CO_2.

Tabel 5.9: Nationale kosten per scenario

Prestatie-indicator	Eenheid	Waarde
Nationale kosten 2020 referentie uitkomst Startanalyse	€ / jaar	11,8 miljard
Nationale kosten 2020 bij inzet hWP in 2020 met aardgas	€ / jaar	15,2 miljard
Nationale meerkosten 2020 bij inzet hWP in 2020 met aardgas	€ / jaar	3,4 miljard
Nationale meerkosten 2020 per ton CO_2-reductie bij inzet hWP	*€ / jaar per tCO_2*	*524,53*

Op basis van de Startanalyse zijn de gemiddelde meerkosten voor de hWP 338 euro/ton CO_2 per jaar in 2030. Wanneer alle warmtetechnieken beschouwd worden leidt het eindbeeld van de Startanalyse tot gemiddeld 401 euro/ton CO_2 in 2030. Op basis van kosten per gereduceerde CO_2-emissies liggen de kosten op dit moment over het algemeen dus een stuk hoger dan in de toekomst. Dit is te verklaren doordat in de korte termijn in 2020 gebruik wordt gemaakt van aardgas. Op de lange termijn kan gebruik gemaakt worden van duurzame gassen. Het gebruik van duurzame gassen resulteert in een lagere CO_2-uitstoot vergeleken met het gebruik van aardgas vanwege de aanname in de methodiek van Vesta-MAIS dat dit leidt tot een uitstoot van 0 kg CO_2. Dit betekent dan ook dat de kosten per CO_2-reductie voor duurzame gassen lager zijn (je bespaart immers meer CO_2 met dezelfde euro) dan de kosten per CO_2-reductie voor aardgas. Het gegeven dat de prijs van duurzaam gas hoger is dan de prijs van aardgas weegt niet op tegen dit effect.

In Tabel 5.9 worden de nationale kosten verder uitgesplitst over de verschillende buurttypen. De gemiddelde jaarlijkse meerkosten per woning zijn zo'n 335 euro wanneer er op korte termijn gekozen wordt voor een hWP. Vergeleken met de gemiddelde kosten in 2030 (775 euro/WEQ op basis van de Startanalyse) is dit bedrag laag. Werkelijke meerkosten per woningequivalent zijn lager voor

woningen met een lage warmtevraag, terwijl wanneer geschaald wordt naar CO_2-reductie de uitkomsten wederom in lijn liggen met de eerdere bevindingen: uitstootreductie is het meest betaalbaar wanneer de hWP wordt ingezet in oude woonwijken met voornamelijk vrijstaande en twee-onder-een-kap woningen. De hoogste kosten per CO_2-reductie zijn te vinden bij moderne wijken en wijken met veel meergezinswoningen.

Tabel 5.10: Verdeling van nationale meerkosten van de korte termijn inzet op de hWP ten opzichte van de huidige situatie. Cijfers weergegeven per WEQ en per CO_2-reductie over de verschillende buurttypen.

Buurttype	Jaarlijkse meerkosten per WEQ	Jaarlijkse kosten per ton CO_2-reductie
Gemengde Buurt	€ 391,07	€ 576,71
Moderne Utiliteitswijk	€ 377,22	€ 740,58
Moderne Woonwijk	€ 285,03	€ 571,88
Oude Utiliteitswijk	€ 365,02	€ 547,90
Oude Woonwijk (Meergezins)	€ 319,44	€ 597,13
Oude Woonwijk (Rijwoningen)	€ 329,03	€ 514,63
Oude Woonwijk (Vrijstaand, Twee-Onder-Een-Kap)	€ 339,39	€ 384,51
Gemiddeld	€ 334,51	€ 524,10

De kosten voor verschillende kostencomponenten van de hWP op dit moment en in 2030 zullen van elkaar verschillen. Technologie-leercurves (zie ook paragraaf 3.2.3), de mogelijke overstap naar andere energiedragers en -bronnen, en energieprijsstijgingen of -dalingen zorgen voor een ingewikkelde dynamiek in de kostenontwikkeling van de hWP. Toch blijkt in iedere situatie een gelijkwaardig patroon terug te vinden met betrekking tot kosteneffectieve verduurzaming van de gebouwde omgeving:

- In de Startanalyse werd groen gas voornamelijk toegekend aan buurten waarin de hWP als techniek het meest kosteneffectief bleek: oude woonwijken met voornamelijk vrijstaande en twee-onder-een-kap woningen;
- Op de korte termijn is de inzet van de hWP het meest aantrekkelijk in oude woonwijken met voornamelijk vrijstaande en twee-onder-een-kap woningen, en
- Op de lange termijn is de inzet van de hWP het meest aantrekkelijk in zowel oude woonwijken met voornamelijk vrijstaande en twee-onder-een-kap woningen als oude utiliteitswijken.

De inzet van de hWP op de korte termijn leidt tot een gemiddelde CO_2-reductie van 26,5% per woningequivalent. De kosten geschaald per gereduceerde ton CO_2 zijn relatief hoog (524,53 euro per ton CO_2), echter zijn absolute kosten per woningequivalent relatief beperkt (334 euro per WEQ). Met name voor oude woonwijken met vooral vrijstaande en twee-onder-een-kap woningen biedt de toepassing van een hWP op de korte termijn een kosteneffectieve oplossing om te verduurzamen. Hiermee is tevens een duidelijk verband te zien tussen de aantrekkelijkheid van de hWP op de korte en op de lange termijn.

5.4 De invloed van de inzet van de hWP op isolatiemaatregelen en lock-in effecten

In onderdeel 5.2.1 kwam reeds naar voren dat inzet van de hWP op de korte termijn (in 2020) er toe zou kunnen leiden dat op de langere termijn andere warmteoplossingen aantrekkelijker worden in 2030. In dit onderdeel onderzoeken we het verband tussen de verschuivingen in voorkeursopties en de mate waarin gebouwen geïsoleerd worden. Daarbij besteden we specifiek aandacht aan lock-in effecten: effecten (als gevolg van keuzes) die de flexibiliteit in de toekomst verslechterd.

De rekenprocedure in het Vesta MAIS-model volgt twee stappen. In deze eerste stap worden alle mogelijke combinaties van schillabels en warmtetechnieken doorgerekend. Voor een techniek met een midden- of hogetemperatuurafgiftesysteem is dat een combinatie van de techniek met het label, D, C, B of A. Voor een techniek met een lagetemperatuurafgiftesysteem zijn er twee combinaties te maken, de techniek samen met label B of A. Wanneer de maatschappelijke kosten van alle combinaties zijn doorgerekend selecteert het Vesta MAIS-model de combinatie met de laagste maatschappelijke kosten.

Het resultaat van de selectie is dat voor alle gebouwen een isolatiewaarde is bepaald die maatschappelijk kostenefficiënt is, met een minimum schillabel eis afhankelijk van de temperatuur van het warmteafgiftesysteem. De Startanalyse volgt hetzelfde procedé met als verschil dat zij enkel rekent met de schillabels B of D. Dat betekent dat in de optimalisatie van de Startanalyse er geen sprongen gemaakt kunnen worden naar schillabel A of C.

De verschillen tussen onze aanpak en die van de Startanalyse leiden er toe dat er tevens verschillen in uitkomsten zijn. Wanneer een woning naar een ander schillabel isoleert heeft dat namelijk impact op de resterende warmtevraag in de buurt en daarmee dus ook op de (on)mogelijkheid van het in bedrijf stellen van een warmtenet (waarvoor een zekere warmtedichtheid van de vraag benodigd is).

In paragraaf 5.2.2 is eerder geconstateerd dat er beperkte verschuivingen in isolatiemaatregelen optreden bij maatschappelijk kostenefficiënte isolatie gecombineerd met de inzet op de hWP op de lange termijn. Wanneer we verder kijken naar de veranderingen van alleen de lange termijn inzet en de korte termijn inzet zien we echter geen verschillen in isolatiewaarden. Het verschil tussen deze scenario's is de inzet van de hWP op verschillende termijnen. Dit betekent dat de additionele inzet van de hWP als tussenoplossing op de korte termijn geen gevolgen heeft op de toegepaste isolatiemaatregelen. Tabel 5.11 toont de resulterende aandelen per schillabel in de verschillende eindbeelden.

Tabel 5.11: Verdeling van de schillabels in het eindbeeld voor de drie verschillende scenario's

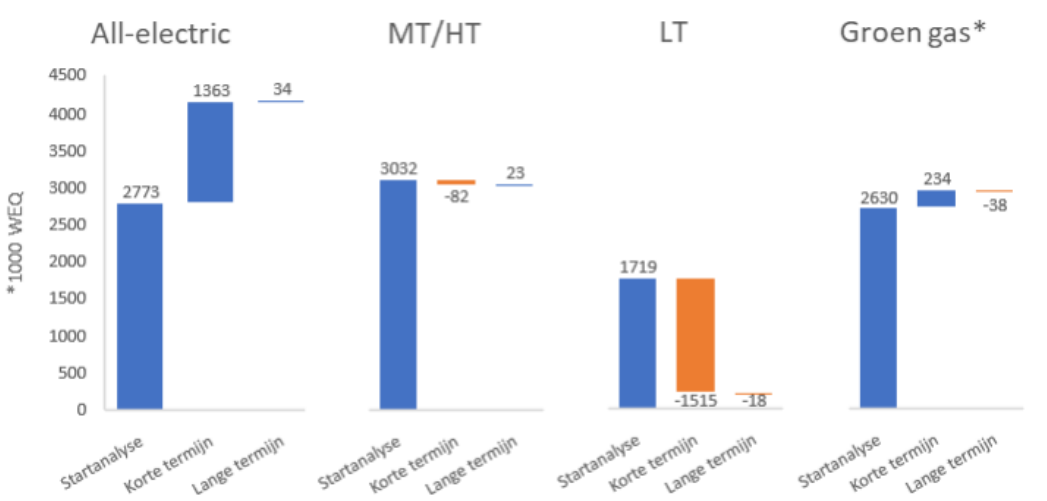
	Aantal A	Aantal B	Aantal C	Aantal D
Startanalyse	10%	42%	10%	39%
Lange termijn inzet (toename t.o.v. SA)	15%	39%	16%	29%
Korte termijn inzet (toename t.o.v. SA)	15%	39%	16%	29%

Isolatiemaatregelen kunnen een belangrijke oorzaak zijn van lock-in: wanneer een woning of gebouw in de basis goed geïsoleerd is zijn andere technieken aantrekkelijker dan bij gebouwen die slecht geïsoleerd zijn. Ook kan een gebrek aan isolatie in een gebouw bepalend zijn voor het al dan niet kunnen toepassen van bepaalde warmtetechnieken (bijvoorbeeld wanneer sprake is van een lage afgiftetemperatuur). De hWP is een techniek die goed toegepast kan worden op vele verschillende woningen, van goed tot slecht geïsoleerd. Het inzetten van de hWP op de korte termijn forceert niet dat bepaalde gebouwen een bepaalde schillabeleis moeten behalen. Hierdoor heeft de inzet van de hWP niet tot nauwelijks effect op de keuze voor isolatiemaatregelen, wat tevens dus suggereert dat geen sprake zal zijn van lock-in effecten.

Om het gebrek aan lock-in effecten als gevolg van de inzet op de hWP verder te kunnen verifiëren is het belangrijk om de resultaten van de 3 verschillende scenario's in het aantal techniektoepassingen te beschouwen. Figuur 5-3 toont de verschuivingen vanaf de Startanalyse gezien alsmede de verschuiving van resultaten van de korte termijn inzet naar de lange termijn inzet. Van de situatie in de Startanalyse naar korte termijn inzet zijn dezelfde verschuivingen terug te vinden zoals beschouwd in paragraaf 5.2.1. Wanneer er sprake zou zijn van lock-in effecten door de inzet van de hWP toont dat zich wederom in de verschuivingen van het scenario "korte termijn inzet" naar "lange

termijn inzet": de korte termijn inzet van de hWP als tussenstap zou in deze situatie een concreet verschil moeten maken. Deze tussenstap toont daarentegen amper verschuivingen ten opzichte van enkel de lange termijn inzet. Op basis van de gesimuleerde situaties zijn dus geen potentiële lock-in effecten geconstateerd als gevolg van de inzet van de hWP op de korte termijn.

Figuur 5-3: Verschuivingen per warmtetechniek per scenario ten opzichte van de Startanalyse**



* Groen gas technieken variëren per doorgerekende scenario. Startanalyse 2020: hWP of HR. Bij overige doorgerekende scenario's: hWP.

** Cijfers in duizenden woningequivalenten. In het blauw is als eerst steeds de basis getoond; dit betreft de hoeveelheid in de resultaten van de Startanalyse van PBL. Een toename of daling in aantal is vervolgens weergegeven boven het scenario in kwestie. Dalingen zijn gemarkeerd in het oranje.

5.5 Conclusies: de impact van inzet van de hybride warmtepomp

In deze paragraaf geven wij op basis van de bevindingen antwoord op de gestelde onderzoeksvragen. Er wordt onderscheid gemaakt tussen drie verschillende eindbeelden in 2030: het eindbeeld op basis van de Startanalyse (de referentiesituatie), het eindbeeld bij een lange termijn inzet op de hWP (géén hr-ketel als optie in 2030) en het eindbeeld bij een korte termijn inzet op de hWP (géén hr-ketel als optie in 2030 én alle huishoudens stappen daarvoor al over op een hWP in 2020). Door de drie verschillende eindbeelden met elkaar te vergelijken worden de effecten van de inzet op de hWP in Nederland in kaart gebracht.

De lange termijn inzet is in dit onderzoek gesimuleerd door een toekomst te verkennen waarin de standaard hr-ketel geen optie is. Deze situatie zorgt ervoor dat voor buurten waarvoor de hr-ketel eerder de voorkeur kreeg de kosten omhoog zullen gaan, maar ook voor een daling in kosten voor buurten die nu wél in aanmerking komen voor een gasaansluiting. Tevens zijn hier isolatiemaatregelen getroffen op basis van maatschappelijke kostenefficiëntie. Uit het onderzoek is gebleken dat voor heel Nederland de totale kosten van de warmtetransitie af nemen wanneer maatschappelijk kostenefficiënt geïsoleerd wordt en maximaal wordt ingezet op de hWP. Een efficiëntere en effectievere inzet van het beschikbare groen gas voor de gebouwde omgeving leidt tot lagere nationale kosten.

In verhouding tot andere warmtetechnieken geldt dat de inzet van de hWP op de lange termijn het meest aantrekkelijk is in ruim opgezette woonwijken met woningtypen met een relatief hoge energievraag: de hWP komt in zowel de Startanalyse als na de lange termijn inzet op de hWP als voorkeursoptie voornamelijk naar voren in oude woonwijken met veelal vrijstaande en twee-onder-een-kap woningen. De grootste verschuiving vindt verder plaats bij oude utiliteitswijken: wanneer de

hr-ketel geen optie meer is wordt er significant meer groen gas toegewezen aan buurten met voornamelijk oude utiliteitsgebouwen.

De inzet van de hWP in de huidige situatie (2020), aangesloten op aardgas, resulteert in een gemiddelde jaarlijkse CO_2-reductie van 26,5% per woningequivalent. Hierbij is tevens rekening gehouden met het elektriciteitsverbruik en de huidige energiemix; wanneer enkel gekeken naar het aardgasverbruik is er sprake van een verbruiksvermindering van gemiddeld 58% per woningequivalent na toepassing van een hWP. De jaarlijkse nationale meerkosten ten opzichte van de huidige situatie zijn bij inzet van de hWP op korte termijn geschat op zo'n 524 euro per gereduceerde ton CO_2, wat relatief hoog is vergeleken met wanneer de hWP wordt toegepast op de lange termijn met groen gas en met aangenomen CO_2-neutrale elektriciteitsproductie (338 euro per ton CO_2). Echter benadrukt dit ook de synergie met de energietransitie: de toenemende verduurzaming van de energiemix en toekomstige inzet van duurzame gassen bevorderen de effectiviteit van de inzet van de hWP. Gespecificeerd naar de verschillende buurttypen lopen bedragen sterk uiteen, waarbij de oude woonwijken met voornamelijk vrijstaande woningen en twee-onder-een-kap woningen met 310 euro per ton CO_2 per jaar wederom het meest aantrekkelijk zijn voor de toepassing van de hWP.

Er is sprake van lock-in wanneer de implementatie van een bepaald warmtealternatief (in dit geval de hWP) in 2020 ervoor zorgt dat de omschakeling naar een alternatief in 2030 niet meer rendabel blijkt. In het onderzoek wordt daarom bepaald of de inzet van de hWP, op aardgas, op de korte termijn voor woningen leidt tot verschuivingen in kosteneffectieve warmtetechnieken in de einduitkomsten voor het jaar 2030. Uit de resultaten blijkt dat dit niet tot nauwelijks het geval is: er is dus geen sprake van lock-in effecten als gevolg van de inzet van de hWP op de korte termijn. Dit is te verklaren doordat een lock-in allen optreedt wanneer bepaalde, veelal zware, investeringen een onomkeerbare aanpassing betreffen die de business-case van de verschillende warmtetechnieken beïnvloedt. Er zijn in de onderzochte situatie twee vormen van investeringen die hieronder vallen:

- Gebouwaanpassingen: isolatiemaatregelen hebben een sterk effect op de business-case per techniek en zijn onomkeerbaar. Voor de inzet van een hWP is geen verdergaande isolatiestap noodzakelijk in vergelijking met andere technieken, dus dit is niet van toepassing.
- Infrastructuur: verzwaring van het elektriciteitsnet is een blijvende ingreep die een positieve bias kan creëren voor elektrische oplossingen. De vermogensvraag van de hWP valt relatief mee, dus het effect hiervan is dan ook zeer beperkt. Het gebruikte Vesta MAIS model houdt hier tevens rekening mee, waaruit blijkt dat dit géén invloed heeft.

De meerwaarde van de inzet van de hWP blijkt groter op de lange termijn dan op de korte termijn. Dit betekent echter niet dat er nog niet begonnen kan worden: de toepassing van een hWP op aardgas leidt tot een gemiddelde reductie van meer dan een kwart van de CO_2-uitstoot en leidt niet tot een ongewenste lock-in naar een later, aardgasvrij eindbeeld. Vanwege het reductiepotentieel op de korte termijn en de substantiële baten op de lange termijn, ondersteund door de inzichten die volgen uit hoofdstukken 2 en 3, wordt aanbevolen om te stimuleren waar de businesscase zowel nu als op termijn aantrekkelijk is. Dit is voornamelijk het geval in oude woonwijken met veel vrijstaande woningen of twee-onder-een-kap woningen, waar op lange termijn de toepassing van de hWP kostenvoordelen oplevert voor zowel de eindgebruiker als voor de maatschappij en op de korte termijn het meest kosteneffectief verduurzaamt kan worden.

6 Referenties

- ABF Research. (2012). Woonmilieutypologie. ABF Research - Woonmilieutypologie - Brongegevens. https://datawonen.nl/info/abfwmtyp.html
- CE Delft. (2015). Op weg naar een klimaatneutrale gebouwde omgeving 2050. https://www.ce.nl/publicatie/op_weg_naar_een_klimaatneutrale_gebouwde_omgeving_2050/1638
- Centraal Bureau voor de Statistiek. (2019). CBS Statline. Kerncijfers Wijken En Buurten 2019. https://opendata.cbs.nl/statline/#/CBS/nl/dataset/84583NED
- Centraal Bureau voor de Statistiek. (2020, November 3). Welke sectoren stoten broeikasgassen uit? https://www.cbs.nl/nl-nl/dossier/dossier-broeikasgassen/hoofdcategorieen/welke-sectoren-stoten-broeikasgassen-uit-
- Chang, M.-C., Bus, P., & Schmitt, G. (2017). Feature Extraction and K-means Clustering Approach to Explore Important Features of Urban Identity. 2017 16th IEEE International Conference on Machine Learning and Applications (ICMLA), 1139–1144. https://doi.org/10.1109/ICMLA.2017.00015
- Jiang, S., Ferreira, J., & Gonzalez, M. C. (2012). Discovering urban spatial-temporal structure from human activity patterns. Proceedings of the ACM SIGKDD International Workshop on Urban Computing - UrbComp '12, 95. https://doi.org/10.1145/2346496.2346512
- Li, Y., & Xie, Y. (2018). A New Urban Typology Model Adapting Data Mining Analytics to Examine Dominant Trajectories of Neighborhood Change: A Case of Metro Detroit. Annals of the American Association of Geographers, 108(5), 1313–1337. https://doi.org/10.1080/24694452.2018.1433016
- Ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties. (2020). Artikel 1.1 Begripsbepalingen | Bouwbesluit Online. Bouwbesluit Online 2012: Artikel 1.1 Begripsbepalingen. https://rijksoverheid.bouwbesluit.com/Inhoud/docs/wet/mrtoe2012/artikelsgewijs/hfd1/art1-1
- Salvati, L., & Sabbi, A. (2014). Identifying urban diffusion in compact cities through a comparative multivariate procedure. The Annals of Regional Science, 53(2), 557–575. https://doi.org/10.1007/s00168-014-0632-2
- Planbureau voor de Leefomgeving. (2020). Startanalyse aardgasvrije buurten, versie 2020. https://themasites.pbl.nl/leidraad-warmte/2020/
- van Eupen, M., Metzger, M. J., Pérez-Soba, M., Verburg, P. H., van Doorn, A., & Bunce, R. G. H. (2012). A rural typology for strategic European policies. Land Use Policy, 29(3), 473–482. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2011.07.007
- Wassenberg, F., Arnoldus, M., Goetgeluk, R., Penninga, F., & Reinders, L. (2011, February 21). Hoe breed is de buurt? Typologie van woonmilieus: herkenbaar, bruikbaar en beschikbaar. Hoe Breed Is de Buurt? https://www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2006/04/01/hoe-breed-is-de-buurt

Bijlage A: Aanpak opstellen buurttypologie

In deze bijlage wordt een nadere toelichting gegeven op de segmentering van de samenstelling van de gebouwenvoorraad van een buurt. Ook lichten we hoe we vervolgens van de gesegmenteerde buurten naar buurt-oppervlakte-profiel gaan. Tenslotte lichten we toe de buurten met oppervlakte-profielen vervolgens kunnen worden ingedeeld in buurttypen aan de hand van een clusteranalyse.

Indelen van buurten op basis van oppervlakte segmenten

Iedere buurt heeft een oppervlakte die toegewijd is aan bebouwing (uitgedrukt in km^2). Deze oppervlakte kan op verschillende manieren onderverdeeld worden. De dimensies waarlangs deze oppervlakten onderverdeeld worden bepalen het karakter van een buurttypologie. In deze studie kiezen we ervoor om de gebouwde oppervlakten op te delen over (i) verblijfsfunctie, (ii) bouwperioden en (iii) gebouw typen. Deze drie dimensies worden gecombineerd in zogenaamde 'oppervlakte segmenten'. Een voorbeeld van zo'n segment is bijvoorbeeld woningen uit 1930 met het gebouwtype rijwoning, of, utiliteitsgebouwen uit 1990 met het gebouwtype kantoor. In totaal onderscheidden we 28 van dit soort segmenten (zie Tabel A.1).

Tabel A.1: Overzicht en beschrijving van oppervlakte segmenten

Buurt	Gebouw Bestemming	Bouwperiode[25]	Gebouw / Functie Type	Oppervlakte Segment
Buurt	Wonen	Oud (Voor 2000) / Modern (Na 2000)	Meergezins (Laag & Midden)	1. Oude lage meergezinswoningen.
				2. Moderne lage meergezinswoningen.
			Meergezins (Hoog)	3. Oude hoge meergezinswoningen.
				4. Moderne hoge meergezinswoningen.
			Rijwoning (Tussen)	5. Oude tussen-rijwoningen.
				6. Moderne tussen-rijwoningen.
			Rijwoning (Hoek)	7. Oude hoek-rijwoningen.
				8. Moderne hoek-rijwoningen.
			Twee-onder-een-kap	9. Oude twee-onder-een-kap woningen.
				10. Moderne twee-onder-een-kap woningen.
			Vrijstaand	11. Oude vrijstaande woningen.
				12. Moderne vrijstaande woningen.
	Utiliteit	Oud (Voor 1990) / Modern (Na 1990)	Bijeenkomst	13. Moderne gebouwen met bijeenkomstfunctie (e.g. kunst, cultuur, godsdienst).
				14. Moderne gebouwen met bijeenkomstfunctie (e.g. kunst, cultuur, godsdienst).
			Gezondheidszorg	15. Oude gebouwen met gezondheidszorgfunctie (e.g. ziekenhuizen, verplegingstehuizen).

[25] Zoals te zien is in Bijlage C en D bevat de originele data meer dan vier categorieën wat betreft bouwperiode. Om de data handzamer te maken is er voor gekozen om gebouwen op te splitsen in een 'oude' en een 'moderne' categorie. De figuren in Bijlage C en D zijn gebruikt voor het bepalen van deze categorieën. Voor gebouwen met bestemming 'Wonen' wordt gesplitst op voor en na 2000 omdat hier de grootste kostenverschillen bestaan voor de hWP. Voor gebouwen met bestemming 'Utiliteit' geldt dat de grootste kostenverschillen bestaan tussen bouwperiode van voor en na 1990. Deze kostenverschillen worden voornamelijk bepaalt door de hogere kosten die ervoor nodig zijn om oude gebouwen te isoleren.

Buurt	Gebouw Bestemming	Bouwperiode[25]	Gebouw / Functie Type	Oppervlakte Segment
				16. Moderne gebouwen met gezondheidszorgfunctie (e.g. ziekenhuizen, verplegingstehuizen).
			Industrie	17. Oude gebouwen met industriefunctie (i.e. het bedrijfsmatig bewerken of opslaan van materialen en goederen, of voor agrarische doeleinden).
				18. Moderne gebouwen met industriefunctie (i.e. het bedrijfsmatig bewerken of opslaan van materialen en goederen, of voor agrarische doeleinden).
			Kantoor	19. Oude gebouwen met kantoorfunctie.
				20. Moderne gebouwen met kantoorfunctie.
			Logies	21. Oude gebouwen met logiesfunctie (i.e. het bieden van recreatief verblijf of tijdelijk onderdak aan personen).
				22. Moderne gebouwen met logiesfunctie (i.e. het bieden van recreatief verblijf of tijdelijk onderdak aan personen).
			Onderwijs	23. Oude gebouwen met onderwijsfunctie (e.g. scholen, universiteiten).
				24. Moderne gebouwen met onderwijsfunctie (e.g. scholen, universiteiten).
			Sport	25. Oude gebouwen met sportfunctie.
				26. Moderne gebouwen met sportfunctie.
			Winkel	27. Oude gebouwen met winkelfunctie (i.e. het verhandelen van materialen, goederen of diensten).
				28. Moderne gebouwen met winkelfunctie (i.e. het verhandelen van materialen, goederen of diensten).

Oppervlakte-profielen per buurt

Het is per buurt mogelijk om de proporties van de segmenten die voorkomen in de buurt aan te duiden. Door vervolgens naar de proporties van alle voorkomende segmenten tezamen te kijken per buurt, bekijkt men in feite het oppervlakteprofiel van de buurt. Voor het opstellen van de proporties per segment gebruiken we de volgende notatie en formules.

De notatie $P_{s,b}$, waar 'P' staat voor proportie, de index 's' voor segment en de index 'b' voor buurt[26]. Ter illustratie, $P_{1,500}$ = 0.5 zou dus betekenen dat oude lage meergezinswoningen 50% van de gebouwde oppervlakte van buurt met ID = 500 beslaan.

[26] De 's' index heeft een bereik van [1 … 28], de 'b' index loopt van [1 … N] waarbij N het totaal aantal buurten in de database betreft (+/- 13,000).

Onderstaande formules laten zien dat $P_{s,b}$ berekend wordt als oppervlakte van alle gebouwen (*g*) die tot een bepaald segment (*s*) behoren gedeeld door de totale oppervlakte van de buurt (*b*) waarin deze gebouwen zich bevinden (zie onderstaande formules).

$$Oppervlakte_s = \sum_{1}^{N} Oppervlakte_{g,s}$$

$$P_{s,b} = \frac{Oppervlakte_s}{Oppervlakte_b}$$

Om de mate van gelijkenis tussen buurten te kwantificeren en ze op basis van die kwantificatie te groeperen wordt er gebruik gemaakt van een Principale Componenten Analyse (PCA) en een K-Means clustering techniek.

De PCA wordt gebruikt om de dimensies in de data te vinden die over het sterkste onderscheidingsvermogen beschikken. Met andere woorden, de PCA analyseert de oppervlakte-profielen van alle buurten en bepaalt zo welke verschillen of overeenkomsten het sterkst aanwezig zijn in de data. De PCA helpt om de data, die uit 28 dimensies bestaat (zie Tabel A.1), te versimpelen door ze terug te brengen naar slechts een paar 'hoofd-dimensies'[27] die het gros van de verschillen verklaren tussen buurten kunnen verklaren. Zodoende reduceert de PCA het totaal aantal buurt-specifieke eigenschappen tot de meest cruciale. Dit heeft als voordeel dat overbodige eigenschappen niet mee worden genomen in de cluster-analyse. Zo zorgt de PCA ervoor dat buurten kunnen worden geclusterd op de meest duidelijke (of voor de hand liggende) verschillen/overeenkomsten. Het uitvoeren van een cluster-analyse *zonder een PCA* zou resulteren in de onwenselijk situatie waarbij er een (te) groot aantal clusters worden geïdentificeerd die niet of nauwelijks van elkaar te onderscheiden zijn.

De cluster-analyse bestaat uit het uitvoeren van het K-Means algoritme. De K-Means techniek groepeert buurten op basis van hun 'scores' op de door de PCA geïdentificeerde dimensies. Technisch gesproken is het algoritme er op toegespitst om de *between-cluster variance* te maximaliseren en de *within-cluster variance* te minimaliseren. Dat houdt in dat er rekening mee wordt gehouden dat buurten die zich in dezelfde categorie bevinden zo veel mogelijk op elkaar lijken, terwijl buurten in verschillende categorieën zoveel mogelijk van elkaar verschillen.

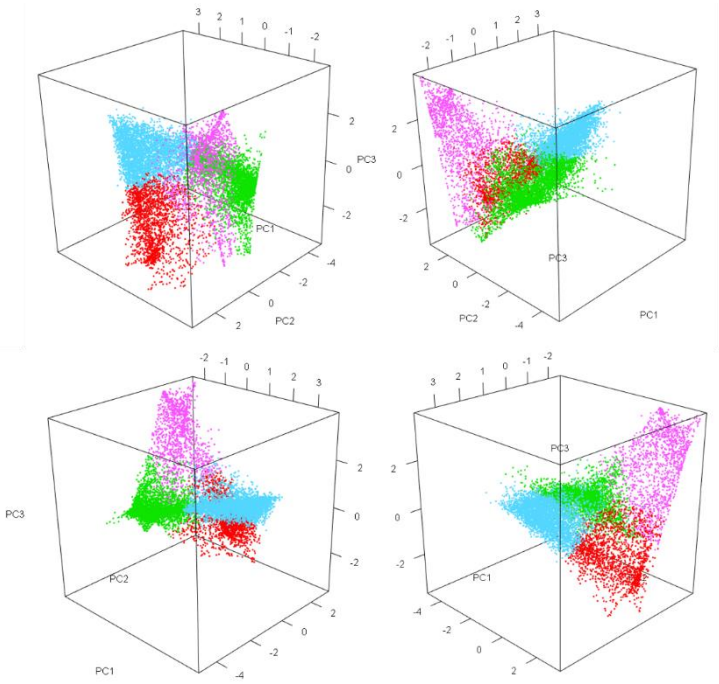
Het combineren van PCA met K-Means is een beproefde methode voor het identificeren van betekenisvolle categorieën of groepen uit multidimensionale datasets. Deze aanpak wordt vaak gebruikt bij het analyseren van de gebouwde omgeving en het identificeren van typologieën binnen stedelijke / ruimtelijke structuren (Chang et al., 2017; Jiang et al., 2012; Li & Xie, 2018; Salvati & Sabbi, 2014; van Eupen et al., 2012). Het feit dat PCA + K-Means vaak samen worden gebruikt om een betekenisvolle indeling te maken van de gebouwde omgeving vormt een sterke onderbouwing van de huidige methodologische beslissingen.

De clusteranalyse: van oppervlakte-profielen per buurt naar buurttypen

Figuur A-1 en Figuur A-2 vormen een abstracte weergave van de geïdentificeerde clusters. Figuur A-1 laat zien hoe er vier clusters ontstaan in de driedimensionale principale componenten ruimte wanneer buurten met elkaar vergeleken worden op basis van het type gebouw dat zich veelal in bepaalde buurten bevindt.

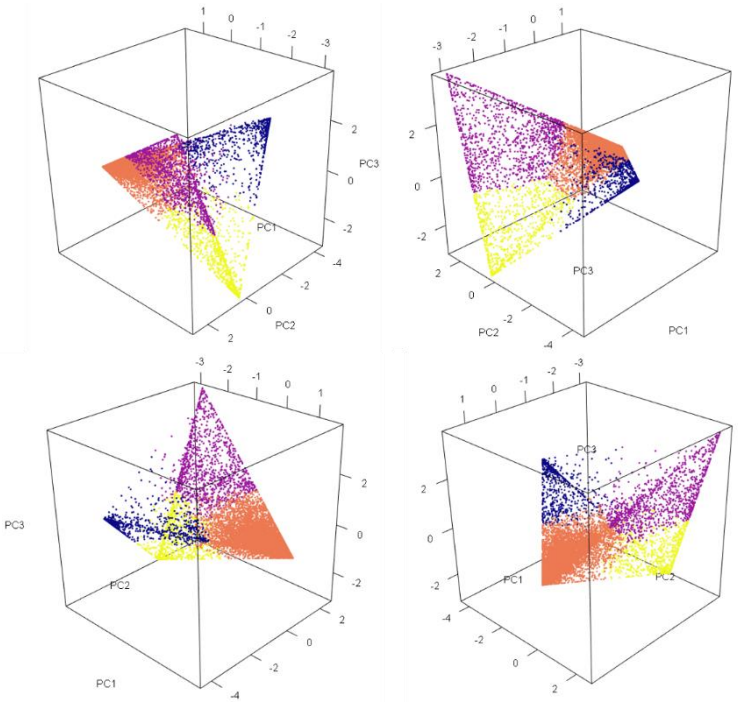
[27] Ook wel 'Principale Componenten' (PCs) genoemd.

Figuur A-1: Buurtclusters van gebouwtypen.



Figuur A-2 laat zien hoe de clusters er uit zien wanneer buurten met elkaar vergeleken worden in termen van de bouwperiode van de gebouwen die zich in buurten bevinden.

Figuur A-2: Buurtclusters van bouwperioden.



Deze 16 (4 x 4) clusters zijn geïndexeerd middels het schema in Tabel A.2. Tabel A.3 laat zien hoeveel buurten (N) er zich in ieder cluster bevinden. Vanwege het verwijderen van buurten met incomplete en/of corrupte data is het totaal aantal buurten uitgekomen op 13,281.

Tabel A.2: Cluster indexering schema.

Index	Dominant Gebouw Type*	Index	Dominante Bouwperiode**
1	Utiliteitsgebouw	A	Voor 2000
2	Rijwoningen	B	Na 2000
3	Vrijstaande en twee-onder-een-kap woningen	C	Voor 1990
4	Meergezinswoning	D	Na 1990

* Het Dominante Gebouw Type geeft aan welk gebouw er het meest voorkomt in de buurten die zich in een bepaald cluster bevinden.

** De Dominante Bouwperiode geeft aan welke bouwperiode er het meest voorkomt in de buurten die zich in een bepaald cluster bevinden.

Tabel A.3: Beschrijvende statistieken van geïdentificeerde buurtclusters.

Cluster	N	%
1A*	17	0.13%
1B*	6	0.05%
1C	754	5.68%
1D	875	6.59%
2A	3,839	28.91%
2B	532	4.01%
2C*	22	0.17%
2D*	2	0.02%
3A	4,804	36.17%
3B	221	1.66%
3C*	232	1.75%
3D*	148	1.11%
4A	1,233	9.28%
4B	146	1.10%
4C*	329	2.48%
4D*	121	0.91%
Totaal	**13,281**	**100%**

* Deze clusters hebben een gebouw type en een bouwperiode index die bij verschillende verblijfsfuncties horen. Dat wil zeggen dat deze clusters uit buurten bestaan met een gemengde mix aan gebouwen met de bestemming ‘wonen’ en ‘utiliteit’. Ondanks het feit dat er getracht wordt om cluster zoveel mogelijk van elkaar te laten verschillen is het onmogelijk om te voorkomen dat ze af en toe overlap vertonen. Deze ‘mix-buurten’ vallen veelal in de overlappende gebieden. Het totaal aantal buurten dat zich in dit soort gemixte clusters bevindt is 690 (ong. 7% van het totaal).

Om buurtcategorieën te maken is er besloten om clusters te groeperen. Tijdens het groeperen van clusters is er rekening gehouden met het realiseren van een zo gelijkwaardig mogelijke verdeling van categorieën in termen van groepsgrootten. Daarnaast is er als criterium gehanteerd dat clusters die samengevoegd worden tot een categorie een soortgelijke oppervlakte-verdeling laten zien. Tabel A.4 laat zien hoeveel buurten er zich in iedere buurtcategorie bevinden.

Daarnaast is er ter validatie van de huidige buurt categorisering gekeken naar de mate van stedelijkheid van de buurten in iedere buurtcategorie. Deze buurt-specifieke stedelijkheidsindicaties zijn verkregen via publieke datasets van het Centraal Bureau van de Statistiek (CBS, 2019). Op grond van de omgevingsadressendichtheid is door het CBS aan iedere buurt, wijk of gemeente een stedelijkheidsklasse toegekend. De volgende klassenindeling is gehanteerd:

1: zeer sterk stedelijk >= 2 500 adressen per km²
2: sterk stedelijk 1 500 - 2 500 adressen per km²
3: matig stedelijk 1 000 - 1 500 adressen per km²

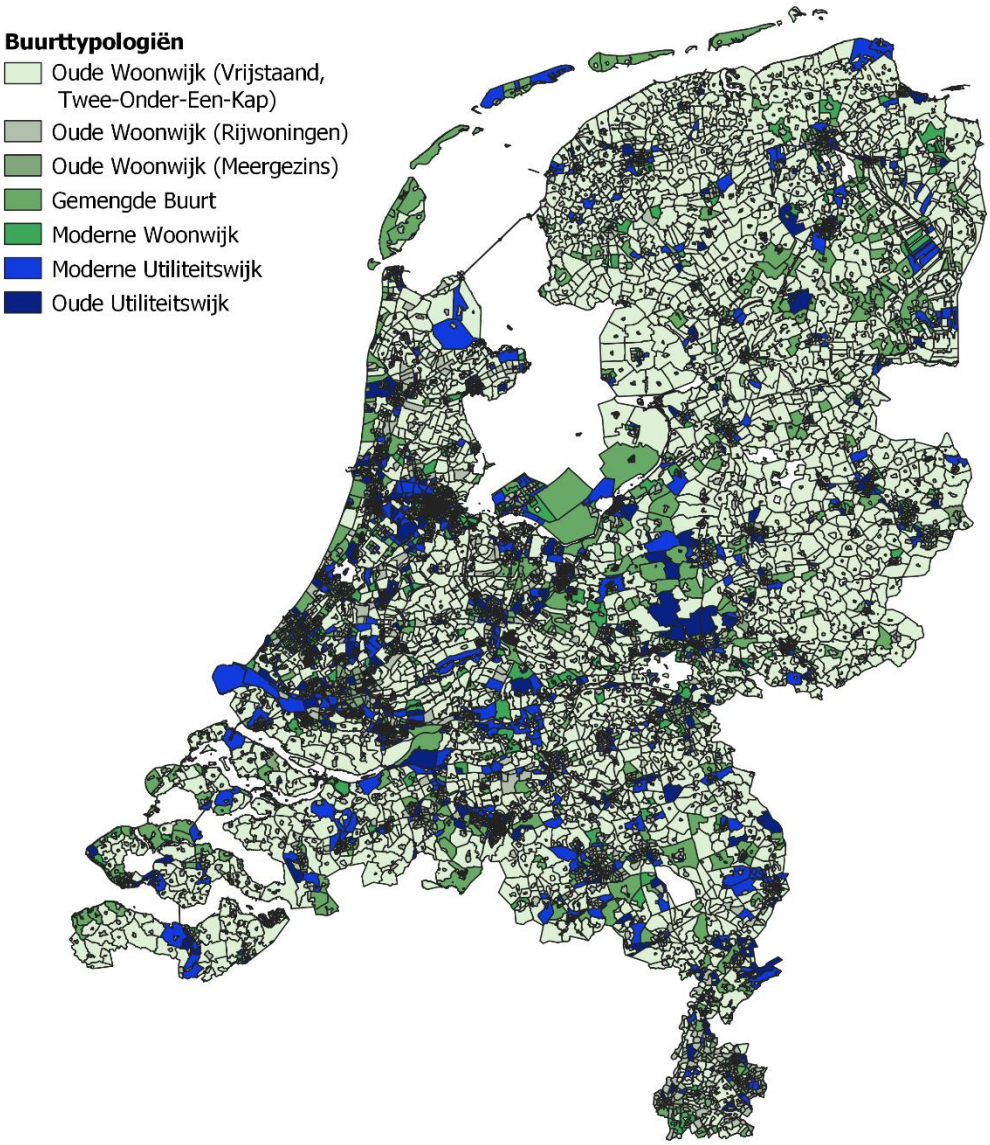
4: weinig stedelijk 500 - 1 000 adressen per km²
5: niet stedelijk < 500 adressen per km²

Tabel A.4 laat zien dat de buurt categorieën Oude en Moderne Utiliteitswijken en Gemengde Buurten de hoogste stedelijkheid vertonen. Stedelijke gebieden zijn doorgaans gekenmerkt door een dichte bebouwing met gebouwen waarvan de verblijfsfuncties een grote variatie vertonen; dit verklaart waarom 'Gemengde Buurten' een hoge mate van stedelijkheid vertonen. Daarnaast is het zo dat stedelijke gebieden veel utiliteitsgebouwen bevatten zoals kantoren, industrie, winkels etc. Dit verklaart de hoge mate van stedelijkheid van de utiliteitswijken.

Tabel A.4: Beschrijvende statistieken van buurttypen

Buurt Categorie	N	%	Stedelijkheid*
Gemengde Buurt	877	6.60%	2.81
Moderne Utiliteitswijk	875	6.59%	2.79
Moderne Woonwijk	899	6.77%	3.91
Oude Utiliteitswijk	754	5.68%	1.94
Oude Woonwijk (Meergezins)	1,233	9.28%	3.32
Oude Woonwijk (Rijwoningen)	3,839	28.91%	4.74
Oude Woonwijk (Vrijstaand, Twee-Onder-Een-Kap)	4,804	36.17%	3.05
Totaal	**13,281**	**100%**	**3.22**

Figuur A-3: Geografische weergave van de verschillende buurttypen



Bijlage B: Beschrijving kostenallocatie

Beschrijving Kostenallocatie: Infrastructuurkosten

Het Vesta-MAIS model genereert de data omtrent K1 (vaste infrastructuurkosten), K5 (variabele infrastructuurkosten) en K4 (energielasten) voor iedere warmtetechniek op buurtniveau. In Sectie 0 worden deze kostencomponenten opgesplitst en toegewezen aan verschillende gebouwcategorieën. Dit wordt gedaan om te onderzoeken voor welke type gebouwen de hybride warmtepomp het meest kostenefficiënt is.

Allereerst wordt berekend wat de totale infrastructuurkosten van alle gebouwen in Nederland zijn door de som te nemen van de infrastructuurkosten van alle buurten in Nederland. Vervolgens wordt een deel van deze infrastructuurkosten toegewezen aan woningen en een deel aan utiliteitsgebouwen. Dit wordt gedaan door te bepalen wat het totaal aantal woningequivalenten is in Nederland en welk aandeel van dit totaal toegeschreven kan worden aan woningen (WEQ_{wonen}) en aan utiliteitsgebouwen ($WEQ_{utiliteit}$); vergelijkingen 1 en 2 laten dit zien.

$$Kosten_{Wonen} = Kosten * \frac{WEQ_{wonen}}{WEQ} \quad (1)$$

$$Kosten_{Utiliteit} = Kosten * \frac{WEQ_{Utiliteit}}{WEQ} \quad (2)$$

Deze procedure wordt herhaald voor de volgende warmteoplossingen:

1. hWP op groengas met schillabel B+
2. hWP op groengas met schillabel D+
3. hr-ketel op groengas met schillabel B+
4. hr-ketel op groengas met schillabel D+

Als duidelijk is wat de kosten zijn voor woningen en utiliteitsgebouwen per warmteoplossing wordt er een verdergaande splitsing gemaakt per gebouwcategorie (GC). Een GC wordt getypeerd door een gebouwtype en een bouwjaar; een voorbeeld van een GC is '*kantoren die gebouwd zijn voor 1990*'. Om te bepalen wat de kosten zijn van een warmteoplossing voor een bepaalde GC wordt er eerst bepaald *hoeveel gebouwen* er binnen een bepaalde GC vallen (N_{GC}). Tevens wordt er berekend hoe het aantal woningequivalenten van een bepaalde GC (WEQ_{GC}) zich verhoudt ten opzichte van het totaal aantal woningequivalenten in Nederland; let op dat het totaal aantal woningequivalenten voor woningen (WEQ_{wonen}) 7.868.727 bedraagt en voor utiliteitsgebouwen gelijk is aan 2.399.372 ($WEQ_{utiliteit}$)[28]. Voor de gemiddelde kosten van gebouwen binnen een GC die tot de verblijfsfunctie

[28] Voor gebouwen met verblijfsfunctie 'wonen' staat het aantal woningequivalenten gelijk aan het aantal woningen; d.w.z. één woning is één WEQ (ongeacht de grootte van de woning in kwestie). Voor gebouwen met bestemming 'utiliteit' is dit niet zo. Dit betekent dat een utiliteitsgebouw gekarakteriseerd kan worden door méér dan 1x WEQ. De reden hiervoor is dat een typisch utiliteitsgebouw vaak over een (veel) groter bebouwingsoppervlakte beschikt dan een typische woning. Om hiervoor te corrigeren wordt voor utiliteitsgebouwen één WEQ toegekend per 130 m^2. Het aantal utiliteitsgebouwen in Nederland bedraagt 934.527. Het gemiddelde aantal woningequivalenten per utiliteitsgebouw in Nederland bedraagt dus ongeveer 11,73 WEQ (2.399.372 / 934.527). De keuze om kosten te alloceren op basis van WEQ-eenheden heeft als gevolg dat het gebouwtype en/of bouwjaar voor woningen *geen* invloed heeft op de hoogte van de toegewezen infrastructuurkosten; immers, een woning krijg altijd één WEQ toegewezen. Daarentegen hebben gebouwtype en/of bouwjaar wél invloed op de toegewezen kosten in het geval van utiliteitsgebouwen omdat de WEQ-eenheden hier afhankelijk zijn van de bebouwingsoppervlakte; d.w.z. hoe groter het utiliteitsgebouw, hoe groter het aandeel van de toegewezen infrastructuurkosten.

'wonen' behoren (i.e. *GC,wonen*) geldt Vergelijking 3, voor gebouwen die tot een GC behoort met bestemming 'utiliteit' (i.e. *GC,utiliteit*) geldt Vergelijking 4.

$$Kosten_{GC,wonen} = \frac{Kosten_{wonen} * \left(\frac{WEQ_{GC,wonen}}{WEQ_{wonen}}\right)}{N_{GC,wonen}} \quad 3$$

$$Kosten_{GC,utiliteit} = \frac{Kosten_{utiliteit} * \left(\frac{WEQ_{GC,utiliteit}}{WEQ_{utiliteit}}\right)}{N_{GC,utiliteit}} \quad 4$$

Middels het toepassen van deze kostenallocatie wordt duidelijk welk deel van de totale infrastructuurkosten er toegeschreven kan worden aan een bepaalde gebouwcategorie.

Beschrijving Kostenallocatie: Energielasten

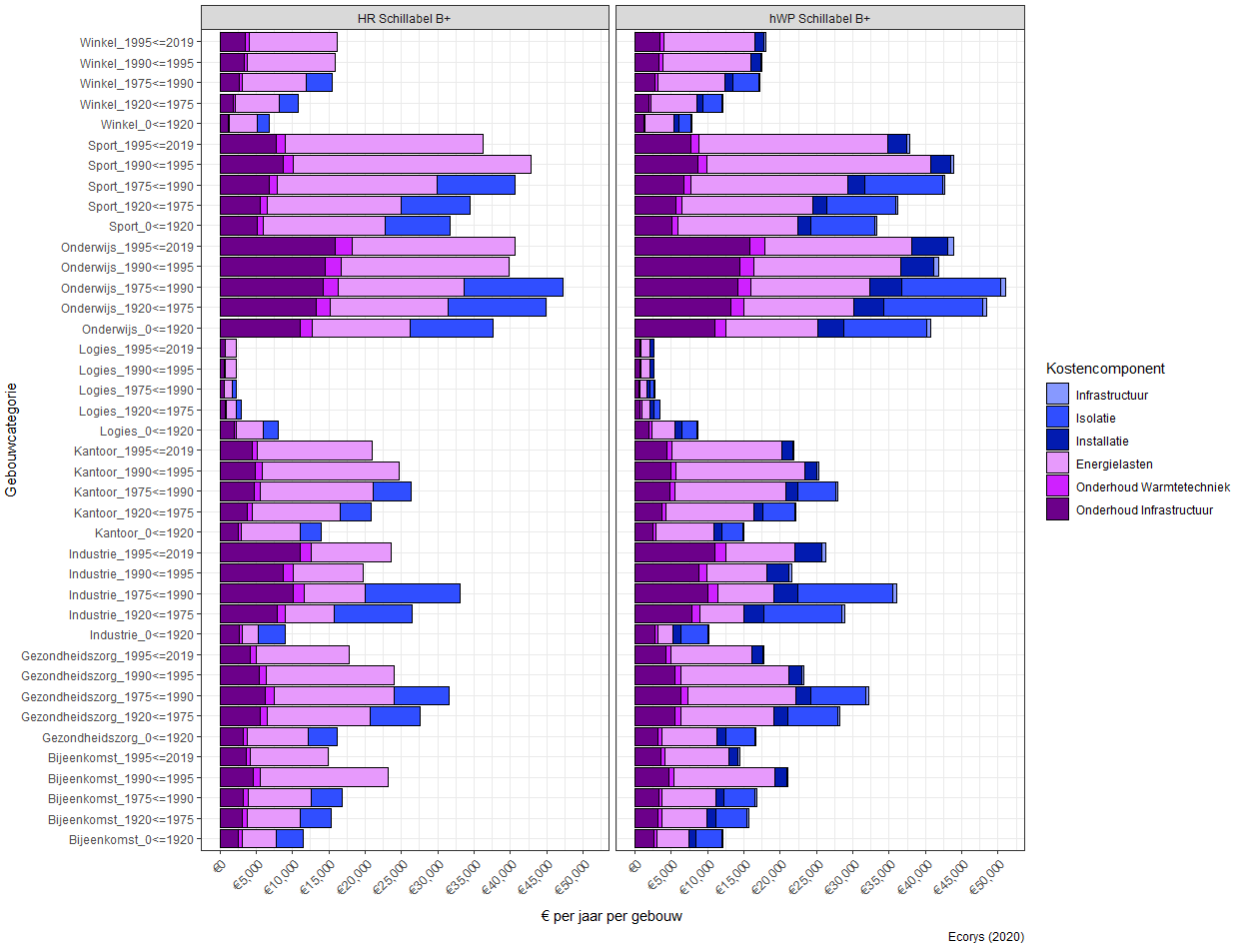
Het Vesta-MAIS model genereert voor iedere buurt in Nederland de totale jaarlijkse energielasten per warmteoplossing. Het analyseren van deze kosten op gebouwniveau vraagt om een kostenallocatie. Deze allocatie is uitgevoerd door eerst per gebouwcategorie (GC) te bepalen wat het totale jaarlijkse energieverbruik is van gebouwen die tot de desbetreffende GC behoren. Vervolgens wordt dit verbruik gedeeld door het totale energieverbruik in Nederland. Dit wordt voor iedere GC gedaan om zo een relatieve verdeling van het energieverbruik te krijgen. Deze verdeling wordt vervolgens gebruikt om het totale energieverbruik op te splitsen naar gebouwcategorie. De gemiddelde energielasten van een gebouw behorende tot een bepaalde GC (*Energielasten*$_{Gebouw}$) wordt bepaald door de energielasten die toebedeeld worden aan een bepaalde GC (de teller in Vergelijking 5) te delen door het aantal gebouwen dat tot die GC behoort (N_{GC}); zie Vergelijking 5.

$$Energielasten_{Gebouw} = \frac{Energielasten * \left(\frac{Energieverbruik_{GC}}{Totaal\ Energieverbruik}\right)}{N_{GC}} \quad 5$$

Bijlage C: CAPEX & OPEX (Utiliteitsgebouwen)

CAPEX worden aangegeven in tinten blauw, **OPEX** worden aangegeven in tinten paars.

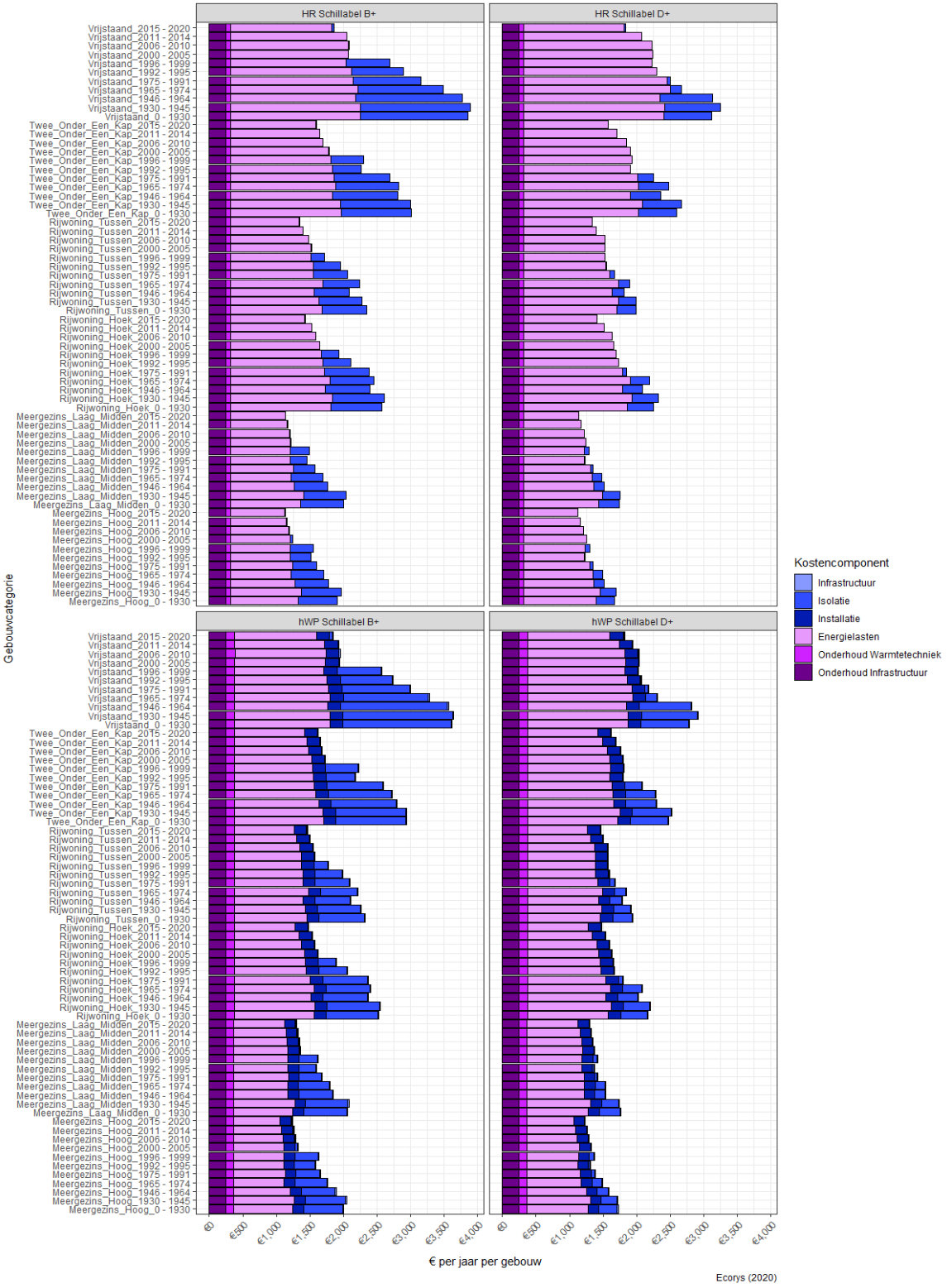
Figuur C-1: CAPEX en OPEX van hr-ketel (schillabel D+) en hybride warmtepomp (schillabel D+) voor utiliteitsgebouwen



Bijlage D: CAPEX & OPEX (Woningen)

CAPEX worden aangegeven in tinten blauw, **OPEX** worden aangegeven in tinten paars.

Figuur D-1: CAPEX en OPEX van hr-ketel (schillabel B+ en D+) en hybride warmtepomp (schillabel B+ en D+) voor woningen



Bijlage E: Overzicht gebouwcategorieën

Algemene statistieken:

- Totaal aantal woningen = 7.868.727
- Totaal aantal utiliteitsgebouwen = 934.527
- Totaal aantal WEQ voor utiliteit = 2.430.501
- Gemiddelde aantal WEQ per utiliteitsgebouw = 11,73

Tabel E.1: Beschrijvende statistieken voor gebouwtypen met verblijfsfunctie wonen

Gebouwtype	Bouwjaar	N (WEQ)	Aandeel
Meergezins (Hoog)	0 - 1930	182.447	2,32%
Meergezins (Hoog)	1930 - 1945	56.073	0,71%
Meergezins (Hoog)	1946 - 1964	188.838	2,40%
Meergezins (Hoog)	1965 - 1974	296.485	3,77%
Meergezins (Hoog)	1975 - 1991	209.807	2,67%
Meergezins (Hoog)	1992 - 1995	54.627	0,69%
Meergezins (Hoog)	1996 - 1999	62.984	0,80%
Meergezins (Hoog)	2000 - 2005	87.790	1,12%
Meergezins (Hoog)	2006 - 2010	110.160	1,40%
Meergezins (Hoog)	2011 - 2014	51.156	0,65%
Meergezins (Hoog)	2015 - 2020	23.626	0,30%
Meergezins (Laag & Midden)	0 - 1930	207.118	2,63%
Meergezins (Laag & Midden)	1930 - 1945	89.900	1,14%
Meergezins (Laag & Midden)	1946 - 1964	201.119	2,56%
Meergezins (Laag & Midden)	1965 - 1974	118.198	1,50%
Meergezins (Laag & Midden)	1975 - 1991	371.261	4,72%
Meergezins (Laag & Midden)	1992 - 1995	68.897	0,88%
Meergezins (Laag & Midden)	1996 - 1999	67.041	0,85%
Meergezins (Laag & Midden)	2000 - 2005	76.314	0,97%
Meergezins (Laag & Midden)	2006 - 2010	80.015	1,02%
Meergezins (Laag & Midden)	2011 - 2014	44.492	0,57%
Meergezins (Laag & Midden)	2015 - 2020	116.841	1,48%
Rijwoning (Hoek)	0 - 1930	75.809	0,96%
Rijwoning (Hoek)	1930 - 1945	52.300	0,66%
Rijwoning (Hoek)	1946 - 1964	159.385	2,03%
Rijwoning (Hoek)	1965 - 1974	208.826	2,65%
Rijwoning (Hoek)	1975 - 1991	307.986	3,91%
Rijwoning (Hoek)	1992 - 1995	43.452	0,55%
Rijwoning (Hoek)	1996 - 1999	38.632	0,49%
Rijwoning (Hoek)	2000 - 2005	42.559	0,54%
Rijwoning (Hoek)	2006 - 2010	32.996	0,42%
Rijwoning (Hoek)	2011 - 2014	15.152	0,19%
Rijwoning (Hoek)	2015 - 2020	41.024	0,52%
Rijwoning (Tussen)	0 - 1930	218.472	2,78%
Rijwoning (Tussen)	1930 - 1945	124.908	1,59%

Rijwoning (Tussen)	1946 - 1964	310.422	3,95%
Rijwoning (Tussen)	1965 - 1974	439.055	5,58%
Rijwoning (Tussen)	1975 - 1991	703.756	8,94%
Rijwoning (Tussen)	1992 - 1995	112.950	1,44%
Rijwoning (Tussen)	1996 - 1999	114.051	1,45%
Rijwoning (Tussen)	2000 - 2005	127.964	1,63%
Rijwoning (Tussen)	2006 - 2010	89.842	1,14%
Rijwoning (Tussen)	2011 - 2014	36.581	0,46%
Rijwoning (Tussen)	2015 - 2020	87.617	1,11%
2 onder 1 kap	0 - 1930	102.447	1,30%
2 onder 1 kap	1930 - 1945	73.996	0,94%
2 onder 1 kap	1946 - 1964	139.574	1,77%
2 onder 1 kap	1965 - 1974	98.528	1,25%
2 onder 1 kap	1975 - 1991	120.723	1,53%
2 onder 1 kap	1992 - 1995	35.273	0,45%
2 onder 1 kap	1996 - 1999	30.133	0,38%
2 onder 1 kap	2000 - 2005	33.716	0,43%
2 onder 1 kap	2006 - 2010	25.565	0,32%
2 onder 1 kap	2011 - 2014	8.586	0,11%
2 onder 1 kap	2015 - 2020	27.569	0,35%
Vrijstaand	0 - 1930	188.516	2,40%
Vrijstaand	1930 - 1945	98.704	1,25%
Vrijstaand	1946 - 1964	142.714	1,81%
Vrijstaand	1965 - 1974	126.384	1,61%
Vrijstaand	1975 - 1991	183.266	2,33%
Vrijstaand	1992 - 1995	59.461	0,76%
Vrijstaand	1996 - 1999	58.642	0,75%
Vrijstaand	2000 - 2005	67.346	0,86%
Vrijstaand	2006 - 2010	43.828	0,56%
Vrijstaand	2011 - 2014	15.256	0,19%
Vrijstaand	2015 - 2020	39.572	0,50%

Tabel E.2: Beschrijvende statistieken voor gebouwtypen met verblijfsfunctie utiliteit

Gebouwtype	Bouwjaar	N	WEQ	Gemiddeld aantal WEQ per gebouw	Aandeel WEQ
Bijeenkomst	0<=1920	16.333	52.950,40	3,24	2,21%
Bijeenkomst	1920<=1975	22.202	86.711,32	3,91	3,61%
Bijeenkomst	1975<=1990	9.311	37.641,72	4,04	1,57%
Bijeenkomst	1990<=1995	3.226	18.733,31	5,81	0,78%
Bijeenkomst	1995<=2019	13.555	60.408,64	4,46	2,52%
Bijeenkomst	onbekend	1	0,96	0,96	0,00%
Cel	0<=1920	13	1.275,00	98,08	0,05%
Cel	1920<=1975	21	1.353,38	64,45	0,06%
Cel	1975<=1990	21	1.306,62	62,22	0,05%
Cel	1990<=1995	17	1.102,55	64,86	0,05%
Cel	1995<=2019	68	3.889,46	57,20	0,16%

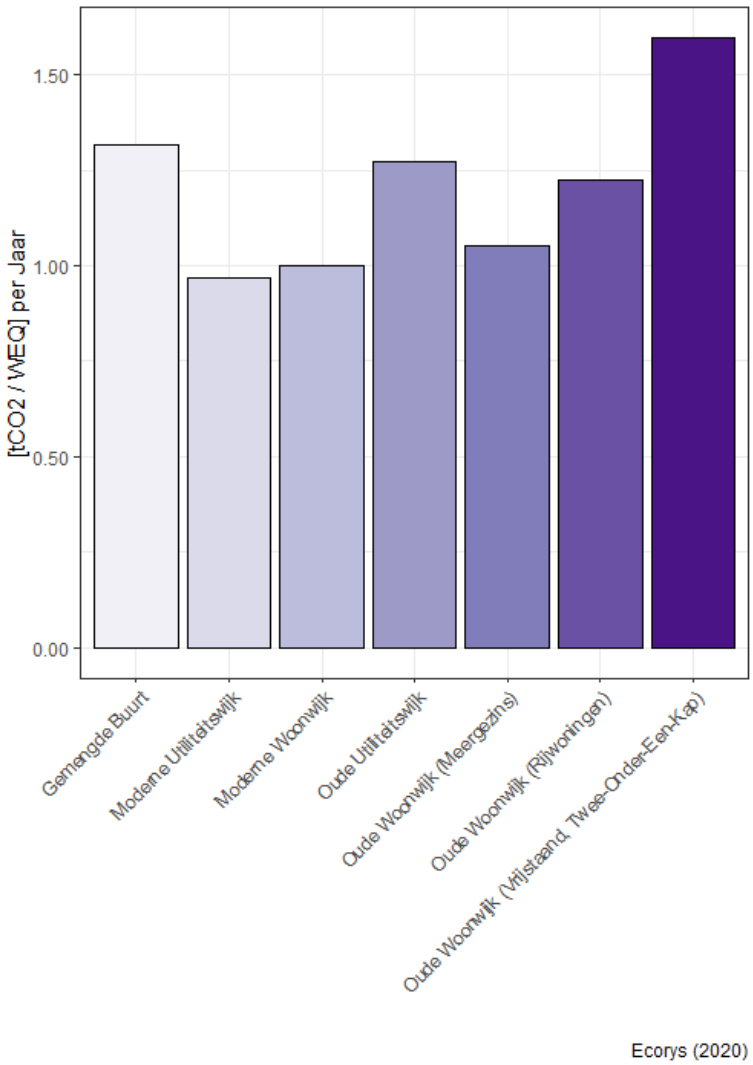
Gezondheidszorg	0<=1920	1.549	6.219,92	4,02	0,26%
Gezondheidszorg	1920<=1975	6.431	44.216,88	6,88	1,84%
Gezondheidszorg	1975<=1990	3.958	31.187,52	7,88	1,30%
Gezondheidszorg	1990<=1995	1.816	12.384,21	6,82	0,52%
Gezondheidszorg	1995<=2019	10.984	58.266,10	5,30	2,43%
Industrie	0<=1920	2.456	8.226,55	3,35	0,34%
Industrie	1920<=1975	7.482	73.748,18	9,86	3,07%
Industrie	1975<=1990	5.808	72.964,98	12,56	3,04%
Industrie	1990<=1995	2.597	28.361,48	10,92	1,18%
Industrie	1995<=2019	15.380	211.490,15	13,75	8,81%
Kantoor	0<=1920	13.128	41.380,04	3,15	1,72%
Kantoor	1920<=1975	22.893	106.960,55	4,67	4,46%
Kantoor	1975<=1990	15.509	92.363,22	5,96	3,85%
Kantoor	1990<=1995	8.777	53.703,15	6,12	2,24%
Kantoor	1995<=2019	38.933	213.971,05	5,50	8,92%
Kantoor	onbekend	6	15,60	2,60	0,00%
Logies	0<=1920	3.232	8.019,85	2,48	0,33%
Logies	1920<=1975	27.847	25.509,26	0,92	1,06%
Logies	1975<=1990	28.032	19.444,68	0,69	0,81%
Logies	1990<=1995	12.106	9.903,99	0,82	0,41%
Logies	1995<=2019	53.298	45.686,52	0,86	1,90%
Logies	onbekend	1	0,41	0,41	0,00%
Onderwijs	0<=1920	817	11.276,70	13,80	0,47%
Onderwijs	1920<=1975	5.704	94.280,62	16,53	3,93%
Onderwijs	1975<=1990	3.387	59.897,02	17,68	2,50%
Onderwijs	1990<=1995	826	14.918,99	18,06	0,62%
Onderwijs	1995<=2019	4.966	98.135,54	19,76	4,09%
Overig	0<=1920	8.382	8.917,03	1,06	0,37%
Overig	1920<=1975	276.285	75.437,96	0,27	3,14%
Overig	1975<=1990	74.435	34.241,32	0,46	1,43%
Overig	1990<=1995	14.117	15.611,63	1,11	0,65%
Overig	1995<=2019	57.856	118.463,45	2,05	4,94%
Overig	onbekend	5	1,07	0,21	0,00%
Sport	0<=1920	369	2.355,64	6,38	0,10%
Sport	1920<=1975	3.484	24.389,93	7,00	1,02%
Sport	1975<=1990	3.494	29.352,06	8,40	1,22%
Sport	1990<=1995	905	9.789,09	10,82	0,41%
Sport	1995<=2019	3.867	37.143,15	9,61	1,55%
Winkel	0<=1920	26.325	38.664,67	1,47	1,61%
Winkel	1920<=1975	48.056	111.926,58	2,33	4,66%
Winkel	1975<=1990	18.497	62.229,59	3,36	2,59%
Winkel	1990<=1995	7.115	29.284,04	4,12	1,22%
Winkel	1995<=2019	28.644	124.787,38	4,36	5,20%

Bijlage F: CO_2-uitstoot en reductiekosten per buurtcategorie

Tabel F.1: CO_2-reductiekostprijs voor buurtcategorieën

Buurtcategorie	CO_2-reductiekostprijs (mediaan)
Gemengde Buurt	€ 347,-
Moderne Utiliteitswijk	€ 349,-
Moderne Woonwijk	€ 272,-
Oude Utiliteitswijk	€ 457,-
Oude Woonwijk (Meergezins)	€ 335,-
Oude Woonwijk (Rijwoningen)	€ 304,-
Oude Woonwijk (Vrijstaand, Twee-Onder-Een-Kap)	€ 306,-

Figuur F-1: CO_2-uitstoot per buurtcategorie



Ecorys (2020)

Bijlage G: Eindgebruikerskosten

Tabel G.1: Overzicht eindgebruikerskosten voor hr-ketel en hybride warmtepomp

Verblijfsfunctie	Warmtetechniek	Kostencomponent	Kosten
utiliteit	hr-ketel schillabel D+	Isolatie	2.689,07
utiliteit	hWP schillabel D+	Isolatie	2.689,07
utiliteit	hr-ketel schillabel D+	Installatie	-
utiliteit	hWP schillabel D+	Installatie	1.115,53
utiliteit	hr-ketel schillabel D+	Energieverbruik	50,13
utiliteit	hWP schillabel D+	Energieverbruik	-852,88
utiliteit	hr-ketel schillabel D+	Onderhoud	-
utiliteit	hWP schillabel D+	Onderhoud	5,7
utiliteit	hr-ketel schillabel D+	Subsidie	-
utiliteit	hWP schillabel D+	Subsidie	-463,43
wonen	hr-ketel schillabel D+	Isolatie	265,45
wonen	hWP schillabel D+	Isolatie	265,45
wonen	hr-ketel schillabel D+	Installatie	-
wonen	hWP schillabel D+	Installatie	212,96
wonen	hr-ketel schillabel D+	Energieverbruik	514,78
wonen	hWP schillabel D+	Energieverbruik	160,77
wonen	hr-ketel schillabel D+	Onderhoud	-
wonen	hWP schillabel D+	Onderhoud	64,69
wonen	hr-ketel schillabel D+	Subsidie	-
wonen	hWP schillabel D+	Subsidie	-52,33

Tabel G.2: Overzicht eindgebruikerskosten voor hybride warmtepomp (schillabel D+) voor woningtypen

Gebouwtype	Kostencomponent	Kosten
2 Onder 1 Kap	Isolatie	529,61
Meergezins (Hoog)	Isolatie	176,22
Meergezins (Laag & Midden)	Isolatie	166,84
Rijwoning (Hoek)	Isolatie	266,32
Rijwoning (Tussen)	Isolatie	178,59
Vrijstaand	Isolatie	539,89
2 Onder 1 Kap	Installatie	225,91
Meergezins (Hoog)	Installatie	194,78
Meergezins (Laag & Midden)	Installatie	193,68
Rijwoning (Hoek)	Installatie	220,15
Rijwoning (Tussen)	Installatie	218,77
Vrijstaand	Installatie	234,22
2 Onder 1 Kap	Energieverbruik	163,88
Meergezins (Hoog)	Energieverbruik	127,15
Meergezins (Laag & Midden)	Energieverbruik	149,12
Rijwoning (Hoek)	Energieverbruik	167,67
Rijwoning (Tussen)	Energieverbruik	157,99

Vrijstaand	Energieverbruik	218,14
2 Onder 1 Kap	Onderhoud	69,87
Meergezins (Hoog)	Onderhoud	57,23
Meergezins (Laag & Midden)	Onderhoud	56,86
Rijwoning (Hoek)	Onderhoud	67,66
Rijwoning (Tussen)	Onderhoud	67,13
Vrijstaand	Onderhoud	73,24
2 Onder 1 Kap	Subsidie	-55,51
Meergezins (Hoog)	Subsidie	-47,86
Meergezins (Laag & Midden)	Subsidie	-47,59
Rijwoning (Hoek)	Subsidie	-54,1
Rijwoning (Tussen)	Subsidie	-53,76
Vrijstaand	Subsidie	-57,56

Tabel G.3: Overzicht eindgebruikerskosten voor hr-ketel (schillabel D+) voor woningtypen

Gebouwtype	Kostencomponent	Kosten
2 Onder 1 Kap	Isolatie	529,61
Meergezins (Hoog)	Isolatie	176,22
Meergezins (Laag & Midden)	Isolatie	166,84
Rijwoning (Hoek)	Isolatie	266,32
Rijwoning (Tussen)	Isolatie	178,59
Vrijstaand	Isolatie	539,89
2 Onder 1 Kap	Installatie	-
Meergezins (Hoog)	Installatie	-
Meergezins (Laag & Midden)	Installatie	-
Rijwoning (Hoek)	Installatie	-
Rijwoning (Tussen)	Installatie	-
Vrijstaand	Installatie	-
2 Onder 1 Kap	Energieverbruik	623,57
Meergezins (Hoog)	Energieverbruik	365,05
Meergezins (Laag & Midden)	Energieverbruik	364,93
Rijwoning (Hoek)	Energieverbruik	564,04
Rijwoning (Tussen)	Energieverbruik	489,44
Vrijstaand	Energieverbruik	854,98
2 Onder 1 Kap	Onderhoud	-
Meergezins (Hoog)	Onderhoud	-
Meergezins (Laag & Midden)	Onderhoud	-
Rijwoning (Hoek)	Onderhoud	-
Rijwoning (Tussen)	Onderhoud	-
Vrijstaand	Onderhoud	-
2 Onder 1 Kap	Subsidie	-
Meergezins (Hoog)	Subsidie	-
Meergezins (Laag & Midden)	Subsidie	-
Rijwoning (Hoek)	Subsidie	-
Rijwoning (Tussen)	Subsidie	-
Vrijstaand	Subsidie	-

Over Ecorys

Ecorys is een toonaangevend internationaal onderzoeks- en adviesbureau dat zich richt op de belangrijkste maatschappelijke uitdagingen. Door middel van uitmuntend, op onderzoek gebaseerd advies, helpen wij publieke en private klanten bij het maken en uitvoeren van gefundeerde beslissingen die leiden tot een betere samenleving. Wij helpen opdrachtgevers met grondige analyses, inspirerende ideeën en praktische oplossingen voor complexe markt-, beleids- en managementvraagstukken.

Onze bedrijfsgeschiedenis begon in 1929, toen een aantal Nederlandse zakenlieden van wat nu beter bekend is als de Erasmus Universiteit, het Nederlands Economisch Instituut (NEI) oprichtten. Het doel van dit gerenommeerde instituut was om een brug te slaan tussen het bedrijfsleven en de wereld van economisch onderzoek. Het NEI is in 2000 uitgegroeid tot Ecorys.

Door de jaren heen heeft Ecorys zich verspreid over de wereld met kantoren in Europa, Afrika, het Midden-Oosten en Azië. Wij werven personeel met verschillende culturele achtergronden en expertises, omdat wij ervan overtuigd zijn dat mensen met uiteenlopende eigenschappen een meerwaarde kunnen bieden voor ons bedrijf en onze klanten.

Ecorys excelleert in zeven werkgebieden:
- Economic growth;
- Social policy;
- Natural resources;
- Regions & Cities;
- Transport & Infrastructure;
- Public sector reform;
- Security & Justice.

Ecorys biedt een duidelijk aanbod aan producten en diensten:
- voorbereiding en formulering van beleid;
- programmamanagement;
- communicatie;
- capaciteitsopbouw (overheden);
- monitoring en evaluatie.

Wij hechten waarde aan onze onafhankelijkheid, onze integriteit en onze partners. Ecorys geeft om het milieu en heeft een actief maatschappelijk verantwoord ondernemingsbeleid, gericht op meerwaarde voor de samenleving en de markt. Ecorys is in het bezit van een ISO14001-certificaat dat wordt ondersteund door al onze medewerkers.

P.O. Box 4175
3006 AD Rotterdam
The Netherlands

Watermanweg 44
3067 GG Rotterdam
The Netherlands

T +31 (0)10 453 88 00
F +31 (0)10 453 07 68
E netherlands@ecorys.com
Registration no. 24316726

W www.ecorys.nl

Answering tomorrow's challenges today