



Een klimaatneutrale warmtevoorziening voor de gebouwde omgeving - update 2016

De route naar een klimaatneutraal
Nederland



CE Delft

Committed to the Environment

Een klimaatneutrale warmtevoorziening voor de gebouwde omgeving - update 2016

De route naar een klimaatneutraal Nederland

Dit rapport is geschreven door:

Nanda Naber

Benno Schepers

Marijke Schuurbijs

Frans Rooijers

Delft, CE Delft, september 2016

Publicatienummer: 16.3I28.68

Gebouwde omgeving / Klimaat / Maatregelen / Energiebedrijven / Aardgas

VT: CEGIOA-model

Opdrachtgever: GasTerra en Gasunie

Alle openbare CE-publicaties zijn verkrijgbaar via www.ce.nl

Meer informatie over de studie is te verkrijgen bij de projectleider Nanda Naber.

© copyright, CE Delft, Delft

CE Delft

Committed to the Environment

CE Delft draagt met onafhankelijk onderzoek en advies bij aan een duurzame samenleving. Wij zijn toonaangevend op het gebied van energie, transport en grondstoffen. Met onze kennis van techniek, beleid en economie helpen we overheden, NGO's en bedrijven structurele veranderingen te realiseren. Al 35 jaar werken betrokken en kundige medewerkers bij CE Delft om dit waar te maken.



Voorwoord

Geachte lezer,

Voor u ligt de eindrapportage van het onderzoek waarin een actualisering heeft plaatsgevonden van de eerdere studie 'Klimaatneutrale gebouwde omgeving 2050'. CE Delft heeft deze vervolgstudie uitgevoerd in opdracht van Gasunie en GasTerra.

Voor dit onderzoek heeft CE Delft gebruikgemaakt van een nieuwere versie van het CEGIOA-model, een model waarmee op buurtniveau kan worden berekend wat de goedkoopste klimaatneutrale warmtevoorziening is. Tevens zijn er binnen het onderzoek meerdere toevoegingen gedaan aan het model om de vragen van de opdrachtgevers te kunnen beantwoorden. Naast het in beeld brengen van de eindsituatie, een klimaatneutrale gebouwde omgeving, is binnen dit onderzoek gekeken naar de route naar dit eindbeeld toe.

Gasunie en GasTerra willen met deze opdracht inzicht krijgen in de rol die hernieuwbaar gas (waaronder groen gas) kan spelen in een klimaatneutrale gebouwde omgeving en de route naar dit eindbeeld toe. Hierbij is vooral gekeken naar de mogelijkheden en bijdrage van de hybride warmtepomp.

CE Delft wil graag de partijen bedanken die een bijdrage hebben geleverd aan dit onderzoek, te weten Stedin, Ecofys, Klimaatgarant, Berenschot, de Stroomversnelling, Techneco, Inventum en Itho Daalderop. Door hun bijdrage hebben wij de uitgangspunten en modelberekeningen kunnen baseren op praktijkgegevens, waardoor de uitkomsten beter onderbouwd zijn.

CE Delft kijkt zeer positief terug op de samenwerking met de opdrachtgevers, die een bijdrage hebben geleverd aan de benodigde kennis en tevens openstonden voor de input van andere partijen. De inhoud van de studie valt geheel onder verantwoordelijkheid van CE Delft.

Frans Rooijers (directeur)
Nanda Naber (projectleider)
CE Delft



Inhoud

	Samenvatting	5
1	Opzet analyse	7
1.1	Voorafgaand onderzoek	7
1.2	Doelstelling	7
1.3	Onderzoeksvragen	8
1.4	CEGOIA-model	8
1.5	Afbakening en randvoorwaarden	9
1.6	Leeswijzer	11
2	Update model	12
2.1	Hybride warmtepomp	12
2.2	Woningisolatie en Nul-op-de-Meter-woningen	14
2.3	Netverzwaring	17
3	Eindbeelden klimaatneutrale gebouwde omgeving	24
3.1	Algemeen	24
3.2	Resultaten	25
3.3	Toelichting resultaten	30
4	Routes naar eindbeeld	54
4.1	Methodiek	54
4.2	Resultaten	55
4.3	Toelichting resultaten	57
5	Bibliografie	61
Bijlage A	Resultaten utiliteit en woningbouw samen	62
Bijlage B	Verschil resultaten eerdere studie	66
B.1	Uitkomsten eerdere studie	66
B.2	Verschillen	67
Bijlage C	Berekeningen isolatie	70
C.1	Investerings- en besparingsisolatie	70
C.2	Add-ons per isolatieschil	71
Bijlage D	Parameters hybride warmtepomp	72
D.1	Ecolution - Inventum B.V.	72
D.2	HP-Cube - Itho-Daalderop	73
D.3	Elga - Techneco Energiesystemen B.V.	74



Bijlage E	Toelichting model	75
E.1	Modelbeschrijving	75
E.2	Berekeningen	75
 Bijlage F	 Belangrijke parameters	 80
F.1	Leercurves	81



Samenvatting

In een gebouwde omgeving met een klimaatneutrale warmtevoorziening worden diverse technieken gebruikt om woningen te verwarmen zonder CO₂-emissie. Welke techniek kostentechnisch het gunstigst is, hangt af van de locatie en de aard van de bebouwing. Isoleren van woningen kan prijstechnisch interessant zijn, maar in veel gevallen zijn de kosten hoger dan de baten, ook bij gebruik van duurder gas/elektriciteit. Daar waar restwarmte en geothermie beschikbaar zijn worden deze in de komende decennia toegepast. Uit deze studie blijkt dat gas, eerst aardgas en later hernieuwbaar gas¹ een belangrijke rol speelt en in veel woningen nog lang de goedkoopste manier zal zijn van verwarmen.

Achtergrond

In dit onderzoek is per buurt (circa 12.000 buurten in Nederland) berekend wat de klimaatneutrale warmtevoorziening met de laagste kosten is voor de woningbouw in 2050 en welke rol hernieuwbaar gas hierin kan spelen. Daarnaast is de route op weg naar dit eindbeeld in kaart gebracht.

Dit onderzoek is een vervolg op de studie 'Klimaatneutrale gebouwde omgeving 2050'. In deze studie uit 2015 is gebruikgemaakt van het CEGOIA-model dat door CE Delft is ontwikkeld. Dit model berekent de kosten van de gehele, klimaatneutrale warmtevoorziening op buurtniveau voor isolatie in combinatie met diverse collectieve en individuele warmteopties, en is de afgelopen jaren verder ontwikkeld. In de voorliggende studie is gebruikgemaakt van de nieuwste versie van CEGOIA. Waar in de vorige versie is gekeken naar vijftien typische buurten, berekent de nieuwe versie voor alle 12.000 buurten van Nederland de jaarlijkse kosten per warmtetechniek zowel in een klimaatneutraal eindbeeld als ook in de route op weg naar dit eindbeeld.

Aanpassingen aan het model

Voor de studie zijn enkele toevoegingen aan het CEGOIA-model gedaan. De belangrijkste toevoeging is de hybride warmtepomp, die zowel elektriciteit als gas gebruikt voor het verwarmen van een woning. Daarnaast zijn de effecten en kosten van het elektriciteitsnet voor all-electric-opties beter in kaart gebracht en zijn de kosten en besparing van isolatie, inclusief de Nul-op-de-Meter-woning, geactualiseerd. Voor het updaten van het model is gebruikgemaakt van de meest recente studies omtrent deze onderwerpen, aangevuld met informatie uit de markt. Om de invloed van diverse aannames te toetsen, zijn verschillende gevoeligheidsanalyses uitgevoerd.

Resultaten eindbeeld

De resultaten laten zien dat in een klimaatneutrale gebouwde omgeving al het beschikbare groen gas (aanne: 1,5 bcm) voor woningbouw in 2050 wordt gebruikt, deels door HR-ketels en deels door hybride opties. In totaal gaat het om ongeveer 1,2 miljoen van het totaal van 7,6 miljoen woningen. Daarnaast worden de collectieve warmteopties die gebruikmaken van restwarmte of geothermie toegepast waar dit mogelijk is. Dit betreft ruim 4,5 miljoen woningen. Om dit aantal woningen ook onder zeer koude weersituaties

¹ Onder hernieuwbaar gas wordt verstaan: alle gassen die worden geproduceerd door middel van overschotten van hernieuwbare elektriciteit en omgezette biomassa.



volledig klimaatneutraal van warmte te voorzien is er 1,2 BCM hernieuwbaar gas nodig in vorm van bijvoorbeeld waterstof en syngas. Individuele all-electric-opties en collectieve WKO-systemen worden ingezet wanneer al het beschikbare groen gas is uitgeput en er lokaal geen restwarmte of geothermie beschikbaar is. Met gas wordt in 2050 voor ruim 50% invulling gegeven aan de benodigde petajoules voor finale warmtevraag.

Besparingen op de warmtevraag door het toepassen van woningisolatie zijn zinvol, maar niet in extreme mate, omdat de financiële besparingen die hiermee bereikt worden vaak niet opwegen tegen de kosten van de isolatie.

Uit de gevoeligheidsanalyses die zijn uitgevoerd voor het onderzoek blijkt dat de beschikbare hoeveelheid groen gas in 2050 bepalend is voor het gebruik ervan; in alle analyses wordt al het beschikbare groen gas opgebruikt. Zelfs als de prijs van groen gas in het model verdubbelt van € 0,75/m³ naar € 1,50/m³ wordt de totale beschikbaarheid van 1,5 bcm gebruikt in 2050. Vergaande isolerende maatregelen blijken in de gevoeligheidsanalyses kostentechnisch niet voordelig te zijn, behalve in de analyse waar met een hogere elektriciteitsprijs is gerekend (70 euro/MWh naar 120 euro/MWh).

Resultaten route naar eindbeeld

Voor de route naar klimaatneutraal is als uitgangspunt genomen dat de CO₂-uitstoot lineair afloopt van momenteel 15 Mton CO₂/jaar naar 0 in 2050. Dit houdt voor de gasopties in dat het aandeel groen gas toeneemt tot 100% in 2050, terwijl de te besteden hoeveelheid aardgas voor de woningbouw juist afneemt naar 2050 als gevolg van de klimaatdoelstellingen. Deze verschuiving van aardgas naar groen gas heeft een geleidelijke kostenstijging tot gevolg tot aan 2050, er komt circa 40 €ct per m³ gas bij. Deze prijs is tevens gehanteerd voor hernieuwbaar gas.

De resultaten laten zien dat vooral de beschikbaarheid van groen gas, en niet de prijs, grote invloed heeft op het toepassen ervan in de route op weg naar 2050. Op dit moment is voor ongeveer 80% van de woningbouw aardgas de voordeligste optie en dit neemt af tot ongeveer 20% groen gas in 2050 (inclusief hybride opties). De all-electric-opties worden rond 2030 aantrekkelijk, wanneer de toegestane inzet van aardgas afneemt (i.v.m. de gestelde maximale CO₂-uitstoot) en ook de kosten van de technieken lager zijn geworden. Geothermie en restwarmte worden al eerder financieel aantrekkelijk, voor die gebieden waar er beschikbaarheid is, en blijven dit tot 2050. Het voldoende beschikbaar komen van hernieuwbaar gas speelt ook bij deze vorm van warmtevoorziening een cruciale rol om deze volledig klimaatneutraal te maken.



1 Opzet analyse

1.1 Voorafgaand onderzoek

In 2014 heeft CE Delft een onderzoek uitgevoerd voor GasTerra waarin is gekeken naar de mogelijkheden van een klimaatneutrale gebouwde omgeving in 2050 (CE Delft, 2015). Op dit moment wordt in Nederland 95% van de gebouwen verwarmd met aardgas. Indien de gebouwde omgeving in 2050 klimaatneutraal is, zal dit aardgas zijn vervangen door groen gas of door een andere CO₂-vrij warmtedrager, zoals duurzame elektriciteit, (rest)warmte of biomassa.

Voor het onderzoek in 2014 was Nederland ingedeeld in vijftien herkenbare buurttypen, zoals historische binnensteden, wederopbouwbuurten en dorpskernen. De indeling was gemaakt op basis van verschillende fysieke parameters die allen invloed hebben op de kosten van de warmtevoorziening, zoals bouwjaar, bebouwingsdichtheid en lokale (on)mogelijkheden. CE Delft heeft per buurttype een berekening gemaakt van de integrale, jaarlijkse kosten voor distributie, energieverbruik, installaties en isolatie van verschillende duurzame warmteopties. Hierbij zijn per buurttype de kosten van tien verschillende warmtetechnieken en drie verschillende isolatieniveaus met elkaar vergeleken.

Uit de berekening blijkt dat de goedkoopste optie om gebouwen te verwarmen verschilt per type buurt. Zo zijn er buurten waar het aardgas geleidelijk wordt vervangen door groen gas in combinatie met energiebesparing en hoog rendement gastoeepassingen, buurten waarbij op termijn de warmtelevering uit verschillende bronnen lagere kosten hebben dan de huidige voorziening en aardgas vervangen wordt en buurten waarbij all-electric-warmtepompen een logische opvolger worden van de aardgasverwarming.

De resultaten uit het onderzoek laten zien dat buurtspecifieke kenmerken invloed hebben op de financieel meest voordelige keuze van de toekomstige warmtevoorziening.

1.2 Doelstelling

GasTerra en Gasunie hebben CE Delft gevraagd de studie uit 2014 te updaten met een aantal extra analyses en functionaliteiten. Hiervoor wordt het CEGOIA-model aangepast en worden de huidige parameters gevalideerd met de meest recente onderzoeken. Eén van deze onderzoeken is 'Systeemkosten van warmte voor woningen', een onderzoek van Ecofys uit 2015 over hoe technologiekeuzes in woningen de toekomstige kosten van het energiesysteem beïnvloeden (Ecofys, 2015). De resultaten uit het Ecofys-onderzoek worden beschouwd als leidend voor het eindbeeld naar een klimaatneutrale warmtevoorziening in 2050.

Het doel van het onderzoek is door middel van de update van het CEGOIA-model een nog duidelijker beeld te krijgen van de verdeling van warmteopties over de buurten in Nederland in 2050 op basis van de kosten van de warmtevoorziening. Hierbij worden enkele scenario's doorgerekend met betrekking tot prijsontwikkeling van verschillende energiedragers en technieken.



Een tweede doel is om inzicht te krijgen in de route naar een klimaatneutrale warmtevoorziening. Hierbij moet, voor zover mogelijk, rekening worden gehouden met:

- natuurlijke vervangingsmomenten² van de infrastructuur;
- de prijsstijging van gas, omdat deze van 100% aardgas in 2016 wordt vervangen door 100% groen gas in 2050;
- de prijsontwikkeling van verschillende warmtetechnieken in de tijd; in 2016 is de techniek nog relatief nieuw en daardoor duur, maar in 2050 is de techniek doorontwikkeld waardoor de prijs fors is gedaald.

Daarnaast wordt de route bepaald op basis van robuustheid van de uitkomsten; hoe groter de businesscase voor overschakeling op een duurzame warmtevoorziening, hoe sneller een buurt zal overschakelen op die duurzame warmtevoorziening. Tevens is inzicht in de afname van CO₂-uitstoot bij het volgen van de route naar klimaatneutraal wenselijk.

1.3 Onderzoeksvragen

In dit onderzoek beantwoorden we de volgende vragen:

1. Hoe ziet de klimaatneutrale gebouwde omgeving er uit met de uitgevoerde updates?

De volgende updates worden doorgevoerd:

- toevoegen hybride warmtepomp (in combinatie met groen gas);
- update woningisolatie en toevoegen Nul-op-de-Meter-woningen;
- differentiëren kosten elektriciteitsnet per buurttype en isolatieschil bij gebruik elektrische warmtepomp.

2. Hoe zien de routes naar klimaatneutraal er uit?

Hierbij wordt gekeken naar:

- substitutie van aardgas naar groen gas;
- rol van de hybride warmtepomp;
- overschakelen buurten op natuurlijk moment;
- afname CO₂ in de tijd.

1.4 CEGOIA-model

De berekeningen in eerdere studie 'Op weg naar een klimaatneutrale gebouwde omgeving 2050' zijn uitgevoerd met het CEGOIA-model. Dit model is door CE Delft ontwikkeld om te berekenen wat de kosten voor verschillende invullingen van de warmtevoorziening zijn voor de verschillende buurttypen in Nederland. In 2015 heeft CE Delft dit model verder ontwikkeld tot het huidige CEGOIA-model. Het nieuwe model is op een aantal essentiële punten gewijzigd en uitgebreid, waardoor de resultaten nu dichter bij de werkelijkheid liggen, maar ook op veel punten verschillen met de eerdere resultaten.

In Bijlage E van dit rapport is een beschrijving gegeven van de uitgangspunten van het model en de berekeningen die ermee worden gemaakt. In Tabel 1 is een overzicht gegeven van de belangrijkste wijzigingen in de twee versies van het model.

² Met het natuurlijk vervangingsmoment van gasinfrastructuur wordt bedoeld de technische levensduur, niet de economische levensduur. De technische levensduur is normaliter veel langer dan de economische levensduur.



Tabel 1 Verschil huidige CEGOIA-model en model gebruikt voor studie 2014

Huidige CEGOIA-model	2014-versie CEGOIA-model
Berekening voor 12.000 specifieke buurten	Berekening voor 15 buurttypen
Alle labelstappen voor schil woningbouw	Drie isolatieniveaus woningbouw/utiliteit
Lokale bodemgeschiktheid (geothermie/WKO)	Gelijke bodemgeschiktheid Nederland
Lokale restwarmtebronnen	Geen restwarmtebronnen
Kostendalingen in de tijd	Gelijke kosten nu en in 2050

Het belangrijkste verschil tussen de twee versies van het model is dat in de huidige versie lokale omstandigheden per buurt worden meegenomen. Er worden losse berekeningen gemaakt van alle 12.000 buurten van Nederland, terwijl dit eerder was gedifferentieerd naar de door CE Delft gedefinieerde 15 buurttypen (die representatief zijn voor 95% van alle buurten in Nederland).

1.5 Afbakening en randvoorwaarden

In deze studie worden berekeningen gemaakt op buurtniveau. De gemiddelde energievraag en het gemiddelde energielabel per buurt zijn uitgangspunten voor de berekeningen.

Daarnaast zijn de volgende afbakeningen gemaakt:

- De berekeningen hebben enkel betrekking op de woningbouw (hoofd-rapport) en woningbouw en utiliteit samen (bijlage).
- De berekening worden uitgevoerd exclusief belastingen.
- De berekeningen worden uitgevoerd voor de 12.000 bestaande buurten. Voor de resultaten gaan we ervan uit dat de woningvoorraad in 2050 gelijk is aan die van 2015. In werkelijkheid zullen er mutaties in de woningvoorraad zijn, hierop wordt bij deze analyse echter niet geanticipeerd. In zijn totaliteit zullen de resultaten hierdoor niet wezenlijk anders zijn. Er zullen in werkelijkheid wel wat slecht geïsoleerde woningen zijn afgebroken in 2050 en wat meer woningen met een goed energielabel bij zijn gekomen. De verwachting is dat deze nieuwe woningen vooral gebruik zullen maken van all-electric-opties.
- Uit financieel en maatschappelijk oogpunt zal het niet mogelijk zijn dat alle woningen in 2050 energieneutraal zijn. Hierdoor zal er behoefte blijven aan energiedragers die uiteindelijk (zichtjaar 2050) CO₂-neutraal zijn. Dit kan warmte, elektriciteit of groen gas zijn.
- De primaire focus van het onderzoek is de energievraag voor warmte. Echter, omdat warmte en elektriciteit steeds verder in elkaar verweven raken, wordt ook gekeken naar de elektrische aspecten van het binnen-klimaat en zon-PV.
- Er wordt aangenomen dat zodra een buurt, ergens op de route naar 2050, is overgeschakeld naar een andere energiedrager voor de warmtevoorziening, in 2050 nog steeds deze energiedrager hiervoor wordt gebruikt.
- Buurten kunnen in de route naar het eindbeeld overschakelen op een restwarmtebron (zie Bijlage E). Dit kan echter alleen als de verwachting is dat de betreffende industrie waarvan de restwarmte komt, in 2050 nog steeds aanwezig is in Nederland, of dat de ondergrond zich leent voor geothermie. Er wordt van uit gegaan dat in 2050 met name de fossiele restwarmtebronnen niet meer gebruikt kunnen worden voor de warmtevoorziening, wat betekent dat het warmtenet vanaf het moment dat de restwarmtebron niet meer bestaat of niet meer genoeg warmte levert, moet worden gevoed door geothermie.



- Om de ontwikkelingen in de tijd te plaatsen, is gebruikgemaakt van leercurves op de ontwikkeling van de kosten van technieken en maatregelen. Deze leercurves geven voor de toekomst het verloop van de (dalende) kosten en zijn afgeleid uit onderzoeken naar techniek-ontwikkeling. In CEGOIA worden meerdere leercurves gehanteerd voor verschillende technieken en maatregelen. In Bijlage F is hiervan een overzicht te vinden.
- De energievraag van de industrie en landbouw valt buiten de scope van deze studie.
- Als uitgangspunt wordt aangehouden dat de elektriciteitsmix in 2050 compleet klimaatneutraal is. Er wordt binnen dit onderzoek niet gekeken naar hoe dit moet worden bereikt.
- Binnen het onderzoek wordt ervan uitgegaan dat het comfortniveau bij het overschakelen naar een andere techniek gelijk blijft. Wanneer er wordt geïsoleerd naar Schillabel A+, A of B zal er hierdoor ook een koeltevraag ontstaan die wordt meegenomen in de berekeningen. Daarnaast is er in werkelijkheid bij een aantal technieken wat aanpassing van bewoners nodig. Zo is bij de elektrische warmtepomp de nachttemperatuur hoger dan men gewend is bij een HR-ketel. Ook kan de temperatuur binnen de woning bij all-electric-systemen niet snel worden aangepast, zoals dat wel kan bij een HR-ketel. In het onderzoek nemen we dit comfortverschil niet mee.
- In 2050 zijn de individuele warmteopties die gebruikmaken van gas allemaal overgeschakeld van aardgas naar groen gas. Dit geldt voor de woningen die dan nog zijn aangesloten op het gasnet en gebruikmaken van een HR-ketel of hybride warmtepomp. Als aanname wordt een beschikbare hoeveelheid groen gas van 1,5 bcm gebruikt voor de woningbouw. Deze 1,5 bcm wordt enkel door deze opties gebruikt.
- Omdat het groen gas niet per definitie fysiek bij de eindgebruiker wordt gebruikt, zijn er voor groen gas, net als bij elektriciteit, groencertificaten die aantonen dat het gebruikte gas ergens uit een hernieuwbare bron is geproduceerd en ingevoerd is op het net. Door middel van deze certificaten kan een eindgebruiker dus toch groen gas ‘gebruiken’, zonder dat deze het groen gas werkelijk inzet in de installatie.
- Voor bijstook voor geothermie en warmtenetten wordt gebruikgemaakt van hernieuwbaar gas. De beschikbare hoeveelheid hiervan is in het model gelimiteerd op 5 bcm (zie Paragraaf 3.1 voor onderbouwing beschikbare hoeveelheid groen gas/hernieuwbaar gas).
- De prijs van alle vormen van hernieuwbaar gas is in deze studie gelijk. In de defaultberekeningen is de prijs van gas verhoogd van € 0,32/m³ naar € 0,75/m³. Bij de prijsbepaling van hernieuwbaar gas (niet zijnde groen gas) zijn de kosten van productie en transport maar beperkt meegenomen, omdat er hierover onvoldoende informatie beschikbaar is. Deze kosten zijn naar verwachting wel significant.

Box 1 Inzet groen gas en hernieuwbaar gas

In deze studie wordt een onderscheid gemaakt tussen de opties waarbij groen gas wordt ingezet en de opties waarbij hernieuwbaar gas wordt gebruikt. Groen gas kan zonder aanpassingen aan infrastructuur worden ingevoerd in het huidige aardgasnetwerk en is daarom geschikt voor de individuele gasopties HR-ketel en hybride warmtepomp. Voor hernieuwbaar gas nemen we aan dat het de power-to-gas-opties zijn, waarbij bijvoorbeeld waterstof wordt gemaakt. Dit hernieuwbare gas kan maar beperkt in de huidige infrastructuur worden toegepast, zonder dat aanpassingen aan leidingen en apparatuur bij de (eind)gebruikers nodig zijn. Aanpassingen aan het hoge- en middendruknet zijn eenvoudiger/goedkoper door te voeren dan het uitgebreide, fijnmazige lagedruknet en we nemen dan dus aan dat dit



hernieuwbare gas niet geleverd gaat worden aan de eindgebruikers, maar alleen aan gebruikers op het hoge- en middendruknet. Het aantal meters leiding en het aantal installaties dat aangepast moet worden is daardoor vele malen kleiner en minder complex. Het methaniseren van het hernieuwbaar gas is ook mogelijk, maar daar is wel een koolstofbron voor nodig (vaak CO₂). Om geen extra CO₂ in de atmosfeer te laten komen, moet deze CO₂ uit biomassa komen (bij CCS met kolen komt bij verbranding van het gemethaniseerde hernieuwbare gas alsnog fossiele CO₂ in de atmosfeer). Wij verwachten niet dat de hoeveelheid CO₂ die afgevangen kan worden bij biomasaverbranding dermate significant is, dat dit een grote bijdrage kan leveren aan het maken van 'biomethaan' uit waterstof. Dit komt doordat de hoeveelheid beschikbare biomassa heel beperkt is (het leeuwendeel wordt namelijk al gebruikt voor de productie van groen gas), veel biomasaverbranding lokaal plaats gaat vinden en veel biomassastromen niet voor stationaire verbranding ingezet gaan worden (maar als grondstof of motorbrandstof).

1.6 Leeswijzer

In Hoofdstuk 2 van dit rapport wordt de update die is gedaan voor deze studie toegelicht. Het gaat hierbij om de onderdelen hybride warmtepomp, de woningisolatie inclusief Nul-op-de-Meter-woningen en de netverzwaring. In Hoofdstuk 3 worden de resultaten van het eindbeeld voor de woningbouw getoond en worden vervolgens deze resultaten toegelicht. Ook wordt met gevoeligheidsanalyses gekeken naar de invloed van enkele parameters op de resultaten. Hoofdstuk 4 laat ten slotte de route naar het eindbeeld zien. Hierbij wordt de route met grafieken in kaart gebracht. In de bijlagen staat extra informatie over het gebruikte CEGOIA-model en de voor deze studie belangrijkste parameters.



2 Update model

Voor de analyses in deze studie wordt het CEGOIA-model op verschillende punten aangepast en uitgebreid. In dit hoofdstuk wordt uitgewerkt welke wijzigingen uitgevoerd worden. Het gaat hierbij om het toevoegen van de hybride warmtepomp als één van de warmtetechnieken, het modelleren van de Nul-op-de-Meter-woning (NoM) en de effecten op het elektriciteitsnet van grootschalig toepassen van elektrische warmtepompen.

2.1 Hybride warmtepomp

Het eerste onderdeel van de analyse is het toevoegen van de hybride warmtepomp als technische optie aan het CEGOIA-model.

Flexibiliteit wordt belangrijk als er steeds meer duurzame bronnen komen, met wisselende opbrengst door de variaties in zon en wind. Om dat op te vangen moet ook het verbruik straks meevariëren. De hybride warmtepomp is één van de technieken die daartoe in staat is, als een nieuw, serieus alternatief voor de HR-ketel.

De hybride warmtepomp combineert een elektrische warmtepomp met de HR-ketel op gas. De combinatie levert warmte voor ruimteverwarming en eventueel warm tapwater, ook voor bestaande woningen. Dit gebeurt op basis van elektriciteit of gas, waartussen wordt geswitcht al naar gelang de warmtebehoefte en de temperatuur, waarbij het gasgedeelte de pieken levert. Daarnaast kan een hybride warmtepomp, in combinatie met een buffer, inspelen op de duurzaam opgewekte energie; bij veel zon en wind wordt duurzaam opgewekte stroom gebruikt, anders (groen) gas. Dat kan ook voordelig zijn voor de eindgebruiker. De hybride warmtepomp kan dus flexibel zijn voor zowel de huishoudens als het hele elektriciteitsnet.

2.1.1 Verschillende types hybride warmtepompen

In het CEGOIA-model worden twee type hybride warmtepompen opgenomen:

- buitenlucht als warmtebron;
- ventilatielucht als warmtebron.

Er wordt bij hybride warmtepompen ook onderscheid gemaakt in hybride warmtepompen waarbij met elektriciteit zowel ruimteverwarming als warmtapwater wordt bereid en hybride warmtepompen waarbij het elektrische deel alleen (deels) zorgt voor ruimteverwarming.

Bij een aantal fabrikanten van de hybride warmtepompen zijn de technische gegevens van de verschillende opties opgevraagd en ontvangen. In Tabel 2 zijn de eigenschappen van de warmtepompen gegeven die nodig zijn voor de berekeningen. De fabrikanten van de hybride warmtepomp op buitenlucht gaven aan dat hun systemen niet gecombineerd zijn met een buffervat en het elektrisch deel van het systeem niet zorgt voor warmtapwater. Voor de hybride warmtepomp op ventilatielucht is wél en geen buffervat beide mogelijk, maar geeft het systeem met buffervat overall een wat hogere efficiëntie. De hybride warmtepompen worden in het model gecombineerd met hoge temperatuurverwarming. In Tabel 2 zijn de eigenschappen van de hybride warmtepompen gegeven waarmee is gerekend in het model.



Er is gekozen voor de volgende hybride warmtepompen:

- HP Cube incl. Base Cube (Itho Daalderop);
- Elga (Techneco);
- Ecolution Combi (Inventum).

Tabel 2 Eigenschappen hybride warmtepompen

Eigenschappen	HP Cube incl. Base Cube	Elga	Ecolution Combi
Fabrikant	Itho Daalderop	Techneco	Inventum
Type	Buitenlucht-warmtepomp	Buitenlucht-warmtepomp	Ventilatie-warmtepomp
Buffervat	0 liter	0 liter	50 liter
Warmtapwater m.b.v. warmtepomp	Nee	Nee	Ja
Thermische output warmtepomp	2,5 kW _{th}	4,9 kW _{th}	1,3-1,6 kW _{th}
Elektrische input warmtepomp	0,6 kW _e	1,1 kW _e	0,6 kW _e
Prijs (excl. BTW incl. plaatsing)	€ 5.000 incl. HR-ketel	€ 3.700 excl. HR-ketel	€ 3.000 excl. HR-ketel

De SPF (seasonal performance factor) van de warmtepomp is afhankelijk van het woningoppervlak, de buitentemperatuur en de schilisolatie (energievraag voor warmte). De fabrikanten hebben tabellen toegestuurd met de SPF van een gemiddeld klimaatjaar. De waarden zijn gegeven voor goed geïsoleerde woningen en slecht geïsoleerde woningen, voor hoge temperatuur- en lage temperatuurafgifte en daarnaast per woninggrootte en jaarlijks verbruik. Ook is gegeven welk deel van de energievraag voor warmte wordt ingevuld met elektriciteit en met gas. In Bijlage D zijn de tabellen met technische gegevens opgenomen.

2.1.2 Type woningen geschikt voor hybride warmtepomp

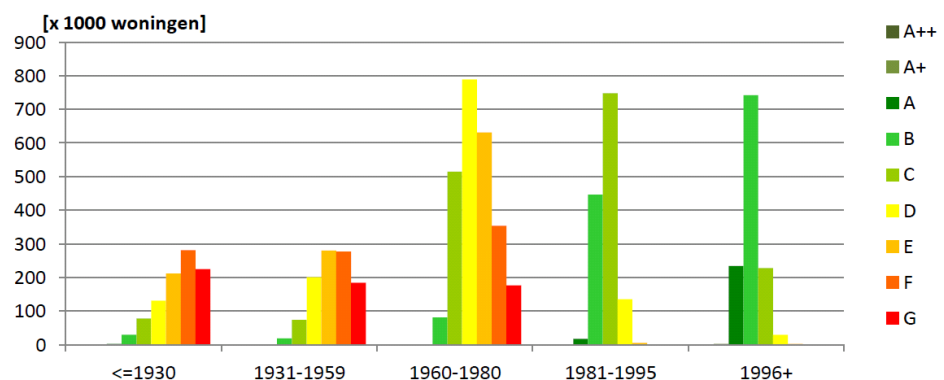
Het rendement van een hybride warmtepomp is het hoogst bij goed geïsoleerde woningen met een lagetemperatuurafgiftesysteem. Bij een hoger isolatieniveau draait de warmtepomp vaker op koude dagen dan bij slechter geïsoleerde woningen, waarbij de HR-ketel het vaker moet overnemen en daardoor het algehele rendement omlaag gaat. In dit onderzoek kijken we naar de bestaande woningvoorraad, waarbij de uitgangssituatie verwarming met hoge temperatuur is. Het is mogelijk om het verwarmingssysteem van een woning om te bouwen, maar hier zijn kosten aan verbonden. Daarnaast zijn hybride warmtepompen ook toepasbaar bij hoge temperatuurverwarming. We gaan er in de berekeningen van uit dat er een hoge temperatuurverwarming aanwezig is in de woning. Bij een hogere isolatiegraad heeft de hybride warmtepomp ook een hoger rendement, omdat verhoudingsgewijs meer warmte uit de warmtepomp komt. Dit kan ervoor zorgen dat het voor een bestaande woning efficiënter is om naast het plaatsen van een hybride warmtepomp de woning te isoleren. Bij de berekeningen met het CEGOIA-model wordt dit meegenomen.

Voor het gebruik van een ventilatiewarmtepomp is de aanwezigheid van een mechanisch ventilatiesysteem, of in ieder geval de mogelijkheid hiervoor, in een woning noodzakelijk. Vanaf 1975 werd een mechanisch ventilatiesysteem verplicht gesteld volgens het Bouwbesluit en vanaf dat jaar moesten de kanalen in woningen geschikt zijn voor mechanische ventilatie.



Er wordt aangenomen dat er een paar jaar vertraging zit tussen de verplichting in het Bouwbesluit en toepassing in de praktijk. Hierdoor wordt ervan uit gegaan dat de woningen die vanaf 1980 werden gebouwd in ieder geval een mechanisch ventilatiesysteem hebben. In Figuur 1 is te zien dat veruit de meeste woningen die gebouwd zijn ná 1980 minimaal Energielabel C hebben. Voor de berekeningen met CEGOIA gaan we er daarom van uit dat in buurten met een gemiddeld Energielabel C een hybride ventilatiewarmtepomp kan worden geïnstalleerd zonder extra aanpassingen aan de woning. Voor buurten met slechtere energielabels zullen in veel gevallen de woningen eerst geschikt moeten worden gemaakt voor de installatie van de ventilatiewarmtepomp door middel van de aanleg van ventilatiekanalen. Dit is vrij kostbaar en niet erg voor de hand liggend. We gaan er in de berekeningen daarom vanuit dat voor buurten met gemiddelde Energielabels D t/m G de ventilatiewarmtepomp geen optie is.

Figuur 1 Relatie energielabel en bouwjaarklasse



Bron: WoOn Energie, 2012.

Voor de hybride warmtepomp die werkt op buitenlucht, hoeft er geen mechanisch ventilatiesysteem aanwezig te zijn in de woning. Voor dit type geldt wel dat bij een hoger isolatieniveau het totale rendement hoger is, omdat in dat geval een groter deel van de tijd met elektriciteit kan worden verwarmd. Voor de berekeningen gaan we ervan uit dat de hybride warmtepomp op buitenlucht voor woningen met alle isolatieniveaus kan worden toegepast. Bij het toepassen in een woning met een slecht energielabel, betekent dit dat een groter aandeel van de energievraag voor warmte wordt voorzien door aardgas dan in een beter geïsoleerde woning.

2.2 Woningisolatie en Nul-op-de-Meter-woningen

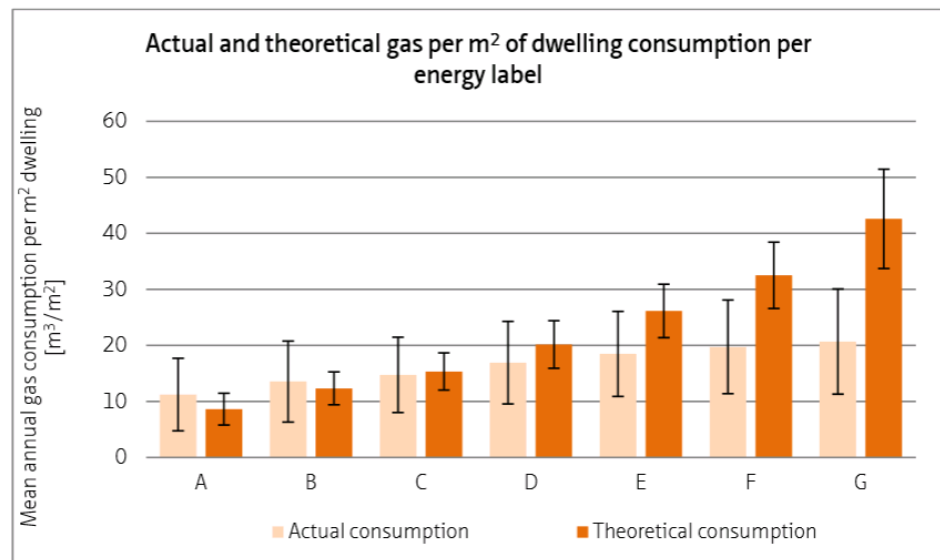
2.2.1 Woningisolatie per labelstap

Op dit moment berekent CEGOIA voor elke buurt de kosten die gemaakt moeten worden voor schilisolatie om van het huidige energielabel (gemiddeld per buurt) naar alle overige (betere) labels te komen. De kosten zijn gebaseerd op de Voorbeeldwoningen 2011 van RVO. De besparingspercentages zijn op dit moment gebaseerd op de theoretische besparingen per labelstap (zie Figuur 2).

Daša Majcen heeft een promotieonderzoek gedaan naar het werkelijk energieverbruik per energielabel door het verbruik te analyseren van 200.000 woningen (Majcen, 2016). Uit het onderzoek komt naar voren dat bij de meest energie-efficiënte labelcategorieën (B, A, A+ en A++) het theoretische gas-

verbruik wordt onderschat, terwijl dit sterk wordt overschat bij slechte label (D t/m G). Hoe slechter het label, hoe groter de theoretische overschatting. Een verklaring voor de afwijkingen kan zijn dat er bij woningen met een slecht energielabel lokale gasverwarming wordt gebruikt, waarbij slechts één of twee kamers worden verwarmd. Bewoners zijn zich bewust van de kosten van ruimteverwarming, dus zullen alleen waar nodig verwarmen. Bij betere labels lijkt een omgekeerde situatie het geval. Dit is vaak het gevolg van bouwfouten waardoor het beoogde isolatieniveau niet wordt behaald. Installaties geven niet hetzelfde rendement als de beoogde luchtdichtheid niet wordt gehaald (Stroomversnelling, 2016). In Figuur 2 is weergegeven hoe het werkelijk gasverbruik van het theoretisch gasverbruik verschilt.

Figuur 2 Werkelijk en theoretisch gasgebruik in woningen per energielabel



Bron: (Majcen, 2016).

Voor dit onderzoek hebben we de theoretische energiebesparing per labelstap omgerekend naar de werkelijke besparing en dit aangepast in het CEGOIA-model. In Bijlage C is weergegeven welke isolatiekosten in CEGOIA worden aangehouden per m² per labelstap en welke verlaging van de energievraag daarbij hoort. Daarnaast wordt in Bijlage C aangegeven welke add-ons er worden toegepast per schillabel (zon-PV, zonneboiler en warmteterugwinning uit douchewater).

Box 2 Schillabel versus energielabel

Het energielabel van een woning wordt bepaald door de combinatie van de schilisolatie en de warmtetechniek. Zo heeft een woning met een bepaalde schilisolatie en een warmtetechniek met een hoog rendement een beter label dan woning met een gelijke schilisolatie, maar met een warmtetechniek met een lager rendement. Op dit moment gebruikt ongeveer 95% van alle woningen in Nederland een gasgestookte ketel. Hiermee komt het energielabel van de meeste woningen ook overeen met de schilisolatie van de woning.

In het CEGOIA-model wordt vraagbeperking door isolatie los gezien van vraagbeperking door efficiëntere warmtetechnieken. De reden hiervoor is dat de kosten van de schilisolatie op deze manier apart kunnen worden berekend. Als we het over huidige labels hebben, praten we over de energielabels (een combinatie van schil en techniek) en als we het over schillabels hebben, dan hebben we het over labels die alleen de status van de schilisolatie uitdrukken.

2.2.2 Nul-op-de-Meter-woningen

Naast enkel isolatiepakketten voor het verbeteren van de isolatieschil van een woning, kan er ook een grootschalige renovatie plaatsvinden, waarna de extra isolatie en installaties ervoor moeten gaan zorgen dat het energiegebruik van een woning over het jaar netto nul is. Een woning die deze energieprestatie haalt, wordt een Nul-op-de-Meter-woning (NoM) genoemd³.

In meerdere projecten in Nederland zijn inmiddels NoM-renovaties uitgevoerd. Bij deze projecten wordt meestal een hele rij huizen in één keer aangepakt, om zo de kosten zo ver mogelijk te beperken. Een NoM-renovatie is echter zeer ingrijpend voor een woning. Niet alleen moet de isolatieschil flink worden verbeterd, installaties moeten worden vervangen en de woningen worden van het aardgas afgekoppeld. In het vervolg zal elektriciteit zorgen voor ruimteverwarming en warmtapwater. Tevens moeten er aanpassingen in de keuken worden gemaakt, omdat ook het koken op gas niet meer mogelijk is.

Meestal worden de aanpassingen tegelijk uitgevoerd met verbeteringen in het comfort van de woningen, zoals een nieuwe keuken en sanitaire voorzieningen. Al deze aanpassingen brengen kosten met zich mee.

In CEGOIA wordt ervan uitgegaan dat de kosten voor aanpassingen in badkamer en keuken op een natuurlijk moment plaatsvinden en hierdoor niet worden toegerekend aan de aanpassingen die nodig zijn voor het overschakelen op een andere warmtetechniek. De kosten van installaties worden wel meegenomen, maar zijn losgekoppeld van de isolatiekosten. Voor het toevoegen van de NoM-woning in CEGOIA, is het daarom enkel van belang wat de kosten voor isolatiemaatregelen zijn.

Er is onderzoek gedaan naar de praktijkgegevens van reeds uitgevoerde projecten, maar hieruit blijkt dat deze gegevens enerzijds zeer beperkt beschikbaar zijn en anderzijds zijn de mogelijkheden om de kosten voor isolatie, installatie en comfort uiteen te halen beperkt. Ecofys is uitgegaan van een bedrag van € 60.000 inclusief assemblage en BTW voor een NoM-renovatie (Ecofys, 2015). Dit bedrag bestaat uit kosten voor een elektrische warmtepomp, PV-panelen en de aanpassingen aan isolatie en balansventilatie. Als de kosten van eWp, PV en ventilatie van het bedrag worden afgetrokken, resteert een bedrag van € 28.500 (excl. BTW) aan kosten voor isolatie. Dit zijn de kosten voor een gemiddelde tussenwoning en van isolatieniveau laag naar hoog (E naar A++). Ecofys heeft dit bedrag geschaald voor verschillende woningtypes.

Voor de NoM-renovaties gaan we ervan uit dat de theoretische energiebesparing ten gevolge van isolatie wel echt wordt gehaald. Het uitgangspunt voor de berekeningen is dat de elektriciteitsvraag die voortkomt uit de warmtevraag en de overige elektriciteitsvraag helemaal kan worden gedekt door de elektriciteit die wordt opgewekt door de zon-PV. Deze aanname is gemaakt, omdat de bouwpartijen prestatiegaranties afgeven voor de woningen. Indien de vooraf beloofde prestatie niet wordt gehaald, zal de aannemer de woning verbeteren totdat de prestatie wel worden behaald⁴. Er wordt een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd om te kijken wat het effect is van deze aanname in de resultaten. In het CEGOIA-model rekenen we met grondgebonden en gestapeld per m² grondoppervlak.

³ Bij een Nul-op-de-Meter-woning zijn de in- en uitgaande energiestromen voor gebouwgebonden energie (o.a. ruimteverwarming, -koeling, warm tapwatergebruik) en het gebruik van huishoudelijke apparatuur op jaarbasis per saldo nul, onder standaard klimaatcondities zoals die gelden in Nederland en bij gemiddeld gebruik van de woning (Stroomversnelling, 2015).

⁴ De bewoners van een Nul-op-de-Meter-woning moeten vaak wel hun gedrag aanpassen om ervoor te zorgen dat de theoretische energieprestatie ook daadwerkelijk wordt gehaald.



In Tabel 3 zijn de isolatiekosten omgerekend vanuit de gegevens van Ecofys zodat ze bruikbaar zijn voor het CEGOIA-model.

Tabel 3 Isolatiekosten behorend bij NoM-renovatie

Labelstap	Grondgebonden	Gestapeld
Laag (E) naar Hoog (A++)	337 €/m ²	277 €/m ²
Midden (C) naar Hoog (A++)	267 €/m ²	218 €/m ²

Deze waarden zijn verder geschaald naar de andere energielabels als beginsituatie (van G naar A++, van F naar A++, etc.) en toegevoegd aan het CEGOIA-model. In Bijlage C is een tabel weergegeven met isolatiekosten per energielabelstap.

2.3 Netverzwaring

2.3.1 Uitgangspunt

Momenteel gebruikt zo'n 95% van de huishoudens in Nederland aardgas voor de verwarming van hun woning en voor het bereiden van warmtapwater. Elektriciteit wordt gebruikt voor de overige apparatuur in huis. Bij het dimensionering van het gas- en elektranet is hier ook van uit gegaan. Voor het verduurzamen van de energievoorziening zijn er de afgelopen jaren steeds meer technieken ontwikkeld die gebruik maken van elektriciteit in plaats van aardgas. Zo kun je tegenwoordig kiezen voor het verwarmen van je woning door middel van een elektrische warmtepomp of kun je elektrisch koken in plaats van koken op gas. Daarnaast hebben steeds meer huishoudens zonnepanelen op hun daken liggen. Deze nieuwe ontwikkelingen zorgen ervoor dat het elektriciteitsnet zwaarder wordt belast. In sommige gevallen is het daardoor nodig dat woningen een zwaardere aansluiting krijgen. Indien veel woningen in eenzelfde buurt meer elektriciteit gaan gebruiken of terugleveren aan het net, kan het nodig zijn het gehele elektriciteitsnet in de buurt te verzwaren. Binnen dit onderzoek wordt gekeken wat de extra kosten bedragen voor de netverzwaring die nodig is voor warmteopties op elektriciteit.

Om de kosten voor netverzwaring ten gevolge van enkel de elektrische warmtepompen te berekenen, is de piekbelasting essentieel. Deze wordt bepaald door het maximum elektrisch vermogen van een warmtepomp in combinatie met de gelijktijdigheidsfactor in de buurt. Het maximum elektrisch vermogen is leidend voor de netverzwaring naar de woning toe. De gelijktijdigheidsfactor bepaalt hoeveel het net in een straat of buurt moet worden verzwared om te garanderen dat alle huishoudens voldoende warmte kunnen generen voor hun woning bij extreem koude buitentemperaturen⁵.

2.3.2 Dimensioneren op extreem koude temperatuur

De extreem koude buitentemperatuur waarop het gasnet is gedimensioneerd is een temperatuur van -17°C een etmaal lang (zie Box 3). Dit is de buitentemperatuur waarop Ecofys in haar studie 'De systeemkosten van warmte voor woningen' ook rekent als eis aan een warmtevoorziening op elektriciteit.

⁵ Als bij alle woningen tegelijk de warmtepomp op vol vermogen aanstaat (gelijktijdigheid van 100%), wordt het net veel zwaarder belast dan wanneer slechts een kwart van de warmtepompen tegelijk op vol vermogen aanstaat (gelijktijdigheid van 25%).



Box 3 **Eis gastransportnet in Besluit leveringszekerheid Gaswet**

“De netbeheerder van het landelijk gastransportnet zorgt voor alle voorzieningen op het gebied van gasinkoop, flexibiliteitsdiensten en gastransport op het landelijke gastransportnet, nodig om vergunninghouders in staat te stellen de pieklevering te verzorgen voor alle kleinverbruikers in Nederland. Deze voorzieningen moeten volstaan om pieklevering te kunnen verzorgen op een dag met een gemiddelde effectieve etmaal temperatuur in De Bilt van -17°C (graden Celsius).”

Bron: (Rijksoverheid, 2006).

Woningborg⁶ stelt als eis aan de verwarmingsinstallatie van woningen dat deze de verblijfsruimte in de zin van het Bouwbesluit, zoals woonkamer, overige kamers en keuken, moet kunnen verwarmen tot 20°C en deze temperatuur te handhaven, bij een buitentemperatuur van -10°C⁷. Bij verwarmen met een andere energiedrager dan gas, hoeft dus niet te worden voldaan aan dezelfde eisen als in de Gaswet staan opgenomen, zie Box 4. Wanneer maar wordt gedimensioneerd op een temperatuur van -10°C, betekent dit dat de leveringszekerheid afneemt. Bij een temperatuur onder de -10°C zullen de warmtepompen niet genoeg vermogen hebben om een binnentemperatuur van 20°C te handhaven.

Box 4 **Eis verwarmingsinstallatie**

*“De verwarmingsinstallatie, al dan niet gecombineerd met een warmwaterinstallatie, van het huis c.q. privégedeelte, moet bij gelijktijdig functioneren van alle onder verantwoordelijkheid van de ondernemer geplaatste verwarmingselementen/inblaasroosters - met gesloten ramen en deuren en in gebruik zijn van de minimaal vereiste ventilatievoorzieningen - voldoen aan de navolgende voorwaarden:
Voor de volgende ruimten, voor zover daarin door de ondernemer een verwarmingselement/inblaasrooster is aangebracht, dient de te behalen en te handhaven temperatuur, tot een buitentemperatuur van -10°C, tenminste te zijn:
20°C in verblijfsgebied in de zin van het Bouwbesluit dat niet is ingedeeld in verblijfs-, verkeers- en/of bergruimte en verblijfsruimten in de zin van het Bouwbesluit, zoals woonkamer, overige kamers en keuken.”*

Bron: (Woningborg, 2010).

Elektriciteitsnetten in nieuwbouwprojecten waarbij gebruik wordt gemaakt van elektrische warmtepompen, worden op basis van de eis van Woningborg gedimensioneerd.

2.3.3 Lucht-waterwarmtepomp

Met de eis van voldoende warmtelevering van een woning bij een gemiddelde effectieve etmaaltemperatuur in De Bilt van -17°C, berekent Ecofys de piekvraag van de elektrische warmtepomp (met in achtneming van een gelijktijdigheidsfactor). Ecofys gaat uit van een lucht-water warmtepomp voor bestaande bouw. Een bodemwarmtepomp heeft een hogere efficiency maar vereist wel installatie van warmtewisselaars in de bodem, wat lastig kan zijn in bestaande bouw. Om deze reden past Ecofys in haar studie bodemwarmtepompen alleen toe in nieuwbouwwoningen.

⁶ De Woningborg groep is een groep van elkaar aanvullende ondernemingen, die voor de (woning)bouwsector certificering, advisering en toetsing & toezicht realiseren.

⁷ Het is niet duidelijk of de invloed van wind is meegenomen in dit uitgangspunt.



Voor de lucht/water warmtepomp komt Ecofys op de volgende additionele vermogensvraag op het elektriciteitsnet per woning uit⁸:

- isolatieniveau midden⁹: 12,6 kWe;
- isolatieniveau hoog¹⁰: 2,3 kWe.

Het huidige piekvermogen dat gelijktijdig aan alle woningen kan worden geleverd vanuit de elektriciteitsinfrastructuur is ongeveer 1,2 kWe per woning.

De benodigde netverzwaring bij toepassing van warmtepompen met de buitenlucht als bron, zoals berekend door Ecofys gaat uit van een ontwerp-temperatuur van -17°C. In Paragraaf 2.3.2 zijn de praktischeisen opgenomen die worden gesteld aan all-electric-systemen. Men gaat hierbij uit van een minimumtemperatuur van -10°C. In de CEGOIA-berekeningen nemen we dit ook als uitgangspunt. Er wordt met een gevoeligheidsanalyse gekeken wat het verschil is in uitkomsten wanneer we uitgaan van -17°C.

Tabel 4 Benodigde netverzwaring per warmtepomp bij toepassing lucht-waterwarmtepompen

Isolatieniveau	Temperatuurverschil binnen/buiten bij -17°C	Netverzwaring bij -17°C (kW)	Temperatuurverschil binnen/buiten bij -10°C	Netverzwaring bij -10°C (kW)
Midden (C)	37°C	12,6	30°C	10,2
Hoog (A++)	37°C	2,3	30°C	1,9

De kosten per kW netverzwaring zijn voor de studie ‘De Systeemkosten van warmte voor woningen’ (Ecofys, 2015) bepaald door Alliander en TenneT. Zij hebben deze kosten bepaald per type woonmilieu: centrum-stedelijk, buiten-centrum, groen-stedelijk, centrum-dorps en landelijk wonen, zie Tabel 5. Hoe kleiner de bebouwingsdichtheid, hoe hoger de kosten per woning. Dit zijn de kosten van het net van Liander LS- tot en met OS-station. De HS-kabels van TenneT zijn niet meegenomen in de verzwaring en resulterende kosten. De aansluitkabel naar de huizen toe heeft voldoende capaciteit en hoeft niet verzwakt te worden. Ecofys gaat ervan uit dat de kosten per kW netverzwaring van nu tot 2050 gelijk blijven in prijs. In CEGOIA wordt de bebouwingsdichtheid gebruikt voor het schalen van de kosten van het net (zie Figuur 3).

Tabel 5 Kosten additioneel vermogen in €/kW per woonmilieu Ecofys

Woonmilieu	Kosten (€/kW)
Centrum-stedelijk	1.600
Buiten-centrum	2.500
Groen-stedelijk	2.500
Centrum-dorps	3.600
Landelijk wonen	4.400

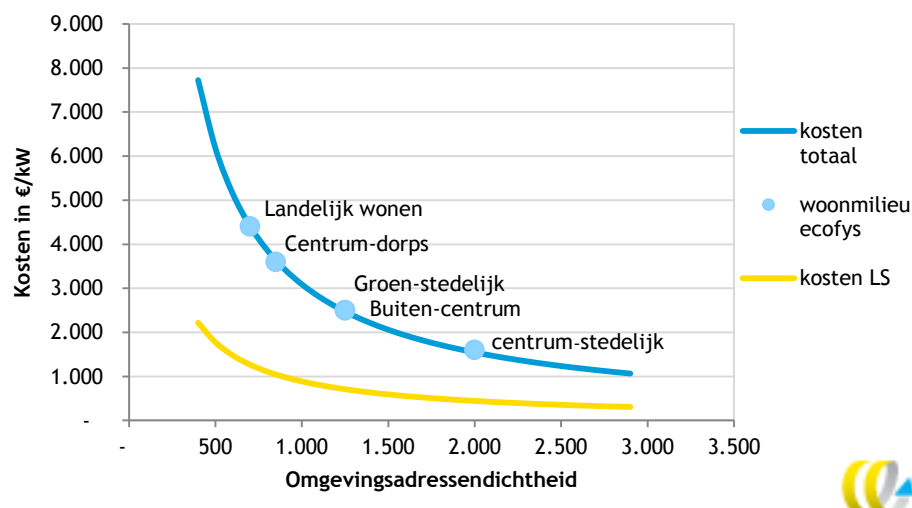
⁸ Hierbij wordt uitgegaan van een verwarmingssysteem op lage temperatuur (afgifte-temperatuur 35°C).

⁹ Schillabel C, Rc-waarde gevel: 1,3; Rc-waarde dak en vloer: 2,5.

¹⁰ Schillabel A++, Rc-waarde gevel, dak en vloer: 5,0.



Figuur 3 Kosten netverzwaring in €/kW als functie van de omgevingsadressendichtheid



Een belangrijke aanname in de Ecofys-studie is dat alle woningen in Nederland overgaan op warmtepompen. Dit heeft tot gevolg dat de berekende netverzwaring geldt voor het laag-, midden- en hoogspanningsnet. In de berekeningen met CEGOIA wordt per buurt bepaald of er warmtepompen komen. In bepaalde gebieden kan het dus voorkomen dat bijvoorbeeld één op de tien buurten warmtepompen krijgen. Logischerwijs is binnen deze ene buurt in ieder geval een verzwaring van het LS-net nodig, maar kan een verzwaring van het MS-net mogelijk achterwege gelaten worden, omdat dit MS-net met de negen andere buurten gedeeld wordt. Hierdoor is het ook niet nodig de omschakeling van middenspanning naar laagspanning aan te passen. Dit zelfde principe gaat op voor het HS-net, maar dan voor nog een schaal groter.

In 2014 heeft CE Delft samen met DNV GL een studie gedaan voor Netbeheer Nederland, waarin de kosten van het elektriciteitsnet zijn bepaald per spanningsniveau. De kosten zijn bepaald op basis van een gemiddelde voor heel Nederland.

Tabel 6 Kostenkengetallen elektriciteitsnet

Netvlak/transformatorvlak	Kostenkengetal (€/kW)
Hoogspanning	408
Hoogspanning → middenspanning	250
Middenspanning	705
Middenspanning → laagspanning	200
Laagspanning	862
Totaal	2.425

Bron: (CE Delft, 2014).

De totale netkosten zijn vergelijkbaar met de kosten zoals berekend door Ecofys. Zoals hierboven beschreven, is er voor netverzwaring per buurt slechts een verzwaring van het laagspanningsnet nodig. Voor de berekeningen gaan we daarom uit van € 862 per kW in plaats van € 2.500 per kW. De kostencurve van de extra kosten ten gevolge van uitbreiding van het laagspanningsnet zijn ook in Figuur 3 weergegeven.

2.3.4 Bodemwarmtepomp

Hoewel het aanbrengen van een bodemwarmtepomp in bestaande bouw iets meer uitdagingen kent, is het meestal wel mogelijk. Er moeten meerdere bronnen worden geboord in de ruimte om het huis. Voor de boringen zijn meestal geen vergunningen nodig (wel een meldingsplicht), maar ze moeten wel bereikbaar zijn voor de boorinstallatie. Na het boren kan de bron voorzien worden van een ondergrondse put en kan er weer overheen bestraat worden. De boring kan bijvoorbeeld onder een oprit of een vanaf de weg bereikbaar stuk tuin. Ook voor gestapelde bouw is het vaak mogelijk een bodemwarmtepomp aan te leggen. Hierbij moet wel ruimte zijn om voor alle woningen boringen te doen. In de modelberekeningen van dit onderzoek gaan we ervan uit dat in alle bestaande bouw de bodemwarmtepomp kan worden toegepast, mits de schilisolatie minimaal Label B is. Dit is een overschatting van het potentieel, omdat het niet in alle gevallen mogelijk is een bodemwarmtepomp te plaatsen bij bestaande bouw.

Het grote voordeel van een bodemwarmtepomp ten opzichte van een warmtepomp met als bron de buitenlucht, is dat de bodemtemperatuur in Nederland vrij constant op 12 °C ligt gedurende het hele jaar. Hierdoor kan ook een constant rendement gegarandeerd worden.

Op basis van monitoringgegevens¹¹ van een tweetal projecten (zie Tabel 7) zijn diverse bruikbare gegevens afgeleid voor de modellering.

Tabel 7 Parameters gemonitorde projecten Klimaatgarant

Parameter	Project 1	Project 2
Type warmtepomp	Bodemwarmtepomp	Bodemwarmtepomp
Gemiddeld vermogen per warmtepomp	1,0 kW _e	1,4 kW _e
Type afgifte	Lage temperatuur	Lage temperatuur
Type glas	Triple glas	Dubbel glas
Type ventilatie	Balansventilatie	Via gevelroosters
Douche WTW	Ja	Nee
Rc-waarde vloeren	3,5 m ² K/W	3,5 m ² K/W
Rc-waarde gevels	4,5 m ² K/W	3,0 m ² K/W
Rc-waarde daken	6,0 m ² K/W	3,5 m ² K/W
EPC	-0,17	0,55
Aantal gemonitorde woningen	28	39
Maximale gelijktijdigheid 2015	40%	63%

In beide wijken zijn bodemwarmtepompen met een elektrisch vermogen van 1,4 kW voldoende om te voorzien in de energievraag voor warmte.

De maximale gelijktijdigheid bij Project 1 was 0,4 en bij Project 2 0,6 in het jaar 2015. Bij Project 2 hebben de woningen een iets minder goede isolatie, waardoor ze vaker tegelijkertijd de warmtepomp aan moeten hebben bij koud weer.

De waarden zijn gemeten over het jaar 2015. In dit jaar was het op 23 januari het koudst. 's Nachts werd het -5,7 °C en overdag -1,3 °C. Het minimum van -10,0 °C is in dit jaar niet bereikt. Bij een binnentemperatuur van 20 °C en een buitentemperatuur van -2,8 °C (daggemiddelde 23 januari 2015) is het temperatuurverschil dat moet worden overbrugd 23 graden. Bij een buitentemperatuur van -10 °C moet er een temperatuurverschil van 30 °C worden

¹¹ Deze gegevens zijn ontvangen van Klimaatgarant (installateur en beheerder van de installaties).



overbrugd. De gelijktijdigheid van de warmtepompen zal naar verwachting worden verhoogd met $30/23 = 130\%$.
 Voor Project 1 wordt de gelijktijdigheid bij -10°C hiermee $0,4 \cdot 130\% = 0,52$ en bij Project 2 wordt de gelijktijdigheid bij -10°C hiermee $0,63 \cdot 130\% = 0,82$ (rekenmethode bepaald op basis van gesprekken met sector). Nader onderzoek is nodig om vast te kunnen stellen dat deze waarden overeenkomen met de praktijk. In een gevoeligheidsanalyse wordt gekeken wat de netverzwaring wordt wanneer gerekend wordt met een minimum temperatuur van -17°C .

Met een EPC van $-0,17$ zijn de woningen in Project 1 vergelijkbaar met NoM-woningen. Een EPC van $0,55$ in Project 2 duidt op Schillabel A++.
 In CEGOIA worden de schilisolatie en de installaties apart van elkaar gemodelleerd. De isolatieschil van de woningen van Project 1 komt in het CEGOIA-model overeen met Schillabel A++ en de isolatieschil van de woningen van Project 2 komt overeen met Schillabel A (dus exclusief het EPC-effect van de installaties). De netverzwaring schalen we in het model per labelstap in dezelfde verhouding als de netverzwaring zoals bepaald door Ecofys voor elektrische warmtepompen met als bron buitenlucht.

Tabel 8 Netverzwaring bepaald per type warmtepomp en isolatieniveau a.d.h.v. bekende data

Type warmtepomp	Schillabel	Piekvraag per warmtepomp (kW_e)	Gelijktijdigheid	Netverzwaring per woning bij -10°C (kW_e)
Bron Buitenlucht	A++	1,9	1,0	1,9
Bron Buitenlucht	A	---	---	4,1*
Bron Buitenlucht	B	---	---	7,1*
Bron Buitenlucht	C	19,3	0,53	10,2
Bron Bodem	A++	1,0	0,52	0,5**
Bron Bodem	A	1,4	0,82	1,1**
Bron Bodem	B	---	---	1,7***

* Bepaald met behulp van lineaire interpolatie.

** Bepaald uit meetgegevens projecten Klimaatgarant.

*** Bepaald door lineaire extrapolatie.

2.3.5 Hybride warmtepomp

Uit het rapport 'Flex-potentieel hybride warmtepomp' blijkt dat bij het toepassen van een hybride warmtepomp bij omstandigheden zoals gekozen in het onderzoek¹², de gelijktijdige belasting op het elektriciteitsnet circa $1,2 \text{ kW}$ per woning bedraagt. Dit is slechts 20% hoger dan de netbelasting bij het gebruik van een HR-ketel (Berenschot, 2016). Een dergelijke verhoging past gewoonlijk binnen de reserves van het huidige netwerk.

Voor deze studie maken we gebruik van wat andere configuraties dan de omstandigheden waarvan Berenschot uitgaat. De hybride warmtepomp kan echter worden gestuurd op het minimaliseren van netwerkcongestie. Het systeem in de gehele buurt kan zo worden ingesteld dat hybride warmtepompen overschakelen op verwarmen met de HR-ketel indien gemiddeld per woning de grens van $1,2 \text{ kW}$ is bereikt.

¹² Het gaat hierbij om een hybride warmtepomp op buitenlucht bij een woning met een warmtevraag van 30 GJ (ongeveer 850 m^3 aardgas per jaar) en een LT-systeem. Bij dit systeem zorgt de elektrisch aangedreven warmtepomp in 80% van de tijd voor benodigde ruimteverwarming.



Om netverzwaring te voorkomen, zal bij gebruik van hybride warmtepompen in een hele buurt gestuurd moeten worden op minimale netwerkcongestie. Binnen deze studie wordt aangenomen dat dit systeem wordt gebruikt en er daardoor geen netverzwaring nodig is wanneer een gehele buurt overschakelt op hybride warmtepompen.

2.3.6 Andere ontwikkelingen die tot netverzwaring leiden

In de voorgaande paragrafen is ingegaan op de effecten van elektrisch verwarmen op het elektriciteitsnet en de benodigde netverzwaring die nodig is als dit op grote schaal in Nederland wordt toegepast. Op dit moment is de elektrificatie van de warmtevoorziening niet de enige ontwikkeling die kan leiden tot netverzwaring. Ook zonnepanelen, elektrisch vervoer en andere functies die worden geëlektrificeerd kunnen een drijfveer voor netverzwaring zijn.

Veel ontwikkelingen van elektrificatie hebben mogelijkheden om de netimpact te verminderen en zo voor een lagere netbelasting en -verzwaring te zorgen. Hierbij kan gedacht worden aan elektriciteitsopslag voor zonnepanelen of het slim laden van elektrische auto's. Ook in het geval van warmtepompen zijn er mogelijkheden om beperkt de impact te reduceren (thermische opslag, waardoor de gelijktijdigheid van de warmtepompen in een buurt verlaagd kan worden), maar de mogelijkheden om dit óók in de meest extreme situaties uit de Gaswet en Woningborg te doen, zijn beperkt, uitdagend en kostbaar. Daar komt bij dat lang niet alle woningen de fysieke ruimte hebben om dit soort oplossingen te accommoderen.

In de komende jaren wordt er nog veel onderzoek gedaan naar alle ontwikkelingen die van invloed zijn op de netverzwaring, omdat er nu nog veel onduidelijkheden zijn. Om pragmatische redenen is bij deze studie daarom het uitgangspunt gekozen dat de elektrificatie van de warmtevoorziening de hoofdrijfveer van netverzwaring is.

3 Eindbeelden klimaatneutrale gebouwde omgeving

3.1 Algemeen

In dit hoofdstuk presenteren we het eindbeeld van de klimaatneutrale warmtevoorziening van woningen in 2050. Bij dit eindbeeld wordt uitgegaan van de parameters voor hybride warmtepompen, isolatie en netverzwaring zoals beschreven in het vorige hoofdstuk. Hierbij is zoveel mogelijk aangesloten op de studie ‘De systeemkosten van warmte voor woningen’ (Ecofys, 2015).

Aanvullend op dit eindbeeld wordt gekeken hoe het beeld verandert als in de gevoeligheidsanalyses wordt gekeken naar de invloed van verschillende parameters op de klimaatneutrale warmtevoorziening¹³.

Essentieel voor de berekening van de eindbeelden is de aanname van de beschikbaarheid van groen gas. In eerste instantie gaan wij in de berekeningen uit van het potentieel dat Gasunie heeft geschat en beschreven in het rapport ‘De rol van gas en Gasunie in de duurzame energievoorziening’ (Gasunie, 2016), zie Box 5.

Box 5 Inschatting potentieel beschikbaar hernieuwbaar gas in 2050

“In de toekomst zullen we mogelijk in staat zijn grotere hoeveelheden hernieuwbaar gas in te zetten. Dit kan waterstof zijn, geproduceerd uit overschotten duurzame elektriciteit, of omgezette biomassa. In een duurzame energievoorziening in 2050 schatten wij dat hernieuwbaar gas 5 tot 10 miljard m³ aardgas kan vervangen.”

Bron: (Gasunie, 2016).

Van dit totale potentieel is 2 bcm groen gas en 3-8 bcm hernieuwbaar geproduceerd gas¹⁴. Naast dat hernieuwbaar gas duurder is dan aardgas, zitten er ook extra kosten en uitdagingen verbonden aan het produceren, transporteren en consumeren van dit gas in het geval het waterstofpercentage hoger ligt dan 20% (Kiwa, 2012). Daarnaast zal dit gas worden verdeeld over verschillende sectoren en niet slechts de woningbouw en/of utiliteitsbouw. Omdat groen gas één-op-één uitwisselbaar is met aardgas en dat rond de toepassing en vorm van hernieuwbaar gas nog keuzes gemaakt kunnen worden, wordt in deze studie ervan uitgegaan dat voor de gebouwde omgeving groen gas rechtstreeks beschikbaar is (maximaal 2 bcm gehele gebouwde omgeving; maximaal 1,5 bcm alleen woningen) en dat voor de piekvoorziening van collectieve warmte het hernieuwbare gas beschikbaar is (maximaal 5 bcm). Voor beide vormen wordt hetzelfde kostenniveau genomen.

¹³ Naast parameters voor hybride warmtepompen, isolatie en netverzwaring, omvat het model nog veel meer parameters die nodig zijn voor de berekening van de eindbeelden. De belangrijkste zijn terug te vinden in Bijlage E.

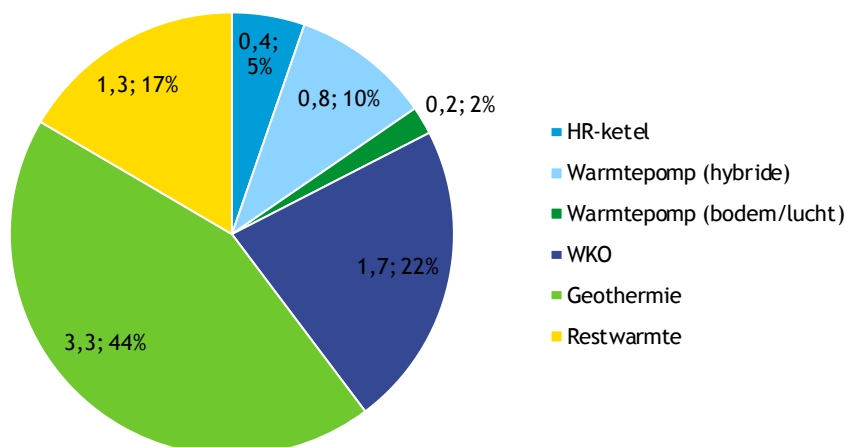
¹⁴ Onder hernieuwbaar gas wordt verstaan: alle gassen die worden geproduceerd door middel van overschotten van hernieuwbare elektriciteit en omgezette biomassa.



3.2 Resultaten

In Figuur 4 t/m Figuur 11 zijn de resultaten van het eindbeeld weergegeven. In een deel van de figuren is een vergelijking gemaakt met de huidige situatie. De resultaten zijn gegenereerd met het CEGOIA-model en zijn gebaseerd op de totale Nederlandse woningvoorraad die momenteel 7,6 miljoen woningen bedraagt.

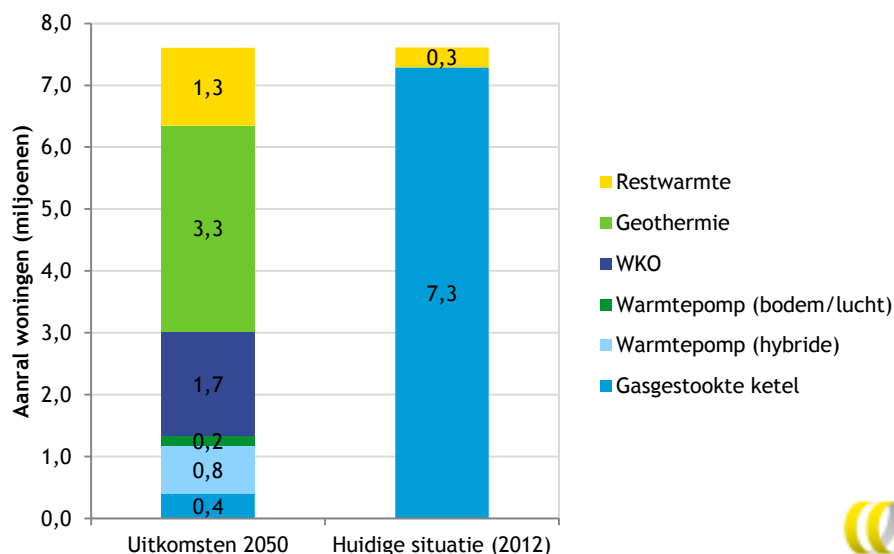
Figuur 4 Verdeling aantal woningen per techniek (miljoenen) (2050)



De resultaten laten zien dat in het eindbeeld meer dan de helft van de woningen gebruikmaakt van collectieve warmteopties, waarbij geothermie het overgrote deel hiervan voor zijn rekening neemt (zie Figuur 4). WKO heeft met 22% ook een behoorlijk aandeel in het eindbeeld. De rest van de woningen wordt verwarmd met een HR-ketel, een hybride warmtepomp (op buitenlucht of ventilatielucht) of een all-electric-warmtepomp. De beperkte hoeveelheid groen gasopties in het eindbeeld hebben te maken met de beperkte beschikbaarheid van groen gas in 2050. De all-electric-opties zijn relatief duur ten opzichte van de andere opties, omdat hiervoor vaak veel kosten moeten worden gemaakt voor netverzwaring. Voor de collectieve opties (restwarmte, geo-thermie en WKO) is wel een warmtenet nodig, maar dit brengt minder kosten met zich mee dan de verzwaring van het elektriciteitsnet die nodig is voor all-electric-opties. Daarnaast zijn de kosten per GJ-warmte voor restwarmte en geothermie erg laag ten opzichte van de kosten voor energie bij de elektrische opties. De collectieve warmteopties hebben een back-up nodig voor wanneer er een te grote piekvraag optreedt in de warmtevraag. Deze piekvraag wordt in het begin nog opgevangen door aardgas en zal naar 2050 voor een steeds groter deel worden ingevuld door hernieuwbaar gas.

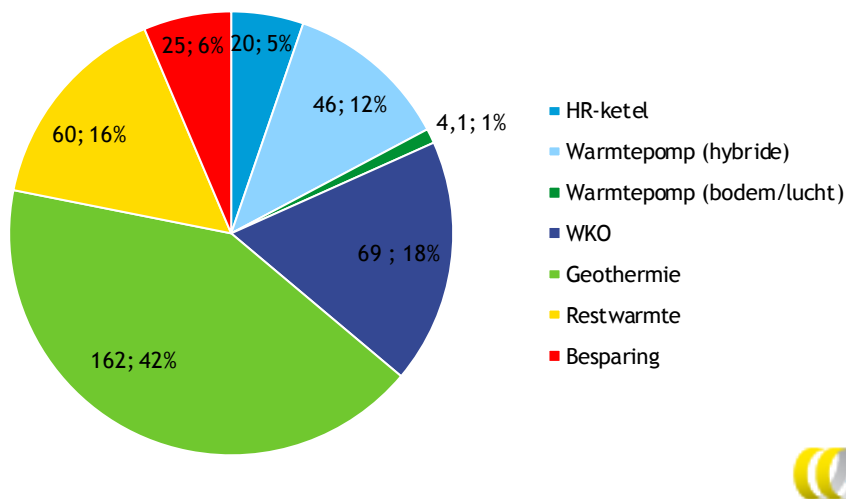


Figuur 5 Verdeling aantal woningen per techniek, uitkomsten 2050 versus huidige situatie (2012)



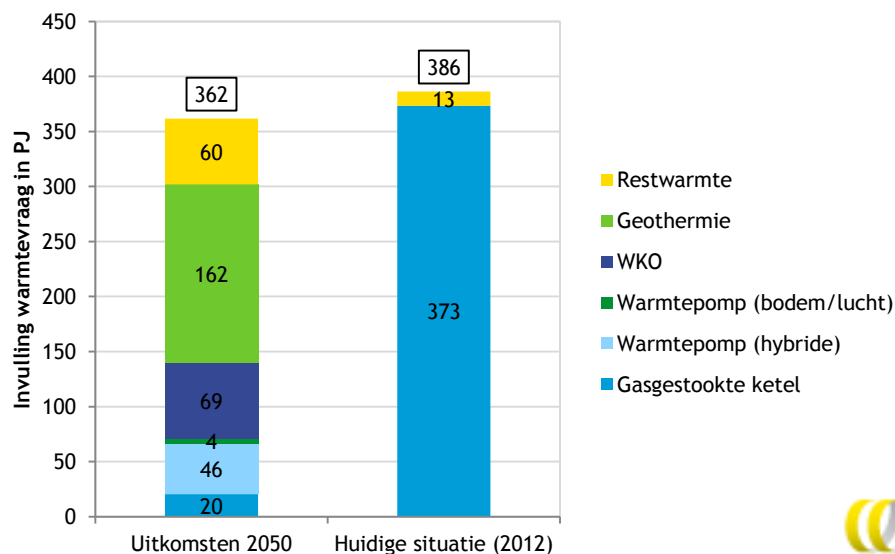
In Figuur 5 is de verdeling van woningen per techniek weergegeven ten opzichte van de huidige situatie in Nederland. Momenteel heeft 7,3 miljoen woningen in Nederland een gasgestookte ketel en 0,3 miljoen woningen is aangesloten op warmtenetten.

Figuur 6 Invulling warmtevraag per techniek (PJ) (2050)



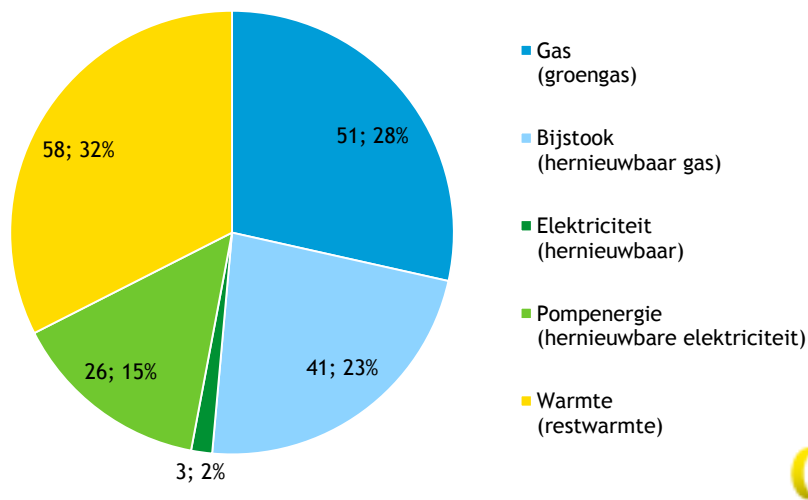
In Figuur 6 is nogmaals aangegeven welke technieken de warmtevraag invullen, maar dan verdeeld over de totale initiële warmtevraag. De verhoudingen zijn ongeveer gelijk aan de invulling van het aantal woningen per techniek. Er is een deel toegevoegd met besparing. De totale warmtevraag op dit moment is 386 PJ en na isolerende maatregelen is deze in 2050 nog 362 PJ.

Figuur 7 Invulling warmtevraag, uitkomsten 2050 versus huidige situatie (2012)



Als we de invulling van de warmtevraag in 2050 vergelijken met de huidige invulling van de warmtevraag (zie Figuur 7), zien we naast het gebruik van andere technieken, dat de warmtevraag wat afneemt. Dit is het gevolg van extra isolerende maatregelen van nu tot 2050. In het eindbeeld wordt de totale beschikbare hoeveelheid groen gas verbruikt (zie Figuur 8).

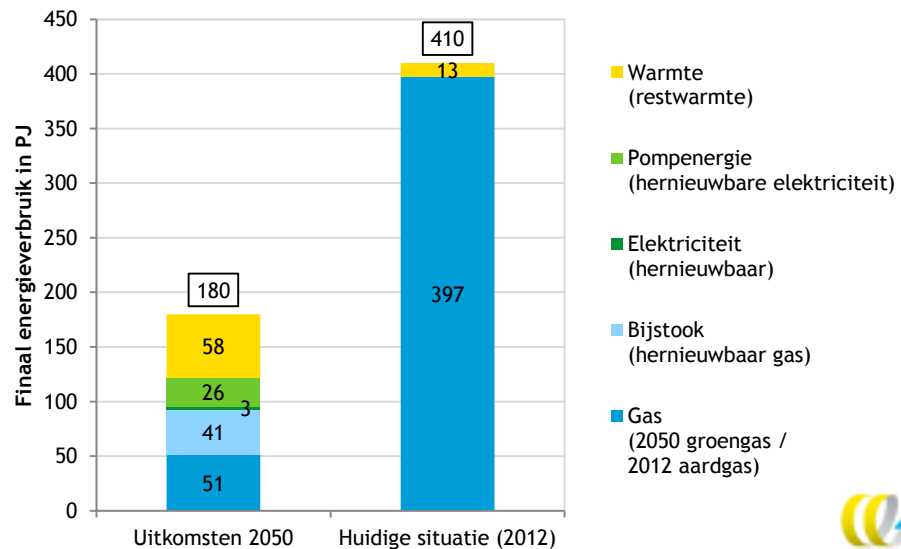
Figuur 8 Finaal energieverbruik per warmtedrager (PJ) (2050)



Figuur 8 laat het finale energieverbruik per warmtedrager zien. Dit is bepaald aan de hand van de rendementen per techniek en leidingverliezen die optreden bij collectieve warmteopties. De pompenergie bestaat uit de elektriciteit die nodig is voor de geothermiebuurten en de buurten die gebruik maken van WKO. Het onderdeel elektriciteit is slechts de elektriciteit die nodig is in de woningen met individuele warmteopties. Het aandeel pomp-energie is veel kleiner dan het aandeel woningen op geothermie, doordat de

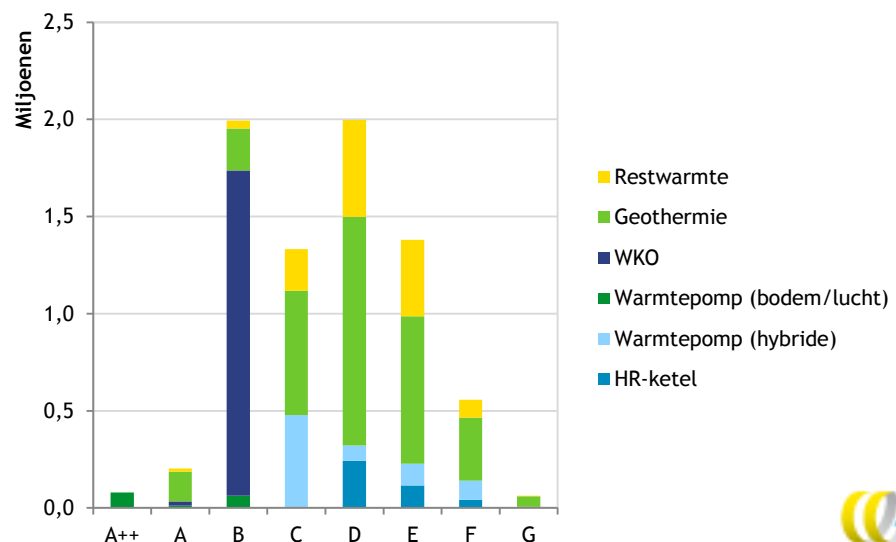
efficiëntie van het oppompen van aardwarmte hoog is. Het aandeel elektriciteit dat nodig is voor de individuele warmtepompen is ook lager dan het aandeel woningen dat gebruikmaakt deze technieken, wederom door een hoge efficiëntie van de warmtepomp. Gasbijstook is het gas dat nodig is ter aanvulling op de collectieve warmteopties (geothermie en restwarmte), op momenten van piekvraag wanneer er niet genoeg warmte kan worden geleverd door de hoofdbron.

Figuur 9 Finaal energieverbruik per warmtedrager, uitkomsten 2050 versus huidige situatie (2012)



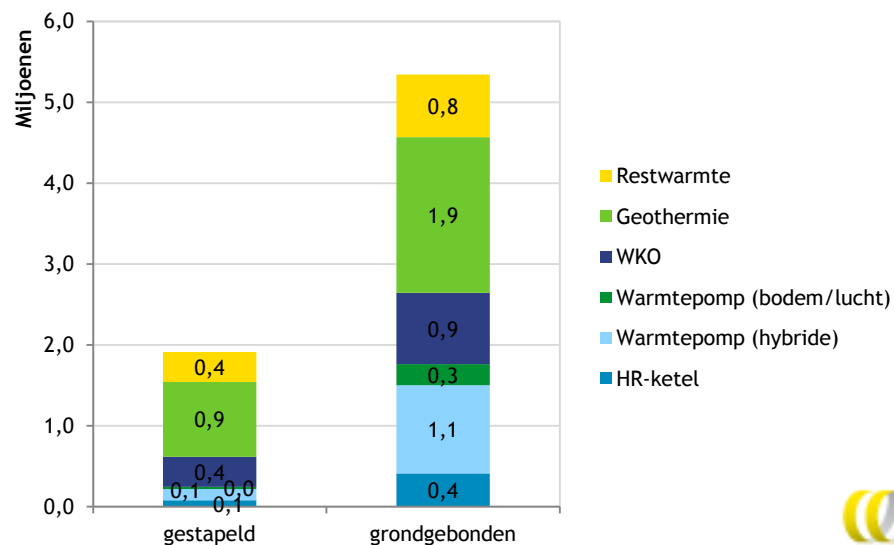
Het finaal energiegebruik geeft aan hoeveel PJ er daadwerkelijk benodigd is per warmtedrager. In Figuur 9 is te zien dat het finale energieverbruik in 2050 veel lager ligt dan het huidige finale energieverbruik voor de verwarming van woningen. De reden hiervoor is dat in 2050 veel meer gebruik zal worden gemaakt van efficiënte warmtetechnieken.

Figuur 10 Aantal woningen per schillabel en techniek (2050)



In Figuur 10 is de verdeling van het aantal woningen naar schillabel te zien, nadat er eventueel extra is geïsoleerd. Per label is weergegeven welke warmtetechnieken kostentechnisch het beste aansluiten bij het eindbeeld in 2050. Duidelijk is dat de WKO en de elektrische warmtepomp (bodem/lucht) het beste past bij goed geïsoleerde woningen en de HR-ketel alleen nog gebruikt wordt bij de woningen met een slechte isolatieschil. De hybride warmtepomp wordt ook alleen toegepast bij de minder goed geïsoleerde woningen. Zodra de isolatieschil beter is, zijn er namelijk technieken die voordeliger zijn. Voor de hybride warmtepomp op ventilatielucht is ingesteld dat deze alleen kan worden toegepast vanaf Schillabel C, omdat deze een ventilatiesysteem nodig heeft dat alleen bij nieuwere woningen aanwezig is.

Figuur 11 Aantal woningen per type (gestapeld versus grondgebonden) en techniek (2050)



In Figuur 11 is de verdeling van warmtetechnieken weergegeven per type woning (gestapeld versus grondgebonden). De meeste warmtetechnieken komen in verhouding ongeveer evenveel voor in beide type woningen. Voor de hybridewarmtepompen is dit echter niet het geval. Voor de hybride warmtepomp met als bron buitenlucht, is plek nodig voor het plaatsen van de buitenunit. Om deze reden is dit type warmtepomp minder geschikt voor gestapelde bouw. De hybride warmtepomp op ventilatielucht komt in verhouding ook meer voor bij grondgebonden bouw.

In Bijlage B zijn de verschillen weergegeven tussen de resultaten uit de vorige studie en de huidige resultaten. De vergelijking is niet één op één te maken, omdat er in de vorige studie de hybride warmtepomp bijvoorbeeld geen optie was. Om deze reden is slechts gekeken naar het verschil in finaal energie-verbruik per warmtedrager. Wat opvalt is dat in de oude resultaten elektriciteit een grote rol speelt in de warmtevoorziening in 2050. Met de huidige berekeningen is deze rol beperkt, vooral doordat de kosten van het elektriciteitsnet beter in kaart zijn gebracht en veel hoger bleken dan in de vorige studie is aangenomen. Daarnaast heeft restwarmte in de huidige resultaten een prominente plek, terwijl restwarmte in de vorige studie nog geen optie was doordat de berekeningen niet locatiespecifiek waren.

3.3 Toelichting resultaten

In de komende paragrafen worden de resultaten toegelicht per onderdeel waarnaar we in de studie hebben gekeken. Daarnaast wordt een aantal gevoeligheidsanalyses uitgevoerd om de invloed van bepaalde keuzes en parameters op de resultaten te zien.

De volgende gevoeligheidsanalyses worden uitgevoerd:

Aandeel groen gas

- beschikbare hoeveelheid groen gas voor de woningen 1,0 bcm in 2050 i.p.v. 1,5 bcm;
- groen gasprijs 1,50 euro/m³ i.p.v. 0,75 euro/m³;
- onbeperkte beschikbaarheid groen gas.

Woningisolatie

- minimaal isoleren naar Schillabel C;
- andere kosten schil NoM-woningen;
- werkelijke i.p.v. theoretische energiebesparing NoM-woningen.

Netverzwaring

- lagere kosten netverzwaring;
- netverzwaring op basis van -17° C.

Hybride warmtepompen

- geen restwarmte beschikbaar in 2050;
- geen restwarmte beschikbaar in 2050 en geothermie 3x zo duur;
- geen HR-ketels mogelijk in 2050;
- hogere prijs elektriciteit in 2050.

Route naar klimaatneutraal

- klimaatneutraal in 2040 in plaats van 2050.

3.3.1 Aandeel groen gas

Voor de berekeningen is de beschikbaarheid van groen gas begrensd op 1,5 bcm voor de techniekopties met een gasinfrastructuur (exclusief bijstook). Met de in het model aangehouden commodity price van € 0,75 per m³ wordt deze 1,5 bcm compleet benut. De technieken die gebruik van dit groen gas maken zijn de HR-ketel en de hybride warmtepomp op ventilatielucht en buitenlucht. De hybride warmtepomp op ventilatielucht wordt slechts toegepast in woningen met Schillabel C. Er is een minimum eis gesteld binnen het model dat een woning isolatieschil Label C moet hebben, omdat bij lagere schilisolaties er vaak geen mechanisch ventilatiesysteem in de woning is aangelegd, wat wel een vereiste is voor de hybride warmtepomp op ventilatielucht. Voor de Schillabels A++, A en B komen andere warmteopties dan gas goedkoper uit, voornamelijk de bodemwarmtepomp.

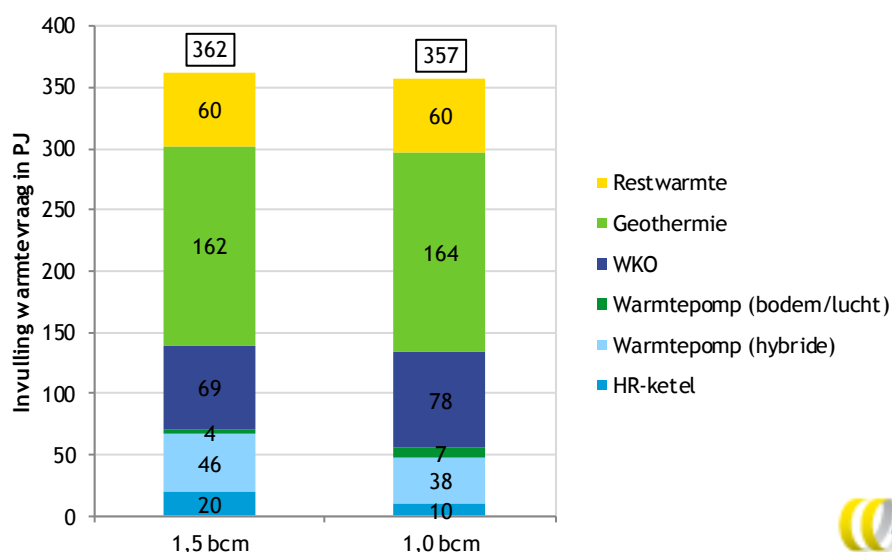
Gevoeligheidsanalyse: Beschikbare hoeveelheid groen gas voor de woningen 1,0 bcm in 2050 i.p.v. 1,5 bcm

In de basisberekeningen is uitgegaan van een beperkte beschikbaarheid van groen gas. Groen gas is een commodity die wordt gemaakt uit biomassa, een schaarse grondstof, die in Nederland maar beperkt voorhanden is. Een potentieelstudie van het Groen Gas Forum (2014) raamt het technisch potentieel van groen gas uit Nederlandse biomassa op iets meer dan 2 miljard m³ (bcm). In de berekening is ervan uitgegaan dat 1,5 bcm hiervan beschikbaar is voor woningen. Er zijn echter nog veel andere sectoren die gebruik kunnen



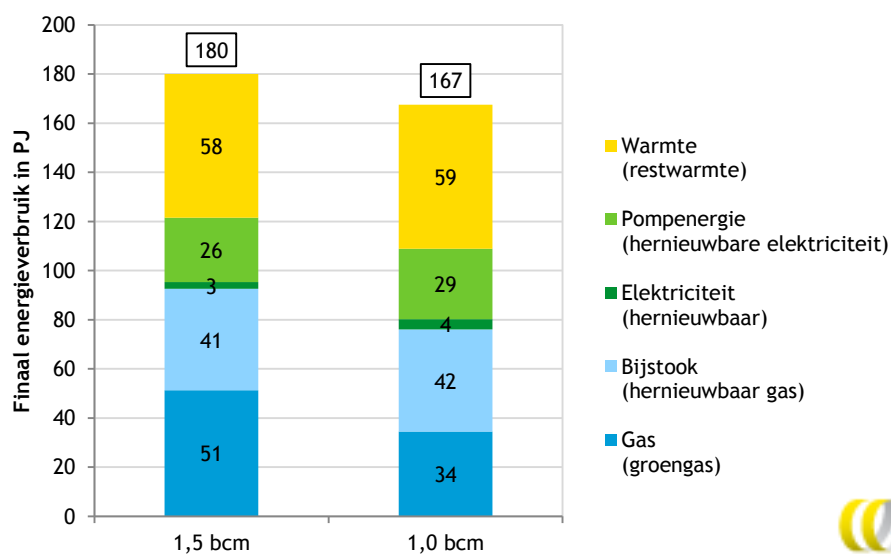
maken van dit gas. In deze gevoeligheidsstudie gaan we daarom uit van een wat lagere potentie voor de woningbouw, namelijk 1,0 bcm.

Figuur 12 Invulling warmtevraag per techniek, beschikbaarheid groen gas 1,5 bcm versus 1,0 bcm (2050)



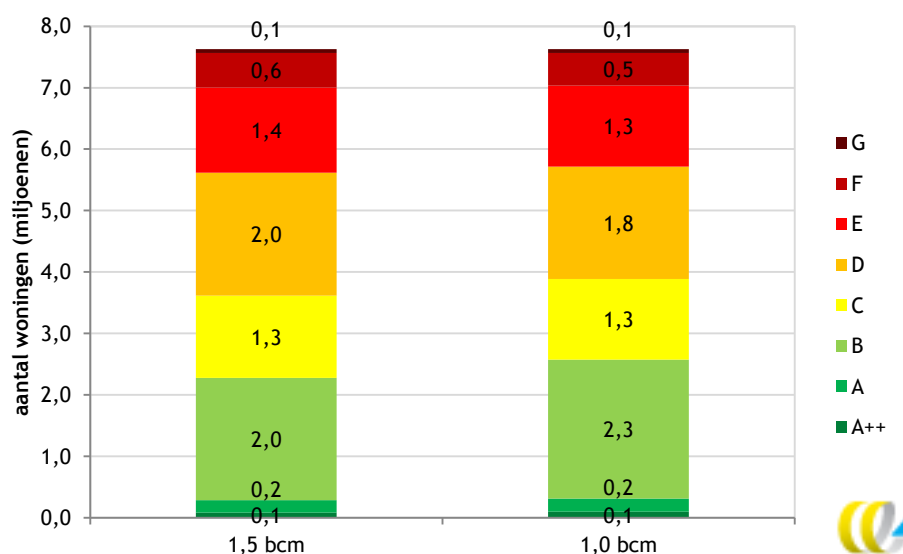
In Figuur 12 is de vergelijking weergegeven tussen de invulling van de energievraag voor warmte naar energiedrager bij een beschikbaarheid van 1,5 bcm groen gas voor woningen ten opzichte van 1,0 bcm. Er is in de figuur te zien dat de warmtevraag nagenoeg gelijk blijft, dus dat er niet extra veel geïsoleerd wordt om het gasverbruik te beperken. Bij een lagere beschikbaarheid van groen gas zullen er vooral minder huizen in 2050 zijn die nog een HR-ketel hebben. Daarnaast wordt de hybride warmtepomp wat minder toegepast. Dit wordt voornamelijk opgevangen door meer WKO-systemen en elektrische warmtepompen te gebruiken.

Figuur 13 Finaal energieverbruik per warmtedrager, beschikbaarheid groen gas 1,5 bcm versus 1,0 bcm (2050)



Figuur 13 laat zien dat het finaal gasverbruik is afgenomen. Doordat de gasopties zijn vervangen door elektrische opties, die een hoog rendement hebben, is het totaal finaal energieverbruik significant afgenomen.

Figuur 14 Verdeling woningen per schillabel, beschikbaarheid groen gas 1,5 bcm versus 1,0 bcm (2050)

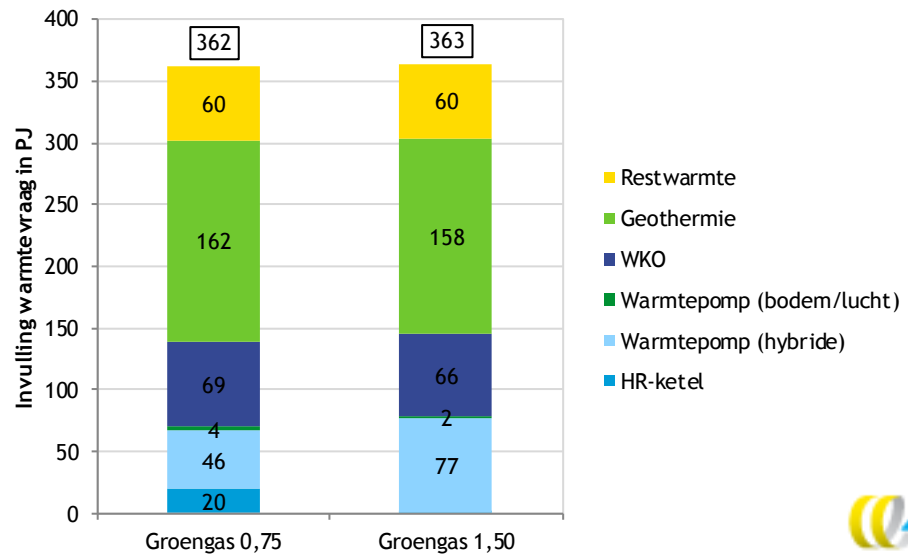


In Figuur 14 is te zien dat de schillabels nagenoeg hetzelfde zijn in het eindbeeld bij het toepassen van 1,0 bcm gas als bij het toepassen van 1,5 bcm gas. Bij een lagere beschikbaarheid van groen gas zijn er wel iets minder woningen met Label F, E en D, en iets meer woningen met Label A.

Gevoeligheidsanalyse: Groen gasprijs 1,50 euro/m³ i.p.v. 0,75 euro/m³

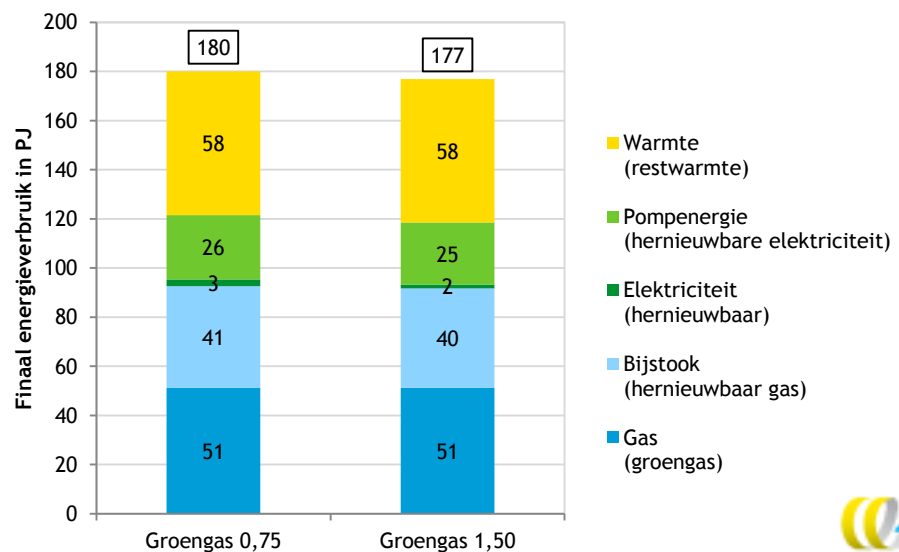
De groen gasprijs waarmee wordt gerekend in de default-run is € 0,75 per m³. Dit is gebaseerd op een kosteninschatting van CE Delft bij grote vraag in 2050. Wanneer er wordt uitgegaan van een onbeperkte beschikbaarheid van groen gas, zullen er meer buurten gebruikmaken van groen gas dan de 1,5 bcm, wat nu als maximum wordt aangehouden voor de gasopties in de woningbouw. Dit betekent dat de beschikbaarheid bepalend is voor de hoeveelheid groen gas die zal worden gebruikt in 2050, en niet de geschatte prijs van € 0,75 per m³. Het zou dus voor de resultaten niet uitmaken als we de groen gasprijs zouden verlagen. Een verhoging zou wel tot andere resultaten kunnen leiden. In deze gevoeligheidsanalyse berekenen we het eindbeeld met een groen gasprijs van € 1,50 per m³.

Figuur 15 Invulling warmtevraag per techniek, groen gasprijs € 0,75 versus € 1,50 per m³ (2050)



In Figuur 15 zijn de resultaten van de warmtevraag gegeven bij een groen gasprijs van € 0,75/m³ en een groen gasprijs van € 1,50/m³. Wat opvalt is dat wanneer de prijs wordt verhoogd naar € 1,50/m³, er geen HR-ketels meer worden toegepast in het eindbeeld. Daarentegen zijn er wel veel meer hybride warmtepompen. Het aandeel elektrische warmtepompen en geothermie is hiermee licht gedaald. Daarnaast valt op dat de warmtevraag nagenoeg gelijk blijft, wat betekent dat het niet voordeliger wordt om veel te isoleren om zo minder groen gas te gebruiken. Wanneer bij een prijs van € 1,50/m³ het nog steeds gunstig is, zoals blijkt uit de berekeningen, om de totale beschikbaarheid aan groen gas te gebruiken, kan het zijn dat de beschikbaarheid toeneemt, bijvoorbeeld doordat er groen gas zal worden geïmporteerd. In de volgende gevoeligheidsanalyse wordt gekeken hoeveel groen gas er zou worden gebruikt bij onbeperkte beschikbaarheid, waarbij de prijs van groen gas € 0,75/m³ is.

Figuur 16 Finaal energieverbruik per warmtedrager, groen gasprijs € 0,75 versus € 1,50 per m³ (2050)

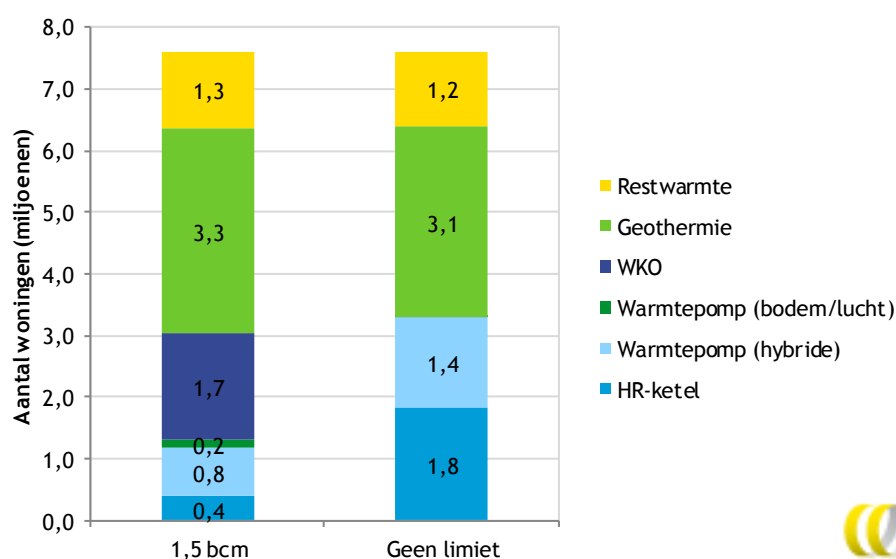


In Figuur 16 is te zien dat het totale finale energieverbruik lichtelijk is gedaald bij een hogere groen gasprijs. Wat vooral opvalt is dat nog steeds de beschikbare 1,5 bcm wordt gebruikt. Bij een verhoging van de groen gasprijs met een factor twee, is het dus financieel nog steeds voordeliger om al het groen gas te gebruiken.

Gevoeligheidsanalyse: Onbeperkte beschikbaarheid groen gas

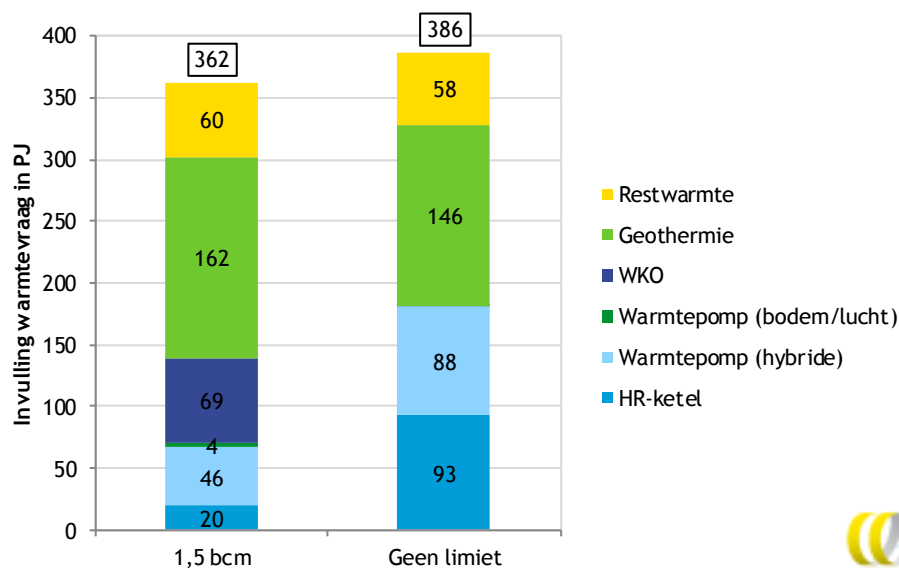
In de defaultresultaten van deze studie wordt uitgegaan van een beperkte beschikbaarheid van groen gas van 1,5 bcm. Deze beperking is niet opgelegd aan elektriciteit, terwijl het hiervan ook niet zeker is dat in 2050 alle voor de warmtevoorziening benodigde duurzame elektriciteit kan worden geleverd. In deze gevoeligheidsanalyse wordt daarom gekeken hoeveel groen gas er zou worden gebruikt voor een duurzame warmtevoorziening indien dit onbeperkt voorradig is en € 0,75/m³ kost.

Figuur 17 Aantal woningen per techniek, beschikbare hoeveelheid groen gas 1,5 bcm versus onbeperkte beschikbaarheid groen gas (2050)



In Figuur 17 is te zien dat het aantal woningen met een HR-ketel of een hybride ketel flink hoger is in 2050 wanneer er een onbeperkte beschikbaarheid is van groen gas ten opzichte van een beperkte beschikbaarheid van 1,5 bcm. Daarnaast blijkt uit de resultaten dat bij een onbeperkte beschikbaarheid aan groen gas de WKO-optie en de all-electric-warmtepomp verdwijnen uit het eindbeeld. De woningen die bij een beperkte beschikbaarheid van groen gas op WKO of all-electric overschakelen, zullen nu voornamelijk hun HR-ketel behouden. Deze goed geïsoleerde woningen hebben een lage warmtevraag en daardoor een laag gasverbruik. De HR-ketel is voor deze woningen financieel vaak gunstiger dan de hybride warmtepomp, omdat de kostenbesparing die met de hybride warmtepomp wordt bereikt door efficiëntere verwarming niet opwegen tegen de lagere kosten van de installatie van de HR-ketel.

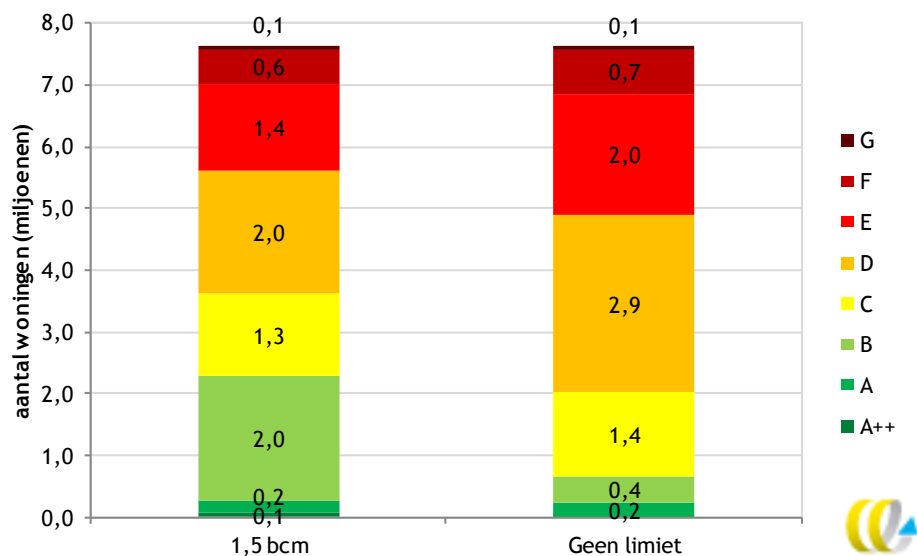
Figuur 18 Invulling warmtevraag per techniek, beschikbare hoeveelheid groen gas 1,5 bcm versus onbeperkte beschikbaarheid groen gas (2050)



In Figuur 17 is te zien dat het aantal woningen met een HR-ketel of een hybride ketel flink hoger is in 2050 wanneer er een onbeperkte beschikbaarheid is van groen gas ten opzichte van een beperkte beschikbaarheid van 1,5 bcm. Daarnaast blijkt uit de resultaten dat bij een onbeperkte beschikbaarheid aan groen gas de WKO-optie en de all-electric-warmtepomp verdwijnen uit het eindbeeld. De woningen die bij een beperkte beschikbaarheid van groen gas op WKO of all-electric overschakelen, zullen nu voornamelijk hun HR-ketel behouden. Deze goed geïsoleerde woningen hebben een lage warmtevraag en daardoor een laag gasverbruik. De HR-ketel is voor deze woningen financieel vaak gunstiger dan de hybride warmtepomp, omdat de kostenbesparing die met de hybride warmtepomp wordt bereikt door efficiëntere verwarming niet opwegen tegen de lagere kosten van de installatie van de HR-ketel.

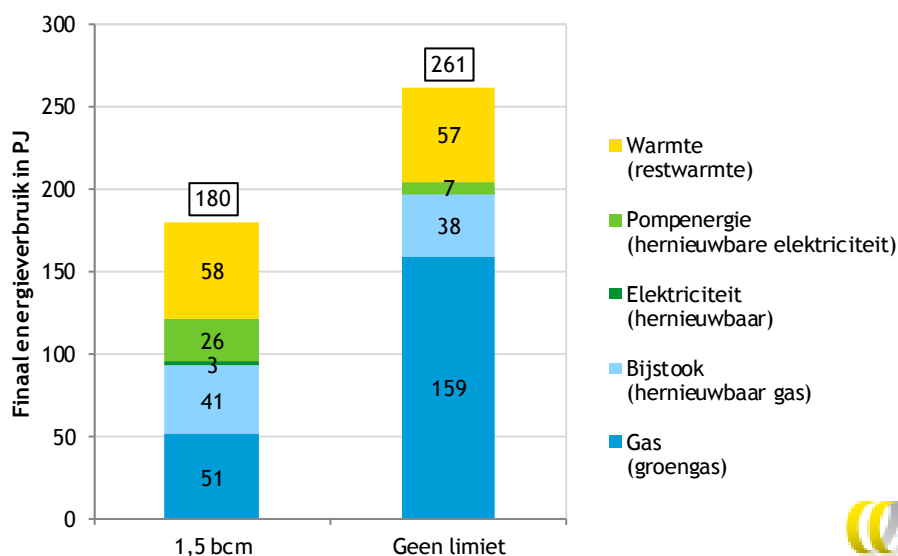
Figuur 18 In Figuur 18 is te zien dat er minder wordt bespaard bij een hogere gaslimiet, doordat all-electric-opties en WKO niet meer gunstig zijn. Hierdoor is de totale warmtevraag groter.

Figuur 19 Verdeling woningen per schillabel, beschikbare hoeveelheid groen gas 1,5 bcm versus onbeperkte beschikbaarheid groen gas (2050)



Ook in Figuur 19 wordt inzichtelijk gemaakt dat er zonder gaslimiet (dus bij onbeperkt gebruik van gas) veel minder hoeft te worden geïsoleerd om toch voldoende warmtecomfort te kunnen leveren aan de woningen. De A++-woning komt niet meer terug in het eindbeeld en er zullen ook veel minder woningen naar Label A worden geïsoleerd dan bij een groen gaslimiet van 1,5 bcm in 2050.

Figuur 20 Finaal energiegebruik per warmtedrager, beschikbare hoeveelheid groen gas 1,5 bcm versus onbeperkte beschikbaarheid groen gas (2050)

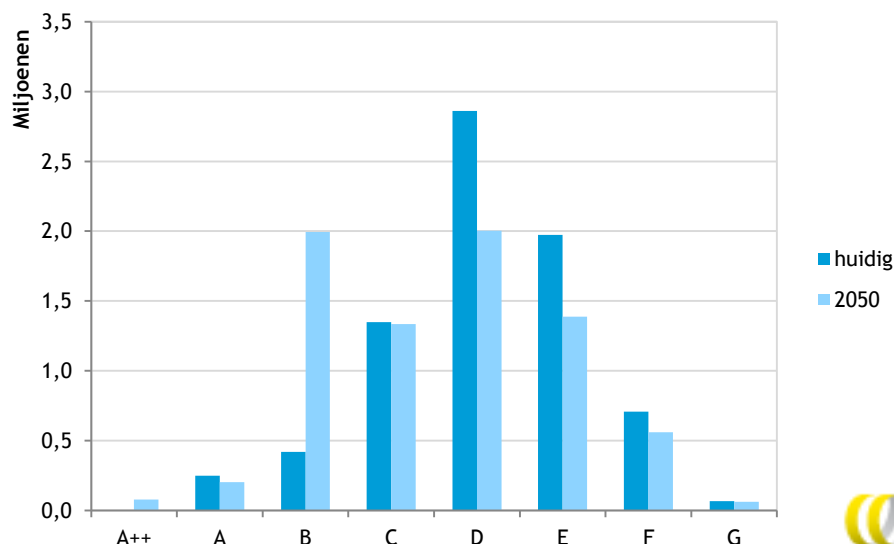


Bij een beperkte beschikbaarheid van 1,5 bcm voor groen gas, wordt al het groen gas in 2050 gebruikt (51 PJ). Bij een onbeperkte beschikbaarheid is dit 159 PJ, wat neerkomt op 4,7 bcm. Op dit moment wordt er in Nederland 11 bcm aardgas gebruikt voor het verwarmen van woningen. De hoeveelheid gebruikt groen gas zal in geval van onbeperkte beschikbaarheid wel ongeveer drie keer zo hoog zijn dan bij een beperkte beschikbaarheid van 1,5 bcm, maar zal wel met meer dan de helft afnemen ten opzichte van het huidige aardgasverbruik.

3.3.2 Woningisolatie

Het CEGOIA-model berekent hoeveel er in 2050 is bespaard in energievraag voor warmte ten opzichte van de huidige situatie. Op dit moment wordt er jaarlijks 11 bcm aardgas gebruikt in de woningbouw in Nederland. Samen met een klein aandeel warmte voor de woningen op een warmtenet, komt de totale energievraag voor warmte op 386 PJ. Na isolerende maatregelen zal dit in 2050 zo'n 362 PJ zijn. Het verschil is beperkt, omdat isolerende maatregelen vaak om een grote investering vragen en daarnaast vaak minder opleveren dan verwacht (zie Paragraaf 2.2.1).

Figuur 21 Aantal woningen per schillabel (huidig en 2050)



In Figuur 21 is het aantal woningen weergegeven per energielabel op dit moment en het schillabel in 2050, na isolerende maatregelen (zie Box 2 voor verschil energielabel en schillabel). Er wordt vooral een groot aantal woningen geïsoleerd naar Schil B de komende 35 jaar. Dit komt voornamelijk doordat een aantal efficiënte technieken, voornamelijk de elektrische warmtepomp, een hoger rendement behalen wanneer de isolatieschil van woningen beter is. Het energielabel is een combinatie van de kwaliteit van de schil van een woning en de installaties. Naast dat de schil van woningen stappen gaat zetten, zullen de energielabels verder stijgen door gebruik van efficiëntere technieken.

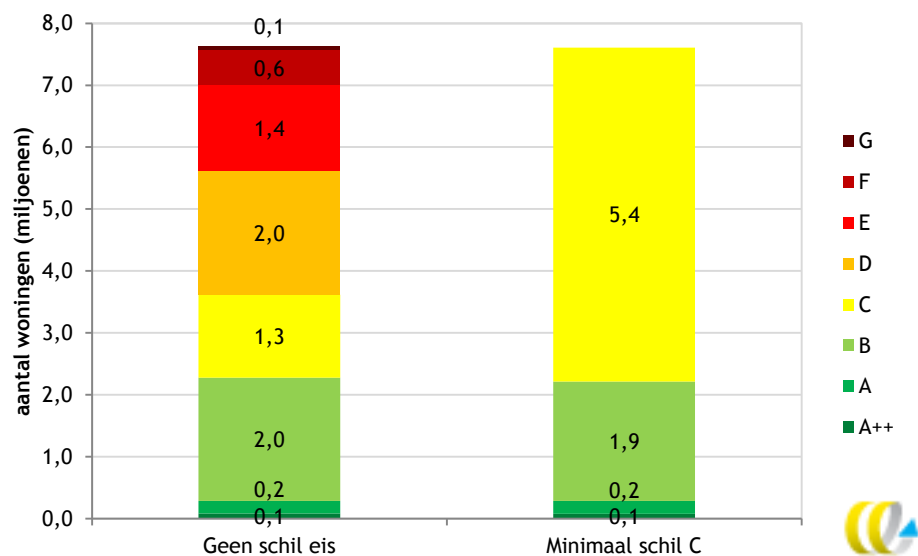
Bij het toepassen van all-electric-opties is het belangrijk dat er eerst schilisolatie wordt toegepast voordat een elektrische warmtepomp wordt geïnstalleerd en kan voorzien in de totale warmtevraag van de woning. Bij andere techniekopties, zoals restwarmte, gasopties en hybride opties, is

het ook mogelijk de techniek eerst te installeren en in de loop van de jaren de schil te verbeteren. Hierdoor hoeven niet direct hoge kosten te worden gemaakt voor isolatie, maar kan dit op een gekozen moment.

Gevoeligheidsanalyse: Minimaal isoleren naar Schillabel C

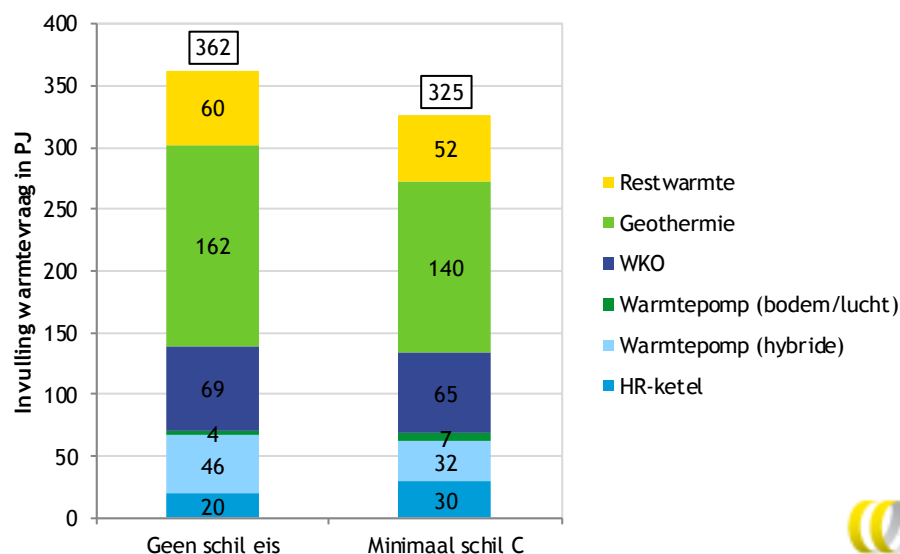
Met het convenant Energiebesparing Huursector (Ministerie van BZK, 2012) hebben overheid, verhuurders en Woonbond afspraken gemaakt over energiebesparing in de huursector. Het doel is dat in 2020 alle corporatiewoningen gemiddeld Energielabel B hebben. Het energielabel wordt bepaald op basis van de schilisotatie en de installaties. In het CEGOIA-model wordt de isolatieschil apart meegenomen. Indien woningen Energielabel B hebben, zal daar minimaal een schilisotatie van Energielabelniveau D bij horen. In deze gevoeligheidsanalyse wordt berekend wat het eindbeeld is indien in 2050 alle woningen een schilisotatie hebben die past bij een Energielabel C-woning. Dit wordt vergeleken met de situatie waarin er geen eisen worden gesteld aan de schilisotatie.

Figuur 22 Verdeling woningen per schillabel, geen minimumeisen gesteld aan schillabel versus minimale eis is Schillabel C (2050)



Wanneer er geen eisen worden gesteld aan de schilisotatie in 2050, zal er, bij sturing op minimale kosten, weinig besparing plaatsvinden (zie Figuur 21). Wanneer de eis is dat een woning minimaal naar Schillabel C moet zijn geïsoleerd in 2050, ziet de verdeling van woningen naar schillabel eruit als in Figuur 22. Wat opvalt is dat wanneer alle woningen naar Label C zullen worden geïsoleerd, er minder woningen zullen zijn met Label A. De reden hiervoor is dat de warmtevraag al sterk daalt doordat er veel woningen naar Label C gaan en het voor andere woningen niet nodig is verder te isoleren, omdat er bijvoorbeeld meer groen gas beschikbaar is voor deze woningen.

Figuur 23 Invulling warmtevraag per techniek. geen minimeisen gesteld aan schillabel versus



In Figuur 23 is de invulling van de warmtevraag weergegeven naar techniek. Door meer te isoleren is de warmtevraag uiteraard gedaald. Dit resulteert vooral in minder restwarmte en minder geothermie. De warmtevraag die wordt ingevuld door de HR-ketel gaat juist omhoog, terwijl er een daling is waar te nemen bij het invullen van de warmtevraag met hybride warmtepompen. Bij een lager gasverbruik wegen de investeringskosten van een hybride warmtepomp vaak niet op tegen de lage kosten van de HR-ketel. Daarentegen wordt er door de hybride warmtepomp per woning wel minder gas verbruikt dan bij verwarming met de HR-ketel en is de hybride warmtepomp efficiënter naarmate er meer wordt geïsoleerd. Wanneer in het scenario van minimaal isoleren naar Label C geen HR-ketels meer worden toegepast in 2050 en deze allemaal worden vervangen door hybride warmtepompen, kunnen dus wel meer huishoudens nog gebruikmaken van de gelimiteerde beschikbare hoeveelheid groen gas.

Gevoeligheidsanalyse: Andere kosten schil NoM-woningen

De kosteninschatting van Ecofys voor de isolatie van een NoM-woning, waarmee ook is gerekend in het CEGOIA-model, is gedestilleerd uit de kosteninschatting van een NoM-renovatie. De Stroomversnelling¹⁵ heeft ervaring met het uitvoeren van NoM-renovaties en heeft CE Delft een overzicht gegeven met een gedetailleerdere uitsplitsing in kosten voor een grondgebonden woning en een gestapelde woning. Deze gegevens worden gebruikt in deze gevoeligheidsanalyse.

¹⁵ Stroomversnelling is een netwerk van bouwers, toeleveranciers, corporaties, gemeentes, financiers, netbeheerders en anderen die samen aan de slag gaan om Nul-op-de-Meter-renovaties en nieuwbouw mogelijk te maken.



Tabel 9 Kosten bouwfysische onderdelen NoM-renovatie grondgebonden tussenwoning, vanaf Label D, 86 m² (excl. BTW, excl. algemene kosten)

Isolatieonderdeel	Kosten per onderdeel	Kosten per m ² woning
Gevels (inclusief openingen)	€ 11.250	€ 131
Vloer	€ 1.080	€ 13
Dak inclusief goten + afvoer	€ 3.780	€ 44
Overig (naar rato totaal)	€ 3.901	€ 45
Totaal	€ 20.011	€ 233

Tabel 10 Kosten bouwfysische onderdelen NoM-renovatie gestapelde woning, tussenappartement, vanaf label E, 62 m² (excl. BTW, excl. algemene kosten)

Isolatieonderdeel	Kosten per onderdeel	Kosten per m ² woning
Gevels achter (inclusief openingen + portieken)	€ 9.000	€ 145
Gevels voor (inclusief openingen + portieken)	€ 9.000	€ 145
Vloer	€ 405	€ 7
Dak inclusief goten + afvoer	€ 2.205	€ 36
Balkons	€ 2.700	€ 44
Algemene ruimtes, trappenhuis, tochtlicht voordeur	€ 720	€ 12
Overig (naar rato totaal)	€ 4.925	€ 79
Totaal	€ 28.955	€ 467

Met behulp van het kostenverloop van de al bekende kosten per isolatiestap is geschat hoeveel de kosten zijn vanaf elk schillabel.

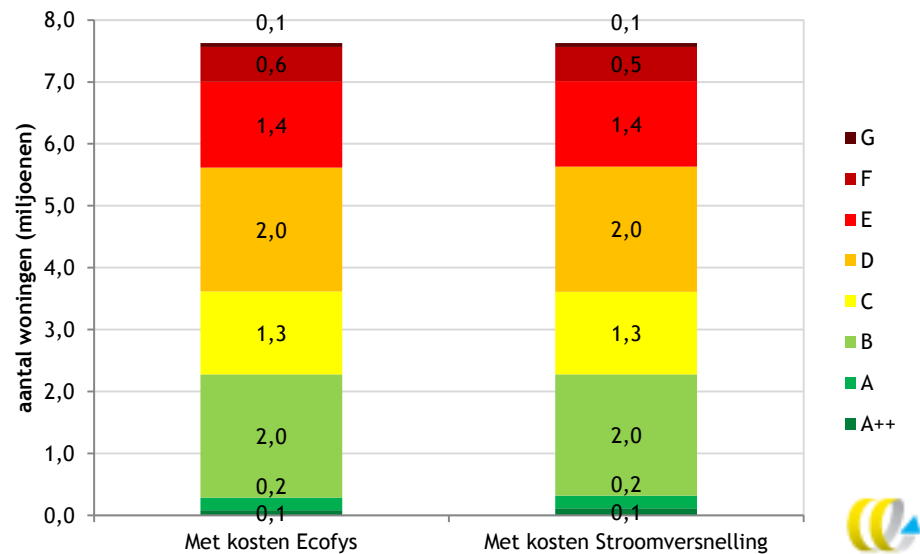
Tabel 11 Kosten NoM-renovatie grondgebonden en gestapelde woning met waarde Stroomversnelling (enkel isolatiekosten)

Huidig label	NoM grondgebonden woning (A++)	NoM gestapelde woning (A++)
G	€ 233	€ 467
F	€ 233	€ 467
E	€ 233	€ 467
D	€ 233	€ 467
C	€ 233	€ 467
B	€ 123	€ 227
A	€ 61	€ 113

De kosten voor de grondgebonden woningen liggen volgens de Stroomversnelling wat lager dan volgens Ecofys. De kosten voor de gestapelde woningen, daarentegen, liggen volgens de Stroomversnelling een stuk hoger dan de kosten voor grondgebonden woningen. Dit is in tegenstelling met de kosteninschatting van Ecofys, die er juist van uit gaat dat het minder kost per m² om gestapelde woningen naar NoM te brengen dan dat dit kost voor grondgebonden woningen.



Figuur 24 Verdeling woningen per schillabel, kosten volgens Ecofys versus kosten volgens stroomversnelling (2050)

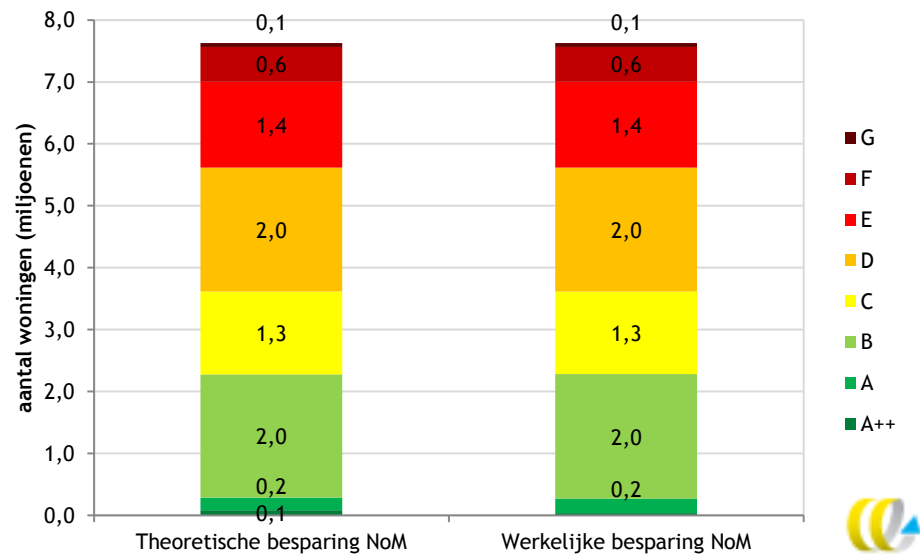


Figuur 24 toont dat er niet significant meer woningen zijn bijgekomen met Schil A++ (samen met installaties gelijk aan NoM-woning). Er is wel te zien dat het aantal woningen met Label F is afgenomen, wat erop duidt dat er iets meer A++-woningen zijn bijgekomen, maar door afronding komt dit in de cijfers niet tot uiting in de grafiek.

Gevoeligheidsanalyse: Werkelijke i.p.v. theoretische energiebesparing NoM-woningen

In de defaultberekening is voor alle energielabels uitgegaan van het werkelijke gasverbruik, zoals onderzocht door Majcen (Majcen, 2016), behalve voor NoM-woningen. Hierbij is uitgegaan van een theoretische energiebesparing. (zie Paragraaf 2.2). Het uitgangspunt hierbij is dat de theoretische energiebesparing ten gevolge van isolatie wordt gehaald en dat de elektriciteitsvraag die voortkomt uit de warmtevraag en de overige elektriciteitsvraag helemaal kan worden gedekt door de elektriciteit die wordt opgewekt door de zon-PV. In deze gevoeligheidsanalyse wordt gekeken wat het gevolg voor de resultaten is wanneer de theoretische energiebesparing niet wordt gehaald, maar de besparing in werkelijkheid meer in lijn ligt met de werkelijke energiebesparing zoals bepaald door Majcen in haar promotieonderzoek (Majcen, 2016). In dit onderzoek is enkel onderzocht wat de werkelijke besparing is voor woningen met Energielabel A t/m G. Om een voorspelling te doen voor de werkelijke energiebesparing, is de lijn hiervan doorgetrokken naar Schillabel A++ (zie Bijlage C).

Figuur 25 Verdeling woningen per schillabel, theoretische besparing NoM versus werkelijke besparing NoM



In de berekening met de theoretische besparing voor de NoM-woning komt isoleren naar Label A++ in combinatie met installaties die de woning Nul-op-de-Meter maken slechts voordelig uit voor zo'n 100.000 woningen in Nederland. Wanneer de theoretische besparing niet wordt gehaald en er nog steeds wat energie moet worden toegevoegd aan de woning om te voldoen aan de warmtevraag, zal het voor minder dan 50.000 woningen financieel gunstig zijn om ze te isoleren naar een NoM-woning.

3.3.3 Netverzwaring

Met de in Paragraaf 2.3 berekende netverzwaring, zal in 2050 ongeveer een kwart van de woningen gebruik maken van een warmtepomp. Onder deze 1,9 miljoen woningen, maakt het overgrote deel, ongeveer 1,7 miljoen woningen, gebruik van een collectieve WKO, waar geen netverzwaring voor nodig is. Slechts voor 80.000 woningen is de lucht-waterwarmtepomp de warmteoptie met de minste kosten en voor 74.000 woningen is dit de bodemwarmtepomp.

Gevoeligheidsanalyse: Lagere kosten netverzwaring

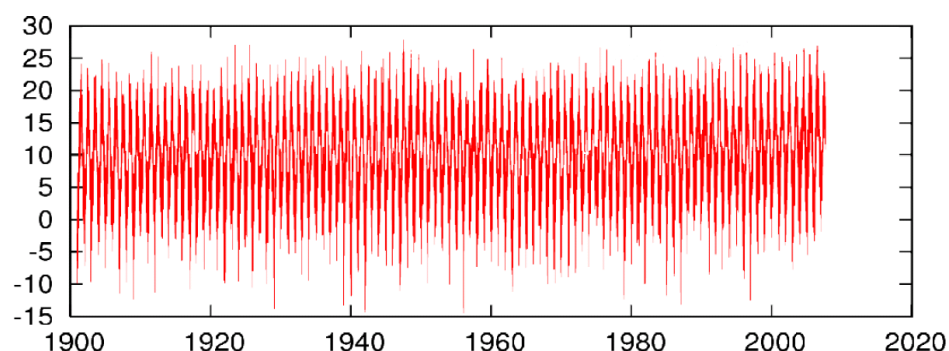
Voor de kosten van de netverzwaring gaat Circles (Eneco Groep) in 2050 uit van € 560/kW voor het LS-net. Dit is iets lager dan de kosten waar men in de studie 'Scenario-ontwikkeling energievoorziening 2030' mee rekent. Door de verwachte kostendaling in de tijd zijn de huidige kosten van € 862 in 2015, in 2050 gedaald naar € 620. Hiermee is het verschil in schatting dus gering. In deze gevoeligheidsanalyse wordt bekeken of er verschillen in de eindsituatie optreden indien de kosten van het LS-net in 2050 € 560/kW bedragen.

Het verlagen van de kosten voor netverzwaring levert geen verschil in resultaten met de default-run. De reden hiervoor is dat de beperkte beschikbaarheid van groen gas voor een deel van de buurten ervoor zorgt dat all-electric-opties worden toegepast. Dit geldt voor het deel van de buurten waarin all-electric net wat duurder is dan de groen gasoptie, maar niet zo duur dat hij helemaal uit de markt wordt geprezen. Wanneer de netverzwaring voor elektriciteit iets goedkoper wordt, zullen de all-electric-opties ook goedkoper worden, maar nog steeds vallen binnen het deel dat al all-electric was, door de beperkte beschikbaarheid van groen gas.

Gevoeligheidsanalyse: Netverzwaring op basis van -17 °C

In de defaultrun is uitgegaan van een netverzwaring op basis van een minimum temperatuur van -10 °C, waarmee in de praktijk wordt gerekend (zie Paragraaf 2.3). Het gasnet is echter gedimensioneerd op een gemiddelde effectieve etmaaltemperatuur in De Bilt van -17 °C. Uit temperatuurmetingen van de afgelopen eeuw blijkt dat het daggemiddelde ongeveer tweemaal per decennium onder de -10 °C uitkomt (zie Figuur 26). Om deze reden wordt er in deze gevoeligheidsanalyse gekeken naar de invloed op de resultaten wanneer de netverzwaring van de all-electric-opties is gebaseerd op een minimum-temperatuur van -17 °C. De -17 °C-norm heeft ook gevolgen voor het benodigde volume, maar dat is relatief gering vergeleken met de extra benodigde capaciteit.

Figuur 26 Daggemiddelde temperaturen (°C) voor station De Bilt voor de periode 01-01-1901 tot en met 30-06-2007 (Wever, 2008)

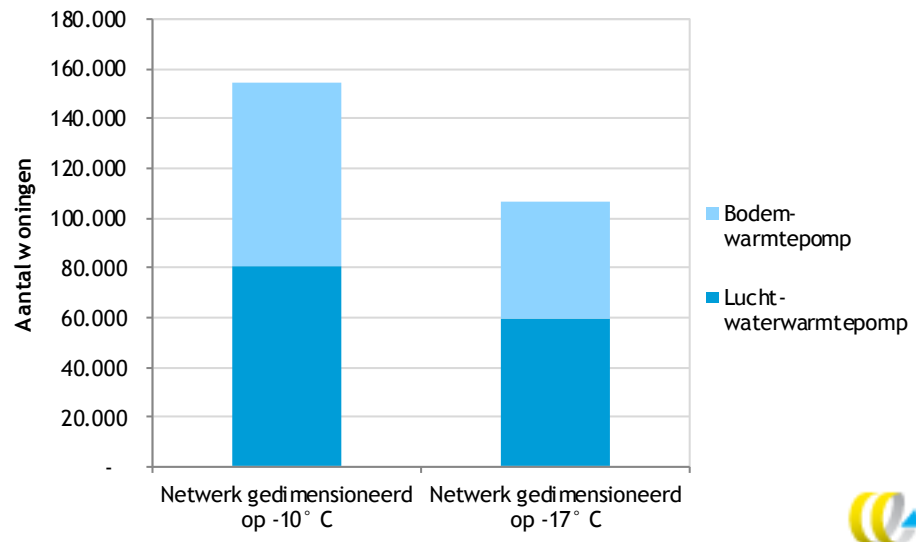


De waarden voor de netverzwaring van de lucht/water warmtepomp bij dimensionering op -17 °C zijn afgeleid uit het rapport De systeemkosten voor warmte voor woningen (Ecofys, 2015). Voor de bodemwarmtepomp is uitgegaan van de waarden zoals genoemd in Paragraaf 2.3, met een gelijktijdigheid van 100%. In Tabel 12 zijn de waarden gegeven van netverzwaring bij dimensionering op -10 °C en -17 °C, waarmee is gerekend in het CEGOIA-model.

Tabel 12 Waarden netverzwaring bij dimensionering op -10 °C en -17 °C

Type warmtepomp	Schillabel	Netverzwaring per woning bij -10 °C (kW _e)	Netverzwaring per woning bij -17 °C (kW _e)
Bron Buitenlucht	A++	1,9	2,3
Bron Buitenlucht	A	4,1	5,7
Bron Buitenlucht	B	7,1	9,2
Bron Bodem	A++	0,5	1,0
Bron Bodem	A	1,1	1,4
Bron Bodem	B	1,7	2,2

Figuur 27 Aantal woningen op all-electric-warmtepomp bij dimensionering op -10°C en -17°C (2050)



In Figuur 27 zijn de resultaten weergegeven van het aantal individuele elektrische warmtepompen in 2050 bij de twee verschillende scenario's. Door de hogere kosten die de netverzwaring bij dimensionering op -17°C met zich meebrengen, zal het aantal individuele elektrische warmtepompen met ongeveer 30% afnemen. Dit is wel significant, maar omdat het totaal aantal woningen op individuele elektrische warmtepomp bij dimensionering op -10°C al laag is in 2050, heeft het op het totale resultaat weinig invloed.

Overigens heeft het toepassen van de -17°C-norm niet alleen gevolgen voor de dimensionering van elektriciteitsnetten, maar ook voor de dimensionering van warmtenetten. Om het huidige comfortniveau van warmtelevering via gasnetten te evenaren zal de capaciteit van warmtenetten aanmerkelijk moeten worden vergroot. Het zal een economische afweging zijn of deze capaciteitsvergroting zal worden gerealiseerd bij de warmtebron inclusief het net of bij de capaciteit van de bijstook, maar duidelijk is dat dit met aanzienlijke kosten gepaard zal gaan.

3.3.4 Hybride warmtepomp

In het eindbeeld in 2050 komen beide typen hybride warmtepompen voor, namelijk de hybride warmtepomp met als bron ventilatielucht en de hybride warmtepomp met als bron buitenlucht. Het aandeel in de totale woningvoorraad is bij de hybride warmtepomp op ventilatielucht 7% en bij de hybride warmtepomp op buitenlucht 5%. In Tabel 13 en Tabel 14 is te zien wat de verdeling is naar schillabel en naar omgevingsadressendichtheid per type hybride warmtepomp.

Tabel 13 Aantal woningen per schillabel per type hybride warmtepomp 2050 (in duizendtallen)

Techniek	A++	A	B	C	D	E	F	G
Hybride warmtepomp (ventilatielucht)	0	0	0	519	0	0	0	0
Hybride warmtepomp (buitenlucht)	0	0	0	0	125	167	118	7

De hybride warmtepomp op ventilatielucht kan slechts worden toegepast indien er ventilatiekanalen aanwezig zijn in de woning (zie Paragraaf 2.1.2).

Om deze reden is ingesteld in het CEGOIA-model dat de woningen minimaal moeten voldoen aan schilisolatie Label C. Door deze instelling komt uit de berekeningen dat de hybride warmtepompen op ventilatielucht alleen het voordeligst is bij woningen met Schil C. Bij woningen met een betere schilisolatie (B t/m A++), is ook de bodemwarmtepomp en de WKO mogelijk, welke een hogere efficiëntie hebben dan de hybride warmtepomp. Om deze reden wordt de hybridewarmtepomp op ventilatielucht in 2050 niet toegepast bij woningen met Schillabel B t/m A++.

De hybride warmtepomp op buitenlucht heeft een wat lagere efficiëntie dan de ventilatiewarmtepomp, waardoor voor woningen met Schil C, de hybride warmtepomp op ventilatielucht goedkoper is dan de warmtepomp die de buitenlucht gebruikt als bron. Voor het toepassen van de hybride warmtepomp op buitenlucht is echter geen ventilatiesysteem nodig in de woning. Deze kan dus ook worden toegepast in woningen met een slechtere isolatieschil. De overall efficiëntie neemt wel af naarmate de woning slechter is geïsoleerd, doordat er meer wordt verwarmd met gas. Bij een slechtere schil zal een groter gedeelte van de tijd de ruimteverwarming moeten worden gedaan met de HR-ketel, omdat de warmtepomp niet voldoende capaciteit heeft om de woning op temperatuur te brengen bij te lage buitentemperaturen.

Tabel 14 Aantal woningen per categorie omgevingsadressendichtheid (OAD) per type hybride warmtepomp (in duizendtallen) (2050)

Techniek	< 500	500-1.000	1.000-1.500	1.500-2.000	2.000-3.000	> 3.000
Hybride warmtepomp (ventilatielucht)	28	115	185	129	56	7
Hybride warmtepomp (buitenlucht)	290	63	27	14	19	5

In Tabel 14 is te zien hoe vaak de hybride warmtepomp in het eindbeeld voorkomt per omgevingsadressendichtheid. Bij de hybride warmtepomp op ventilatielucht is dit voornamelijk in de gebieden met een gemiddelde OAD. Bij zeer dichtbevolkte gebieden zijn andere technieken voordeliger, net als bij zeer dunbevolkte gebieden. De hybride warmtepomp op buitenlucht is juist voordelig in dunbevolkte gebieden en zeer beperkt in dichter bevolkte gebieden.

Tabel 15 Aantal woningen per type woning (gestapeld versus grondgebonden) per type hybride warmtepomp (in duizendtallen)

Techniek	Gestapeld	Grondgebonden
Hybride warmtepomp (ventilatielucht)	78	441
Hybride warmtepomp (buitenlucht)	14	403

In Tabel 15 is een vergelijking gemaakt tussen het aantal hybride warmtepompen in het eindbeeld in stapelde bouw versus grondgebonden bouw. De hybride warmtepomp die gebruik maakt van buitenlucht komt vooral voor in grondgebonden bouw, omdat er een installatie buitenshuis nodig is. Deze wordt vaak op het dak van de woning geplaatst. Gestapelde bouw heeft geen eigen dak, waardoor het niet logisch is een individuele hybride warmtepomp op buitenlucht te gebruiken. Hybride warmtepompen op ventilatielucht kunnen wel worden toegepast in gestapelde bouw. Het aandeel gestapelde bouw is iets groter dan een kwart van het totaal aantal woningen, dus dit verklaart al deels waarom ook de hybride ventilatiewarmtepomp in absolute

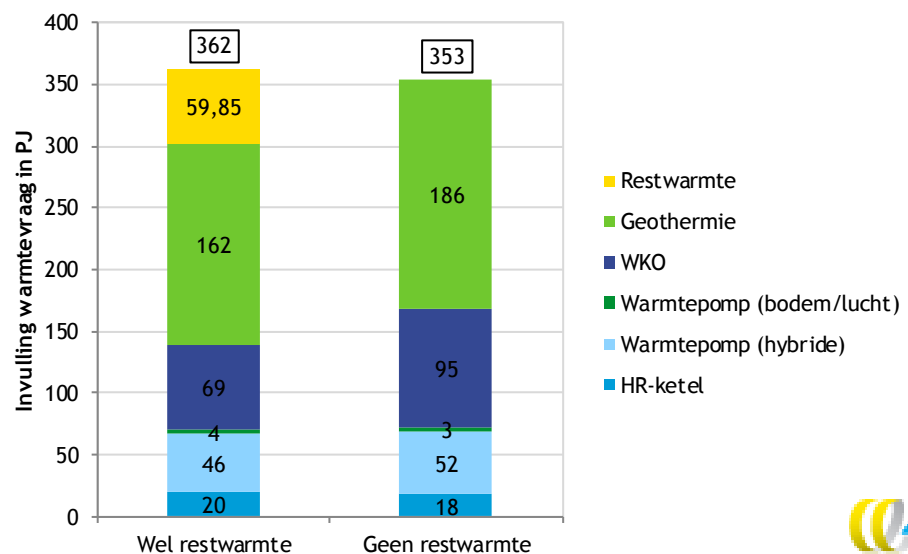


aantal minder wordt toegepast in gestapelde bouw. Daarnaast is de gemiddelde schilisolatie van gestapelde bouw slechter dan dat van grondgebonden bouw. Voor de ventilatiewarmtepomp is minimaal Label C nodig, wat percentueel minder vaak wordt gehaald in gestapelde bouw.

Gevoeligheidsanalyse: Geen restwarmte beschikbaar in 2050

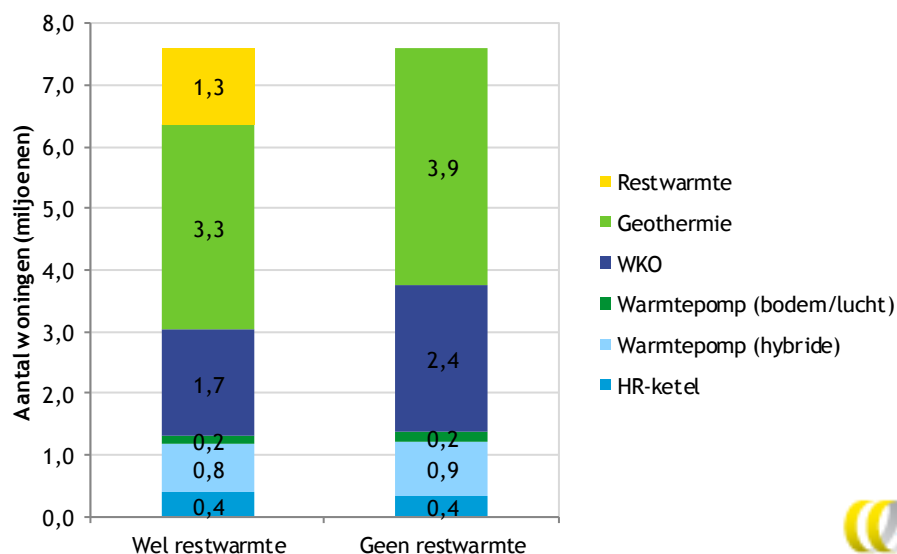
In de defaultberekening is het uitgangspunt dat alle type restwarmtebronnen, behalve raffinaderijen en industrie in de energiesector, in 2050 nog evenveel restwarmte kunnen leveren als hun huidige capaciteit. Het is niet zeker of dit daadwerkelijk zo is. In deze gevoeligheidsanalyse wordt daarom gekeken wat de invloed op de resultaten is wanneer restwarmte helemaal niet beschikbaar is in 2050.

Figuur 28 Invulling warmtevraag per techniek, wel restwarmte mogelijk versus geen restwarmte (2050)



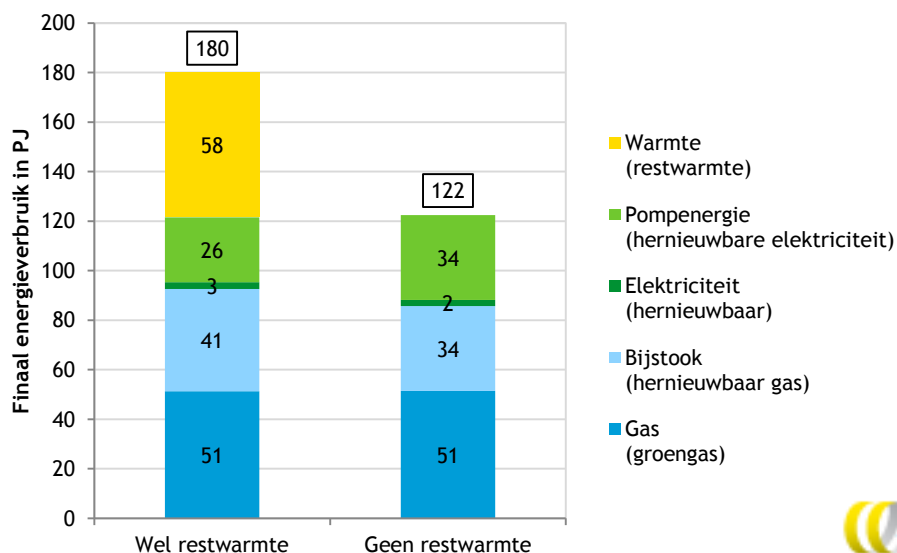
In Figuur 28 zijn de resultaten weergegeven van de invulling van de warmtevraag per techniek. In het scenario zonder restwarmte is uiteraard geen restwarmte mogelijk. Dit wordt voornamelijk vervangen door geothermie en WKO. Ook is het aandeel hybride warmtepompen wat gestegen in dit scenario.

Figuur 29 Aantal woningen per techniek, wel restwarmte mogelijk versus geen restwarmte (2050)



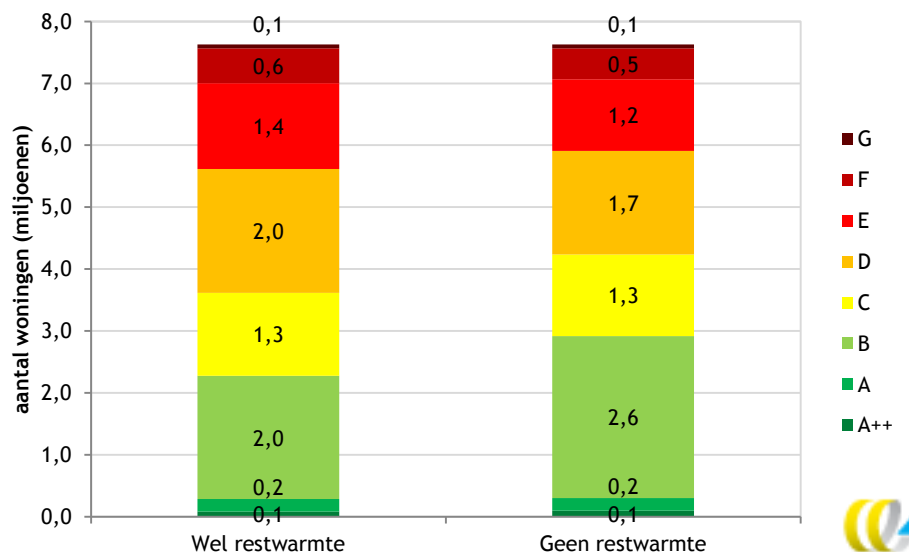
In Figuur 29 is te zien dat het aantal woningen op geothermie en WKO enorm toenemen wanneer er geen restwarmte beschikbaar is in 2050. Ook het aantal woningen met een hybride warmtepomp is hoger. Dit is slechts mogelijk wanneer er meer isolatie wordt toegepast, omdat de totale beschikbare hoeveelheid groen gas al wordt opgebruikt in het scenario dat er wel restwarmte beschikbaar is. Dat er extra isolerende maatregelen worden getroffen wanneer er geen restwarmte beschikbaar is, is te zien in Figuur 31.

Figuur 30 Finale energievraag voor warmte per energiedrager, wel restwarmte mogelijk versus geen restwarmte (2050)



De finale energievraag gaat flink omlaag wanneer er geen restwarmte wordt gebruikt in 2050. Dit komt doordat de restwarmte wordt vervangen door de efficiënte warmtetechnieken geothermie en collectieve WKO.

Figuur 31 Verdeling woningen per schillabel, wel restwarmte mogelijk versus geen restwarmte (2050)

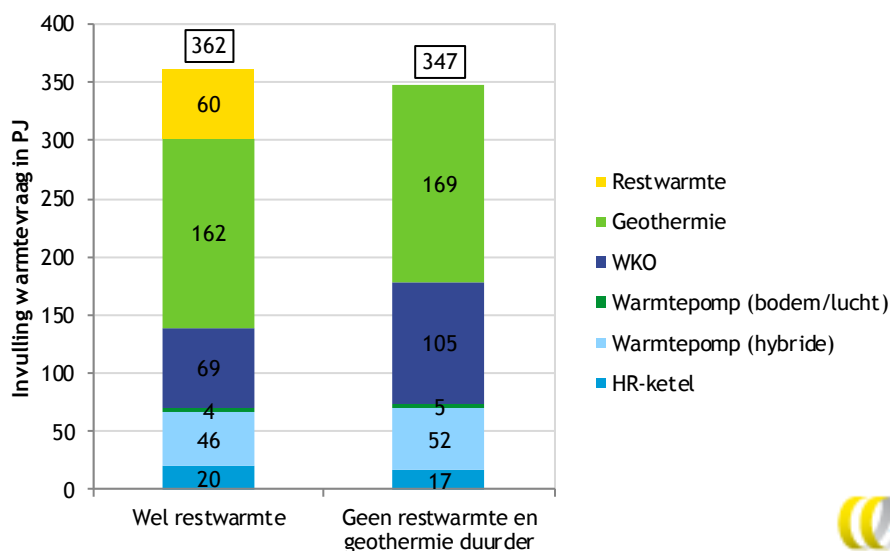


In Figuur 31 zijn de energielabel van woningen weergegeven van beide scenario's. In het scenario zonder restwarmte wordt er meer geïsoleerd. Dit gaat voornamelijk om woningen van Energielabel E en D naar Energielabel B.

Gevoeligheidsanalyse: Geen restwarmte beschikbaar in 2050 en geothermie drie keer zo duur

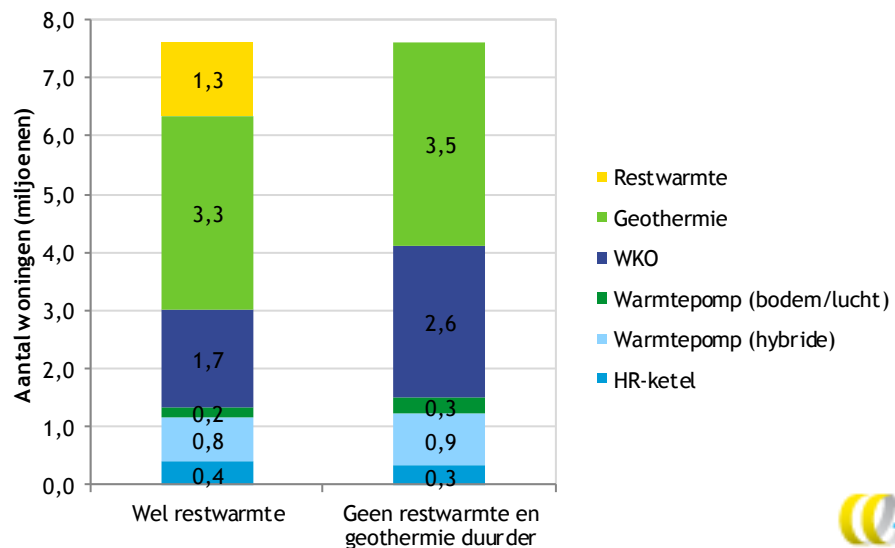
In deze gevoeligheidsanalyse wordt gerekend met het scenario dat er geen restwarmte beschikbaar is en dat tevens geothermie veel duurder wordt. De reden voor deze gevoeligheidsanalyse is dat de kosten van geothermie vaak onzeker zijn. Bij een aantal uitgevoerde projecten zijn de kosten veel hoger uitgevallen dan vooraf begroot. Het is vaak vooraf niet duidelijk of de bodem geschikt is voor geothermie. In de defaultberekeningen wordt gerekend met € 1.875/kW, in de gevoeligheidsanalyse met € 5.625/kW.

Figuur 32 Invulling warmtevraag per techniek, wel restwarmte mogelijk versus geen restwarmte en geothermie drie keer zo duur (2050)



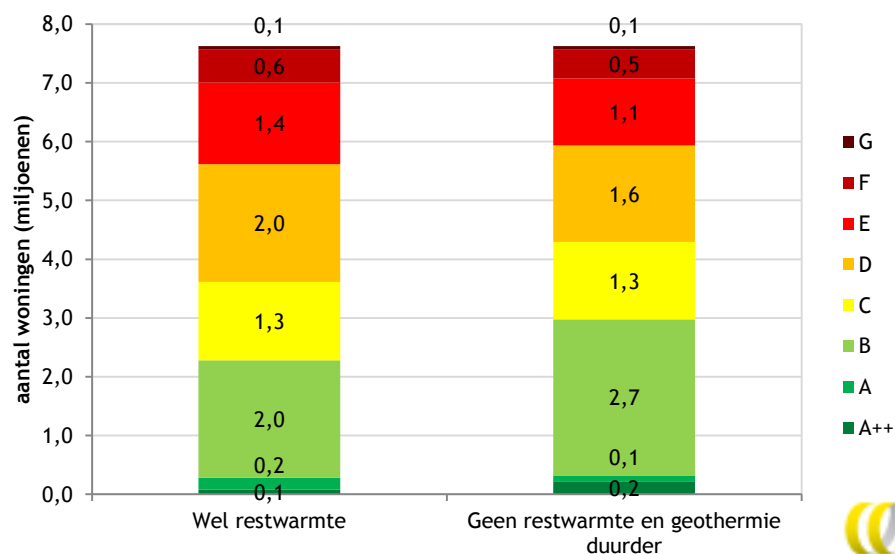
In Figuur 32 is weergegeven hoe de invulling van de restwarmtevraag verandert wanneer er geen restwarmte mogelijk is in 2050 en de kosten voor geothermie drie keer duurder zijn dan in het basisscenario. Door de beperkte beschikbare hoeveelheid groen gas en de hoge kosten voor netverzwaring bij all-electric-opties, wordt de warmtevraag voor geothermie toch iets hoger wanneer er geen restwarmte beschikbaar is. De toename in WKO-systemen is het grootst in dit scenario.

Figuur 33 Aantal woningen per techniek, wel restwarmte mogelijk versus geen restwarmte en geothermie drie keer zo duur (2050)



Het aantal woningen op WKO zal een stuk hoger uitvallen wanneer er geen restwarmte beschikbaar is in 2050 en geothermie veel duurder is. Wat opvalt is dat er toch wat meer woningen op geothermie zullen overschakelen, ondanks dat de prijs veel hoger ligt. De beschikbare hoeveelheid groen gas neemt niet toe en de elektrische warmtepompen zijn nog steeds duur ten opzichte van geothermie. Wél zijn er iets meer woningen op hybride warmtepompen en ook op elektrische warmtepompen. Er kunnen meer woningen gebruik maken van gas doordat er wat meer isolatie zal worden toegepast, zoals te zien is in Figuur 34.

Figuur 34 Verdeling woningen per schillabel, wel restwarmte mogelijk versus geen restwarmte en geothermie drie keer zo duur (2050)

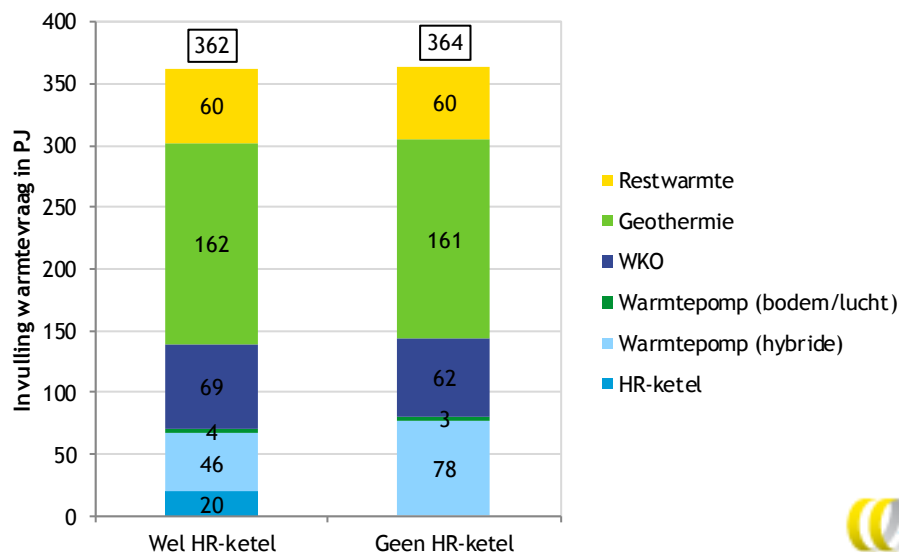


Wanneer restwarmte niet meer beschikbaar is en geothermie drie keer zo duur wordt, is het gunstig om wat isolerende maatregelen te treffen. Dit wordt vooral gedaan voor woningen met Energielabel E en D. Er komen ongeveer 700.000 woningen bij met Energielabel B.

Gevoeligheidsanalyse: Geen HR-ketels mogelijk in 2050

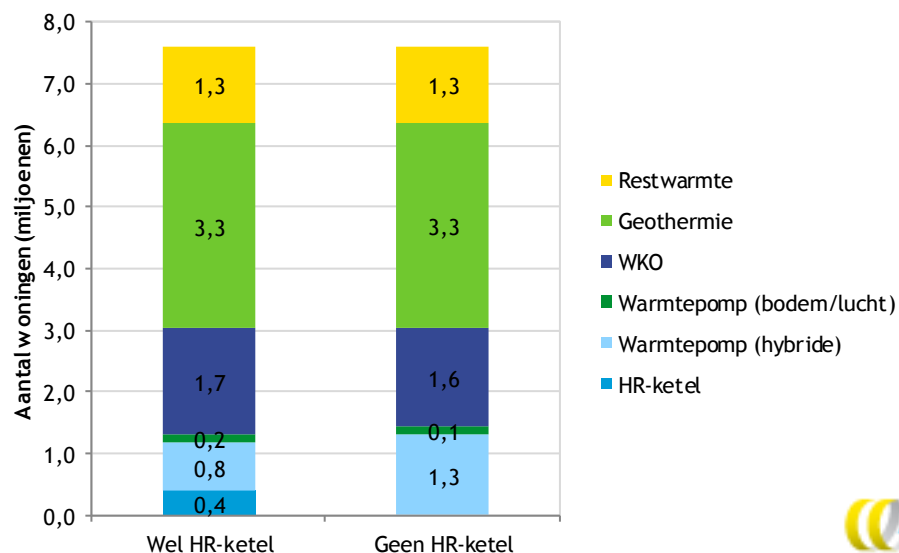
Zoals al eerder aangegeven, wordt de totale beschikbare hoeveelheid groen gas in 2050 verbruikt in het basisscenario. Ook in alle gevoeligheidsanalyses zien we dat al het groen gas wordt verbruikt. Het groen gas wordt gebruikt door enerzijds HR-ketels en anderzijds hybride opties, die tevens elektriciteit gebruiken. Voor de hybride opties is minder gas per woning nodig dan bij woningen met een HR-ketel. Het beschikbare gas wordt op een efficiëntere manier ingezet. Toch komt de HR-ketel er vaak als voordeligst uit in een buurt, waardoor het model hiervoor kiest. Dit betekent echter niet dat de totale kosten voor Nederland het laagst zijn wanneer de HR-ketel veelvuldig wordt ingezet. Bij de inzet van HR-ketels wordt het groene gas namelijk niet op de meest efficiënte manier gebruikt, waardoor er meer buurten moeten overschakelen op een duurdere warmtevoorziening dan wanneer er enkel hybride warmtepompen zouden worden ingezet voor het gebruik van groen gas. Om ervoor te zorgen dat al het beschikbare groen gas efficiënt wordt ingezet, zouden HR-ketels verboden kunnen worden in 2050. In deze gevoeligheidsanalyse wordt bekeken wat het effect hierop zou zijn.

Figuur 35 Invulling warmtevraag per techniek, wel HR-ketels mogelijk versus geen HR-ketels mogelijk (2050)



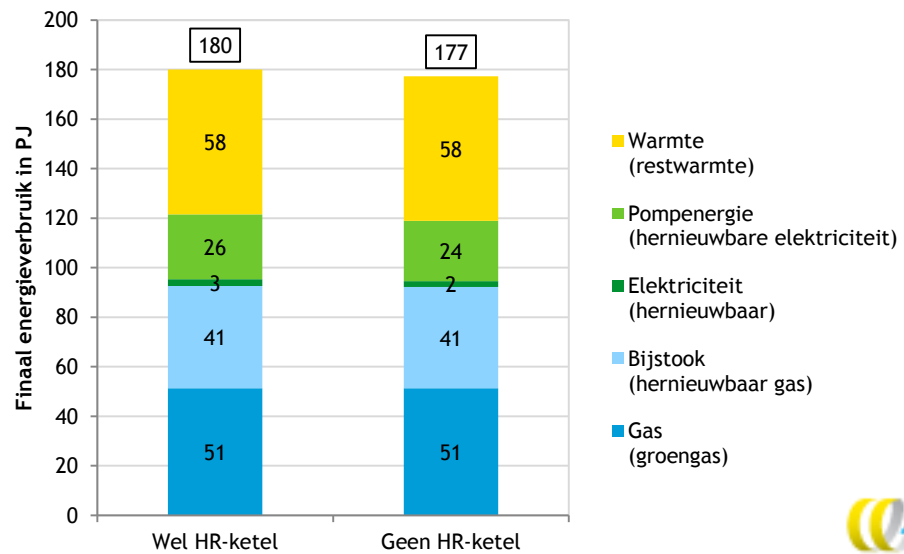
In Figuur 35 is de invulling van de warmtevraag weergegeven in het geval er wel HR-ketels worden toegepast in 2050 en in het geval er geen HR-ketels meer worden toegepast. In dat laatste geval vervalt de warmtevraag van HR-ketels, maar wordt de warmtevraag van hybride warmtepompen groter. Er is een afname waar te nemen in de warmtevraag voor de all-electric-warmtepomp. Het blijkt dat wanneer HR-ketels niet meer mogen worden toegepast in 2050, de kosten van de totale warmtevoorziening in Nederland dalen met 1%.

Figuur 36 Aantal woningen per techniek, wel HR-ketels mogelijk versus geen HR-ketels mogelijk (2050)



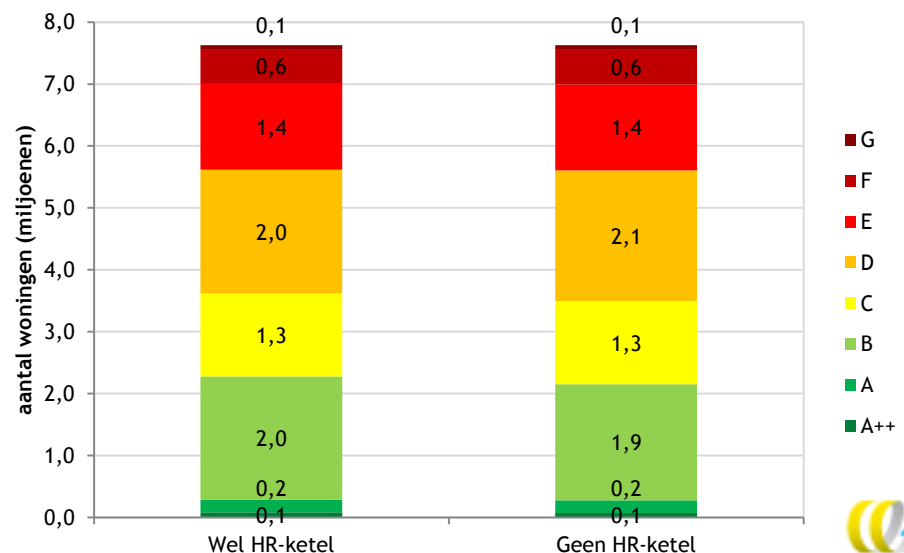
Als we kijken naar het aantal woningen, zien we in Figuur 36 dat het aantal woningen met hybride warmtepomp ook toeneemt en dat het aantal woningen met een all-electric-warmtepomp afneemt.

Figuur 37 Finale energievraag voor warmte per energiedrager, wel HR-ketels mogelijk versus geen HR-ketels mogelijk (2050)



In Figuur 37 is te zien wat er gebeurt met de finale energievraag wanneer de HR-ketel in 2050 geen optie meer is. Nog steeds wordt de totale beschikbare hoeveelheid groen gas verbruikt. De finale energievraag is in totaal iets lager, doordat de hybride warmtepomp efficiënter is dan de HR-ketel. Verder is te zien dat de elektriciteit voor de all-electric-warmtepomp en de pompenergie voor de WKO-systemen iets is gedaald.

Figuur 38 Verdeling woningen per schillabel, wel HR-ketels mogelijk versus geen HR-ketels mogelijk (2050)

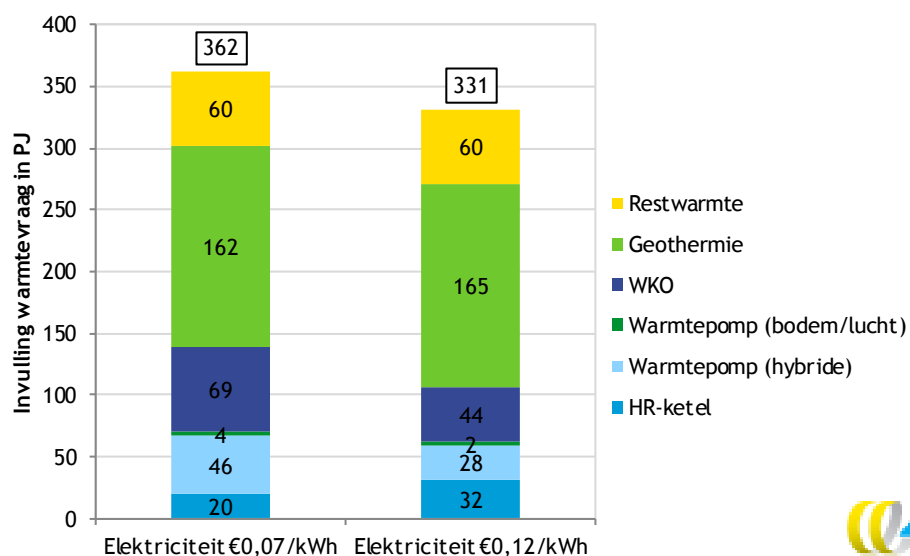


In Figuur 38 is te zien dat er geen significante verschuiving plaatsvindt in de schillabels wanneer er geen HR-ketels meer beschikbaar zouden zijn in 2050 ten opzichte van het basisscenario.

Gevoeligheidsanalyse: Hogere prijs elektriciteit in 2050

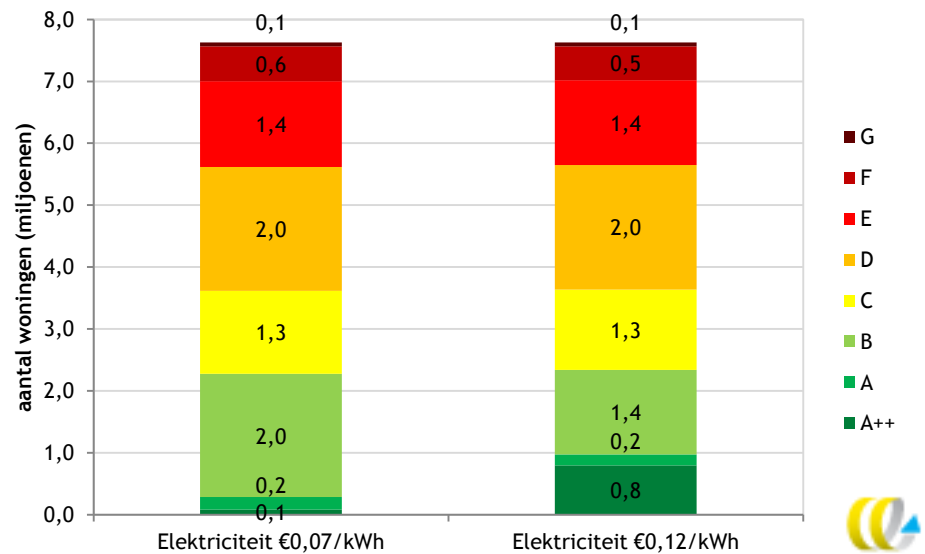
In de defaultberekeningen is de prijs van gas verhoogd van € 0,32/m³ naar € 0,75/m³, doordat het aardgas wordt vervangen door groen gas. De elektriciteitsprijs is niet verhoogd van 2016 naar 2050 toe, hoewel de opwekking ervan wel naar klimaatneutraal moet. Dit kan gepaard gaan met een prijsverhoging, hoewel hier veel onzekerheid over is. In deze gevoeligheidsanalyse wordt gekeken naar de invloed van een prijsstijging van elektriciteit van 70 euro/MWh naar 120 euro/MWh. In het toekomstdocument Welvaart en Leefomgeving van het PBL en CPB wordt als 'scenario hoog' uitgegaan van een groothandelsprijs voor elektriciteit van 100 euro/MWh (CPB/PBL, 2016). De prijzen van kleinegebruikers liggen hier iets boven. Voor deze studie is daarom een scenario van 120 euro/MWh aangehouden.

Figuur 39 Invulling warmtevraag per techniek, prijs elektriciteit € 0,07/kWh versus € 0,12/kWh



Bij een verhoging van de elektriciteitsprijs van € 0,07/kWh naar € 0,12/kWh, wordt de warmtevraag lager. In Figuur 39 is te zien dat de warmtevraag voor de technieken die gebruikmaken van elektriciteit minder is bij een hogere elektriciteitsprijs.

Figuur 40 Verdeling woningen per schillabel, prijs elektriciteit € 0,07/kWh versus € 0,12/kWh



In Figuur 40 zijn de energielabels van de woningen weergegeven in 2050 bij beide prijsscenario's voor elektriciteit. Bij een hogere elektriciteitsprijs is het aantal woningen met Schillabel A++ veel hoger dan bij een lagere elektriciteitsprijs. In dit scenario wegen de kosten van het isoleren dus op tegen de besparing die wordt bereikt op de energierekening.

4 Routes naar eindbeeld

4.1 Methodiek

Voor de route naar klimaatneutraal worden de volgende aspecten meegenomen in de modelberekening:

- **Prijsveranderingen van 2016 naar 2050**

Voor elk kostenkengetal dat wordt gebruikt in het model, is bepaald of dit snel of langzaam zal dalen in de tijd. Bij kosten voor technieken die nog volop in ontwikkeling zijn, wordt verwacht dat er een sterke kostendaling zal plaatsvinden richting 2050. Voor technieken die al lange tijd in gebruik zijn, wordt een minder scherpe kostendaling aangenomen (zie Bijlage F.1).

- **Afnemende beschikbaarheid capaciteit restwarmtebronnen**

In de modelberekeningen wordt de capaciteit van alle restwarmtebronnen van Nederland meegenomen als zijnde beschikbaar voor de woningbouw. Voor een aantal type restwarmtebronnen is het aannemelijk dat deze niet meer bestaat in 2050. Het gaat hierbij voornamelijk om bronnen in de energiesector, zie Bijlage E.2.7.

- **Beschikbaarheid groen gas**

In de berekening wordt ervan uitgegaan dat de beschikbaarheid van groen gas voor woningen lineair toeneemt tot 1,5 bcm in 2050. Voor 2016 gaat het model voor de gasvoorziening uit van 100% aardgas met de bijbehorende prijs. In 2050 is compleet overgeschakeld op groen gas. In het pad naar 2050 toe lopen de kosten van gas lineair op, omdat een steeds groter deel van de invulling van de gasvoorziening wordt gedaan met groen gas.

- **Niet twee keer overschakelen van infrastructuur**

Indien in de route naar 2050 een buurt eenmaal is overgeschakeld naar een andere infrastructuur (van gas naar all-electric of van gas naar warmte-net), zal deze buurt tot en met 2050 op dit type infrastructuur blijven. Het is in het model niet mogelijk nogmaals van warmtevoorziening te wisselen in het pad naar 2050 toe.

- **Behaalde isolatieniveau blijft behouden**

Indien het in een buurt in het pad naar 2050 toe voordelig is om isolerende maatregelen aan te brengen, is het modelmatig niet mogelijk deze maatregelen weer teniet te doen in een later jaar. Het minimaal behaalde isolatieniveau blijft behouden.

- **Geen amoveringskosten buurten brosse leidingen**

In de gebieden van Stedin en Enexis is bekend wat het aandeel brosse leidingen (leidingen gemaakt van grijs gietijzer of asbestcement) is per buurt. Bij deze buurten gaat het model ervan uit dat de leidingen in ieder geval moeten vervangen. Om deze reden worden er in het model na 2016 geen amoveringskosten gerekend voor buurten met een groot aandeel brosse leidingen, zie Bijlage E.

Met bovenstaande ontwikkelingen in de tijd zijn er per tijdsstap andere uitgangspunten voor de berekening, waardoor de uitkomsten per tijdsstap ook verschillen. Door de uitgangspunten niet nogmaals te schakelen naar een andere infrastructuur en het behaalde isolatieniveau te behouden, ontstaat een solide route richting klimaatneutraal. In dit hoofdstuk worden de resultaten van deze route gepresenteerd.



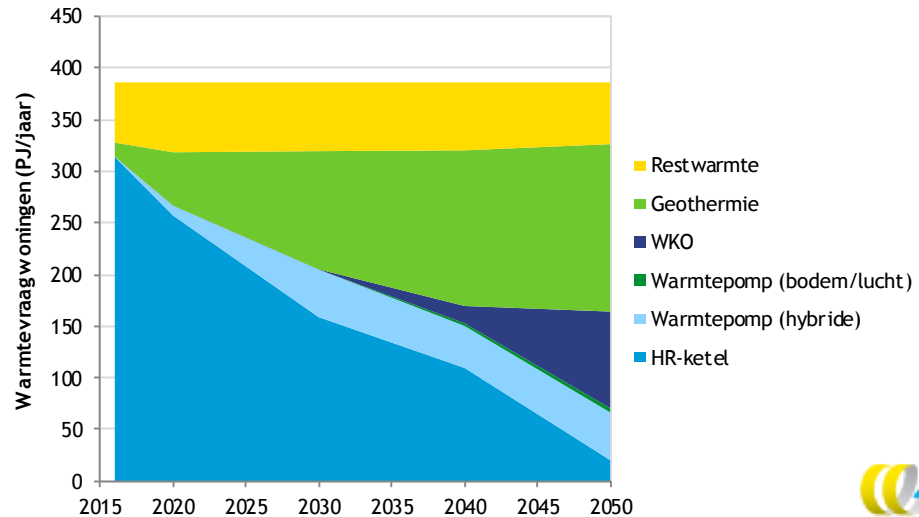
De resultaten van 2016 geven weer wat de voordeligste optie is volgens het model. Dit kan afwijken van de huidige situatie. Het is niet voor alle technieken mogelijk om deze binnen een paar jaar uit te rollen. Voor geothermie kost het traject van proefboring tot het daadwerkelijk aansluiten van woningen bijvoorbeeld minimaal een jaar of vijf. Ook voor restwarmteopties moet veel worden geregeld voordat woningen daadwerkelijk zijn aangesloten. Dit wordt niet meegenomen in de weergave van resultaten, waarin enkel te zien is welke opties op welk moment het meest kosten-efficiënt zijn.

4.2 Resultaten

In Figuur 41 is de route naar klimaatneutraal weergegeven aan de hand van de energievraag voor warmte per energiedrager. De warmtevraag neemt af van 386 PJ/jaar in 2016 tot 362 PJ/jaar in 2050. Dit betekent dat de afname van warmtevraag gering is en het kostentechnisch dus niet gunstig is om veel isolerende maatregelen te nemen. De finale energievraag (zie Figuur 42) neemt echter wel flink af, van zo'n 420 PJ/jaar in 2016 naar 230 PJ/jaar in 2050. De reden hiervoor is dat er veel gebruik wordt gemaakt van warmtetechnieken met een hoog rendement.

Het gasverbruik is 11 bcm in 2016, inclusief bijstook voor restwarmte en geothermie. In 2050 is het gasverbruik voor de woningen met technieken op gas 1,5 bcm en de gasbijstook 1,0 bcm, waarmee het totale gasverbruik voor verwarming van woningen 2,5 bcm per jaar is. Dit is te zien in Figuur 42, uitgedrukt in PJ/jaar. De gestippelde lijn geeft het aandeel groen gas aan in het gasverbruik voor de individuele warmteopties op gas. Zie ook Tabel 16.

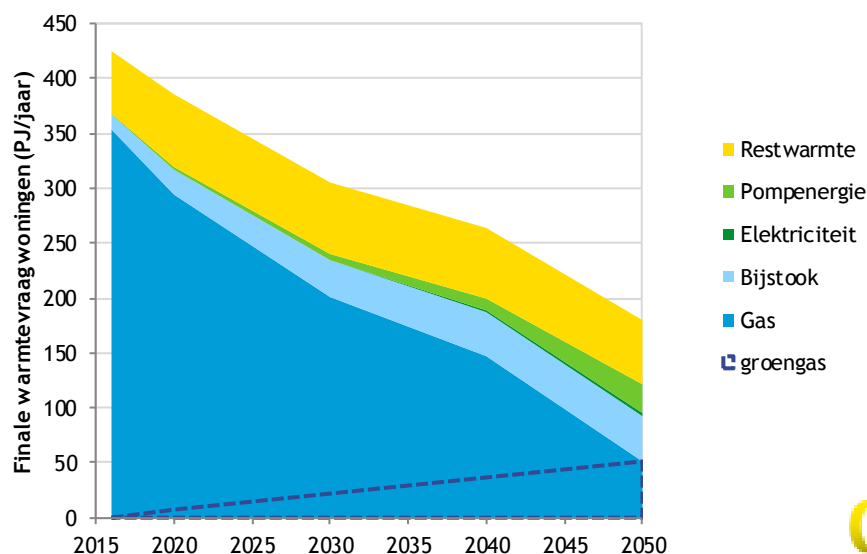
Figuur 41 Invulling warmtevraag per techniek (2016-2050)



Tabel 16 Finale energievraag voor warmte van woningen per energiedrager (2016-2050) in PJ/jaar

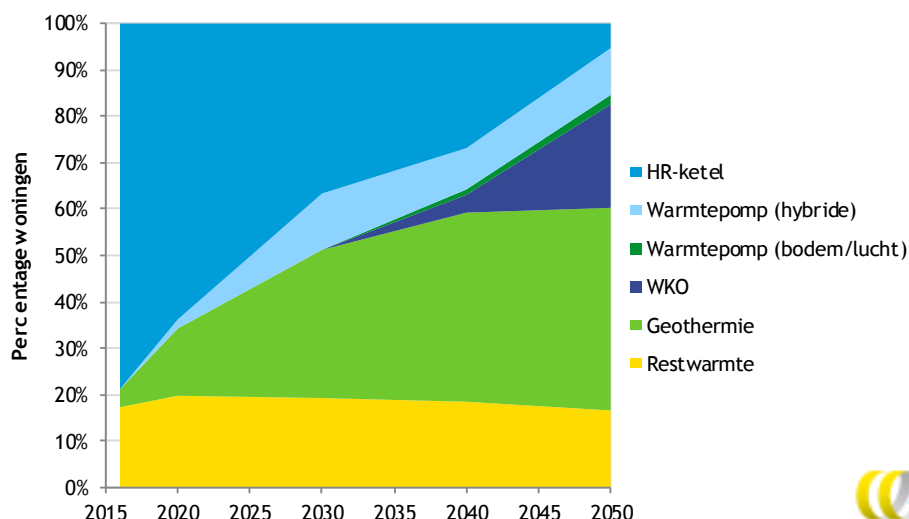
	2016	2020	2030	2040	2050
Aardgas	367	304	195	121	-
Groen gas	-	7	22	37	51
Hernieuwbaar gas	-	6	18	29	41
Conventionele elektriciteit	1	2	3	4	-
Hernieuwbare elektriciteit	0	0	2	9	29
Restwarmte	57	66	65	64	58

Figuur 42 Finale energievraag voor warmte van woningen per energiedrager (2016-2050)



In Figuur 43 is het percentage woningen per techniek weergegeven in de route naar klimaatneutraal. In 2016 is de goedkoopste techniek in 80% van de woningen nog de HR-ketel op aardgas. Naar 2050 toe zal het aardgas worden vervangen door groen gas, waarvan de beschikbaarheid beperkt is. Door deze beperktere beschikbaarheid, zullen andere warmteopties de gasopties vervangen. Restwarmte is de enige techniek die financieel gezien in 2016 al kan concurreren met de HR-ketel op aardgas. Geothermie wordt geleidelijk aan een gunstige optie. Individuele elektrische warmtepompen en/of collectieve WKO-systemen zijn pas vanaf 2030 concurrerend met de andere techniekopties. Hybride warmtepompen zorgen vanaf 2020 voor een klein deel van de woningen voor warmte. Het aandeel hybride warmtepompen neemt tot 2030 toe en blijft tot 2050 ongeveer gelijk.

Figuur 43 Percentage woningen per techniek (2016-2050)



4.3 Toelichting resultaten

4.3.1 Klimaatneutrale warmtevoorziening woningen

In deze studie wordt ervan uitgegaan dat de warmtevoorziening van de woningen in 2050 klimaatneutraal is. Hierbij is de aanname dat de elektriciteitsvoorziening verduurzaamt tot de CO₂-emissies nul zijn in 2050 en dat het aardgas wordt vervangen door groen gas, dat ook geen CO₂-uitstoot veroorzaakt. Het richtjaar 2050 is gekozen, omdat dit in lijn ligt met de Europese doelen. Wanneer het richtjaar naar voren wordt gehaald, zal er uiteindelijk meer CO₂ worden bespaard. In de volgende gevoeligheidsanalyse wordt gekeken wat het betekent voor de route naar klimaatneutraal, wanneer niet in 2050, maar in 2040, de warmtevoorziening van de Nederlandse woningen klimaatneutraal is.

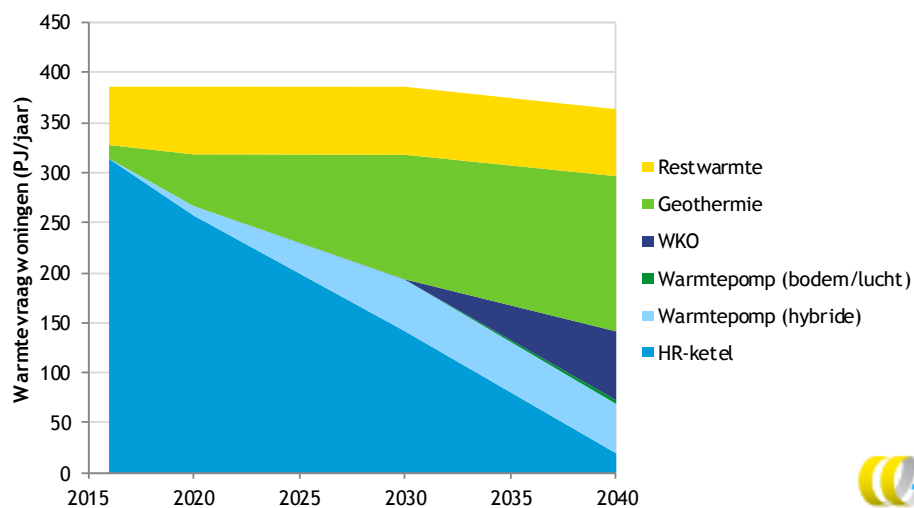
Gevoeligheidsanalyse: Klimaatneutraal in 2040 i.p.v. in 2050

Voor deze gevoeligheidsanalyse zijn de volgende uitgangspunten aangehouden:

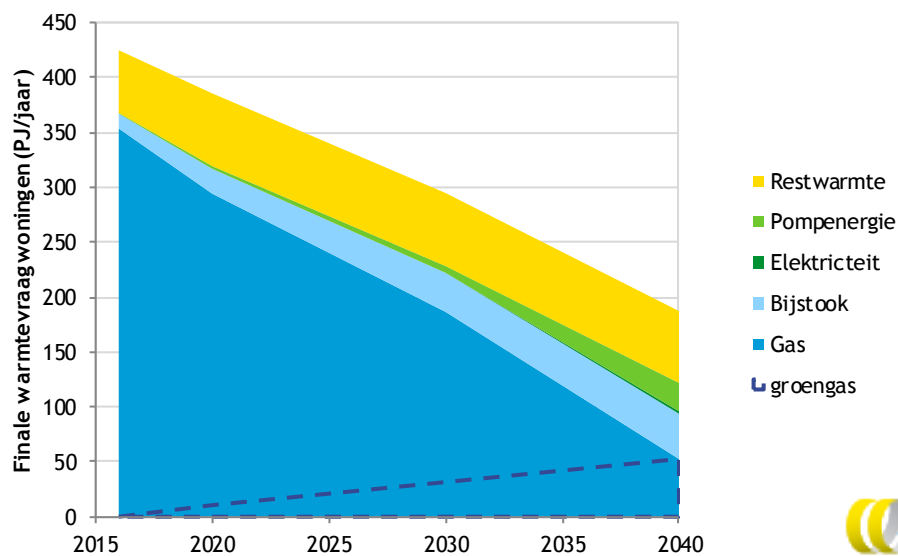
- prijsniveaus 2040;
- geen aardgas;
- beschikbaarheid groen gas 1,5 bcm voor woningen;
- elektriciteit is volledig klimaatneutraal in 2040.

In Figuur 44 zijn de resultaten weergegeven van de invulling van de warmtevraag per techniek. Figuur 45 geeft de finale energievraag voor warmte per energiedrager weer in de route naar klimaatneutraal. Het beeld lijkt op dat van de route naar 2050, maar de energievraag voor warmte loopt steiler af. De verdeling naar warmtetechnieken komt ook redelijk overeen. Er is een kortere weg naar klimaatneutraal, waardoor de WKO-systemen, die geen gas nodig hebben, eerder een rol zullen gaan spelen in de warmtevoorziening van woningen.

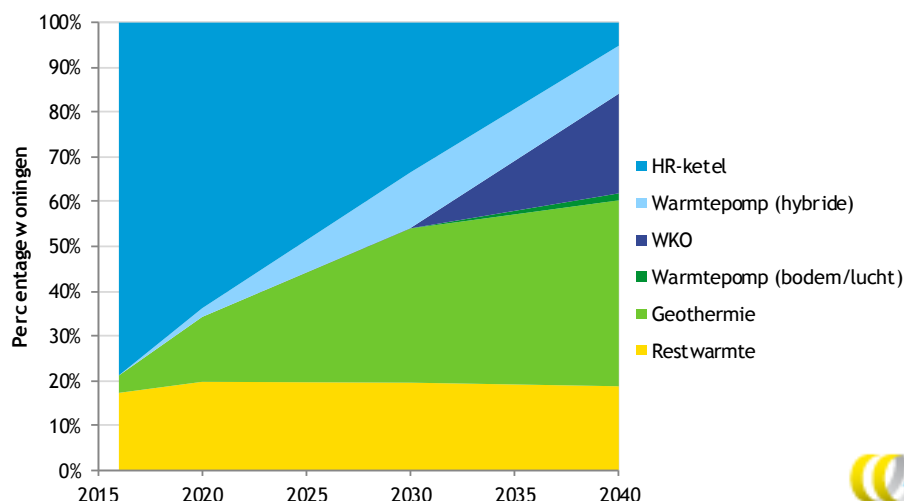
Figuur 44 Invulling warmtevraag per techniek (2016-2040)



Figuur 45 Finale energievraag voor warmte woningen per energiedrager bij klimaatneutraal in 2040 (2016-2040)



Figuur 46 Percentage woningen per techniek bij klimaatneutraal 2040 (2016-2040)



4.3.2 CO₂-afname

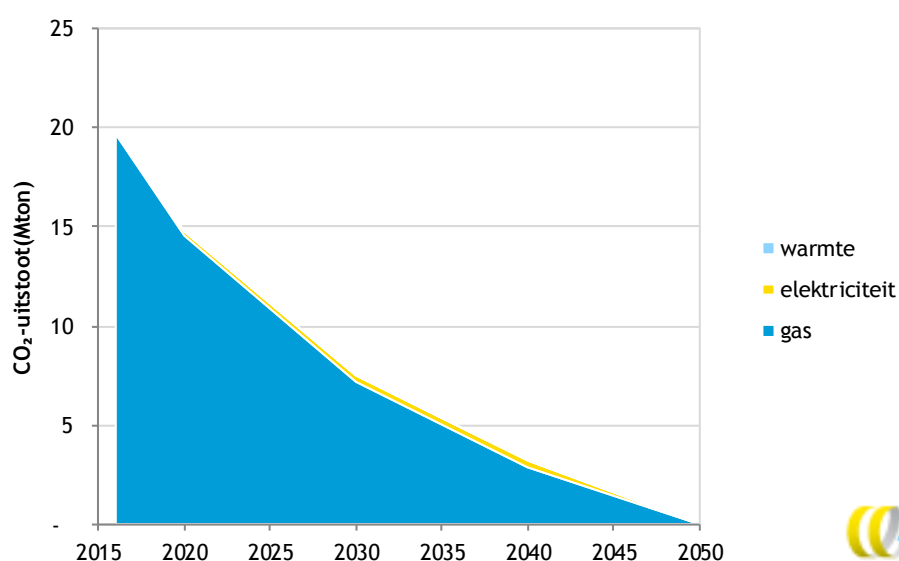
De CO₂-afname in de tijd wordt bepaald door emissiefactoren toe te kennen aan de verschillende energiedragers. Voor dit onderzoek gaan we uit van de waarden zoals weergegeven in Tabel 17.

Tabel 17 Emissiefactoren

CO ₂ -uitstoot	2016	2020	2030	2040	2050	Eenheid
Gasmix	53,57	45,92	30,61	15,31	0,00	kg/GJ
Elektriciteitmix	98,61	84,52	56,35	28,17	0,00	kg/GJ
Restwarmte	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	kg/GJ

Met deze emissiefactor loopt de CO₂-uitstoot van de woningbouw af zoals weergegeven in Figuur 47.

Figuur 47 Totale CO₂-uitstoot woningbouw (2016-2050)



4.3.3 Rol hybride warmtepomp

In de route naar klimaatneutraal kan de hybride warmtepomp een rol vervullen. Door van deze techniek gebruik te maken is er minder gas nodig dan bij een HR-ketel, terwijl de infrastructuur niet hoeft te worden aangepast. Er is elektriciteit nodig voor de hybride warmtepomp. Indien gas duurder wordt en de beschikbaarheid afneemt, wordt het gunstig om de hybride warmtepomp toe te passen. In Tabel 18 zijn de aantallen woningen (in duizendtallen) weergegeven in de route naar klimaatneutraal. Wat opvalt is dat het in 2016 nog voor geen van beide types hybride warmtepomp financieel gunstig is deze in te zetten ter vervanging van de HR-ketel. De reden hiervoor is dat aardgas in Nederland goedkoop is ten opzichte van elektriciteit. Door een deel van het gasverbruik te vervangen door elektriciteitsverbruik, wordt geen financiële besparing behaald. Om de aanschaf van hybride warmtepompen te stimuleren, is er momenteel wel een subsidie beschikbaar in Nederland van € 1.000 tot € 1.500. Naarmate het gas duurder wordt, is het wel gunstig een hybride warmtepomp in te zetten. Ook wanneer de overheid besluit de belasting op gas te verhogen, zal het snel gunstiger zijn met een hybride warmtepomp te verwarmen ten opzichte van met een HR-ketel.

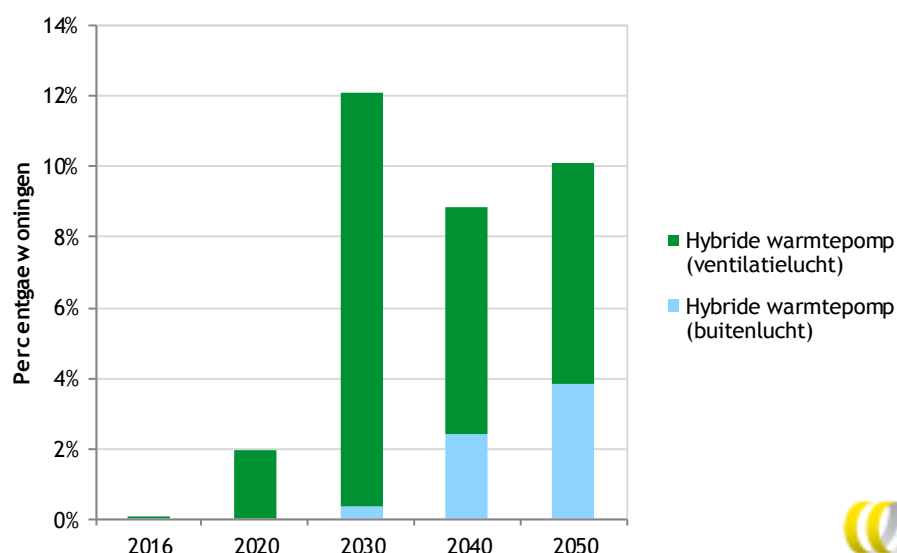
Tabel 18 Aantal woningen met als warmtetechniek een hybride warmtepomp (in duizendtallen)

Type warmtepomp	2016	2020	2030	2040	2050
Hybride warmtepomp (ventilatielucht)	0	150	900	490	480
Hybride warmtepomp (buitenlucht)	0	0	30	180	290

Tabel 19 Percentage woningen met als warmtetechniek een hybride warmtepomp

Type warmtepomp	2016	2020	2030	2040	2050
Hybride warmtepomp (ventilatielucht)	0%	2%	12%	6%	6%
Hybride warmtepomp (buitenlucht)	0%	0%	0%	2%	4%

Figuur 48 Percentage woningen per type hybride warmtepomp (2016-2050)



5 Bibliografie

Berenschot, 2016. *Flex-potentieel hybride warmtepomp*, Utrecht: Berenschot Groep B.V., BDH, DNV GL.

CE Delft, 2014. Scenario-ontwikkeling energievoorziening 2030. In: Delft: CE Delft, p. 183.

CE Delft, 2015. *Op weg naar een klimaatneutrale gebouwde omgeving 2050*, Delft: CE Delft.

CPB/PBL, 2016. *Klimaat en Energie. Achtergronddocument. WLO - Welvaart en Leefomgeving. Toekomstverkenning 2030 en 2050*, Den Haag: Centraal Planbureau en Planbureau voor de Leefomgeving.

Ecofys, 2015. *De systeemkosten van warmte voor woningen*, Utrecht: Ecofys.

Gasunie, 2016. *De rol van gas en Gasunie in de duurzame energievoorziening*, Groningen: N.V. Nederlandse Gasunie.

Groen Gas Forum, 2014. *Routekaart hernieuwbaar gas*, s.i.: De Gemeeynt, ECN, Groen Gas Nederland, RVO.

Kiwa, 2012. *Waterstof in aardgas op Ameland*, Apeldoorn: Kiwa NV.

Majcen, D., 2016. *Predicting energy consumption and savings in the housing stock*, Delft: TU Delft.

Ministerie van BZK, 2012. *Convenant energiebesparing huursector*. Den Haag: Rijksoverheid.

Rijksoverheid, 2006. Besluit leveringszekerheid Gaswet. In: *Artikel 2.1*. Den Haag: Rijksoverheid.

Stroomversnelling, 2015. *Definities Nul op de meter*. [Online] Available at: <http://energieling.nl/resources/915041> [Geopend mei 2016].

Stroomversnelling, 2016. *Persoonlijke communicatie met Ivo Opstelten*. Utrecht: sn.

Wever, N., 2008. *Effectieve temperatuur en graaddagen. Klimatologie en klimaatscenario's*, De Bilt: KNMI publicatie 219.

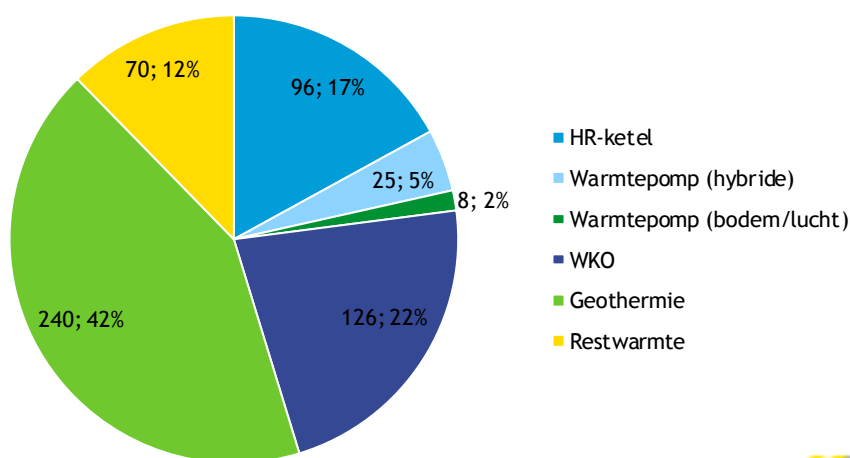
Woningborg, 2010. *Aanvullende garantie verwarmingsinstallatie, ventilatie en installatiegeluid*, sl: sn.



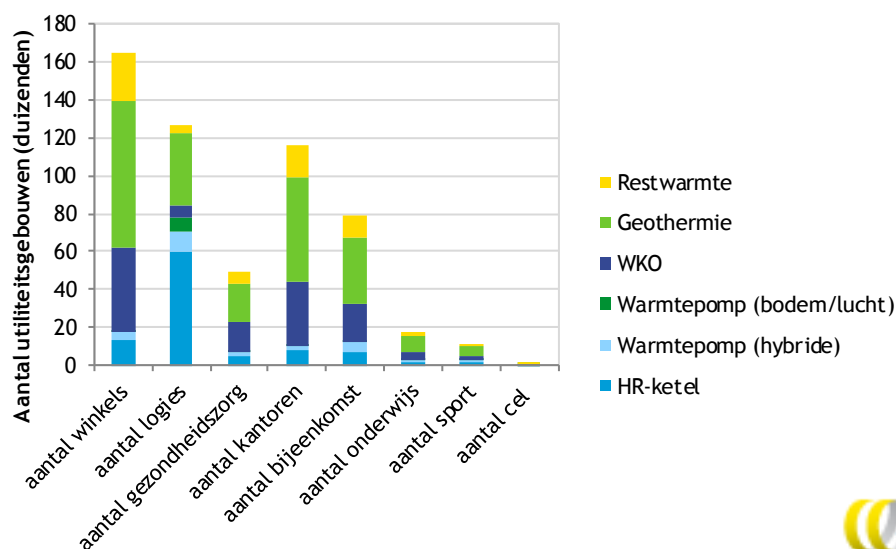
Bijlage A Resultaten utiliteit en woningbouw samen

Het CEGOIA-model kan ook berekeningen maken waarbij zowel de aanwezige utiliteit als de woningen in een buurt worden meegenomen. De combinatie van deze twee kan resulteren in andere uitkomsten dan de resultaten bij het alleen meenemen van de woningbouw. In deze bijlage worden de resultaten van de utiliteit en woningbouw samen gepresenteerd, met daarbij ook een vergelijking tussen de resultaten waarin enkel woningbouw is meegenomen (zoals in het hoofdrapport).

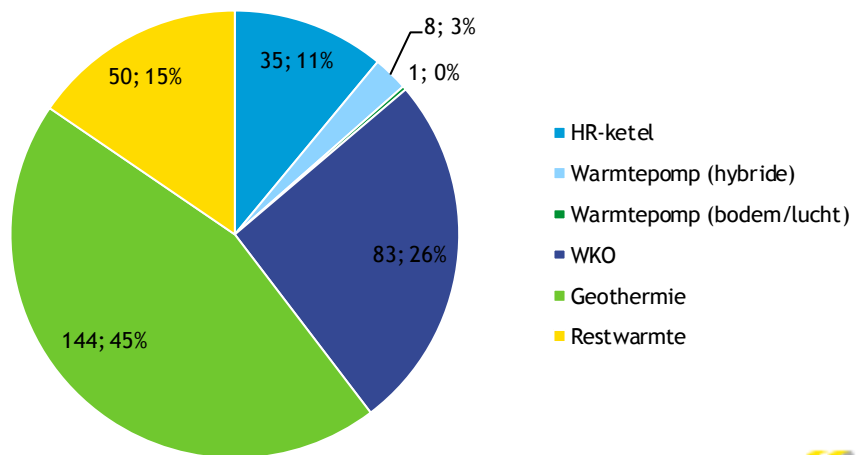
Figuur 49 Aantal utiliteitsgebouwen per techniek (duizenden)



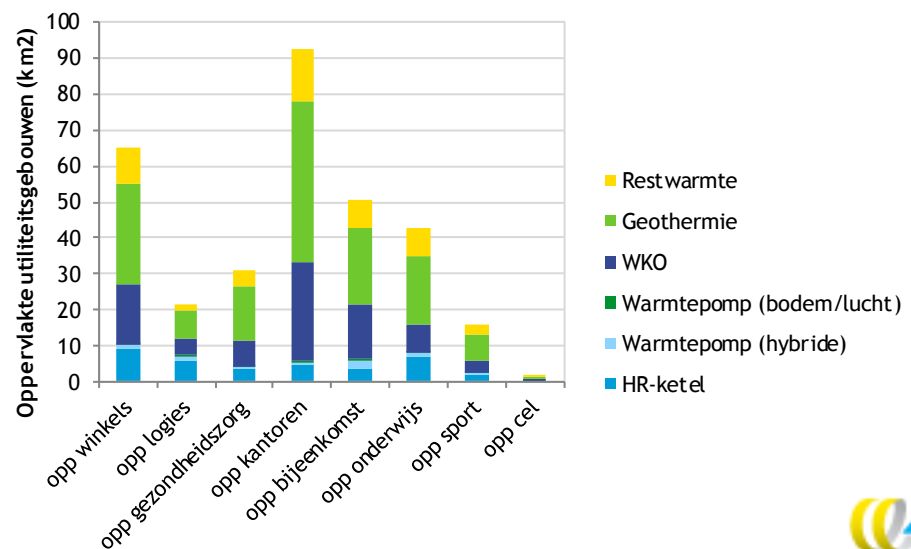
Figuur 50 Aantal utiliteitsgebouwen per techniek en functie (duizenden)



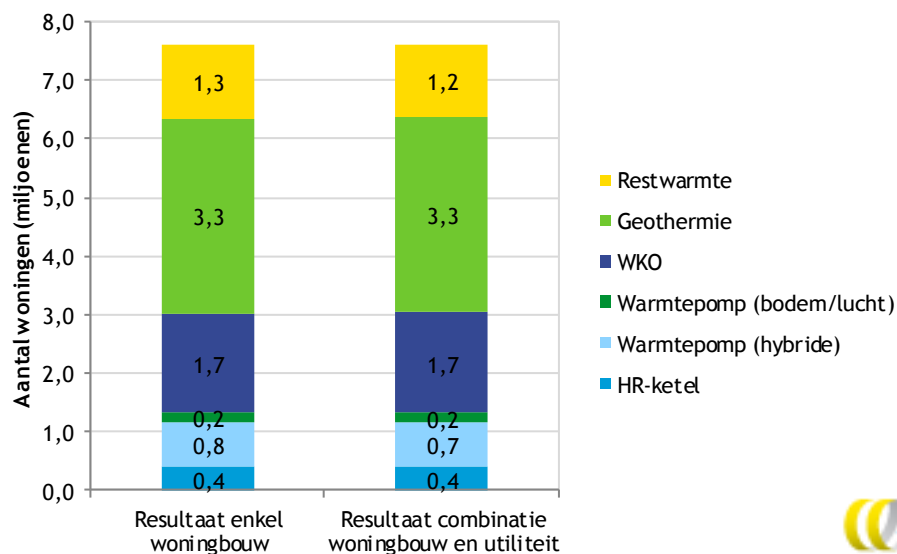
Figuur 51 Oppervlakte utiliteit per techniek (km²)



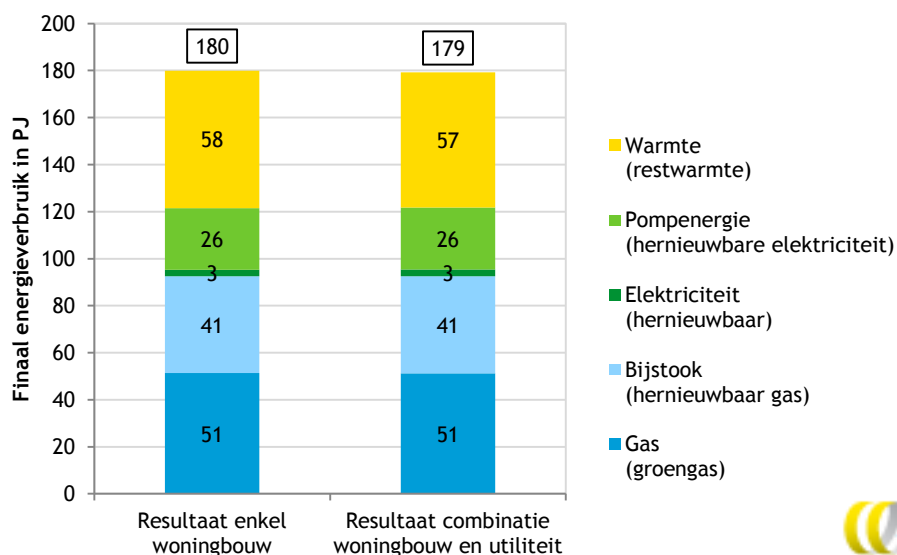
Figuur 52 Oppervlakte utiliteitsgebouwen per techniek per functie (km²)



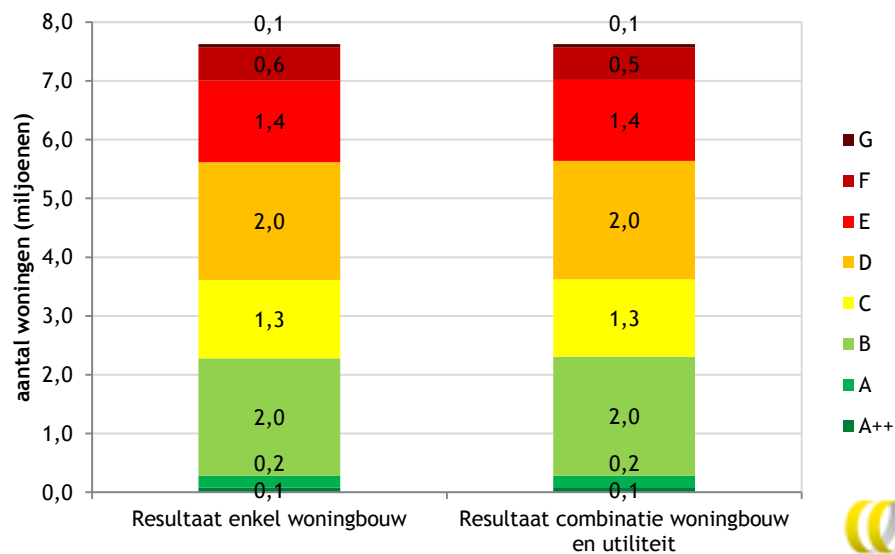
Figuur 53 Aantal woningen per techniek bij berekeningen met enkel woningbouw versus de combinatie woningbouw en utiliteit



Figuur 54 Invulling warmtevraag per techniek bij berekeningen woningbouw versus de combinatie woningbouw en utiliteit



Figuur 55 Aantal woningen per schillabel bij berekeningen woningbouw versus de combinatie woningbouw en utiliteit



Bijlage B Verschil resultaten eerdere studie

B.1 Uitkomsten eerdere studie

In de studie 'Op weg naar een klimaatneutrale gebouwde omgeving 2015' zijn berekeningen gemaakt per buurttype. De belangrijkste kenmerken van deze buurten zijn weergegeven in Tabel 20. De resultaten, weergegeven in Tabel 21, laten zien dat de financieel meest voordelige keuze van de toekomstige warmtevoorziening afhangt van buurtspecifieke kenmerken. De uitkomst is dan ook verschillend per type buurt en er zijn meerdere typen energiedragers nodig om aan de totale energievraag voor warmte te voldoen. De invulling van de totale energievraag voor warmte bij een groen gasprijs van € 0,85 per m³, inclusief beschikbaarheid restwarmte/geothermie en zonder belastingen per type energiedrager, is weergegeven in Tabel 22.

Tabel 20 Gebiedsindeling studie 'Op weg naar een klimaatneutrale gebouwde omgeving'

Buurt-type	Gebied	Bouwjaar	Stedelijkheid
1	Oude binnensteden	<1900	1 en 2
2	1e ringen, hoogstedelijk	1900-1945	1 en 2
3	Wederopbouw, hoogstedelijk	1945-1965	1 en 2
4	Wederopbouw, matig stedelijk	1945-1965	3
5	Wederopbouw, suburbaan	1945-1965	4
6	Bloemkoolwijk, hoogstedelijk, wonen	1965-1990	1 en 2
7	Bloemkoolwijk, hoogstedelijk, wonen & utiliteit	1965-1990	1 en 2
8	Bloemkoolwijk, matig stedelijk	1965-1990	3
9	Bloemkoolwijk, suburbaan	1965-1990	4
10	Kantorenpark	Verskillend	
11	Recente nieuwbouw, hoogstedelijk en matig stedelijk	1990-2010	1, 2 en 3
12	Recente nieuwbouw, suburbaan en niet stedelijk	1990-2010	4 en 5
13	Dorpskernen	< 1945	3,4
14	Niet-stedelijk gebied	< 1990	5
15	Overig	Verskillend	

Tabel 21 Goedkoopste klimaatneutrale oplossing per buurt (studie 'Op weg naar een klimaatneutrale gebouwde omgeving')

Buurt-type	Gebied	Goedkoopste energiedrager 2050
1	Oude binnensteden	Groen gas
2	1e ringen, hoogstedelijk	Groen gas
3	Wederopbouw, hoogstedelijk	Warmte
4	Wederopbouw, matig stedelijk	Warmte
5	Wederopbouw, suburbaan	Groen gas
6	Bloemkoolwijk, hoogstedelijk, wonen	Warmte
7	Bloemkoolwijk, hoogstedelijk, wonen & utiliteit	Warmte
8	Bloemkoolwijk, matig stedelijk	Warmte
9	Bloemkoolwijk, suburbaan	All-electric
10	Kantorenpark	Groen gas



Buurt-type	Gebied	Goedkoopste energiedrager 2050
11	Recente nieuwbouw, hoogstedelijk en matig stedelijk	Warmte
12	Recente nieuwbouw, suburbaan en niet stedelijk	All-electric
13	Dorpskernen	Groen gas
14	Niet-stedelijk gebied	All-electric
15	Overig	All-electric

Tabel 22 Resulterende energievraag voor invulling energievraag voor warmte 2050 (studie 'Op weg naar een klimaatneutrale gebouwde omgeving')

Energiedrager	Verbruik
Groen gas	0,9 bcm
Elektriciteit	2,4 bcm _{eq} (voor warmte en hulpenergie)
Warmte	4,0 bcm _{eq} + 0,4 bcm groen gas (voor piek)
Biomassa	0,0 bcm _{eq}
Totaal	7,7 bcm _{eq}

B.2 Verschillen

In Figuur 56 is een vergelijking gemaakt tussen de huidige resultaten en de resultaten uit de oude modelversie. Enkele grote verschillen zijn:

- volgens de oude resultaten werd de energievraag voor warmte veel verder omlaag gebracht;
- er is in de oude modelresultaten geen restwarmte aanwezig;
- het gedeelte dat in de oude modelresultaten werd ingevuld met elektriciteit is veel groter.

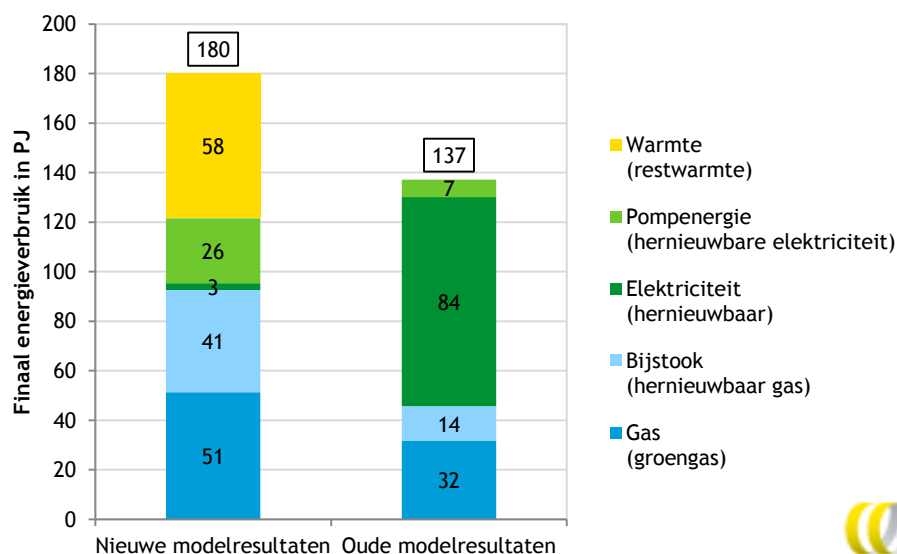
Dat er in de nieuwe resultaten minder wordt bespaard in energievraag voor warmte, komt door de nieuwe inzichten dat de werkelijke besparing die wordt bereikt door een schillabelstap te maken, veel lager is dan de theoretische besparing. In de oude versie van het model, werd nog met de theoretische besparing gerekend.

In de studie 'Op weg naar een klimaatneutrale gebouwde omgeving' is restwarmte nog geen optie, vandaar dat deze uitkomst niet terugkomt in de resultaten. De reden dat er nog niet met restwarmte werd gerekend, is dat er niet met locatiespecifieke data werd gewerkt, wat wel nodig is in geval van restwarmte.

In de oude modelresultaten werd een groter deel van de energievraag voor warmte ingevuld met all-electric-opties. In deze versie werd ervan uitgegaan dat de kosten voor het elektriciteitsnet bij all-electric-opties met 50% moest worden verhoogd. Recente studies laten zien dat de benodigde netverzwaring meer kosten met zich meebrengt, waardoor in de nieuwe resultaten de all-electric-opties minder vaak financieel het voordeligst zijn ten opzichte van andere warmteopties.

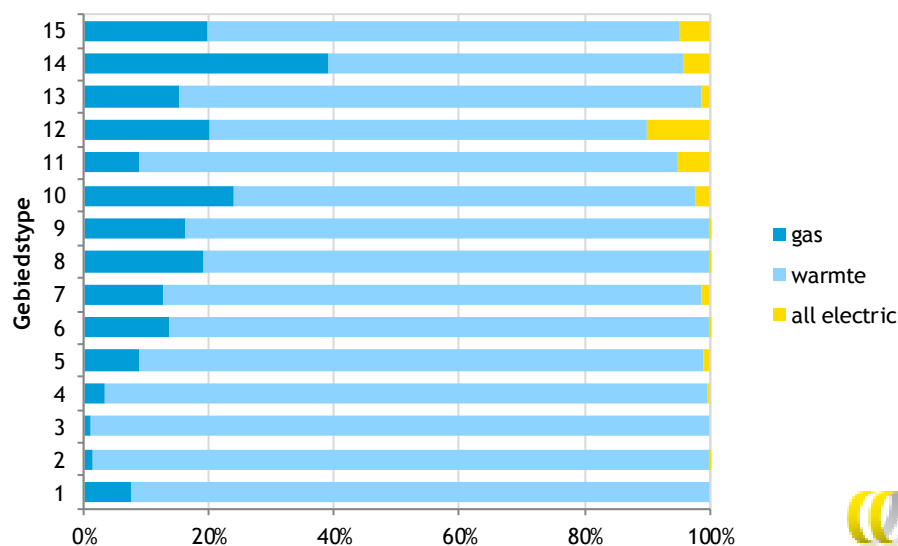


Figuur 56 Finale energievraag voor warmte per energiedrager nieuwe versus oude modelresultaten (2050)



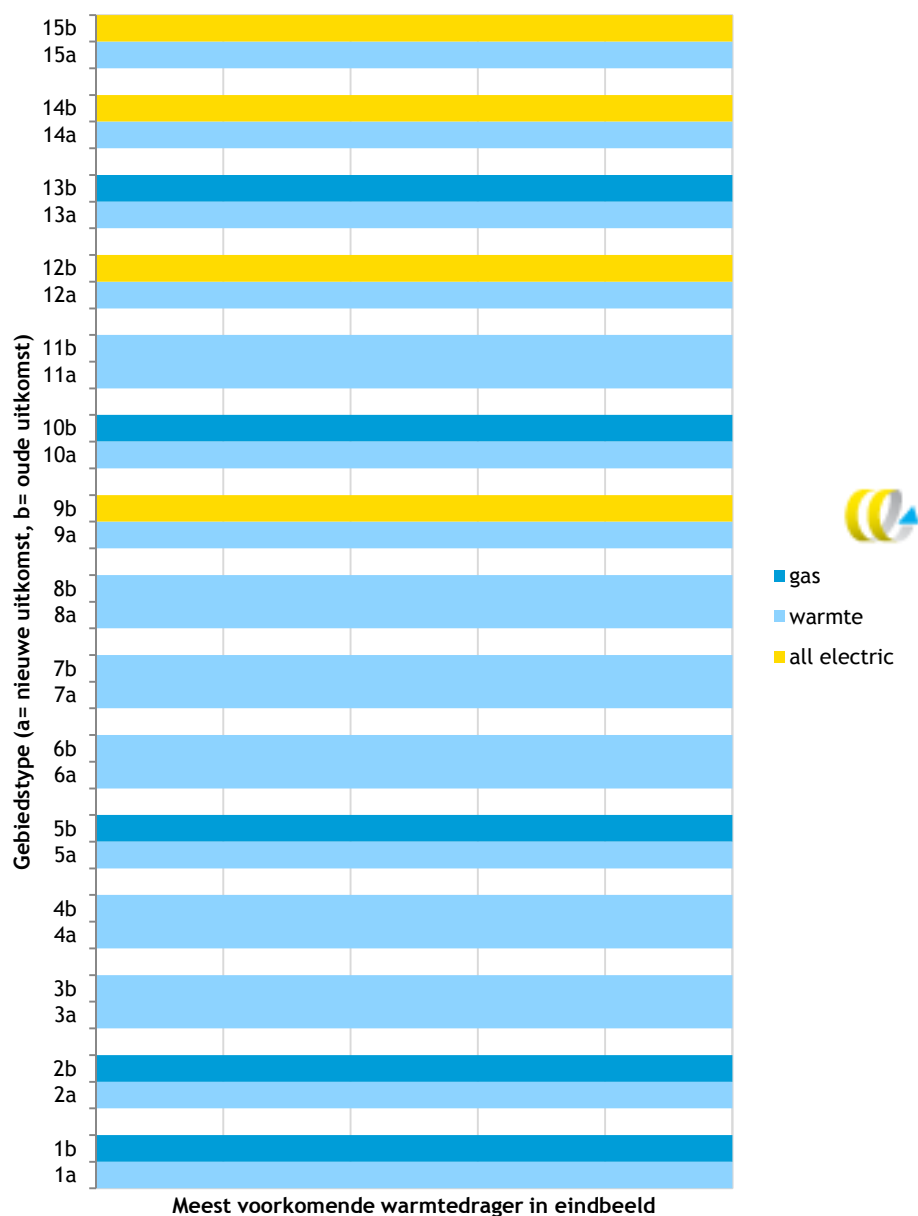
In Figuur 57 zijn de resultaten weergegeven welke warmtedrager per buurttype, zoals deze waren gedefinieerd in de eerste versie van het CEGOIA-model. Wat opvalt is dat bij elk buurttype meerdere warmteopties zullen terugkomen in het eindbeeld. Dit laat zien dat er meerdere factoren zijn die de uitkomst bepalen en niet slechts de kenmerken van de buurten. Dit verklaart ook waarom de huidige resultaten afwijken van de eerdere resultaten.

Figuur 57 Resultaten warmtedrager per buurttype berekend met huidige model (2050)



In Figuur 58 is een vergelijking gemaakt tussen de warmtedrager per buurttype die het meeste voorkomt in de eindsituatie in het nieuwe model en de resultaten uit het oude model. Wat hierin opvalt is dat in het nieuwe model voor alle buurten warmte het meeste voorkomt in een klimaatneutrale warmtevoorziening. Er zijn per buurttype niet veel overeenkomsten tussen de meest voorkomende warmtedrager in het oude en het nieuwe model.

Figuur 58 Vergelijking meest voorkomende warmtedrager per buurttype oude modelresultaten versus nieuwe resultaten (2050)



Bijlage C Berekeningen isolatie

C.1 Investerings en besparing isolatie

De kosten van de isolatiemaatregelen voor woningen zijn uitgesplitst in kosten voor grondgebonden en gestapelde woningen, zie Tabel 23 en Tabel 24. De kosten naar de Labels F t/m A zijn gebaseerd op de Voorbeeldwoningen 2011 van RVO. De kosten naar het Label A++ zijn gebaseerd op de isolatiekosten van de NoM-woningen uit de studie 'De systeemkosten van warmte voor woningen' van Ecofys (Ecofys, 2015).

Tabel 23 Investerings in isolatiestappen van grondgebonden woningen in €/m²

Schil	A++	A	B	C	D	E	F
Van G	441	141	116	102	80	57	30
Van F	337	138	107	89	61	30	-
Van E	337	132	96	75	43	-	-
Van D	253	160	80	34	-	-	-
Van C	267	157	72	-	-	-	-
Van B	119	84	-	-	-	-	-
Van A	64	-	-	-	-	-	-

Tabel 24 Investerings in isolatiestappen van gestapelde woningen in €/m²

Schil	A++	A	B	C	D	E	F
Van G	303	170	140	123	96	66	33
Van F	277	166	128	106	72	35	-
Van E	232	147	107	85	49	-	-
Van D	198	122	76	49	-	-	-
Van C	218	185	69	-	-	-	-
Van B	82	70	-	-	-	-	-
Van A	31	-	-	-	-	-	-

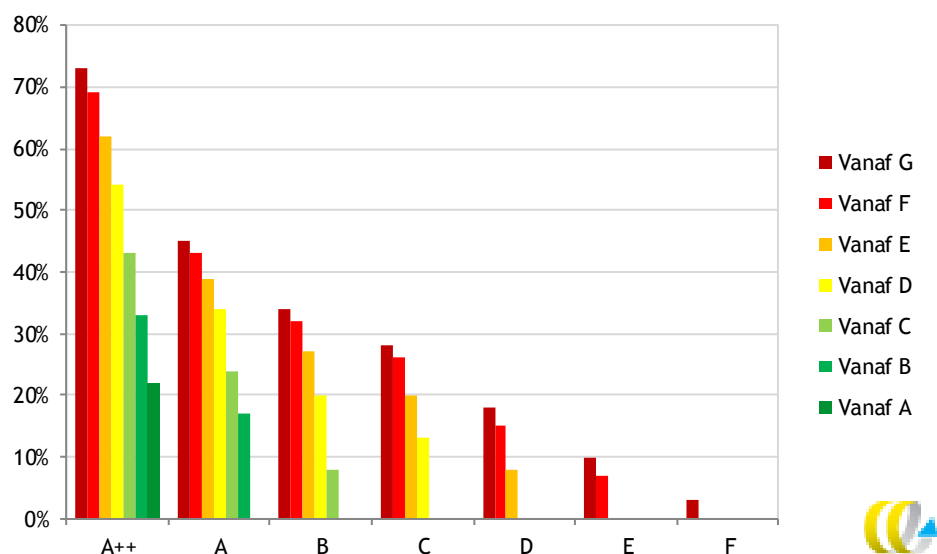
De besparing van elke isolatiestap is weergegeven in Tabel 25. Deze besparingen zijn gebaseerd op werkelijk gemeten besparingen volgens Majcen (Majcen, 2016).

Tabel 25 Besparing op de warmtevraag door isolatiestappen van woningen

Schil	A++	A	B	C	D	E	F
Van G	73%	45%	34%	28%	18%	10%	3%
Van F	69%	43%	32%	26%	15%	7%	-
Van E	62%	39%	27%	20%	8%	-	-
Van D	54%	34%	20%	13%	-	-	-
Van C	43%	24%	8%	-	-	-	-
Van B	33%	17%	-	-	-	-	-
Van A	22%	-	-	-	-	-	-



Figuur 59 Besparingspercentages op de warmtevraag per isolatiestap voor de woningen



C.2 Add-ons per isolatieschil

De instellingen van de add-ons (koeling, ventilatie, WTW, zonneboiler en zon-PV) per schil zijn weergegeven in Tabel 26.

Tabel 26 Add-ons per schillabel

Schil	Koelinstallatie	Ventilatiesysteem	WTW	Zonneboiler	Zon-PV
A++	Monoblock	Mechanisch	Ja	Ja	Ja
A	Monoblock	Mechanisch	Nee	Nee	Nee
B	Monoblock	Mechanisch	Nee	Nee	Nee
C	Geen	Mechanisch	Nee	Nee	Nee
D	Geen	Natuurlijk	Nee	Nee	Nee
E	Geen	Natuurlijk	Nee	Nee	Nee
F	Geen	Natuurlijk	Nee	Nee	Nee
G	Geen	Natuurlijk	Nee	Nee	Nee

Bijlage D Parameters hybride warmtepomp

D.1 Ecolution - Inventum B.V.

Van de Ecolution wordt in het CEGOIA-model gerekend met gegevens over de Ecolution Combi (verwarmd (deels) de ruimte en het warmtapwater).

Opwekkingsrendement verwarming

$\theta_{sup} = 70\text{ °C}$; $\theta_{ret} = 50\text{ °C}$

A_g [m ²]	$Q_{H;dis;nren}$ [MJ]											
	3000	6000	8000	10000	15000	25000	35000	45000	55000	65000	75000	90000
50	4,037	4,037	4,041	4,054	4,099	4,167	4,202	4,222	4,236	4,243	4,250	4,257
70	4,037	4,037	4,041	4,054	4,099	4,167	4,202	4,222	4,236	4,243	4,250	4,257
90	4,149	4,149	4,152	4,165	4,211	4,284	4,322	4,344	4,358	4,366	4,374	4,382
110	4,297	4,297	4,299	4,312	4,359	4,437	4,480	4,504	4,519	4,529	4,537	4,547
130	4,424	4,424	4,425	4,437	4,485	4,568	4,615	4,642	4,658	4,670	4,678	4,689
150	4,535	4,535	4,536	4,548	4,596	4,683	4,733	4,762	4,780	4,793	4,801	4,813
200	4,768	4,768	4,769	4,778	4,827	4,923	4,979	5,013	5,034	5,050	5,060	5,072
250	4,957	4,957	4,957	4,965	5,013	5,116	5,179	5,216	5,241	5,257	5,270	5,282
300	5,116	5,116	5,116	5,123	5,171	5,279	5,347	5,388	5,416	5,433	5,447	5,460

Tabel 5a, $\eta_{H;gen}$

A_g [m ²]	$Q_{H;dis;nren}$ [MJ]											
	3000	6000	8000	10000	15000	25000	35000	45000	55000	65000	75000	90000
50	1,000	1,000	0,997	0,984	0,910	0,715	0,566	0,463	0,392	0,337	0,297	0,254
70	1,000	1,000	0,997	0,984	0,910	0,715	0,566	0,463	0,392	0,337	0,297	0,254
90	1,000	1,000	0,998	0,986	0,919	0,728	0,580	0,476	0,402	0,347	0,306	0,262
110	1,000	1,000	0,999	0,989	0,928	0,746	0,598	0,492	0,416	0,359	0,317	0,272
130	1,000	1,000	0,999	0,991	0,936	0,760	0,612	0,506	0,427	0,370	0,326	0,280
150	1,000	1,000	0,999	0,992	0,942	0,771	0,623	0,516	0,437	0,380	0,335	0,288
200	1,000	1,000	1,000	0,995	0,952	0,795	0,648	0,539	0,459	0,399	0,352	0,302
250	1,000	1,000	1,000	0,996	0,960	0,813	0,668	0,558	0,476	0,414	0,367	0,314
300	1,000	1,000	1,000	0,997	0,965	0,826	0,684	0,573	0,491	0,427	0,379	0,325

Tabel 5b, $F_{H;gen;sl;gpref}$



Opwekkingsrendement warmtapwaterbereiding

A_g [m ²]	$Q_{w,dis,nren,en}$ [MJ]						
	4000	6500	9000	11500	14000	16500	19000
50	2,233	2,354	2,497	2,663	2,851	3,063	3,297
70	2,233	2,354	2,497	2,663	2,851	3,063	3,297
90	2,282	2,405	2,551	2,721	2,914	3,130	3,369
110	2,346	2,472	2,623	2,797	2,995	3,217	3,463
130	2,400	2,530	2,684	2,862	3,065	3,292	3,544
150	2,448	2,580	2,737	2,919	3,126	3,357	3,614
200	2,547	2,684	2,847	3,037	3,252	3,493	3,877
250	2,626	2,768	2,936	3,131	3,353	3,602	3,877
300	2,693	2,838	3,011	3,211	3,438	3,693	3,975

Tabel 8a, $\eta_{w,gen,gl}$

D.2 HP-Cube - Itho-Daalderop

Van Itho Daalderop wordt de HP-Cube incl. Base Cube (HR-ketel) doorerekend met CEGOIA. De HP-Cube gebruikt als bron buitenlucht.

Opwekkingsrendement voor Taanvoer/Tretour=70/50 °C (HT)

		Bruto warmtebehoefte [GJ]																								
		3					5					10					20					30				
		F	COP	Nopw	Ewp	Ebij	F	COP	Nopw	Ewp	Ebij	F	COP	Nopw	Ewp	Ebij	F	COP	Nopw	Ewp	Ebij	F	COP	Nopw	Ewp	Ebij
Oppervlak [m2]	50	0,54	4,22	1,029	384	151	0,54	4,22	1,083	640	162	0,54	4,22	1,125	1280	188	0,70	3,46	1,135	4020	206	0,63	3,51	1,117	5378	263
	100	0,54	4,22	1,029	384	151	0,54	4,22	1,083	640	162	0,54	4,22	1,125	1280	188	0,70	3,46	1,135	4020	206	0,63	3,51	1,117	5378	263
	150	0,54	4,22	1,029	384	151	0,54	4,22	1,083	640	162	0,54	4,22	1,125	1280	188	0,70	3,46	1,135	4020	206	0,63	3,51	1,117	5378	263
	200	0,54	4,22	1,029	384	151	0,54	4,22	1,083	640	162	0,54	4,22	1,125	1280	188	0,70	3,46	1,135	4020	206	0,63	3,51	1,117	5378	263
	250	0,54	4,22	1,029	384	151	0,54	4,22	1,083	640	162	0,54	4,22	1,125	1280	188	0,70	3,46	1,135	4020	206	0,63	3,51	1,117	5378	263
	300	0,54	4,22	1,029	384	151	0,54	4,22	1,083	640	162	0,54	4,22	1,125	1280	188	0,70	3,46	1,135	4020	206	0,63	3,51	1,117	5378	263

Bruto warmtebehoefte [GJ]																								
30					40					50					70					90				
F	COP	Nopw	Ewp	Ebij	F	COP	Nopw	Ewp	Ebij	F	COP	Nopw	Ewp	Ebij	F	COP	Nopw	Ewp	Ebij	F	COP	Nopw	Ewp	Ebij
0,63	3,51	1,117	5378	263	0,55	3,64	1,099	6066	341	0,49	3,72	1,079	6572	425	0,40	3,84	1,044	7214	588	0,33	3,91	1,018	7602	738
0,63	3,51	1,117	5378	263	0,55	3,64	1,099	6066	341	0,49	3,72	1,079	6572	425	0,40	3,84	1,044	7214	588	0,33	3,91	1,018	7602	738
0,63	3,51	1,117	5378	263	0,55	3,64	1,099	6066	341	0,49	3,72	1,079	6572	425	0,40	3,84	1,044	7214	588	0,33	3,91	1,018	7602	738
0,63	3,51	1,117	5378	263	0,55	3,64	1,099	6066	341	0,49	3,72	1,079	6572	425	0,40	3,84	1,044	7214	588	0,33	3,91	1,018	7602	738
0,63	3,51	1,117	5378	263	0,55	3,64	1,099	6066	341	0,49	3,72	1,079	6572	425	0,40	3,84	1,044	7214	588	0,33	3,91	1,018	7602	738
0,63	3,51	1,117	5378	263	0,55	3,64	1,099	6066	341	0,49	3,72	1,079	6572	425	0,40	3,84	1,044	7214	588	0,33	3,91	1,018	7602	738
0,63	3,51	1,117	5378	263	0,55	3,64	1,099	6066	341	0,49	3,72	1,079	6572	425	0,40	3,84	1,044	7214	588	0,33	3,91	1,018	7602	738



D.3 Elga - Techneco Energiesystemen B.V.

Van Techneco wordt de Elga doorgerekend met het CEGOIA-model. De Elga gebruikt als bron buitenlucht.

Tabel 1: Opwekkingsrendement $\eta_{H,gen,tot}$ voor woning met laag energiegebruik ($Q_{H,nd} / A_{g,tot} \leq 150 \text{ MJ/m}^2$).

Q	Ontwerp aanvoer- temperatuur	COP	$F_{H,gen,opref}$	$\eta_{H,gen,tot}$ met $\eta_{H,gen,gl}$ gelijk aan:					
				Mono- valent	CR- ketel 0,75	VR- ketel 0,80	HR-100 ketel 0,90	HR-104 ketel 0,925	HR-107 ketel 0,95
[MJ/jaar]	[°C]								
10000	$\theta_{sup} \leq 35$	4.791	1.000	1.870	1.869	1.869	1.869	1.869	1.869
	$35 < \theta_{sup} \leq 45$	4.322	1.000	1.685	1.685	1.685	1.685	1.685	1.685
	$45 < \theta_{sup} \leq 60$	3.664	0.997	1.419	1.426	1.426	1.427	1.427	1.427
	$60 < \theta_{sup}$	2.522	0.985	0.962	0.979	0.980	0.982	0.983	0.983
20000	$\theta_{sup} \leq 35$	4.947	0.991	1.866	1.903	1.906	1.910	1.911	1.912
	$35 < \theta_{sup} \leq 45$	4.499	0.984	1.661	1.718	1.722	1.728	1.730	1.731
	$45 < \theta_{sup} \leq 60$	3.896	0.973	1.408	1.478	1.483	1.491	1.493	1.495
	$60 < \theta_{sup}$	2.858	0.949	1.018	1.088	1.093	1.101	1.103	1.105
30000	$\theta_{sup} \leq 35$	5.002	0.966	1.715	1.849	1.859	1.876	1.879	1.883
	$35 < \theta_{sup} \leq 45$	4.583	0.952	1.526	1.676	1.688	1.707	1.711	1.715
	$45 < \theta_{sup} \leq 60$	4.013	0.935	1.309	1.462	1.473	1.493	1.498	1.502
	$60 < \theta_{sup}$	3.035	0.898	0.981	1.118	1.129	1.147	1.151	1.155
40000	$\theta_{sup} \leq 35$	4.981	0.927	1.504	1.740	1.758	1.790	1.798	1.804
	$35 < \theta_{sup} \leq 45$	4.609	0.906	1.344	1.590	1.610	1.644	1.652	1.659
	$45 < \theta_{sup} \leq 60$	4.078	0.884	1.171	1.407	1.427	1.460	1.468	1.475
	$60 < \theta_{sup}$	3.144	0.838	0.910	1.112	1.129	1.158	1.165	1.171
50000	$\theta_{sup} \leq 35$	4.952	0.876	1.297	1.616	1.644	1.692	1.702	1.713
	$35 < \theta_{sup} \leq 45$	4.613	0.855	1.181	1.496	1.523	1.572	1.582	1.593
	$45 < \theta_{sup} \leq 60$	4.114	0.828	1.044	1.341	1.367	1.414	1.424	1.434
	$60 < \theta_{sup}$	3.216	0.777	0.840	1.091	1.113	1.153	1.162	1.171
60000	$\theta_{sup} \leq 35$	4.915	0.824	1.136	1.505	1.539	1.599	1.613	1.626
	$35 < \theta_{sup} \leq 45$	4.615	0.801	1.046	1.407	1.441	1.501	1.514	1.528
	$45 < \theta_{sup} \leq 60$	4.137	0.773	0.942	1.279	1.310	1.367	1.380	1.392
	$60 < \theta_{sup}$	3.266	0.720	0.779	1.065	1.093	1.141	1.152	1.163
70000	$\theta_{sup} \leq 35$	4.887	0.773	1.012	1.411	1.450	1.520	1.536	1.551
	$35 < \theta_{sup} \leq 45$	4.613	0.749	0.944	1.332	1.370	1.439	1.454	1.470
	$45 < \theta_{sup} \leq 60$	4.158	0.720	0.860	1.223	1.259	1.324	1.339	1.353
	$60 < \theta_{sup}$	3.307	0.667	0.730	1.041	1.071	1.127	1.140	1.153
80000	$\theta_{sup} \leq 35$	4.877	0.721	0.913	1.331	1.373	1.451	1.469	1.486
	$35 < \theta_{sup} \leq 45$	4.615	0.700	0.864	1.268	1.309	1.385	1.402	1.419
	$45 < \theta_{sup} \leq 60$	4.172	0.671	0.797	1.175	1.214	1.286	1.302	1.318
	$60 < \theta_{sup}$	3.339	0.618	0.688	1.017	1.051	1.112	1.127	1.141
90000	$\theta_{sup} \leq 35$	4.869	0.674	0.839	1.266	1.311	1.394	1.413	1.432
	$35 < \theta_{sup} \leq 45$	4.623	0.654	0.800	1.213	1.257	1.338	1.357	1.376
	$45 < \theta_{sup} \leq 60$	4.187	0.627	0.747	1.135	1.177	1.253	1.271	1.288
	$60 < \theta_{sup}$	3.364	0.576	0.656	0.996	1.032	1.099	1.115	1.130



Bijlage E Toelichting model

E.1 Modelbeschrijving

CEGOIA berekent op buurtniveau alle kosten over de gehele keten van verschillende warmteopties voor gebouwen: besparing, consumptie, productie en distributie. Per buurt wordt voor alle isolatieniveaus en maximaal tien techniek(groep)en berekend wat de totale jaarlijkse ketenkosten zijn voor de woningen, utiliteit en eventueel glastuinbouw. Alle investeringen worden met een specifieke afschrijf-termijn en discontovoet omgerekend naar jaarlijkse kosten. Hiermee wordt impliciet dus rekening gehouden met het doen van vervangingsinvesteringen.

E.2 Berekeningen

De totale ketenkosten worden apart berekend voor de woningen en utiliteit. Per buurt worden alle gekozen warmteopties doorgerekend bij alle mogelijke besparingsniveaus. Voor de woningen zijn dat met alle acht schillen (A t/m G en Nul-op-de-Meter) maximaal 80 berekeningen per buurt. Het model rekent alleen de labelsprongen uit die een verbetering opleveren van het energiegebruik. Indien het huidige gemiddelde energielabel van de woningen in een buurt bijvoorbeeld D is, dan worden alleen Labels A t/m D en A++ uitgerekend en niet E t/m G. De berekening van de totale ketenkosten is uitgesplitst in vijf onderdelen, namelijk: distributie, productie, installaties, gebouwmaatregelen en optioneel belastingen. Hieronder wordt de berekening van deze onderdelen voor de woningen beschreven.

E.2.1 Distributie

Onder het distributiedeel vallen de kosten voor de benodigde infrastructuur. Voor alle infrastructuur worden de werkelijke kosten berekend en wordt geen rekening gehouden met reeds bestaande infrastructuur. Hierdoor zijn de jaarlijkse kosten voor bestaande en nieuwe infrastructuur gelijk. Wel wordt er rekening gehouden met amoveringskosten voor het verwijderen van de gasleidingen, indien er wordt overgegaan op een andere energiedrager (all-electric of warmte). Er worden enkel geen amoveringskosten in rekening gebracht als het gasnet uit brosse leidingen bestaat en er toch al uit moet. In een buurt wordt het gasnet beschouwd als bros indien het percentage brosse leidinglengte hoger is dan 20%.

Elektriciteitsnet

Ongeacht de gekozen warmteoptie is het elektriciteitsnet altijd nodig. De kosten voor het elektriciteitsnet bestaan uit een vast deel, een variabel deel en onderhoud. Het vaste deel is een eenmalige investering per woning, voor het aanleggen van de aansluiting. Het variabele deel is een eenmalige investering per woning die varieert met de adressendichtheid van de woningen. De totale investering voor het elektriciteitsnet in de buurt wordt afgeschreven met de afschrijftermijn van de leidingen en de discontovoet van het energiebedrijf. De totale kosten voor het elektriciteitsnet, de verdisconteerde kosten per jaar en de jaarlijkse onderhoudskosten, worden vermenigvuldigd met een ouderdomsfactor. De ouderdomsfactor wordt per buurt berekend als een gewogen gemiddelde op basis van het aantal woningen met een bouwjaar voor 1900 (factor 2), een bouwjaar tussen 1900 en 1945 (factor 1,5) en een bouwjaar na 1945 (factor 1). Tot slot worden voor all-



electric-opties kosten voor de benodigde verzwaring van het net in rekening gebracht en de amoveringskosten van het gasnet.

Gasnet

De infrastructuur voor gas wordt alleen meegenomen in de berekeningen voor de warmteopties met gas als warmtedrager. De kosten worden op eenzelfde wijze uitgerekend als voor het elektriciteitsnet, met afwezigheid van extra netverzwarkosten die eventueel bij all-electric noodzakelijk zijn en de amoveringskosten.

Warmtenet

Het warmtenet wordt berekend voor de geothermie-, wijk-WKK- en restwarmteopties. De totale investering in het warmtenet bestaat uit: de aansluiting, de onderstations, de zijleidingen, een hoofdleiding, de warmteoverdrachtstations (WOS) en de transportleiding. Onder de aansluiting vallen de kosten voor het distributienet en de woningaansluiting (warmtewissel, meter, etc.). Er wordt onderscheid gemaakt in de kosten voor grondgebonden en gestapelde woningen en vanwege het distributienet lopen de kosten op naarmate de adressendichtheid afneemt. Het aantal onderstations dat nodig is hangt samen met de aansluitwaarde en gelijktijdigheid van het totaal aan utiliteit en woningen in de buurt. (De kosten voor de onderstations, leidingen en het warmteoverdrachtstation worden evenredig toegekend aan de woningen en utiliteit o.b.v. de verhouding tussen woningen en utiliteit in de buurt.) Voor ieder onderstation is een zijleiding nodig. De zijleidingen komen samen op een hoofdleiding. De kosten voor de leidingen hangen samen met de benodigde capaciteit en de oppervlakte van de buurt. De hoofdleiding is via een warmteoverdrachtstation verbonden met de transportleiding naar de warmtebron. De lengte van de transportleiding is afhankelijk van de oppervlakte van de buurt. Verder wordt onderscheid gemaakt tussen een lokale warmtebron (geothermie en wijk-WKK) of een externe bron (rest-warmte) met een langere transportpijp. De totale investering wordt net als bij het gas- en elektriciteitsnet verdisconteerd met de afschrijftermijn van de leidingen en de discontovoet van het energiebedrijf. Samen met de jaarlijkse onderhoudskosten, berekend als een percentage van de investeringen, vormen de verdisconteerde kosten de totale jaarlijkse kosten voor het warmtenet. Netals bij het gas- en elektriciteitsnet wordt er gerekend met een ouderdomsfactor over de totale kosten van het warmtenet. Tot slot worden de amoveringskosten berekend voor het verwijderen van de gasleidingen.

WKO-net

Voor de WKO-optie is een apart net nodig. Deze bestaat uit de aansluitingen, een hoofdleiding, zijleidingen en een aantal bronnen. De aansluitkosten van het WKO-net zijn gelijk aan die van het warmtenet. Het aantal benodigde bronnen en de capaciteit van de leidingen voor de buurt wordt, net als bij het warmtenet, berekend aan de hand van de totale aansluitwaarde van utiliteit en woningen in de buurt. De totale investering wordt verdisconteerd en opgeteld bij de jaarlijkse onderhoudskosten. De onderhoudskosten zijn ingevoerd als percentages over de investeringsonderdelen van het WKO-net. Tot slot wordt er door middel van de ouderdomsfactor rekening gehouden met de hogere kosten voor de aanleg van het net in bijvoorbeeld historische binnensteden en wordt er rekening gehouden met de amoveringskosten van het gasnet.



E.2.2 Productie

De productiekosten worden berekend op basis van de totale vraag naar elektriciteit, gas, warmte en biomassa. De energievraag bestaat uit de vraag naar ruimteverwarming, warm tapwater, bijstook met gas, koeling, ventilatie, hulpenergie en energie voor apparatuur en verlichting. De vraag kan worden verminderd door isolatiemaatregelen, maar ook d.m.v. WTW, zonneboilers en zon-PV. Bij de berekening van de energievraag worden de rendementen van de verschillende installaties in acht genomen.

E.2.3 Installaties

Onder het onderdeel installaties vallen alle kosten voor de individuele ruimteverwarmingsinstallatie of de uitkoppelingskosten bij de collectieve warmteopties, de kosten voor de warm tapwatervoorziening, de koelinstallatie, het ventilatiesysteem en het afgiftesysteem. De jaarlijkse kosten worden berekend door de totale investering te verdisconteren met de afschrijftermijn van de gebouwinstallaties en de discontovoet van de woningen. Bij de WKO-optie worden extra investeringskosten in rekening gebracht als de woning niet optimaal is geïsoleerd. Deze kosten moeten worden gemaakt om de bron in balans te houden; bij een slechter label is de warme/koudevraag slechter in balans.

E.2.4 Gebouwmaatregelen

De gebouwmaatregelen bestaan uit de kosten voor de isolatiemaatregelen per labelsprong en eventuele kosten voor WTW, zonneboilers en zon-PV. Alle gebouwmaatregelen worden afgeschreven met een discontovoet voor de woningen en de afschrijftermijn voor respectievelijk gebouwmaatregelen, zonneboilers en zon-PV.

E.2.5 Belastingen

Alle kosten die worden gehanteerd in het model zijn exclusief belastingen. Als de belastingen worden meegenomen in de berekeningen worden deze apart uitgerekend. De belasting bestaat uit BTW over alle totale jaarlijkse kosten voor distributie, productie, installaties en gebouwmaatregelen. Daarnaast wordt energiebelasting en opslag duurzame energie (ODE) berekend over het gebruik van gas en elektriciteit. Tot slot wordt de heffingskorting in mindering gebracht op de totale belasting per woning.

E.2.6 Utiliteit

Voor utiliteit wordt er gerekend met in totaal drie besparingsniveaus per warmteoptie, dus maximaal 30 berekeningen per buurt. De berekeningen voor de utiliteit gaan op eenzelfde manier als voor de woningen, echter wordt er onderscheid gemaakt tussen de verschillende functies van de utiliteitsbouw: kantoren, winkels, gezondheidszorg, logies, onderwijs, bijeenkomst, sport en cel. Verder is er een aantal kostenparameters enkel uitgedrukt in een investeringsbedrag per woning. Dit betreft het vaste en variabele deel van de investering in de elektriciteit- en gasinfrastructuur en de investeringskosten in de individuele ruimteverwarmingsinstallatie, de warm tapwatervoorziening, de koelinstallatie en het ventilatiesysteem. Voor deze kostenparameters wordt aangenomen dat een woning equivalent is aan 150 m² utiliteit.

E.2.7 Restwarmte

De in Nederland beschikbare restwarmte is afgeleid uit de kaart 'Ligging industrie en CO₂-emissies' van RVO. Deze bevat een inschatting van de energievraag voor warmte op basis van de CO₂-emissiegegevens van de nationale emissieregistratie. Alleen de industriële bronnen met een berekende energievraag groter dan 400 TJ zijn opgenomen in de kaart. Per doelgroep



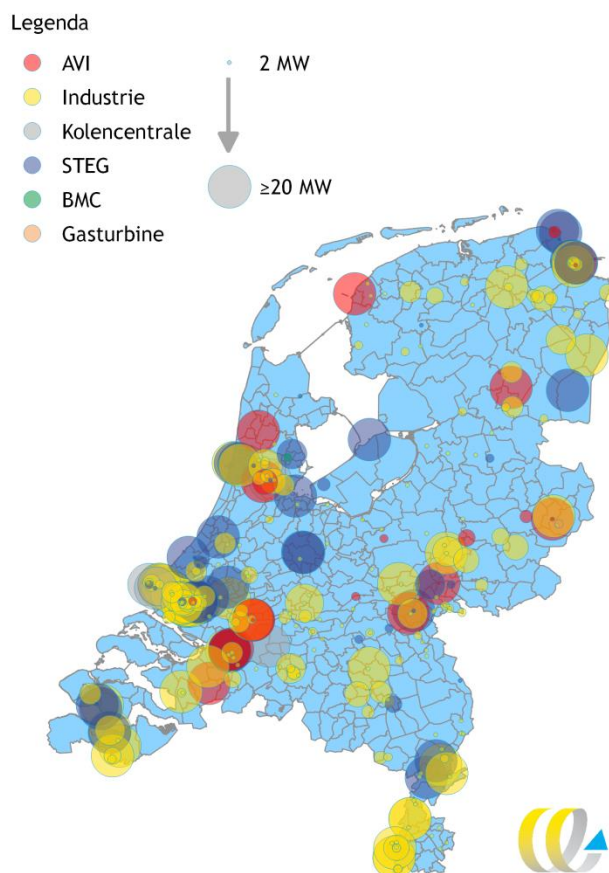
(type industrie) is het percentage van de energievraag voor warmte ingeschat dat beschikbaar is voor restwarmte, zie Tabel 27.

Tabel 27 Percentage beschikbare restwarmte per industrie doelgroep en beschikbaarheid in 2050

Doelgroep	Percentage restwarmte	Beschikbaar in 2050?
Afvalverwijdering	45	Ja
Bouw	0	Ja
Chemische Industrie	40	Ja
Energiesector	60	Nee
Handel, Diensten en Overheid (HDO)	0	Ja
Landbouw	0	Ja
Overige industrie	40	Ja
Raffinaderijen	40	Nee
Riolering en waterzuiveringsinstallaties	40	Ja
Verkeer en vervoer	0	Ja

De capaciteit van de restwarmtebron bepaalt het potentiële bereik. Per 2 MW is een straal van 1 km aangehouden, met een maximum van 10 km, zie ook Figuur 60.

Figuur 60 Ligging restwarmtebronnen



Naar verwachting zullen niet alle restwarmtebronnen beschikbaar zijn in 2050. Met name de beschikbaarheid van kolencentrales en STEG's voor de energievoorziening zijn onzeker. In de CEGOIA-berekeningen neemt de totale capaciteit van de restwarmtebronnen daarom lineair af indien de bron naar verwachting niet beschikbaar is in 2050. De op deze bronnen aangesloten warmtenetten zullen moeten overgaan op geothermie.



Bijlage F Belangrijke parameters

De parameters waarmee de berekeningen worden gedaan zijn gebaseerd op gegevens uit verschillende bronnen, te weten:

- BAG (Basisregistraties Adressen en Gebouwen, Kadaster): bouwjaar, functie, oppervlak, aantal gebouwen;
- Statline (CBS): energiegebruik huishoudens op buurtniveau (is gebaseerd op Energie in Beeld), eigendomsverhouding, type bouw (gestapeld/grondgebonden);
- SWING (RVO): energiegebruik utiliteitsbouw;
- Klimaatmonitor (min I&M): energielabels per buurt;
- Verbetering referentiebeeld utiliteitssector (ECN, 2014): besparingspotentieel utiliteitsbouw.

Tabel 28 Installatiekosten per techniek

Techniek	Installatiekosten	Bron
HR-ketel	€ 1.900	ACM - Rekenmodel maximumprijs 2015
Hybride WP ventilatielucht combi	€ 4.900 incl. HR-ketel en ventilatiesysteem	Fabrikant
Hybride WP ventilatielucht solo	€ 4.400 incl. HR-ketel en ventilatiesysteem	Fabrikant
Hybride WP buitenlucht HP-Cube	€ 5.000 incl. HR-ketel	Ecofys
Hybride WP buitenlucht Elga	€ 5.600 incl. HR-ketel	Fabrikant
Elektrische WP lucht	€ 8.000	Maatregelen EPA - Maatwerkadvies bestaande woningbouw 2014
Elektrische WP bodem	€ 15.000	Klimaatgarant
WKO	1.133 €/kW	Vesta 2.0
Geothermie	1.875 €/kW	Vesta 2.0
Restwarmte	AVI1 63 €/kW BMC 875 €/kW Industrie 250 €/kW STEG 167 €/kW Kolencentrale 167 €/kW Gasturbine 180 €/kW	Vesta 2.0

Tabel 29 Productiekosten per energiedrager

Energiedrager	Productiekosten (€/GJ)	Bron
Aardgas (2015)	9,1	Milieucentraal (32 €ct/m ³)
Groen gas (2050)	21,3	CE Delft (75 €ct/m ³)
Elektriciteit	19,4	Milieucentraal (7 €ct/kWh)
Warmte (WKO)	5,54	Elektriciteitskosten gedeeld door een SPF van 3,5
Warmte (Geothermie)	0,97	Elektriciteitskosten gedeeld door een SPF van 20 (pomp-energie)
Warmte (AVI)	2,67	Vesta 2.0
Warmte (BMC)	20	Duurzame energie Gelderland



Energiedrager	Productiekosten (€/GJ)	Bron
Warmte (Industrie)	0,97	Elektriciteitskosten gedeeld door een SPF van 20 (pomp-energie)
Warmte (STEG)	4,94	Vesta 2.0
Warmte (Kolencentrale)	2,38	Vesta 2.0
Warmte (Gasturbine)	4,94	Vesta 2.0

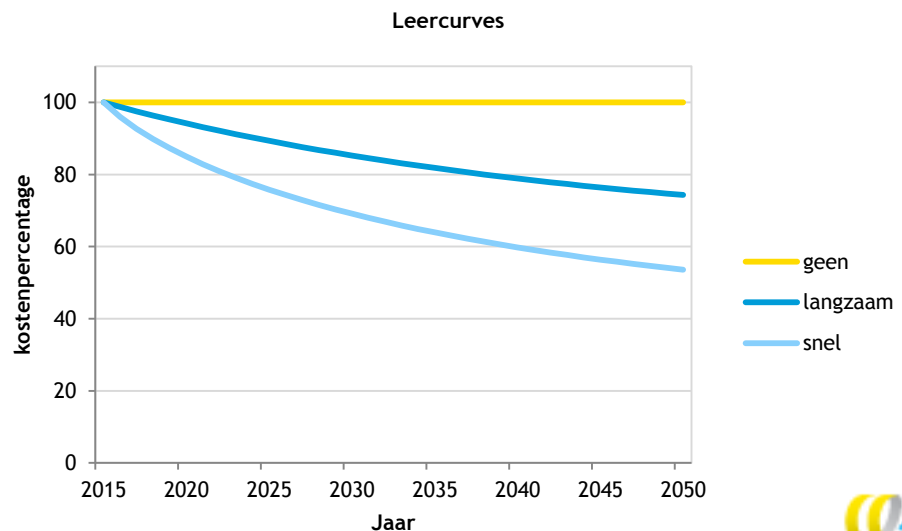
Tabel 30 Afschrijftermijnen en discontovoeten

Parameter	Hoeveelheid
Afschrijftermijn collectieve installaties	25 jaar
Afschrijftermijn gebouwinstallaties	15 jaar
Afschrijftermijn leidingen	30 jaar
Afschrijftermijn gebouwmaatregelen	25 jaar
Afschrijftermijn Zonneboiler	20 jaar
Afschrijftermijn zon-PV	20 jaar
Discontovoet energiebedrijf	6,0%
Discontovoet woningen	5,5%
Discontovoet utiliteit	8,0%

F.1 Leercurves

De kostenparameters in het model zijn voorzien van een leercurve die aangeeft hoe de kosten zich in de loop van de tijd ontwikkelen. Er zijn twee verschillende leercurves gehanteerd: een langzame curve voor technieken die al verder doorontwikkeld zijn en een snelle curve voor nieuwe technieken waarbij wordt verwacht dat er nog veel kostendaling zal optreden.

Figuur 61 Leercurves op kostenparameters



Een overzicht van de gehanteerde leercurves per kostenparameter is opgenomen in Tabel 31.

Tabel 31 Type leercurve per kostenparameter

Kostenparameter	Leercurve
Aansluitkosten gas en elektriciteit	Langzaam
Aansluitkosten warmte	Snel
Netverzwaring	Langzaam
HR-ketel	Langzaam
Hybride warmtepomp	Snel
Elektrische warmtepomp	Snel
WKO	Snel
Geothermie	Snel
Restwarmte	Snel
Afgiftesystemen	Langzaam
Koelinstallaties	Snel
Ventilatiesystemen	Snel
WTW	Snel
Zonneboilers	Snel
Zon-PV	Snel
Isolatiemaatregelen	Langzaam
Nul-op-de-Meter-isolatie	Snel

