

De systeemkosten van warmte voor woningen

Hoe beïnvloeden technologiekeuzes in woningen de
toekomstige kosten van het energiesysteem?

Eindrapport



Een samenwerking van:



De systeemkosten van warmte voor woningen

Hoe beïnvloeden technologiekeuzes in woningen de toekomstige kosten van het energiesysteem?

Eindrapport

Door:

Timme van Melle (Ecofys)
Marijke Menkveld (ECN)
Joop Oude Lohuis (Ecofys)
Robert de Smidt (ECN)
Wouter Terlouw (Ecofys)

Met medewerking van:

Esther Hardi (Alliander)
Erik van der Hoofd (TenneT)
Inge Janssen-Visschers (TenneT)
Piet Nienhuis (Gasunie)
Danny de Pater (Alliander)
Nicolien van der Sar (Gasunie)

Datum: 11 november 2015

© Ecofys 2015 in opdracht van: Alliander, Gasunie en TenneT

Projectnummer: CESNL15639
Projecttitel: Systeemintegratie van de huishoudelijke warmtevoorziening
Opdrachtgevers: Alliander, Gasunie en TenneT
Projectperiode: januari – september 2015
Contactgegevens: t.vanmelle@ecofys.com (inhoudelijke vragen)
marketing@ecofys.com (aanvraag rapportage)

Het project is uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken, Nationale regelingen EZ-subsidies, Topsector Energie uitgevoerd door Rijksdienst voor Ondernemend Nederland.

Samenvatting

Achtergrond en vraagstelling

De energievoorziening is aan het veranderen. De huishoudelijke warmtevoorziening speelt een belangrijke rol in de Nederlandse energievraag. De toekomstige invulling van de warmtevraag vormt dan ook een belangrijke uitdaging binnen de energietransitie. Vooral in de bestaande bouw is er nog geen gedeeld beeld van hoe die duurzame warmtevoorziening er uit gaat zien, terwijl meer dan 75% van de woningen waarin wij in 2050 zullen wonen al gebouwd zijn.

In deze studie hebben Alliander, ECN, Gasunie (GTS), TenneT en Ecofys zich gericht op de vraag wat nieuwe technologische ontwikkelingen gaan betekenen voor de betrouwbaarheid en betaalbaarheid van het energiesysteem van de toekomst. Belangrijk uitgangspunt is dat ook in de toekomst de stabiliteit en betaalbaarheid van de warmte voorziening voor de consument geborgd blijft.

Alleen op basis van een breed begrip en een gedeelde terminologie kan een goede discussie en besluitvorming over de energietransitie plaatsvinden. Het opstellen van dit rapport beoogt hier een bijdrage aan te leveren. Deze studie doet voor het eerst uitspraken over de integrale kosten over de gehele keten van een aantal scenario's voor de warmtevoorziening van Nederland voor de komende decennia.

Uniek en cruciaal in dit project is de inbreng en gezamenlijke kennisopbouw van de betrokken netbeheerders Alliander, Gasunie en TenneT geweest. Hierdoor hebben de resultaten een directe band met de huidige en toekomstige praktijk. De studie is mede mogelijk gemaakt met een bijdrage van de TKI Systeemintegratie. De resultaten zijn daarnaast voorgelegd aan een relevante en brede groep stakeholders.

Per scenario levert de studie inzichten in de resulterende emissies en de hiermee verband houdende kosten. Daarbij stonden de volgende onderzoeksvragen centraal:

1. Welke energiedragers en technologieën kunnen een rol spelen in de huishoudelijke warmtevraag?
2. Hoe beïnvloeden keuzes voor het invullen van de huishoudelijke warmtevraag binnen de energietransitie de emissies en de kosten in de keten van productie, transport, distributie en verbruik?
3. Wat is de benodigde capaciteit in de verschillende delen van de Nederlandse transmissie- en distributie-infrastructuur die met technologiekeuzes samenhangen, en welke kosten hangen daarmee samen?

Uitgangspunten

Scenario's

Het consortium heeft gekozen voor een werkwijze met scenario's tot en met 2050 waarin verschillende technologieën dominant zijn in de invulling van de warmtevraag van huishoudens. De scenario's bestaan uit twee kernelementen: isolatieniveau en toegepaste techniek. In de scenario's met Midden isolatieniveau worden bestaande woningen tot 2050 na-geïsoleerd tot Rc 1,3 voor gevel en Rc 2,5 voor dak en vloer. In het Hoog isolatie niveau worden alle woningen geïsoleerd tot Rc 5. Een nul-op-de-meter woning zoals bij renovaties in het kader van de Stroomversnelling worden gerealiseerd, voldoet aan dit hoge isolatieniveau. Nieuwbouw die conform het bouwbesluit 2015 wordt gebouwd heeft een vergelijkbaar isolatieniveau.

Onderstaande schema geeft de combinaties van isolatie en techniek weer per scenario.

Naam scenario	Isolatieniveau	Toegepaste technologie
HR Hoog	Hoog isolatieniveau	Gas – HR Ketels
Hybride Hoog		Gas en Elektra – Hybride Warmtepompen
Elektrisch Hoog		Elektra – Elektrische Warmtepompen
Warmte Hoog		Gas en warmte – Warmtenetten
Decentraal Hoog		Gas en Elektra – μWKK's en E warmtepompen
HR Midden	Midden isolatieniveau	Gas – HR Ketels
Hybride Midden		Gas en Elektra – Hybride Warmtepompen
Elektrisch Midden		Elektra – Elektrische Warmtepompen
Warmte Midden		Gas en warmte – Warmtenetten
Decentraal Midden		Gas en Elektra – μWKK's en E warmtepompen

Figuur 1: Scenario's voor invulling warmtevoorziening woningen

Om specifiek naar de invloed van technologiekeuzes te kunnen kijken, verschillen alleen de energetische aannames (technologiekeuzes en de mate van isolatie) tussen deze scenario's. De overige basiselementen zijn voor alle scenario's bewust gelijk gehouden. De functionele warmtevraag is in elk scenario hetzelfde, en de leveringszekerheid zoals deze op dit moment wettelijk is vastgelegd voor het gastransportsysteem wordt in elk scenario toegepast. Ook de woningvoorraad en de ontwikkeling daarvan, de dichtheid van de bebouwing en samenstelling van woningtypes (woonmilieus) is gelijk in alle scenario's.

In Tabel 1 worden de karakteristieken van de bovengenoemde scenario's nader beschreven.

Tabel 1: Invulling van scenario's met betrekking tot de inzet van verwarmingstechnologieën

Technologie	Aannames
HR	- HR-ketel blijft de dominante technologie. - De verdeling tussen warmtelevering en gasinfrastructuur in de bestaande bouw verandert niet. Er worden dus geen bestaande woningen alsnog op warmtelevering aangesloten. Het aandeel warmtenetten is wel verschillend per woningtype: 4% bij tussenwoning, 7% meergezinswoning en 1% vrijstaande woning. - Het aandeel warmtelevering in de nieuwbouw houden we gelijk aan wat het nu is per woningtype in recent gebouwde woningen met label A+, A en B.
Elektrische warmtepomp	- Bestaande woningen met een gas-infrastructuur die na-isolatie krijgen stappen over op een lucht-water elektrische warmtepomp. Woningen met warmtelevering blijven op warmte aangesloten. - Het aandeel warmtelevering in de nieuwbouw houden we gelijk aan wat het nu is per woningtype in recent gebouwde woningen label A+, A en B. Alle andere nieuwbouw woningen krijgen een elektrische bodemwarmtepomp.
Warmte	- Het percentage woningen met warmtenetten neemt lineair toe van 5% in 2015 tot 25% in 2050. De rest blijft met HR-ketels verwarmd worden. Er wordt hierbij geen verschil gemaakt tussen bestaande bouw en nieuwbouw. - We gaan ervanuit dat overstap naar warmtenetten bij bestaande woningen gebeurt op het moment van na-isolatie. - De verhouding tussen woningtypen die worden aangesloten op warmtelevering is gelijk aan huidige verdeling woningtypen bij woningen met warmtelevering. - De warmte wordt opgewekt met behulp van geothermie en gasketels¹.
Hybride	- Bestaande woningen met een gas-infrastructuur die na-isolatie krijgen stappen over op een hybride warmtepomp. Dit betekent in dit geval het bijplaatsen van een elektrische warmtepomp met behoud van een HR-ketel als back-up. Woningen met warmtelevering blijven op warmte aangesloten. - Het aandeel warmtelevering in de nieuwbouw houden we gelijk aan wat het nu is per woningtype in recent gebouwde woningen label A+, A en B. Alle andere nieuwbouw woningen krijgen een hybride warmtepomp.
Decentraal	- Alle woningen krijgen een warmtepomp of een micro WKK. - De verhouding tussen deze technologieën wordt zo bepaald dat de gezamenlijke piekvraag geminimaliseerd wordt, 40% van de woningen krijgen een micro-WKK en 60% van de woningen een elektrische warmtepomp.

¹ Deze aannames zijn relevant voor het bepalen van de emissiefactoren voor warmte, de kosten per MWh en de effecten op de kosten van buffers. Voor de kosten is een vergelijking uitgevoerd met kentallen van EnNatuurlijk om de redelijkheid van de aannames te testen.

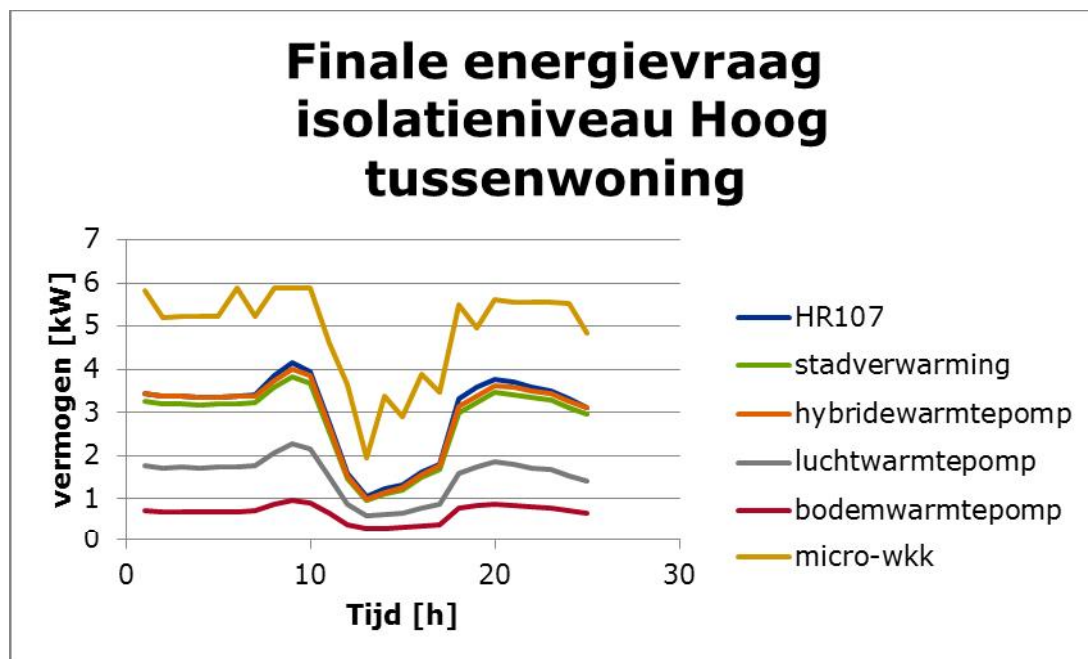
Piekanalyse

Energienetten worden aangelegd voor de piekvraag = (capaciteit kW) en daarmee niet voor het benodigde volume per jaar (kWh). De piekvraag is berekend voor een relatief koud jaar om ongestoorde levering ook bij extreem lage temperaturen te garanderen. In deze studie is het uitgangspunt geweest om voor het simuleren van de maatgevende piekvraag het extreem koude winterjaar 1987 te hanteren. De huidige wettelijke normen eisen dat bij deze weersomstandigheden aan de energievraag kan worden voldaan. De kosten van netinfrastructuur zijn bepaald afhankelijk van de piekcapaciteit op basis van praktijkgegevens van Gasunie, TenneT en Alliander. In deze studie is bij de kosten van netinfrastructuur onderscheid gemaakt naar kosten voor verschillende woonmilieus met een onderscheid naar stedelijk en landelijk gebied.

Om de benodigde piekcapaciteit te bepalen voor de netinfrastructuur zijn er warmtevraagprofielen bepaald per woning voor verschillende woningtypen, isolatiegraad en warmte technologie. Deze warmtevraagprofielen waren niet beschikbaar en zijn in het kader van dit project berekend aan de hand van een warmteverliesberekening. De warmtevraagprofielen geven de warmtevraag per uur weer door het hele jaar heen. De warmtevraag bij een hoog isolatieniveau ligt aanzienlijk lager en laat een sterk afgevlakt profiel zien ten opzichte van isolatiegraad Laag en Midden. Het vlakke profiel hangt samen met een vlak patroon in thermostaatinstelling.

Als we de warmtevraag invullen met verschillende technologieën wordt het verschil in rendement zichtbaar. Hoe efficiënter de technologie, hoe verder het warmtevraagprofiel afvlakt. Op basis van deze vraagprofielen is de piekvraag voor gas, warmte en elektriciteit per woning bepaald in de verschillende scenario's.

Ter referentie: de huidige piekvraag voor elektriciteit per huishouden (rekening houdend met gelijktijdigheid) ligt op ongeveer 1 kW. De onderstaande vraag komt daarbovenop.



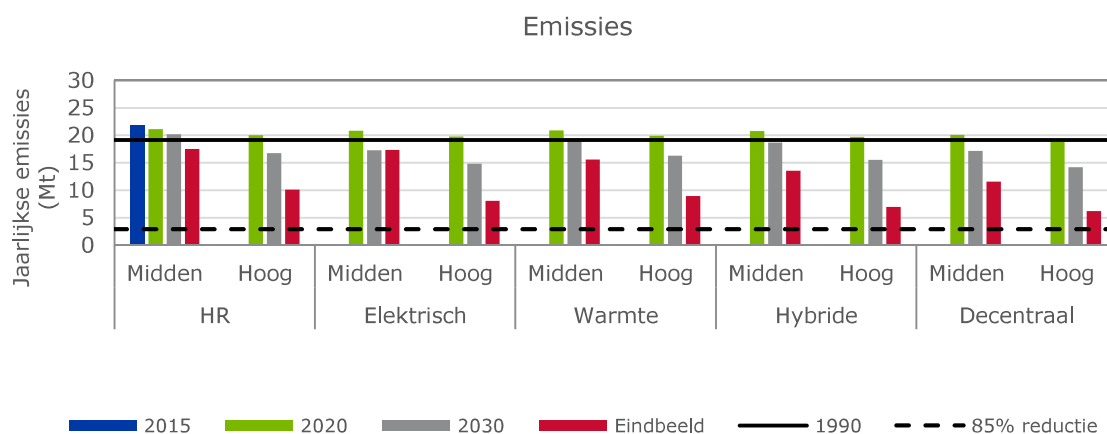
Emissiefactor

Voor het berekenen van de CO₂-emissie in een scenario wordt het gebruik van gas, elektriciteit en warmte vermenigvuldigd met een emissiefactor. Deze emissiefactor is afhankelijk van de vraag naar gas of elektriciteit in het scenario, omdat is aangenomen dat de maximaal beschikbare hoeveelheid groen gas en hernieuwbare elektriciteit in een zichtjaar vastligt. De energievraag bepaalt zodoende het aandeel groen gas of hernieuwbare elektriciteit en dat komt tot uitdrukking in de emissiefactor van gas en elektriciteit. De aannames voor de beschikbare volume duurzaam opgewekte elektriciteit en biogas zijn afgeleid van de Nationale Energie Verkenning. Hoogwaardige restwarmte van industrie is buiten beschouwing gelaten.

Resultaten

Emissiereductie

Per scenario levert de studie inzichten in de resulterende emissies en kosten op. De emissies per scenario zijn weergegeven in Figuur 2.



Figuur 2: Emissies CO₂ verschillende scenario's

De grootste reducties wordt gehaald in het Decentraal scenario en het Hybride scenario met hoge isolatie. Deze positieve resultaten zijn in eerste instantie te danken aan de hoge isolatiegraad in deze scenario's. Daarnaast kan er door het beperkte elektriciteitsverbruik in deze scenario's relatief veel duurzaam opgewekte elektriciteit toegepast worden en is het verbruik van gas laag, omdat alleen in hele koude periodes en voor tapwater gas gebruikt wordt. Het Decentraal Scenario wordt verder verbeterd doordat er teruglevering van elektriciteit plaatsvindt aan het net. De emissies die hiermee bespaard worden bij de centrale productie worden afgetrokken van de emissies in dit scenario.

Het Elektrisch Hoog scenario presteert relatief slecht. Alle emissies in dat scenario worden veroorzaakt door de sterk toenemende vraag naar elektriciteit. Deze studie gaat ervan uit dat additionele vraag naar elektriciteit ingevuld wordt door ongesubsidieerde duurzame energie. Dit past bij de aanname dat de kosten voor subsidie van duurzame energie bij alle scenario's gelijk zijn.

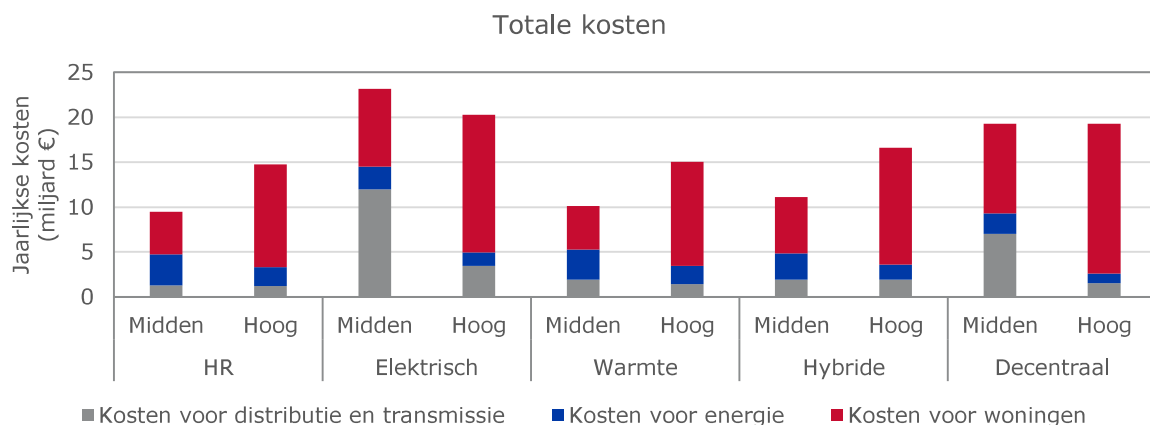
De additionele elektriciteitsvraag wordt – ook gelet op het vraagprofiel – ingevuld met gascentrales. Dit brengt de emissiefactor voor deze additionele vraag omhoog. Hoge CO₂ prijzen en/of additionele subsidies kunnen het aandeel duurzame elektriciteit doen stijgen en de emissies in dit scenario verder doen dalen. Dit geldt voor alle scenario's.

Tot slot is te zien in scenario HR Hoog dat een aanmerkelijke reductie van emissies behaald kan worden door isolatiemaatregelen alleen. Van de potentiële emissiereductie (emissie HR Midden minus emissie Decentraal Hoog) kan 2/3 worden gerealiseerd met alleen isolatie (HR Hoog). Elektrisch en Warmte leiden daarna nauwelijks tot extra emissiereductie, namelijk 0,6 tot 1,2 Mton. Bij Warmte is dit effect beperkt omdat is aangenomen dat slechts 25% van de woningen van collectieve warmte worden voorzien. Warmtelevering is vooral aantrekkelijk als niet tot een hoog isolatie niveau kan worden na-geïsoleerd.

Totale kosten

Naast verduurzaming en betrouwbaarheid is betaalbaarheid een belangrijke pijler in de vormgeving van de warmtevoorziening. Het verschil in kosten om de extra emissiereductie te realiseren is bijvoorbeeld in bovengenoemde case voor Decentraal veel hoger dan voor Hybride (1153 €/ton tegenover 584 €/ton).

Een volledig overzicht van de totale systeemkosten per scenario is weergegeven in Figuur 3. De totale kosten zijn de som van jaarlijkse kosten voor energie, kosten voor distributie en transmissie en kosten voor isolatie en installaties in woningen.



Figuur 3: Totale kosten voor verschillende scenario's

De resultaten laten zien dat een scenario Elektrisch Midden het scenario is met relatief de hoogste kosten. Deze kosten worden veroorzaakt door de hoge investeringen in elektriciteitsdistributie en -transmissie, die nodig is om aan de hoge piekvraag van elektrische warmtepompen in middelmatica geïsoleerde huizen te voldoen. Ook in Decentraal Midden is dit effect om dezelfde reden zichtbaar, maar minder doordat door de lokale afstemming van vraag en aanbod de piekvraag van het netwerk minder stijgt dan in het scenario Midden Elektrisch.

Elektrisch Hoog en Decentraal Hoog hebben bijna dezelfde kosten. Bij Decentraal Hoog zijn de kosten voor de woningen hoger vanwege de inzet van de relatief dure micro WKK, maar dit wordt gecompenseerd door de besparingen in distributie en transmissie van elektriciteit vanwege de lagere piekvraag door betere lokale afstemming van vraag en aanbod. Dit laatste is in Elektrisch Hoog niet het geval.

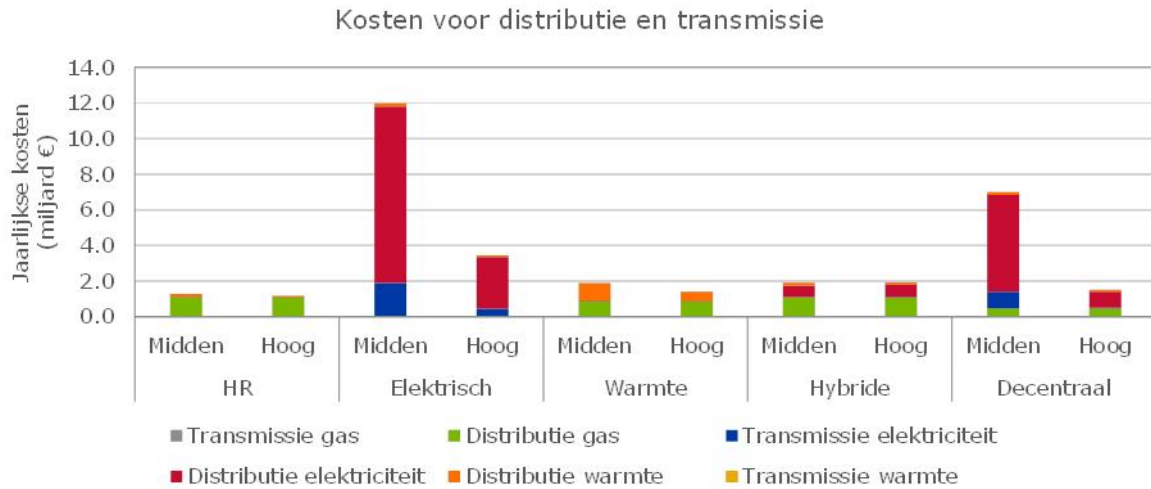
Daarnaast is te zien dat het inzetten van elektrische warmtepompen (zoals in Elektrisch en Decentraal) de kosten bij hoge isolatie lager zijn dan bij midden isolatie. Het verhogen van het isolatieniveau faciliteert dus de kostenefficiënte inzet van warmtepompen, en brengt uiteindelijk de kosten voor verregaande emissieverlagingen omlaag. De sterke interactie tussen isolatiegraad en infrastructuurkosten voor elektrische warmtepompen maakt het belangrijk om maatschappelijk de juiste keuzes te maken en maatregelen in de juiste volgorde te implementeren. Het moet voorkomen worden dat elektrische warmtepompen infrastructuur nodig maken die op middellange termijn, met hogere isolatie, niet meer nodig is.

De kosten voor Warmte midden zijn in verhouding tot HR midden het laagst, maar dit scenario levert veel minder CO₂-reductie dan de andere scenario's omdat warmtelevering niet in de warmtevraag van de hele woningvoorraad kan voorzien. Het belangrijk om te benadrukken dat de effecten van warmte beperkt naar voren komen omdat maar 25% van de huishoudens met warmtenetwerken worden voorzien, terwijl de andere scenario's tot 100% implementatie van de respectievelijke technologieën overgaan.

Kosten distributie en transmissie

De jaarlijkse kosten voor distributie en transmissie in het eindbeeld zijn weergegeven in Figuur 4. De jaarlijkse kosten voor distributie en transmissie liggen in het scenario Elektrisch Hoog een factor 3 hoger dan in het gasscenario HR Hoog. Zelfs bij een hoge isolatiegraad is nog een forse verzwaring van het elektriciteitsnet nodig bij de inzet van elektrische warmtepompen. De inzet van hybride warmtepompen leidt tot minder netverzwaring, maar ook daar zijn de infrastructuur kosten nog 2 keer zo hoog dan in het gasscenario HR Hoog. Het decentraal scenario vermindert de vraag naar zwaardere elektriciteitsnetten door gelijktijdige lokale productie maar ook daar zijn de infrastructuur kosten nog 1,5 keer hoger dan in het gasscenario². De jaarlijkse kosten bij de inzet van warmtenetten zijn iets hoger dan in het HR Midden scenario.

² Het lokaal optimaliseren van vraag en aanbod en een optimaliseren van soorten warmte opwek (zonnecollectoren, warmteboilers, luchtwarmtepompen e.d.) is buiten scope van het onderzoek gebleven.

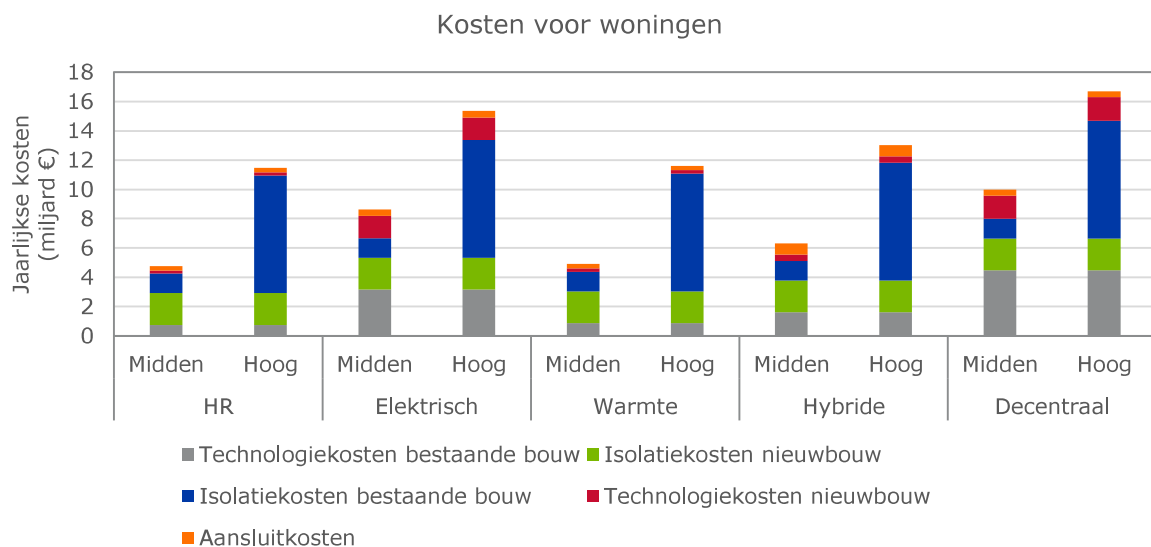


Figuur 4: Jaarlijkse kosten distributie en transmissie verschillende scenario's - eindbeeld

Kosten in woningen

De jaarlijkse kosten in woningen in het eindbeeld zijn weergegeven in Figuur 5. De kosten bestaan uit kosten voor isolatie, kosten voor technologie en aansluiten.

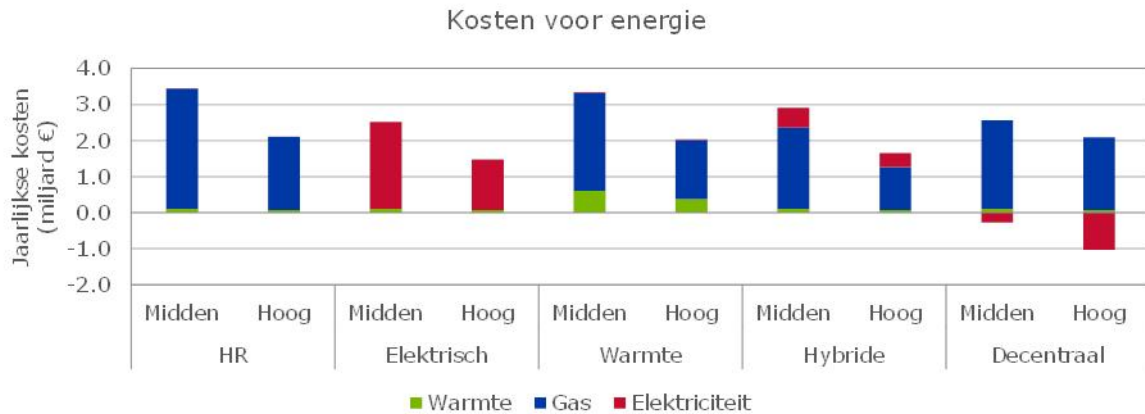
De kosten in woningen zijn het hoogst in het Decentrale scenario, door inzet van relatief dure micro-WKK installaties. Daarna komen de hoogste kosten voor in het Elektrisch scenario door de inzet van warmtepompen. Hybride warmtepompen (warmtepomp inclusief HR-ketel) zijn goedkoper. De laagste kosten komen voor in het gasscenario. De kosten van een HR-ketel zijn relatief laag, zelfs lager dan de aansluiting op warmtenetten in bestaande eengezinswoningen. In de kosten in woningen zitten ook nog kosten voor de aansluiting van de woning zelf en bemetering.



Figuur 5: Jaarlijkse kosten in woningen verschillende scenario's eindbeeld

Kosten energie

De jaarlijkse kosten voor energie in het eindbeeld zijn weergegeven in Figuur 6. In alle scenario's liggen de energiekosten lager dan in het scenario HR Midden³.



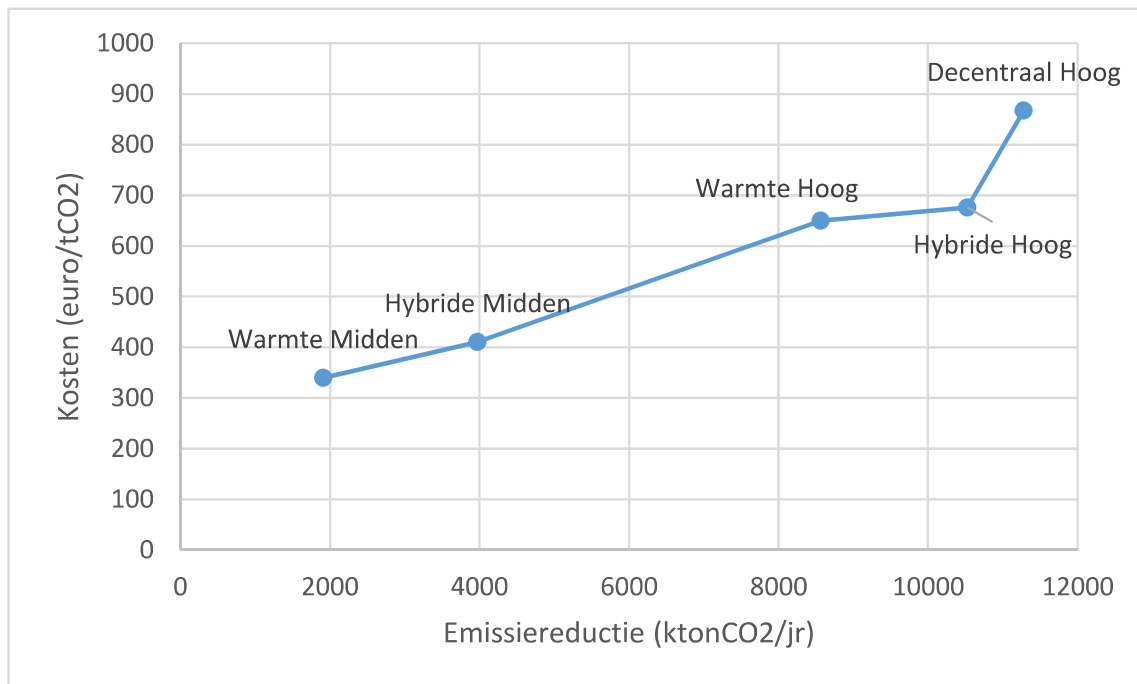
Figuur 6: Kosten voor energie

Kosten emissiereductie

De kosten voor emissiereductie lopen op naarmate de reducties toenemen. In Figuur 7 zijn, in volgorde van oplopende emissiereductiekosten per eenheid, de scenario's in een grafiek geplaatst weergegeven. De scenario's waarbij hogere kosten niet samengaan met verdergaande emissiereductie zijn weggelaten.

Uit de figuur valt af te lezen dat de meest verregaande reducties bereikt worden met hoge isolatie, en met de hoogste kosten. Relatief goedkope stappen kunnen genomen worden met warmte en hybride in midden isolatie. Het implementeren van het decentraal of elektrische warmtepompen scenario in midden isolatie (niet weergegeven) leveren echter zeer hoge kosten op (1.648 €/ton) en lijkt daarom geen goede stap.

³ Noot: De regels voor Niet-Meer-Dan-Anders worden in deze analyse niet toegepast omdat deze bepalend zijn voor de tarieven, niet de systeemkosten.



Figuur 7: Kosten per eenheid bespaarde uitstoot bij oplopende absolute hoeveelheid vermeden emissies

De onderstaande tabel geeft een overzicht van alle uitkomsten per scenario.

Tabel 2: Overzicht resultaten scenario's (jaarlijkse kosten in miljoenen tenzij anders vermeld)

Hoofdenenergiedrager Verwarmingstechniek Isolatie niveau	Gas HR			Elektriciteit Elektrisch			Warmte Warmte			Gas/elektriciteit Hybride			Mix Decentraal		
	Midden	Hoog	Midden	Midden	Hoog	Midden	Midden	Hoog	Midden	Midden	Hoog	Midden	Midden	Hoog	Hoog
Kosten															
Totaal, waarvan:	9,491	14,767	23,164	20,288	10,142	15,059	11,124	16,611	19,282	19,277					
Woningen	4,765	11,484	8,652	15,370	4,900	11,618	6,312	13,030	9,984	16,702					
Infrastructuur	1,276	1,180	11,988	3,441	1,897	1,403	1,904	1,921	7,010	1,510					
Energie	3,450	2,104	2,525	1,477	3,346	2,038	2,909	1,659	2,288	1,066					
Woningen															
Isolatie	3,503	10,222	3,503	10,222	3,503	10,222	3,503	10,222	3,503	10,222					
Installaties	1,262	1,262	5,148	5,148	1,396	1,396	2,808	2,808	6,480	6,480					
Infrastructuur															
Elektriciteitsdistributie	7	7	9,926	2,887	37	37	618	724	5,435	904					
Elektriciteitstransmissie	0	0	1,847	421	2	2	29	34	927	45					
Gasdistributie	1,056	1,056	37	37	836	836	1,056	1,056	443	443					
Gastransmissie	35	22	0	0	29	17	24	13	26	21					
Warmtedistributie	178	95	178	95	993	510	178	95	178	95					
Energie															
Elektriciteit	4	4	2,418	1,407	24	24	550	391	-275	-1,028					
Gas	3,339	2,030	0	0	2,717	1,639	2,252	1,198	2,457	2,024					
Warmte	106	70	106	70	605	375	106	70	106	70					
Verbruik															
Elektriciteit [GWh]	66	66	36,365	21,165	358	358	8,270	5,885	-4,129	-15,463					
Gas [GWh]	101,178	61,504	0	0	82,342	49,661	68,248	36,298	74,443	61,342					
Warmte [GWh]	3,670	2,409	3,670	2,409	20,853	12,948	3,670	2,409	3,670	2,409					

Hoofdenenergiedrager Verwarmingstechniek Isolatie ­ niveau	Gas HR		Elektriciteit Elektrisch		Warmte Warmte		Gas/elektriciteit Hybride		Mix Decentraal	
	Midden	Hoog	Midden	Hoog	Midden	Hoog	Midden	Hoog	Midden	Hoog
Emissies										
Totaal, waarvan	17,503	10,136	17,331	8,104	15,590	8,937	13,528	6,978	11,562	6,224
Elektriciteit [ktonCO2]	16	16	17,019	7,899	89	89	2,067	1,471	-1,032	-3,866
Gas [ktonCO2]	17,175	9,914	0	0	13,728	7,747	11,149	5,302	12,282	9,885
Warmte [ktonCO2]	312	205	312	205	1,772	1,101	312	205	312	205
Kosten per eenheid van emissiereductie	-	716	79474	1149	340	650	411	676	1648	868

Conclusies

Dit is de eerste studie die uitspraken doet over de integrale kosten van een aantal scenario's voor de verduurzaming van de warmtevoorziening van Nederland voor de komende decennia. In verschillende scenario's verkent deze studie vraag- en aanbodopties voor de invulling van de huishoudelijke warmtevraag. De onderzochte keuzes zijn de mate van isolatie, keuze van warmtetechniek (HR ketel, warmtepomp, μ WKK, warmtenet) en keuze van energiedrager (gas, elektriciteit of warmte). De randvoorwaarde hierbij is het behoud van het huidige comfort en mate van betrouwbaarheid.

De uiteindelijke oplossingsrichting is zeker niet één van de extremen die in deze studie geschetst zijn, maar zal een mix van de verkende richtingen zijn. Door belangrijke lokale verschillen in woningvoorraad, woningdichtheid en bestaande infrastructuur, zal deze mix ook voor elk gebied verschillend uitpakken.

In de studie wordt het HR Midden scenario als basisscenario gezien. De andere scenario's worden met dit scenario vergeleken. Op basis hiervan kunnen we de volgende conclusies trekken:

Emissies

Verregaande maatregelen zijn nodig om emissies in de gebouwde omgeving sterk te verminderen – Er zijn verregaande maatregelen nodig om in alle woningen 85% CO₂-reductie te realiseren. Geen van de scenario's bereikt 85% reductie. De gevoeligheidsanalyse op emissiefactoren laat zien dat deze reductie alleen gehaald kan worden in het scenario met elektrische warmtepompen of het scenario decentrale energieopties als de landelijke inzet van respectievelijk duurzame elektriciteit en groen gas verder wordt vergroot dan nu verondersteld.

De emissiefactor voor gas en elektriciteit heeft een sterke invloed op de te bereiken CO₂ reductie

De emissie in de scenario's kunnen verder omlaag worden gebracht door het aandeel duurzame elektriciteit en groen gas verder te verhogen. Hier kunnen echter kosten mee gemoeid zijn die in deze studie niet zijn meegenomen in de vergelijking. De aanname dat er een absoluut beperkte hoeveelheid duurzame elektriciteit beschikbaar is voor de huishoudelijke markt heeft een belangrijke invloed op de resultaten van deze studie.

Voor warmte is in deze studie gekozen voor warmteopwekking met geothermie met een gasgestookte back up. Dit is een duurzamere invulling dan de huidige praktijk waarbij warmtenetten meestal gevoed worden vanuit elektriciteitscentrales en AVI's.

Scenario's met hoge isolatie en veel decentrale opties of hybride warmtepompen geven de meeste emissiereductie

Deze positieve resultaten zijn in eerste instantie te danken aan de hoge isolatiegraad in deze scenario's. Daar komt bij dat ondanks de inzet van gas in deze scenario's, de emissies laag zijn door een relatief grote fractie groen gas, die mogelijk wordt gemaakt door sterke besparingen in het gasgebruik. Het Decentraal Scenario heeft de laagste uitstoot.

Dit is mogelijk doordat er teruglevering van elektriciteit plaatsvindt aan het net. De emissies die hiermee bespaard worden bij de centrale productie worden meegerekend.

Welk scenario optimaal is, is afhankelijk van het ambitieniveau ten aanzien van CO₂ reductie. De meest kosteneffectieve keuze afhankelijk van de ambitie ziet het er als volgt uit.

- Gematigd: alleen hybride warmtepompen en warmtenetten;
- Hoog: hoog isolatieniveau;
- Zeer hoog: Isolatie + hybridewarmtepompen;
- Maximaal: isolatie + combinatie van elektrische warmtepompen en micro-WKK.

Indien maximale reductie van CO₂ uitstoot in de non-ETS sector voorop staat dan vallen technieken die in een huis CO₂ uitstoot veroorzaken af en blijven warmtenetten en elektrificatie over in combinatie met isolatie.

Indien naar de meest kosten effectieve besparing gekeken wordt, dan is bij Midden isolatie de aanleg van een warmtenet een goede keuze of de installatie van een hybride warmtepomp. Uitgaande van een Hoog isolatieniveau is verdere substantiële emissiereductie met name realiseerbaar door grootschalig gebruik te maken van hybride warmtepompen of de combinatie van elektrische warmtepompen met micro-WKK. De kosten per vermeden ton CO₂ voor de combinatie zijn echter circa het dubbele van die voor de hybride warmtepomp (1.153 €/ton tegenover 584 €/ton).

Van de potentiële emissiereductie kan twee derde worden gerealiseerd met alleen isolatie, hetgeen te zien is in het scenario HR Hoog

De scenario's Elektrisch en Warmte leiden daarna nauwelijks tot extra emissiereductie, namelijk 0,6 tot 1,2 Mton. Dat komt bij de elektrische warmtepomp door de grote hoeveelheid elektriciteit die daarvoor nodig is en die niet allemaal duurzaam kan worden opgewekt, wat tot uiting komt in de emissiefactor van elektriciteit. Bij warmtenetten hangt dat samen met het uitgangspunt dat warmtenetten maximaal 25% van de woningen van warmte kunnen voorzien. Hybride en Decentraal leiden wel tot extra emissiereductie.

Kosten

Alle scenario's leiden tot een substantiële stijging van de systeemkosten

Het invoeren van de meest verregaande maatregelen betekent meer dan een verdubbeling van de kosten die op dit moment met de verwarming van woningen gemoeid zijn. **De grootste investering ligt in de woningen zelf.** In de geschetste scenario's vormen investeringen in isolatie en technologieën (zoals warmtepompen) een groot deel van de kosten voor de warmtevoorziening. Vooral als gevolg van deze investeringen nemen de jaarlijkse kosten voor de warmtevoorziening toe ten opzichte van de huidige situatie. Dit betekent dat huishoudens zelf het grootste deel van de investeringskosten moeten dragen. Deze eenmalige grote investeringsbeslissingen zullen naar verwachting ingrijpender zijn dan de, relatief, beperkte energie-infrastructuurkosten die maandelijks worden doorberekend door de netbeheerders.

Isolatie heeft grote invloed op de kosten van infrastructuur bij inzet van elektrische warmtepompen

Het is gebleken dat de mate van isolatie cruciaal is voor de omvang en de vorm van de warmtevraag. Isoleren naar een gemiddeld isolatieniveau leidt tot een patroon dat vergelijkbaar is met het bestaande patroon, terwijl maximale isolatie het vraagpatroon zeer sterk afvlakt. De studie toont aan dat het grootschalig toepassen van elektrische warmtepompen zonder afdoende isolatie de infrastructuurkosten zeer sterk (tienvoudig) doet stijgen. Het Elektrisch Midden scenario is daarmee het enige scenario waar de infrastructuurkosten dominant zijn in de totale kosten. Een hoge isolatiegraad zorgt ervoor dat de kosten voor netverzwaring met een factor 4 worden teruggebracht. De kosten van de isolatie worden hiermee in dit scenario – op maatschappelijk niveau – ruimschoots terugverdiend. Evengoed zullen de netwerkkosten voor elektriciteit bij toepassing van elektrische warmtepompen samen met een Hoog isolatieniveau een factor 2 tot 3 hoger zijn dan nu.

Lokale optimalisatie leidt tot lagere netwerkkosten

Door grootschalige invoering van warmtepompen nemen de kosten van de energie-infrastructuur sterk toe. Door lokale vraag te optimaliseren met lokale productie zoals Micro-WKK's kunnen de infrastructuurkosten worden verlaagd. De verscheidenheid aan mogelijke technieken, slimme regelingen of vraagresponso op real time pricing zijn in deze studie niet onderzocht.

In perspectief

In de studie zijn keuzes gemaakt om de toekomstige ontwikkeling van de warmtevoorziening van woning te verkennen. Deze keuzes leiden tot enkele belangrijke kanttekeningen.

Er zijn veel factoren die snelheid en richting van de warmtetransitie in de gebouwde omgeving zullen gaan bepalen. Een aantal daarvan zijn verkend binnen de bandbreedte aan scenario's gebruikt in deze studie. De scenario's geven extremen weer, waarbij individuele technologieën in extreme mate wordt toegepast. In werkelijkheid zal elke wijk en elk huis zijn unieke eigenschappen hebben die de optimale oplossing voor dat geval bepalen. **De uiteindelijke oplossingsrichting is daarom zeker niet één van de extremen die in deze studie geschetst zijn, maar zal een mix van de verkende richtingen zijn.**

Deze studie heeft een aantal scenario's verkend op eindpunten en voor Nederland als geheel. Er is weinig aandacht besteed aan **implementatie aspecten en omgeving die daarvoor nodig is**. Bij de totstandkoming van dit werk realiseerden deelnemers zich steeds sterker de spanning tussen enerzijds de lokale differentiatie en anderzijds de nationale systeemeffecten. Vanwege de grote invloed van individuele keuzes en systeemkosten is het raadzaam om te onderzoeken of meer regie en beslissingsbevoegd op regionaal niveau nodig is.

Deze studie richt zich op de ontwikkelingen in de huishoudelijke warmtevoorziening. Deze afbakening leidt er toe dat ontwikkelingen met betrekking tot de overige huishoudelijk energievraag (elektrische apparaten, elektrisch vervoer) niet expliciet onderzocht zijn.

De kosten die gemaakt worden om het energiesysteem aan de nieuwe eisen voor duurzame warmtevoorziening te laten voldoen zijn volledig toegerekend aan de warmtevoorziening. **In werkelijkheid wordt dezelfde infrastructuur ook gebruikt voor andere toepassingen en gebruikers.** De meest in het oog springende technologie die kan worden gefaciliteerd is zon-PV. De netwerkinfrastructuur die aangelegd is voor het voorzien van de piekvraag van warmtepompen, kan ook gebruikt worden voor het terugleveren van zonne-energie aan het net. Dit geeft synergie tussen aanpassingen in het net voor zonnepanelen en warmtepompen. De mate waarin zonnepanelen worden geïnstalleerd en daarmee het ontstaan van een dergelijk synergievoordeel zal sterk verschillen per geografisch gebied.

De in deze studie gepresenteerde kosten zijn systeemkosten. De studie geeft dus een beeld van de totale te verwachten financiële kosten voor het energiesysteem voor de verschillende scenario's. De verdeling van deze kosten over huishoudens, overheid of andere partijen wordt daarbij niet beschouwd. Er zijn verschillende kostenperspectieven mogelijk op het energiesysteem: maatschappelijk, consumenten, energieleveranciers, netbeheerders, overheid, etc. In deze studie is gekozen om de nationale kosten te hanteren die samenhangen met het systeem als geheel. **Bij het interpreteren van de resultaten is het belangrijk om in gedachten te houden dat de getoonde kosten niet de werkelijke uitgaven en netto kosten of baten voor de gebruiker laten zien.** Deze worden namelijk voor een aanmerkelijk deel bepaald door belastingen en subsidies, die in deze studie niet zijn meegenomen. Daarnaast is het belangrijk om te realiseren dat de studie heeft gekeken naar *financiële* kosten. Dit betekent dat externaliteiten, zoals verminderde uitstoot van CO₂ en fijn stof, geopolitieke onafhankelijkheid, adaptatiekosten en werkgelegenheid niet zijn gewaardeerd in euro's zoals in een maatschappelijke kosten-baten analyse.

Binnen deze studie is een groot aantal woningtypen, ambitieniveaus voor isolatie en toegepaste warmtetechnologieën onderzocht. **De veelzijdigheid is in werkelijkheid nog veel groter.** Ook zijn diverse gedragsfactoren (deel van het huis dat verwarmd wordt, stooktemperatuur, etc.) van groot belang. In de scenario's worden zowel technologieën ingezet die al lange tijd op de markt zijn (HR107, warmtenetten) als technologieën die zich nog in een opkomende fase bevinden (warmtepompen, brandstofcellen). De kosten van deze nieuwe technologieën zijn nu nog erg hoog, maar kunnen in de toekomst sterk dalen. Hoe groot deze daling zal zijn is echter een grote onzekerheidsfactor.

Gedrag warmtepompen is belangrijk en onzeker

Deze studie heeft voor het eerst het gedrag van warmtepompen tijdens extreem koude periodes gemodelleerd. Bij aanvang van de studie bleken er sterk verschillende perspectieven van betrokken partijen. Dit wijst erop dat er nog aanmerkelijke onzekerheid bestond over het gedrag van elektrische warmtepompen, en de bijbehorende elektriciteitsvraag, in periodes van extreme koude. Hierin heeft de studie meer duidelijkheid gegeven. Omdat er echter geen enkele praktijkervaring is met het gedrag van warmtepompen bij een extreme koudepiek kunnen modelresultaten niet gekalibreerd worden met praktijkmetingen waarin het daadwerkelijke gedrag van bewoners en technologie is geobserveerd.

Er moet worden onderzocht hoe de kosten voor warmtenetten kunnen worden verlaagd

Opties zijn aangedragen om de kosten op termijn te verlagen door goede locatiekeuze, door een langere levensduur en door innovatie in de warmte-isolatie van de netten. Het hergebruik van warmte vanuit de industrie (vuilverbranding, procesindustrie) geeft andere resultaten. Dit moet in meer detail onderzocht worden. Ook kan worden onderzocht of een positief effect kan worden bereikt door de netten open te stellen, waardoor concurrentie tussen warmte-aanbieders ontstaat. Naarmate het beter lukt dit kostenpatroon te verlagen, zal het voor meer huishoudens een goede oplossing zijn.

Bij de warmtescenario's is het daarnaast belangrijk om in het hoofd te houden dat deze scenario's voor 75% van de woningen bepaald worden door een andere technologie. In dit geval is deze gelijk aan het HR scenario. Hierdoor is het effect van warmtenetten minder sterk zichtbaar.

Inhoudsopgave

1	Inleiding	1
1.1	Achtergrond	1
1.2	Doelstelling	2
1.3	Afbakening	3
1.4	Tijdshorizon	4
1.5	Leeswijzer	4
2	Werkwijze en basisaannames	5
2.1	Basisaannames	6
2.2	Scenario specifieke energetische kenmerken	8
2.3	Warmtevraagprofielen	10
2.4	Synthese	17
3	Scenario's	31
3.1	Overzicht scenario's	31
3.2	Beschrijving technologieën in scenario's	32
3.3	Beschrijving isolatieniveaus in scenario's	34
3.4	Implementatie van de verschillende scenario's	34
4	Analyse van de resultaten	36
4.1	Analyse effect emissies	36
4.2	Analyse kosten	38
4.3	Flexibiliteitsscenario's	43
4.4	Resultaten per scenario	45
4.5	Gevoeligheidsanalyse	47
5	Conclusies	54
6	In perspectief	57
7	Bronnen	59
Bijlage I.	Vraagprofielen	62
I.1.	Validatie en kalibratie gasvraagprofiel in scenario A	62
Bijlage II.	Specificaties Warmtepompen	65
II.1.	Lucht-water warmtepomp	65
I.1.	Bodem-water warmtepomp	66
Bijlage II.	Scenario's	68

Bijlage III.	Kosten woningen	77
III.1.	Kosten isolatie	77
III.2.	Kosten technologieën	79
Bijlage IV.	Kosten netwerk	82
IV.1.	Kosten elektriciteitsdistributie	82
IV.2.	Topografie woonmilieus	83
IV.3.	Kosten elektriciteitstransmissie	85
IV.4.	Kosten gasdistributie	87
IV.5.	Kosten warmtenetten	88
Bijlage V.	Kosten energie	90
V.1.	Portfolio generation model	90

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

De huishoudelijke warmtevoorziening speelt een belangrijke rol in de Nederlandse energievraag. Op dit moment bedraagt deze circa 388 PJ primair⁴ en wordt vooral ingevuld door aardgas. De invulling van de warmtevraag vormt een belangrijke uitdaging binnen de energietransitie. De huidige doelstellingen gaan uit van een vrijwel energieneutrale gebouwde omgeving in 2050⁵. Vooral in de bestaande bouw is er nog geen gedeeld beeld van hoe die verandering er uit gaat zien, terwijl meer dan 75% van de woningen waarin wij in 2050 zullen wonen nu al gebouwd zijn. Het duurzaam maken van de warmtevoorziening voor de bestaande bouw is de grootste opgave.

De complexiteit van de te maken keuzes is groot. Het gaat niet langer om een afzonderlijke afweging voor een beperking van de energievraag door bijvoorbeeld isolatie. Duurzaam verwarmen van woningen vraagt ook om een bijpassende keuze in de installatie, energiedrager en infrastructuur. Het vergt een integrale analyse waarbij verschillende energiedragers (gas, elektriciteit en warmte), technologieën (zoals warmtepompen, HR-ketels en brandstofcellen) en de benodigde energie-infrastructuur in samenhang worden beschouwd en met elkaar vergeleken. Tegelijkertijd moet de nieuwe warmtevoorziening blijven voldoen aan hoge eisen met betrekking tot zowel betrouwbaarheid als betaalbaarheid. Keuzes die nu worden gemaakt op voorgenoemde gebieden zullen een groot en langdurig effect hebben op de wijze waarop, de mate waarin, en de snelheid waarmee de kosten voor het energiesysteem zich zullen ontwikkelen.

Deze transitie zal niet alleen in of rond deze woningen, maar ook in de bijbehorende gas-, elektriciteits- en warmtenetten plaatsvinden. Daarnaast gaat de energietransitie ook gevolgen hebben voor de wijze waarop de energievoorziening is ingericht. Lokale en regionale eigen productie en gebruik van (hernieuwbare) energie vraagt ook om nieuwe balans tussen van oudsher centraal georganiseerde en nieuwe opkomende decentrale systemen. Ook dit krijgt aandacht in deze studie.

In deze studie analyseren ECN en Ecofys in opdracht van Alliander, Gasunie en TenneT, hoe de warmtevraag van huishoudens kosten-efficiënt kan worden ingevuld rekening houdend met de gevolgen voor capaciteiten in transport- en distributie-infrastructuur en kosten over de gehele keten. De kosten bestaan uit:

- Technologie in woningen (isolatie en warmte-installaties);
- Productie of inkoop van elektriciteit, gas en warmte;
- Distributie- en transportinfrastructuur voor gas, elektriciteit en warmte.

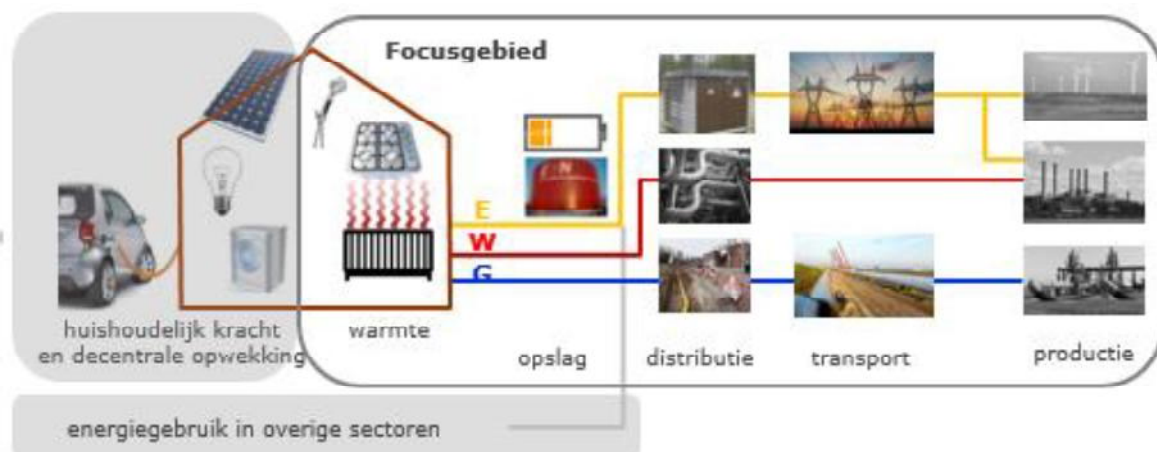
⁴ <http://www.rvo.nl/sites/default/files/Warmte%20en%20Koude%20NL%20NECW1202%20jan13.pdf>

⁵ In het rapport 'Rijk zonder CO₂: Naar een duurzame energievoorziening in 2050' van de Raad voor de Leefomgeving wordt aangegeven dat een emissieloze woningvoorraad in 2035 mogelijk is.
<http://www.rli.nl/publicaties/2015/advies/rijk-zonder-co2-naar-een-duurzame-energievoorziening-in-2050>

Uniek en cruciaal in dit project is de inbreng en gezamenlijke kennisopbouw van de verschillende betrokken netbeheerders Alliander, Gasunie en TenneT, waardoor de resultaten een directe band met de huidige en toekomstige praktijk hebben. De studie is mede mogelijk gemaakt met een bijdrage van de TKI Systeemintegratie. De resultaten zijn daarnaast voorgelegd aan een relevante en brede groep stakeholders in een klankbordgroep.

1.2 Doelstelling

De doelstelling van het project is om samen met relevante stakeholders inzicht te krijgen in en gevoel voor de gevolgen van keuzes voor de invulling van de warmtevraag voor de gehele keten, met als uitgangspunt dat het energiesysteem ook in de toekomst betrouwbaar en betaalbaar kan blijven. Deze analyse richt zich op de integrale effecten (energie, emissies, kosten) van de gehele huishoudelijke warmtevoorziening inclusief distributie en transport van elektriciteit, gas en warmte en wisselwerking daartussen.



Figuur 8: Focusgebied van de studie Systeemintegratie van de huishoudelijke warmtevoorziening

Het einddoel van het onderzoek is de volgende vragen te beantwoorden:

1. Welke energiedragers en technologieën kunnen een rol spelen in de huishoudelijke warmtevraag?
2. Hoe beïnvloeden keuzes voor het invullen van de huishoudelijke warmtevraag binnen de energietransitie de kosten in de keten van productie, transport, distributie en verbruik?
3. Wat is de benodigde netwerkcapaciteit die met technologiekeuzes samenhangen, en welke kosten hangen daarmee samen?

Deze vragen worden in deze studie beantwoord door de landelijke vraag te modelleren en de gevolgen voor de systeemkosten van verschillende scenario's voor verwarmingstechnologieën en isolatiemaatregelen te onderzoeken. Om de gevolgen van technologiekeuzes goed in kaart te kunnen brengen wordt in de scenario's aangenomen dat specifieke technologieën zeer grootschalig worden toegepast. Dit geeft een scherp beeld van de gevolgen van technologiekeuzes.

In werkelijkheid zal er altijd een mix van technologieën worden toegepast, omdat de verscheidenheid van gevallen om een verscheidenheid van oplossingen vraagt.

Een secundair doel is het verder verbeteren van begrip over de doorwerking van keuzes in de keten tussen de partners Alliander, Gasunie en TenneT een doel op zich. Tijdens de uitvoering van het project, het bepalen van de aanpak en de aannames en het bespreken en vaststellen van de tussenresultaten is onduidelijkheid weggenomen en is de wederzijdse kennis over warmtevoorziening toegenomen.

Alleen op basis van een breed begrip en een gedeelde terminologie kan een goede discussie en besluitvorming over de energietransitie plaatsvinden. Het opstellen van dit rapport beoogt hier een bijdrage aan te leveren.

1.3 Afbakening

Bepaalde aspecten van het energiesysteem worden in deze studie niet expliciet onderzocht.

- **Ander elektriciteitsgebruik** – Het elektriciteitsgebruik voor verlichting en huidhoudelijke apparaten in woningen wordt meegenomen in de berekening van de gevraagde piekcapaciteit van de elektriciteitsinfrastructuur, maar varieert niet tussen de scenario's en valt verder buiten de scope van deze studie. De kosten die aan dit gebruik zijn gerelateerd worden niet meegenomen. In de toekomst zou dit elektriciteitsverbruik kunnen dalen door efficiëntere verlichting en apparaten, maar ook kunnen toenemen door nieuwe toepassingen.
- **Zonnepanelen** – Decentrale elektriciteitsproductie met zonnepanelen op daken van woningen zal in de toekomst verder groeien. In deze studie worden zonnepanelen op huishoudelijk niveau niet gemodelleerd. Dit is omdat zonnepanelen op momenten van zeer grote warmtevraag geen gegarandeerde bijdrage kunnen leveren aan de warmtevoorziening, omdat het op deze momenten vaak donker is⁶. Zonnepanelen worden in deze studie wel meegenomen als onderdeel van het elektriciteitsproductiepark, en helpen dus de emissiefactor van elektriciteit te verlagen.
- **Energieproductie** – De kosten van de productie van elektriciteit worden niet volledig gemodelleerd. Als basis voor de kostenberekeningen worden bestaande prijsvoorspellingen genomen. Er wordt aangenomen dat de prijs van de energie de achterliggende kosten weerspiegelt. Er wordt wel gemodelleerd wat de relatieve effecten kunnen zijn van het verhogen van piekvraag op de kosten voor de elektriciteit voor verwarming.
- **Emissiefactoren** – Er wordt in alle scenario's rekening gehouden met eventuele wijziging van de vraag naar elektriciteit en gas, en de effecten daarvan op de emissiefactoren doordat een beperkte hoeveelheid duurzame energie mogelijk is. Als basis voor de emissiefactoren wordt uitgegaan van de NEV, met de bijbehorende neerwaartse ontwikkeling van de emissies per MWh.
- **Elektrisch vervoer** – Elektrisch vervoer zal naar de toekomst verder groeien, maar er wordt geen interactie verondersteld met de warmtevoorziening van woningen. Ten eerste zijn de volumes in autobatterijen onvoldoende om huizen langere tijd van energie voor warmte te voorzien. Ten tweede zal de autobatterij niet altijd beschikbaar zijn om te leveren op het kritieke moment (bijvoorbeeld omdat de auto gebruikt wordt of omdat de batterij op bepaalde momenten voldoende gevuld moet zijn).

⁶ Deze studie neemt aan dat seizoensopslag voor elektriciteit economisch en praktisch nog niet kan worden toegepast.

1.4 Tijdshorizon

De scenario's beschrijven een situatie in de toekomst, waarin de energietransitie, in lijn met de karakteristieken van de scenario's, volledig is uitgevoerd. Wanneer dit punt daadwerkelijk zal worden bereikt is sterk afhankelijk van de drijvende krachten en praktische beperkingen, zoals de mate van ontwikkeling en adoptie van nieuwe veelbelovende technologieën, beschikbare menskracht, beschikbare financiering en de snelheid van beleidsaanpassingen. Om deze redenen is er geen nadrukkelijk jaar aan het eindpunt verbonden. Om aannames te kunnen doen in de modelanalyse over de situatie op dit punt in de toekomst is in deze studie echter wel een jaar gekozen om de kwantitatieve aannames op te baseren. Dit jaar is 2050. Ook het pad naar dit eindpunt toe kan op verschillende manieren doorlopen worden: lineair, langzame start en later versnellend of juist afnemend in de tijd. Dit verloop is niet nader onderzocht en onderwerp voor nadere analyse.

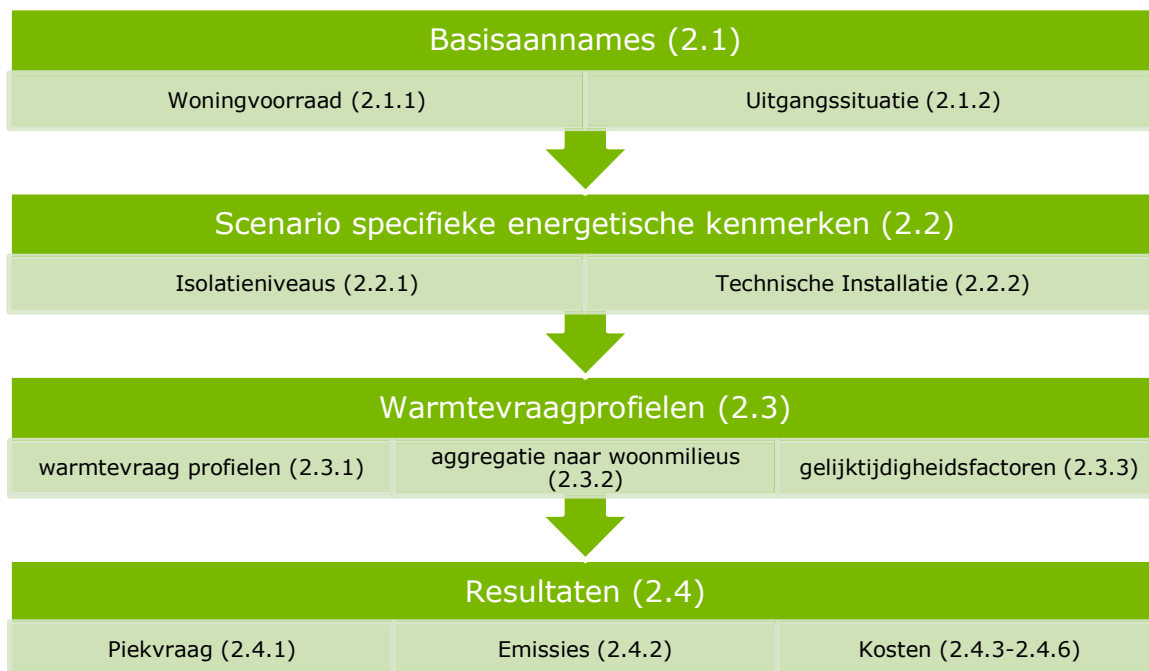
1.5 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 beschrijft de gevolgde methodologie en de aannames van deze studie. Dit hoofdstuk beschrijft ook de wijze waarop scenario's zijn opgebouwd. Bij het beschrijven van de methodologie is gekozen voor een beschrijving op hoofdlijnen. Verdere details met betrekking tot aannames en achtergronden worden nader uitgewerkt in voetnoten of bijlagen. In hoofdstuk 3 worden de vijf scenario's beschreven. In hoofdstuk 4 worden de resultaten gepresenteerd. In hoofdstukken 5 en 6 worden de conclusies behandeld en in perspectief geplaatst.

2 Werkwijze en basisaannames

In dit hoofdstuk zal worden beschreven op welke wijze de gevolgen van verschillende technologiekeuzes en isolatieniveaus zijn geanalyseerd. De volgende stappen worden hierin gevolgd:

- **Definiëren basisaannames** – Om specifiek naar de invloed van technologiekeuzes te kunnen kijken, verschillen alleen de energetische aannames (technologiekeuzes en de mate van isolatie) tussen deze scenario's. De overige basiselementen zijn voor alle scenario's bewust gelijk gehouden. De functionele warmtevraag is in elk scenario hetzelfde, en de leveringszekerheid zoals deze op dit moment wettelijk is vastgelegd voor het gastransportsysteem wordt in elk scenario toegepast. Ook de woningvoorraad en de ontwikkeling daarvan, de dichtheid van de bebouwing en samenstelling van woningtypes (woonmilieus) is gelijk in alle scenario's. De basisaannames worden besproken in paragraaf 2.1.
- **Definiëren energetische scenario's** – Om de gevolgen van energetische keuzes op de integrale kosten te kunnen bepalen, worden er verschillende scenario's gedefinieerd waarin telkens een bepaalde technologie dominant is in combinatie met een bepaald isolatieniveau. De scenario's zijn in intensieve samenspraak met de partners en na consultatie met de Klankbordgroep gekozen. In paragraaf 2.2 wordt beschreven uit welke elementen de scenario's worden opgebouwd. De scenario's zelf worden in hoofdstuk 3 besproken.
- **Warmtevraagprofielen** – De basis van het onderzoek is de *functionele* huishoudelijke warmtevraag. Dit is de warmte die in een huis ingevoerd moet worden om de vereiste temperatuur te bereiken. Deze vraag is onafhankelijk van de toegepaste technologie, maar verschilt per woningtype en isolatiegraad. Omdat het warmtevraagprofiel/techniekcombinatie van de toekomst vaak niet bekend waren, zijn deze nieuw opgebouwd. Per technologie wordt vervolgens bepaald wat de bijbehorende vraag naar elektriciteit, gas en warmte is. Dit wordt nader beschreven in paragraaf 2.3.
- **Resultaten** – Op basis van de woningvoorraad, woonmilieus en vraagprofielen per energiedrager wordt de geaggregeerde warmte gerelateerde energievraag gemodelleerd en de bijbehorende kosten en emissies berekend. In paragraaf 2.4 wordt besproken welke methode en aannames gebruikt zijn bij de berekening van deze resultaten.



Figuur 9: Overzicht van werkwijze modellering

2.1 Basisaannames

In deze paragraaf worden de basisaannames besproken. Dit zijn aannames die in alle scenario's hetzelfde zijn.

2.1.1 Woningvoorraadontwikkeling en karakteristieken

De ontwikkeling van het totaal aantal woningen en het cumulatieve aantal woningen gebouwd na 2015 is gebaseerd op Primos prognose van ABF Research. De totale woningvoorraad groeit van 7,4 miljoen woningen in 2015 naar 8,4 miljoen woningen in 2050. Dit wordt nader toegelicht in Bijlage II.

Voor het berekenen van de distributiekosten en transmissiekosten is ook een karakterisering van de woningvoorraad⁷ naar woningtype en 'woonmilieu' noodzakelijk. Een woonmilieu wordt getypeerd door een bepaalde dichtheid van woningen en een samenstelling van woningtypes. Deze elementen hebben een belangrijke invloed op de netwerkkosten. In het woonmilieu 'Centrum-stedelijk' staan bijvoorbeeld relatief veel kleinere huizen dicht bij elkaar, terwijl in het woonmilieu 'Landelijk wonen' veel vrijstaande huizen ver uit elkaar staan. Dit heeft invloed op de piekvraag per woning en de kosten voor het uitbreiden van het netwerk.

⁷ In de netwerktarieven worden deze kosten gesocialiseerd.

De verdeling van de woningvoorraad naar woningtype en woonmilieu is gebaseerd op ABF Research (2005) en is weergegeven in sectie 2.4.6⁸.

Op basis van de brochure "Voorbeeldwoningen bestaande bouw 2011" (RVO, 2011) zijn de gemiddelde karakteristieken van de geometrie van verschillende woningtypen in de Nederlandse woningvoorraad bepaald (zie Tabel 33 in Bijlage II). Het berekende gemiddelde dak-, gevel- en vloeroppervlak wordt gebruikt in de warmteverliesberekening waarmee de warmtevraagprofielen zijn berekend.

2.1.2 Uitgangspunt isolatieniveau en technologie in 2015

Voor de verdeling naar isolatiegraad in 2015 is een grove verdeling gemaakt naar isolatie graad laag, midden en hoog. Voor isolatiegraad laag nemen we de woningen die label D t/m G hebben. Voor isolatiegraad Midden nemen we alle label A+ t/m C. Isolatiegraad hoog komt in huidige woningbestand nog niet of nauwelijks voor.

Voor de verdeling naar technologie in 2015 is onderscheid gemaakt naar woningen met een gasaansluiting en woningen aangesloten op een warmtenet. Bij woningen met een gasaansluiting nemen we aan dat deze een HR107 ketel hebben. Het aandeel van andere technologieën zoals warmtepompen is in 2015 nog verwaarloosbaar. Ongeveer 2% van de woningen wordt verwarmd met een warmtepomp. De verdeling naar isolatiegraad en technologie per type woning is gebaseerd op data uit het WoON 2012 onderzoek (ECN, 2013).

Tabel 3: Verdeling per woning type naar isolatiegraad en technologie in 2015

Woningtype	Met warmtenet		Zonder warmtenet	
	Laag	Midden	Laag	Midden
Tussenwoning	0,76%	3,54%	57%	39%
Hoekwoning	0,31%	2,64%	59%	38%
Flat	2,97%	3,59%	55%	39%
Twee-onder-een-kapwoning	0,16%	1,72%	51%	47%
Vrijstaande woning	0,00%	0,72%	52%	47%

⁸ In het rapport "Methodiek en toelichting Socratesmodel" van ABF Research (2005) worden dertien woonmilieus gekarakteriseerd, o.a. met de parameters "aantal", "aandeel eengezinswoningen" en "aandeel vrijstaande woningen". Op basis van de publicatie "Woonmilieutypologie" van ABF Research heeft het project team de dertien woonmilieus gekoppeld aan één van de vijf woonmilieus in deze studie (centrum-stedelijk, buiten-centrum, groen-stedelijk, centrum-dorps en landelijk wonen). Vervolgens is aan de hand van de parameter "aantal" het gewogen "aandeel eengezinswoningen" en het gewogen "aandeel vrijstaande woningen" bepaald. Het aandeel appartementen is vervolgens gedefinieerd als $1 - \text{"aandeel eengezinswoningen"}$. Het aandeel tussenwoningen, hoekwoningen en twee-onder-een-kapwoningen zijn berekend op basis van het "aandeel eengezinswoningen" – "aandeel vrijstaande woningen". Hierbij is aangenomen dat in elk woonmilieu de verdeling tussen de resterende eengezinswoningen constant is. Het uiteindelijke resultaat is geoptimaliseerd op basis van de verdeling van woningen naar woningtype en het aantal woningen per woonmilieu zoals gedefinieerd Tabel 17, Tabel 18 en Tabel 19.

2.2 Scenario specifieke energetische kenmerken

Per scenario verschillen de toegepaste isolatieniveaus en de toegepaste technologieën. Deze paragraaf beschrijft nader welke kenmerken worden onderscheiden.

2.2.1 Isolatieniveaus

In deze studie wordt voor alle woningtypen onderscheid gemaakt tussen drie verschillende isolatieniveaus: laag, midden en hoog:

- **Isolatiegraad laag** betekent dat de woning niet is voorzien van dak-, vloer-, of gevelisolatie, waarbij het aandeel dubbelglas significant meer is dan enkelglas. Een woning met dit isolatieniveau en een HR-ketel heeft een energielabel E.
- **Isolatiegraad midden** betekent dat de woning is (na)geïsoleerd tot $R_c=1,3$ voor de gevel (spouwmuurisolatie), $R_c=2,5$ voor dak en vloer en overal voorzien van HR++ glas. Vanaf 1992 zijn alle nieuwbouwwoningen met dit isolatieniveau gebouwd, en dit is tevens het gebruikelijke niveau van na-isolatie. Een woning met dit isolatieniveau en een HR-ketel heeft een energielabel B.
- **Isolatiegraad hoog** betekent zeer goede isolatie met een $R_c=5$ voor de gehele gebouwschil en driedubbel glas. Een nul op de meter woning zoals bij renovaties in het kader van de Stroomversnelling worden gerealiseerd, voldoet aan dit isolatieniveau. Nieuwbouw vanaf 2015 heeft een vergelijkbaar isolatieniveau, hoewel de isolatie-eisen uit het bouwbesluit nog iets lager liggen op $R_c=4,5$ voor de gevel, $R_c=6$ voor het dak en $R_c=3,5$ voor de vloer. Wanneer vanaf 2020 bijna energieneutraal gebouwd moet gaan worden, zal de isolatiegraad zeker voldoen aan de karakteristiek van isolatiegraad Hoog.

In Tabel 4 worden de karakteristieken van de verschillende isolatieniveaus nader beschreven.

Tabel 4: Karakteristieken van de gemodelleerde isolatieniveaus en de toegepaste technologieën

Isolatiegraad	Rc dak [m ² · K/W]	Rc gevel [m ² · K/W]	Rc vloer [m ² · K/W]	U glas [W/m ² · K]
Laag	0,86	0,43	0,17	Enkel glas 5,2 Dubbel glas 2,9
Midden	2,5	1,3	2,5	HR++ glas 1,8
Hoog	5,0	5,0	5,0	Triple glas 0,5

2.2.2 Technische installaties

2.2.2.1 HR107

Voor de HR-ketels is uitgegaan van een HR combi tapketel, waarbij het gemiddeld rendement wordt gebruikt dat voor HR-ketels is gemeten in de veldtesten (Energy Matters, 2014). Het praktijkrendement voor ruimteverwarming ligt tussen de 90 en 95% op bovenwaarde. We nemen 90% bij isolatieniveau laag, en 95% bij isolatieniveau Midden of Hoog. Omdat de CV aanvoer- en retourtemperatuur in een woning met slechtere isolatie hoger moet zijn zal de HR-ketel minder in condenserend bedrijf zijn waardoor het rendement lager ligt.

Het praktijkrendement voor warm tapwater ligt op 54% bij een tapwatervraag van 4,3 kWh thermisch per dag. Aangenomen is dat een HR ketel tapwater kan maken met een rendement van 87%, betekent dat het praktijkrendement een factor 62% lager ligt door stilstandsverliezen. Bij isolatieniveau hoog en bij een hybride warmtepomp wordt ervan uitgegaan dat er een ketel wordt toegepast met een verhoogd tapwaterrendement van 62%.

2.2.2.2 Elektrische Warmtepompen

Er is gerekend met twee verschillende types combi-warmtepompsystemen: een lucht-water warmtepomp (air source) en een bodem-water warmtepomp (ground source) met een gesloten bronnen een verticale bodem warmtewisselaar.

In de scenario's hebben we ervoor gekozen een bodem-water warmtepomp alleen toe te passen in de nieuwbouw. In de bestaande bouw wordt een lucht-water warmtepomp toegepast. Een bodem warmtepomp heeft een hogere efficiency maar vereist wel installatie van warmtewisselaars in de bodem, wat in de bestaande bouw lastig kan zijn.

De gebruikte warmtepomp efficiency-curves zijn samengesteld op basis van gemeten data van het Heat Pump Test Center WPZ in Buchs, Zwitserland (NTB, 2015) bij verschillende bron- en aanvoertemperaturen. Deze efficiency-curves zijn gebruikt om de efficiency van de warmtepompen voor ruimteverwarming en warm tapwater te bepalen. Bij warm tapwater bereiding nemen we daarnaast stilstandsverliezen en boiler(buffervat)verliezen mee. Voor de stilstandsverliezen wordt gewerkt met een factor 62% gelijk aan de HR-ketel. Voor boilerverliezen wordt uitgegaan van een warmteverlies van 1,5 kWh/dag. Een uitgebreide specificatie van de verschillende typen warmtepompen is te vinden in Bijlage II.

2.2.2.3 Hybride warmtepomp

De hybride warmtepomp is een combinatie van een lucht-water warmtepomp en een HR107 ketel. Hiervoor is als uitgangspunt gekozen voor de Itho Daalderop HP Cube (lucht-water warmtepomp) + Base Cube (HR-ketel).

De luchtwarmtepomp heeft een nominaal afgegeven vermogen van 2,5 kWth, de HR-ketel een vermogen van 24 kWth. De HR ketel wordt gebruikt voor zowel ruimteverwarming als warm tapwater, de warmtepomp wordt alleen gebruikt voor ruimteverwarming. Dat is vermogen gestuurd, wanneer de warmtevraag groter is dan het vermogen van de warmtepomp, dan gaat de hybride warmtepomp over op HR-ketel bedrijf. Echter, ook al het vermogen voldoende is, is tevens de regelstrategie afgestemd op een economische afweging. Als de buitentemperatuur te laag wordt daalt het rendement van de warmtepomp zoveel dat het rendabeler is de gasketel in te zetten voor ruimteverwarming. De HR ketel verzorgt dan de ruimteverwarming.

Voor de luchtwarmtepomp gebruiken we dezelfde efficiency curves als bij de all-electric warmtepomp. Voor de HR-ketel gebruiken we dezelfde efficiency cijfers als bij de HR-ketel als individuele techniek.

2.2.2.4 Warmtenetten

Bij warmtenetten wordt de geleverde warmte centraal opgewekt. Deze warmte wordt via een warmtenet aan de klant geleverd. In huis is er naast het warmteafgiftesysteem een warmtewisselaar aanwezig. Voor ruimteverwarming gaan we uit van een rendement van 100%, voor warmtapwater nemen we stilstandsverliezen mee. Voor de stilstandsverliezen wordt gewerkt met een factor 62% gelijk aan de HR-ketel. Voor de productie van warmte is gebruik gemaakt van geothermie en gasketels als back-upsysteem. Restwarmte afkomstig van de industrie is buiten beschouwing gelaten. Dit is omdat op lange termijn het niet zeker is dat restwarmte van afvalverwerkingsinstallaties en industrie beschikbaar blijft. De inzet van restwarmte kan een effect hebben op de daadwerkelijke CO₂ emissiefactor van warmte.

2.2.2.5 Micro-WKK

Voor de micro-WKK hebben we gekeken naar de Bluegen, dat is een micro-WKK installatie op basis van een SOFC brandstofcel met een elektrisch rendement van 60% en een thermisch rendement van 25%. Omdat een brandstofcel in verband met stackdegeneratie slecht tegen veelvuldig aan en uit zetten kan, levert de Bluegen normaal gesproken alleen warm tapwater via een boilervat van 200 liter. In een project in Eerbeek⁹, wordt de Bluegen echter ook gebruikt voor ruimteverwarming. Het vermogen van de Bluegen is daarvoor niet toereikend, maar kan wel in een deel van de vraag voorzien. Wanneer de Bluegen tekort schiet wordt een HR-ketel ingezet. Bij warm tapwater bereiding nemen we stilstandsverliezen en boiler(buffervat)verliezen mee. Voor de stilstandsverliezen wordt gewerkt met een factor 62% gelijk aan de HR-ketel. Voor boilerverliezen wordt uitgegaan van een warmteverlies van 2 kWh/dag.

2.3 Warmtevraagprofielen

Om de systeemkosten van de huishoudelijke warmtevraag te kunnen inschatten is het belangrijk om de warmtevraag te bepalen waaraan moet worden voldaan. Dit is ten eerste om de piekvraag in de verschillende netwerkdelen te kunnen inschatten, aangezien deze piekvraag bepaalt welke capaciteit nodig is om in de vraag te voorzien. Ten tweede is het belangrijk om het volume van de vraag te bepalen om de kosten en CO₂-uitstoot te kunnen berekenen.

De huishoudelijke warmtevoorziening in Nederland is bottom-up geanalyseerd op basis van vijf woningtypes. Voor elk van deze woningtypen is met behulp van woningkarakteristieken (oppervlakte van de schil, isolatiegraad, stookgedrag, etc.) een warmtevraagprofiel gecreëerd. Op basis van dit warmtevraag profiel is een vraagprofiel voor elektriciteit, gas en warmte berekend voor de inzet van verschillende verwarmingstechnologieën. Deze energievraagprofielen vormen de bouwstenen voor de verdere analyse waarbij de vraagprofielen van individuele woningen worden geaggregeerd tot vraagprofielen per woonmilieu en voor heel Nederland.

⁹ <http://www.e2go.nl/innovatieve-primeur-brandstofcel-en-warmtepomp-in-gelderland>

2.3.1 Warmtevraagprofielen op woningniveau

2.3.1.1 Ruimteverwarming

De deelnemers aan dit project realiseerden zich dat de energievoorziening van de woningen van de toekomst een combinatie zijn mate van isolatie en nieuwe energie-installaties en andere energiedragers. Hoe zich dit vertaalt in een vraagprofiel en inzicht in de piekvraag (bepalend voor de infracapaciteit) was veelal nog onbekend. Ook is er nog veel discussie hoe dit er uit gaat zien, zeker als de piekvraag moet worden voldaan bij een extreem koude winterweek. Om die reden is gekozen voor een bottom up bepalen van het warmtevraagprofiel per type woning.

De warmtevraagprofielen zijn berekend aan de hand van een warmteverliesberekening. De berekening is gemaakt voor ieder uur in een jaar, waarbij de omgevingstemperatuur en zoninstraling afhankelijk is van het gekozen klimaatjaar.

Het warmteverlies door de buitenschil van de woning is afhankelijk van het verschil tussen de omgevingstemperatuur en de temperatuur in de woning. Daarbij wordt niet alleen gerekend met de transmissieverliezen door de schil van de woning, maar wordt ook rekening gehouden met de ventilatie- en infiltratieverliezen. De warmtevraag is gelijk aan het warmteverlies minus de warmteopbrengst van zoninstraling, de interne warmtelast (warmteproductie van mensen, verlichting en apparatuur in de woning) en de warmte die zich nog in de thermische massa van de woning bevindt.

De gewenste temperatuur (stooktemperatuur) is overgenomen uit data van het WoON 2012 (ECN, 2013) onderzoek. Daaruit blijkt dat hoe beter een woning geïsoleerd is, hoe hoger de ingestelde stooktemperatuur is en hoe minder nachtverlaging wordt toegepast. Op basis van die inzichten is de stooktemperatuur gekozen zoals in Tabel 5 weergegeven.

Tabel 5: Keuze thermostaatinstelling afhankelijk van isolatiegraad

Isolatiegraad	T nacht [°C]	T overdag [°C]	T 's avonds [°C]
Laag	15,8	18,5	19,5
Midden	18	19	20,5
Hoog	21	21	21

Uit het WoON 2012 (ECN, 2013) onderzoek is ook gebleken dat een warmteverliesberekening zoals hier beschreven en die ook voor de berekening van het energielabel wordt gebruikt, een energiegebruik oplevert dat afwijkt van het werkelijk energiegebruik.

Om hiervoor te corrigeren wordt een bewonersgedrag factor gehanteerd, welke er voor zorgt dat de berekende jaarlijkse ruimteverwarmingsvraag overeenkomt met de werkelijk gemeten waarden uit WoON2012¹⁰.

De omgevingstemperatuur is bepaald op basis van KNMI uurgegevens voor weerstation De Bilt. Hierbij is eerst gebruik gemaakt van het jaar 2012 om het rekenmodel te valideren met de gemeten data uit WoON 2012 (bewonersgedragfactor).

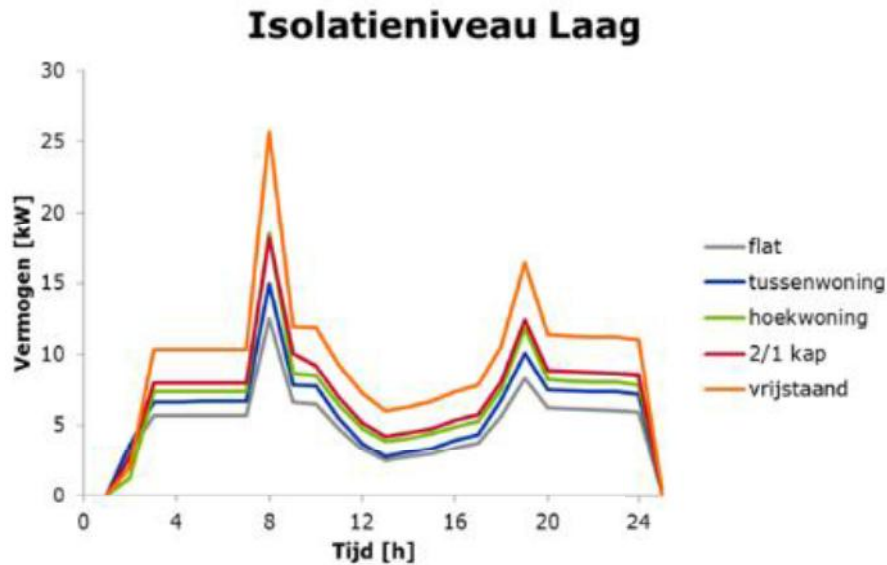
2.3.1.2 Extreme koude

De definitieve warmtevraagprofielen (inclusief schaafactor) zijn gemaakt voor het jaar 1987, waarin een extreem koude periode voorkwam. Dat is omdat we de piekvraag willen bepalen bij een strenge winter. Gasunie heeft de wettelijke taak tot bij een etmaal gemiddelde effectieve buitentemperatuur van minus 17 graden Celsius (Meteostation de Bilt) de warmtevoorziening van huishoudens te garanderen. Er zijn geen aanwijzingen dat de kans van optreden van een etmaalgemiddelde temperatuur van -17°C sinds 1987 kleiner is geworden¹¹.

Figuur 10 laat het warmtevraagprofiel voor ruimteverwarming zien op de koudste dag van een jaar voor verschillende woningtypen bij een laag isolatieniveau. Door een groter te verwarmen vloeroppervlak en een grotere buitenschil van de woning is de warmtevraag van een vrijstaande woning groter dan van kleinere woningtypen en de piekvraag ligt ook hoger.

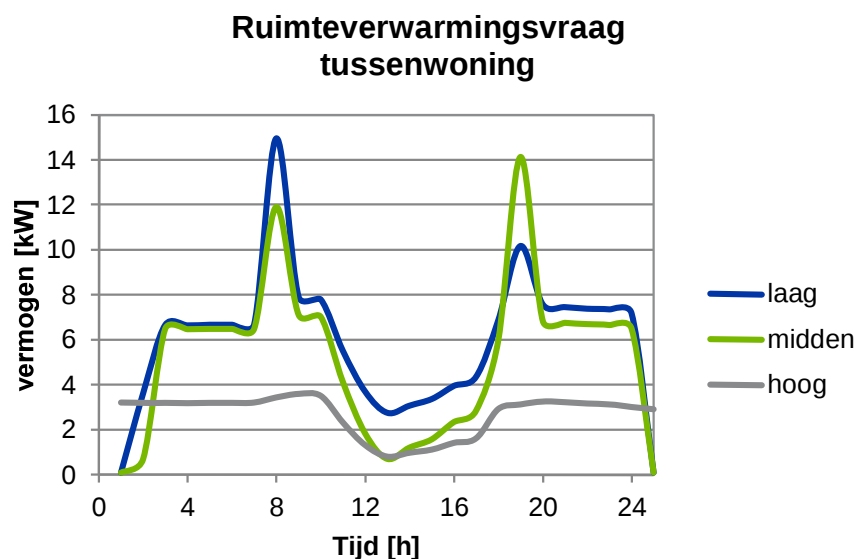
¹⁰ In WoON 2012 is het werkelijk gasverbruik in de praktijk van een E label woning lager dan theoretisch gebruik volgens het energielabel, en het werkelijk gasverbruik van een B label woning juist hoger. Dit komt door variatie in gedrag dat niet in de theoretische berekening is meegenomen, zoals het aantal ruimtes dat wordt verwarmd en de ventilatiegraad. De modelberekeningen met warmteverliesberekening laten dezelfde afwijking zien t.o.v. het werkelijk gasverbruik als de energielabelberekening doordat binnen de modelberekeningen deze variaties ook buiten beschouwing worden gelaten. Hierdoor wordt een bewonersgedrag factor gehanteerd, welke er voor zorgt dat de berekende jaarlijkse ruimteverwarmingsvraag overeenkomt met de werkelijk gemeten waarden uit WoON2012. Dit is een schaafactor waarmee het gehele warmtevraagprofiel wordt gecorrigeerd. Deze schaafactor varieert per woningtype en isolatiegraad (van 0,62 voor een vrijstaande woning tot 0,87 voor een meergezinswoning met een lage isolatiegraad en van 1,08 voor een vrijstaande woning tot 1,32 voor een tussenwoning bij isolatiegraad midden). Voor woning met een hoge isolatiegraad zijn dezelfde schaafactoren gebruikt als bij isolatiegraad midden.

¹¹ Zie ook: <http://www.knmi.nl/kennis-en-datacentrum/achtergrond/koudegolven-van-de-toekomst>



Figuur 10: Warmtevraagprofiel voor ruimteverwarming op de koudste dag bij een laag isolatieniveau, per woningtype

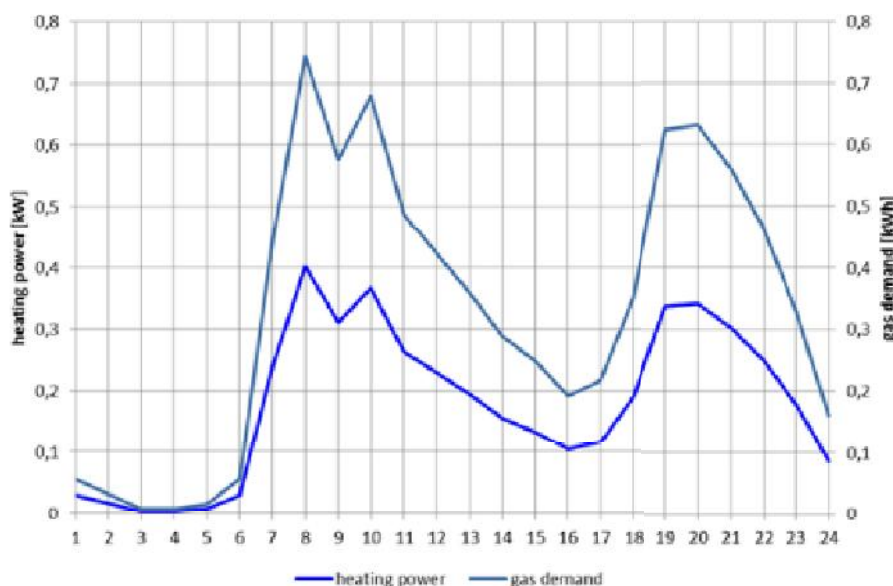
Figuur 11 laat het warmtevraagprofiel voor ruimteverwarming zien op de koudste dag voor een tussenwoning bij verschillende isolatiegraden. Daarin is te zien dat de verschillen tussen isolatieniveau laag en Midden beperkt zijn. Deze verschillen lijken vooral te ontstaan door andere aannames rond thermostaatinstelling. Het warmtevraagprofiel bij een hoog isolatieniveau ligt aanzienlijk lager. De warmteverliezen worden enorm verminderd. Tevens is het een heel vlak profiel, wat ook samenhangt met het vlakke patroon in thermostaatinstelling.



Figuur 11: Warmtevraagprofiel voor ruimteverwarming op de koudste dag

2.3.1.3 Warm tapwatervraag

In deze studie wordt gebruikgemaakt van een gemiddeld warmtevraag patroon voor warm tapwater per woning. Dit patroon van functionele tapwatervraag is voor alle woningtypen gelijk. Idee daarachter is dat de tapwatervraag niet afhankelijk is van het woningtype maar de huishoudgrootte. De bijbehorende energievraag voor warm tapwater hangt wel af van de toegepaste techniek. De totale jaarlijkse gasvraag voor de bereiding van warm tapwater is overgenomen uit metingen in het kader van het HOME onderzoek (ECN, 2009) en bedraagt 300 m³ (circa 3000 kWh) aardgas per jaar¹². Dit is een gemiddelde, afhankelijk van het aantal personen in een huishouden en hun douchegedrag kan de vraag hoger of lager zijn. De verdeling van de tapwatervraag is overgenomen uit het rapport "Eindrapportage veldtesten, Energieprestaties van 5 warmtetechnieken bij woningen in de praktijk" (Energy Matters, 2014) (Figuur 12).

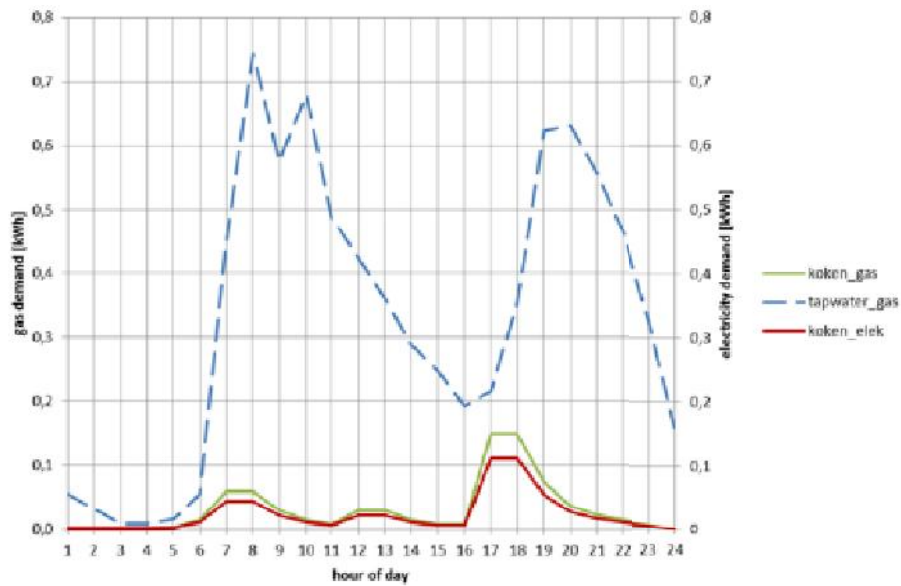


Figuur 12: Tapwaterpatroon per dag

2.3.1.4 Koken

Het energievraagpatroon voor koken is voor deze studie geconstrueerd, uitgaande van logische warmtevraag momenten voor koken gedurende de dag. De gemiddelde energievraag voor koken is 39 m³/jaar bij koken op gas en 211 kWh/jaar bij koken op elektriciteit (ECN, 2014b). Niet alle huishoudens met een gasaansluiting koken op gas, sommige koken elektrisch. Omdat we de profielen voor de woningvoorraad optellen is hiervoor gecorrigeerd en gerekend met 31 m³ gas voor koken per jaar. Het getal voor elektrisch koken is afgerond naar 200 kWh per jaar. De relevantie is beperkt, de pieken zijn slechts klein t.o.v. tapwaterprofiel (Figuur 13).

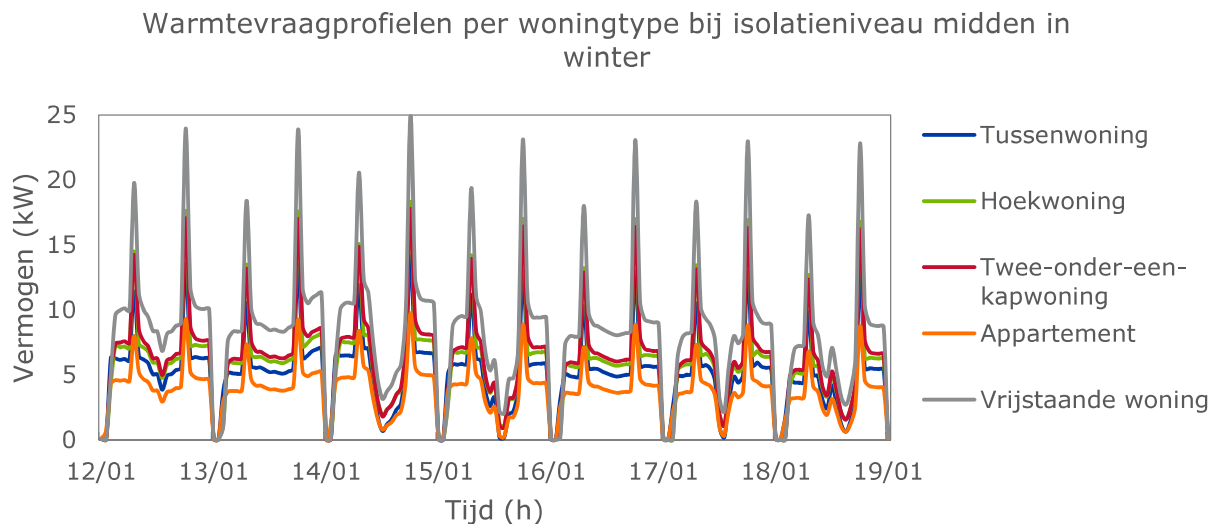
¹² Dit komt overeen met ca. 8 kWh aardgasequivalenten per dag op bovenwaarde.



Figuur 13: Vraagprofiel koken per dag

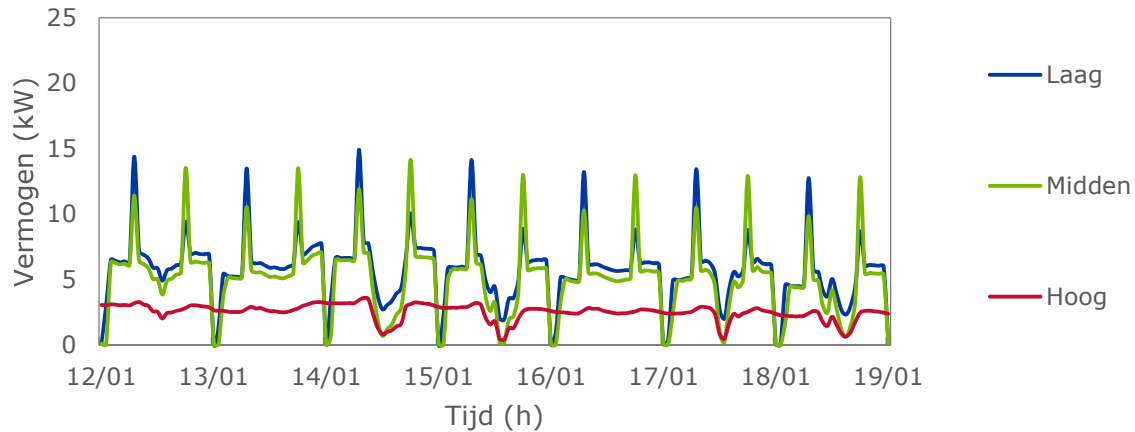
2.3.1.5 Totaal warmtevraagprofiel

In onderstaande figuren zijn de vraagprofielen voor ruimteverwarming, warmtapwater en koken gecombineerd. Figuur 14 beschrijft een weekprofiel in de winter waarbij onderscheid wordt gemaakt tussen verschillende woningtypes bij isolatieniveau Midden. Figuur 15 beschrijft een weekprofiel in de winter waarbij onderscheid wordt gemaakt naar isolatieniveau bij een tussenwoning.



Figuur 14: Warmtevraagprofielen per woningtype bij isolatieniveau Midden in de winter

Warmtevraagprofielen voor tussenwoning per isolatieniveau in winter



Figuur 15: Warmtevraagprofielen voor tussenwoning per isolatieniveau in de winter

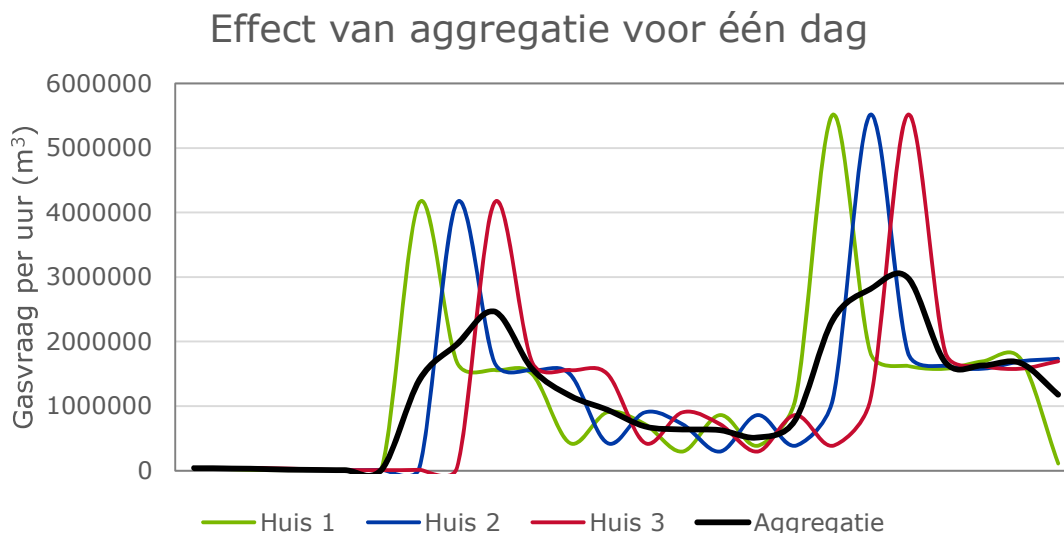
2.3.2 Aggregatie van vraagprofielen per woningtype naar vraagprofielen per woonmilieu en voor heel Nederland (Stap 2)

Op basis van een indeling van de woningvoorraad in Nederland naar woonmilieus en op basis van de gedefinieerde scenario's zijn geaggregeerde vraagprofielen gecreëerd. Deze geaggregeerde profielen zijn vervolgens gebruikt als basis voor de distributie- en transmissiekostenberekening.

2.3.3 Gelijktijdigheidsfactoren

Bij de aggregatie van de vraagprofielen naar een profiel voor een grote groep woningen moet rekening worden gehouden met het fenomeen gelijktijdigheid. Gelijktijdigheid is de mate waarin de piekvraag voor meerdere woningen op hetzelfde moment plaatsvindt. Waar het profiel van een individuele woning om precies zeven uur 's ochtends een piek heeft, zal dit bij andere woningen eerder of later kunnen zijn. Het effect van een distributie over verschillende uren is geïllustreerd in Figuur 16.

Voor woningen met een laag en midden isolatieniveau is daarom op basis van de gemodelleerde profielen en de gemeten profielen door Gasunie een gelijktijdigheidsfactor bepaald van 0,53. In woningen met een hoog isolatieniveau is aangenomen dat geen nachtverlaging plaatsvindt, waardoor de gelijktijdigheid 1 zal zijn. De bepaling van de gelijktijdigheidsfactor is verder uitgewerkt in Bijlage I.



Figuur 16: Effect van aggregatie van piekvraag van 3 huizen op de gezamenlijke piekvraag

Bij isolatieniveau hoog gaan we uit van een continue thermostaatinstelling die dag en nacht hetzelfde is, zie tabel 5. De gelijktijdigheidsfactor is dan 1.

2.4 Synthese

2.4.1 Piekvraag

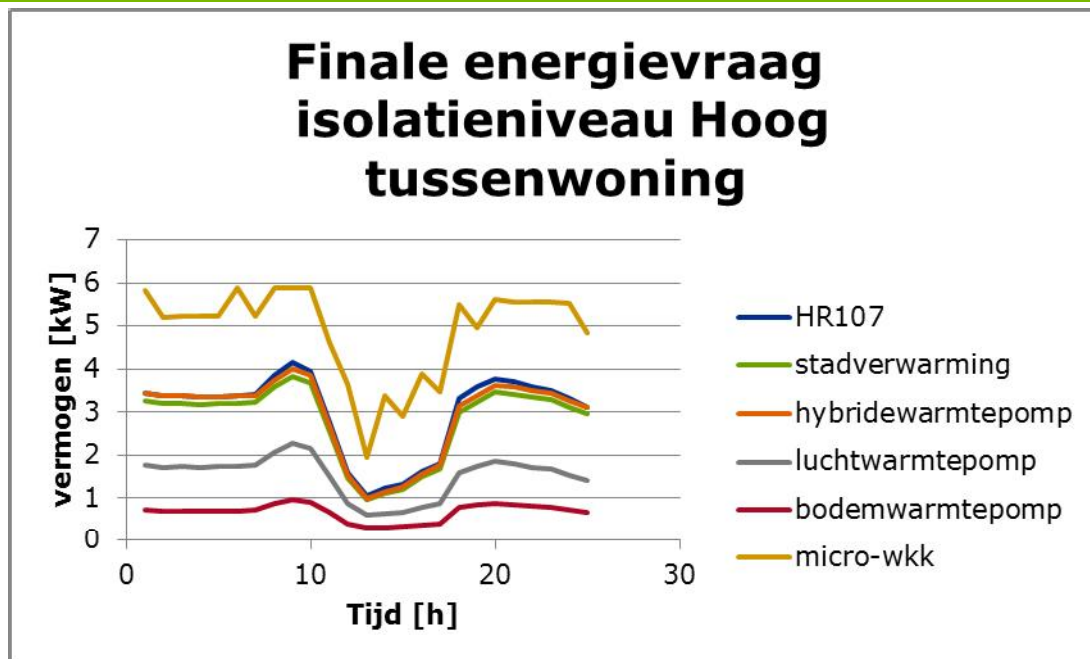
In deze studie willen we ook de netwerkkosten meenemen. De kosten voor gas, elektriciteit en warmte-infrastructuur worden bepaald door de gevraagde capaciteit in de netten die afhankelijk is van de piekvraag. Zoals eerder gezegd bepaalt de piekvraag in belangrijke mate de kosten voor de infrastructuur. Om de piekvraag per woonmilieu te bepalen zijn de vraagprofielen van de individuele woningen in het desbetreffende woonmilieu bij elkaar opgeteld. De piekvraag van het resulterende profiel beschrijft de piekvraag in het woonmilieu bij volledige gelijktijdigheid. De piekvraag wordt vervolgens gecorrigeerd met de gelijktijdigheidsfactor beschreven in sectie 2.3.3.

In Sectie 2.3.1 is beschreven hoe de warmtevraagprofielen worden gemaakt. Indien een woning op een warmtenet is aangesloten is dat profiel direct het warmtevraagprofiel voor een individuele woning¹³. Maar als de warmte wordt geleverd door een HR-ketel of warmtepomp dan wordt het warmtevraagprofiel met een rendement omgezet naar een gasvraag- of elektriciteitsvraagprofiel. De uitgangspunten voor de rendementen zijn weergegeven in tabel 4, het gevraagde volume is weergegeven in tabel 5 en de piekvraag is weergegeven in tabel 6. De technologieën worden uitvoerig toegelicht in Bijlage I.

¹³ De wijze van productie van de warmte in het warmtenet wordt besproken in sectie 2.4.6.

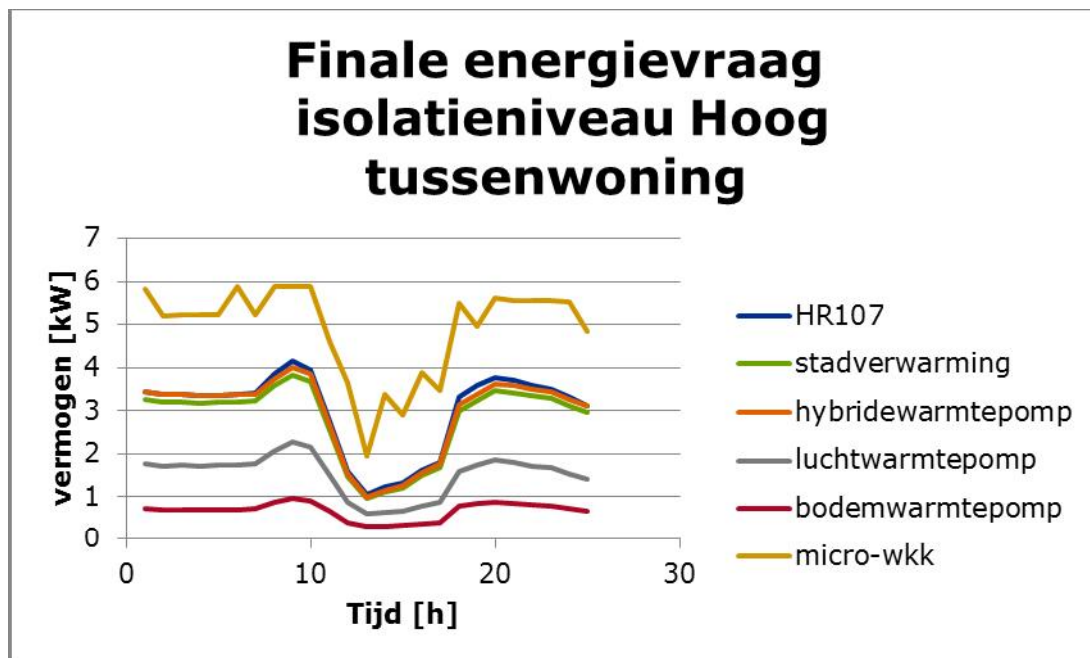
Tabel 6: Uitgangspunten bij de modelering van de elektriciteits-, gas- en warmtevraagprofielen

Technologieën	Karakteristieken
HR107	HR-combitapketel met $\eta_{\text{ruimteverwarming}} = 90\text{-}95\%$ en $\eta_{\text{warm tapwater}} = 54\text{-}62\%$, rendementen op bovenwaarde. De tapwaterrendementen zijn lager dan voor ruimteverwarming vanwege stilstandsverliezen.
Warmtenetten	Directe warmtelevering, $\eta = 100\%$
Luchtwarmtepomp	Lucht-water warmtepomp met temperatuursafhankelijke <i>coefficient of performance</i> . Voor warm tapwater wordt daarnaast rekening gehouden met stilstandsverliezen (factor 62%) en boiler verliezen 1,5 kWh/dag.
Bodemwarmtepomp	Bodem-water warmtepomp met gesloten bron en een verticale bodem warmtewisselaar, temperatuursafhankelijke <i>coefficient of performance</i> . Voor warm tapwater wordt daarnaast rekening gehouden met stilstandsverliezen (factor 62%) en boiler verliezen 1,5 kWh/dag.
Hybride warmtepomp	Bivalent systeem van een lucht-water warmtepomp en een HR-ketel. Temperatuursafhankelijke <i>coefficient of performance</i> voor warmtepomp en HR107 karakteristieken voor piekvraag; tapwater met HR-ketel en voor ruimteverwarming een economische regelstrategie.
Micro-WKK	Bluegen (SOFC brandstofcel met $\eta_{\text{elektrisch}} = 60\%$ en $\eta_{\text{thermisch}} = 25\%$), uitgevoerd in combinatie met een HR-ketel. Voor warm tapwater wordt daarnaast rekening gehouden met stilstandsverliezen (factor 62%) en boiler verliezen 2 kWh/dag.



Figuur 17 toont de finale energievraag voor ruimteverwarming en warm tapwater op de koudste dag voor een tussenwoning met isolatieniveau hoog en invulling van de warmtevraag met verschillende technologieën. Voor een HR107 ketel en de micro-WKK is in de figuur de gasvraag weergegeven, voor stadsverwarming de warmtevraag en voor de warmtepompen de elektriciteitsvraag. Voor de hybride warmtepomp staat in de figuur de optelling van de gasvraag en elektriciteitsvraag van de warmtepomp. Uit de figuur is het verschil in rendement zichtbaar tussen de verschillende technologieën. Hoe efficiënter de technologie, hoe vlakker het energievraagprofiel eruit ziet.

Deze koudste dag geeft wel een vertekend beeld voor de hybridewarmtepomp. Deze lijkt nu nagenoeg even goed te presteren als de HR-ketel, wat klopt want dit komt door de regelstrategie, maar op minder koude dagen volgt deze uiteraard meer het profiel van de luchtwarmtepomp. De figuur laat zien dat de piekvraag van micro-WKK hoger ligt dan van een HR-Ketel, er wordt meer gas gebruikt voor elektriciteitsopwekking. In het micro WKK profiel zitten kleine pieken. Dit zijn de momenten waarop de μ WKK op vollast tapwater aan het produceren is, en dus geen warmte meer kan maken voor ruimteverwarming. Op deze momenten moet de HR-ketel extra bijspringen om de ruimteverwarmingsvraag op te wekken. Na een uur is het boilvervat gevuld (is aanname in rekenmodel) en schakelt de μ WKK weer bij voor ruimteverwarming, totdat het buffervat weer zover leeg is dat de μ WKK weer tapwater voor een vol uur kan produceren en de volgende spike optreedt.



Figuur 17: Energievraagprofiel voor ruimteverwarming en warm tapwater voor de koudste dag tussenwoning isolatieniveau hoog met verschillende technologieën

Tabel 7: Energievraag (kWh) voor tussenwoning per technologie en isolatiegraad (met graaddagen gecorrigeerd voor een gemiddeld jaar)

Technologieën	Isolatiegraad		
	Laag	Midden	Hoog
HR107	20.247 kWh gas	14.991 kWh gas	8.510 kWh gas
Warmtenetten	17.894 kWh warmte	13.755 kWh warmte	7.598 kWh warmte
Luchtwarmtepomp	-	5.647 kWh elektriciteit	3.151 kWh elektriciteit
Bodemwarmtepomp	-	-	2.269 kWh elektriciteit
Hybride warmtepomp	-	10,048 kWh gas 1,257 kWh elektriciteit	5213 kWh gas 755 kWh elektriciteit
Micro-WKK	-	27.206 kWh gas -9.331 kWh elektriciteit	21.849 kWh gas -10.231 kWh elektriciteit

Tabel 8: Piekvraag (kW) voor tussenwoning per technologie en isolatiegraad. De piekvraag is gegeven voor klimaatjaar 1987

Technologieën	Isolatiegraad		
	Laag	Midden	Hoog
HR107	16,8 kW _{gas}	15,2 kW _{gas}	4,2 kW _{gas}
Warmtenetten	15,1 kW _{th}	14,3 kW _{th}	3,8 kW _{th}
Luchtwarmtepomp	-	12,6 kW _e	2,3 kW _e
Bodemwarmtepomp	-	-	1,0 kW _e
Hybride warmtepomp	-	15,2 kW _{gas} 0,8 kW _e	4,1 kW _{gas} 0,5 kW _e
Micro-WKK	-	17,3 kW _{gas} -1,5 kW _e	6,0 kW _{gas} -1,5 kW _e

Tabel 8 valt op dat de piekvraag van de elektrische warmtepomp bij Midden isolatie vele malen hoger is dan in het Hoog isolatie scenario. Dit heeft een grote invloed op de infrastructuurkosten, zoals later zal worden besproken. Het huidige piekvermogen dat gelijktijdig aan alle woningen kan worden geleverd vanuit de elektriciteitsinfrastructuur is ongeveer 1,2 kW elektrisch per woning. Dat betekent dat zelfs bij Hoog isolatieniveau in geval van toepassing van lucht warmtepompen een verdrievoudiging van de capaciteit nodig is.

2.4.2 Berekening van emissie

De emissies van de huishoudelijke energievoorziening zijn berekend op basis van het totale verbruik per energiedrager en de emissiefactoren.

$$Emissies = \sum_i \sum_j \text{verbruik van energiedrager } i \text{ in woningtype } j \cdot \text{aantal woningen van woningtype } j \cdot \text{emissies van energiedrager } i$$

De emissiefactoren van elektriciteit zijn tot 2030 gebaseerd op de Nationale Energieverkenning (ECN, 2014). Bij verregaande elektrificatie wordt er rekening mee gehouden dat er additionele opwekcapaciteit nodig zal zijn. Tot 2030 wordt aangenomen dat dit met eenzelfde emissiefactor zal plaatsvinden. In 2050 wordt voor additionele vraag in eerste instantie een emissiefactor van 0,250 kgCO₂/kWh aangenomen. Deze emissiefactor weerspiegelt een mix van circa 50% hernieuwbare, ongesubsidieerde productie en 50% fossiele (piek) productie. Er wordt een grens van 8 TWh aan additionele duurzame elektriciteitsvraag aangehouden ten opzichte van het HR Midden scenario. Hierboven wordt de vraag volledig door conventionele bronnen ingevuld. Dit wordt weerspiegeld in de oplopende emissiefactoren in de scenario's met een zeer hoge additionele elektriciteitsvraag.

De emissiefactoren van gas zijn de standaardfactoren voor Nederlands aardgas. Er wordt hierbij aangenomen er in 2050 maximaal 1,5 miljard m³ groen gas beschikbaar is¹⁴ voor de huishoudelijke warmtevoorziening¹⁵.

¹⁴ Routekaart Hernieuwbaar Gas (De Gemeiynt, ECN, Groen Gas Nederland, juni 2014). Er wordt uitgegaan van het doortrekken van hierin aangegeven lijn tot 6 BCM. Op basis van de huidige vraag als onderdeel van het totaal wordt 25% hiervan aan huishoudens toegekend.

¹⁵ De differentiatie over de zichtjaren is als volgt: 2015: 0 miljard m³, 2020: 0,25 miljard m³, 2030: 0,75 miljard m³, 2050: 1,5 miljard m³.

In de verschillende scenario's wordt aangenomen dat de absolute hoeveelheid groen gas door meer factoren dan alleen de warmtevoorziening huishoudens wordt bepaald en gelijk blijft. De in Tabel 9 weergegeven emissiefactoren zijn de emissiefactoren gebruikt als basisaannames. De emissiefactoren voor warmte zijn sterk afhankelijk van de mix van technologieën gebruikt voor de productie van warmte. In deze studie zijn de emissiefactoren gebaseerd op warmte geproduceerd uit geothermische bronnen (basislast) en gasketels (pieklast) en voor elektriciteit berekend met behulp van het *generation portfolio model* waarin ook de resulterende elektriciteitsvolumes worden weergegeven (zie Bijlage V).

Tabel 9: Emissiefactoren

Energiedrager	Emissiefactor (kg CO ₂ /kWh)			
	2015	2020	2030	2050
Elektriciteit*	0,586	0,461	0,343	0,250
Gas*	0,183 ¹⁶	0,177	0,171	0,171
Warmte	0,099	0,097	0,093	0,085

* Emissiefactoren voor elektriciteit en gas zijn scenario afhankelijk. De genoemde emissiefactoren zijn voor scenario HR Midden.

2.4.3 Berekening nationale kosten

De in deze studie gepresenteerde kosten zijn *nationale kosten*. Ten eerste betekent dit dat de kosten exclusief alle belastingen en subsidies zijn die immers per saldo voor het land als geheel nul zijn. De bepaalde kosten zijn daarom niet noodzakelijkerwijs representatief voor de kosten van een huishouden. Verder is de uitgevoerde analyse geen volledige maatschappelijke kosten-baten analyse (MKBA). Met name de verschillende externaliteiten, zoals de baten van emissiereductie, zijn niet gekwantificeerd of meegenomen in de kosten en baten. De studie geeft dus een beeld van de totale te verwachten financiële kosten voor verschillende scenario's. De verdeling van deze kosten over huishoudens, overheid of andere partijen wordt daarbij niet beschouwd.

De kosten worden gepresenteerd als jaarlijkse kosten. Deze jaarlijkse kosten zijn berekend op basis van de investeringskosten en een bij de afschrijvingstermijnen en rentepercentage horende annuïteitsfactor,

$$\text{Jaarlijkse kosten} = \text{Investeringskosten} \cdot \text{Annuïteitsfactor}$$

waarbij de annuïteitsfactor is gedefinieerd als $\frac{r}{1-(1+r)^{-n}}$

met r als rentepercentage en n als afschrijvingstermijn in jaren.

In Tabel 10 zijn de afschrijvingstermijnen en annuïteitsfactoren van diverse kostenposten gegeven. De annuïteitsfactor is gebaseerd op een rentepercentage van 5%. Dit percentage is gekozen als een globaal gemiddelde van de "opportunity cost" van het kapitaal dat voor deze investeringen wordt gereserveerd.

¹⁶ De emissiefactor op bovenwaarde is 50,8 kgCO₂/GJ (0,183 kgCO₂/kWh).

Het is belangrijk om op te merken dat dit gehanteerde rentepercentage een belangrijke invloed op de omrekening van investeringskosten in bijvoorbeeld isolatie of warmtetechnologieën naar jaarlijkse kosten. Daarmee heeft het een bepalende invloed op de uiteindelijke sommatie en verhouding tussen verschillende onderdelen in de totale kosten. Een gevoeligheidsanalyse (beschreven in paragraaf 4.5) geeft verder inzicht in de gevolgen van een hoger of lager aangenomen rentepercentage.

Tabel 10: Afschrijvingstermijnen kostenposten

Kostenpost	Afschrijvingstermijn (jaren)	Annuïteitsfactor
Isolatie	40	0,06
Technologieën	15	0,10
Infrastructuur	40	0,06

Voor de kosten van isolatie en technologieën wordt rekening gehouden met een kostendaling in de periode van 2015 tot 2050 door schaalgrootte en verbeterde efficiency in productie en implementatie (zie tot en met Tabel 14). Voor de berekening van de jaarlijkse kosten is daarom van belang wanneer bepaalde investeringen zijn gedaan. Dit wordt gebaseerd op de scenario's zoals beschreven in sectie 3. Tevens wordt, afhankelijk van de levensduur, rekening gehouden met het al dan niet plaatsvinden van een vervanging aan het einde van deze technische levensduur. Deze vervanging vindt plaats op basis van het op dat moment geldende kostenniveau.

2.4.4 Kosten van maatregelen op woningniveau

De totale integrale kosten bestaan uit de volgende componenten:

1. Kosten voor woningen: kosten voor isolatie, technologieën en de aansluiting.
2. Kosten voor distributie- en transmissienetwerken: kosten voor elektriciteits-, gas en warmte-infrastructuur.
3. Kosten voor energie: kosten voor elektriciteit, gas en warmte.

De integrale kosten voor de huishoudelijke warmtevoorziening zijn bottom-up bepaald op basis van vraagprofielen voor individuele huishoudens. Op basis van woningvoorraadkarakteristieken zijn deze vraagprofielen geaggregeerd naar woonmilieus en voor heel Nederland, die vervolgens gebruikt zijn voor het bepalen van de kosten van de energie-infrastructuur.

De kosten voor isolatie van bestaande woningen en nieuwbouwwoningen zijn berekend op basis van het aantal woningen dat een bepaalde isolatiesprong doormaakt respectievelijk op basis van het aantal woningen dat met een bepaald isolatieniveau in een bepaald jaar is gebouwd. De kosten voor technologieën zijn berekend op basis van het aantal woningen met de desbetreffende technologieën.

De kosten voor na-isolatie van de niveaus laag naar midden en van midden naar hoog zijn gebaseerd op de kosten gegeven in het rapport "Maatregelen EPA-Maatwerkadvies Bestaande Woningbouw 2013" (Arcadis, 2013). Voor nieuwbouw woningen, met isolatieniveau hoog, worden alleen materiaal kosten van isolatie meegenomen.

Voor de kosten van isolatie van laag naar hoog maken we gebruik van de ervaringen met Nul op de meter renovaties in het kader van de Stroomversnelling. Bij NOM renovatie van rijwoningen is het doel van de Stroomversnelling dat de kosten van de energie gerelateerde maatregelen niet meer mogen kosten dan 45.000 euro per woning inclusief assemblage en BTW, exclusief badkamer of keukenvervanging. Dat is nodig om de business case mogelijk te maken. Dat wordt nu nog niet gehaald; de kosten NOM renovaties bedragen op dit moment nog ca. 60.000 euro per woning inclusief assemblage en BTW. Deze 60.000 euro bestaat uit kosten voor een elektrische warmtepomp, PV en de aanpassingen aan isolatie en ventilatie.

Als we ervan uitgaan dat de kosten voor een warmtepomp 12.000 euro inclusief BTW bedragen en de kosten voor zon-PV 12.000 euro inclusief BTW¹⁷, dan blijft er voor isolatie en ventilatie kosten 36.000 euro over inclusief BTW. De kosten voor andere woningtypes worden bepaald door een schalingsfactor gebaseerd op het totale schiloppervlak ten opzichte van een tussenwoning. Voor een inschatting van kostendaling over de tijd maken we gebruik van leercurves voor woningverbetering aan de schil van CE voor het VESTA model van PBL (CE, 2013).

De kosten van na-isolatie van midden naar een hoog isolatie niveau hebben we gelijk gesteld aan 80% van de kosten van isolatie van laag naar hoog.

Voor de kosten van een HR ketel (HR107) is gebruik gemaakt van de kosten zoals gegeven in "Maatregelen EPA-Maatwerkadvies Bestaande Woningbouw 2013" (Arcadis, 2013). Voor warmtepompen hebben we kosten inschattingen van de Dutch Heat Pump Association (DHPA) gebruikt. In werkelijkheid zullen de kosten in de nieuwbouw iets goedkoper zijn. Voor alle type warmtepompen geldt dat bij inpassing in bestaande woningen het per situatie verschilt of er wel of niet aanpassingen aan het warmteafgiftesysteem moeten plaatsvinden of niet. We hebben daarom de kostencijfers opgehoogd met 20%.

De kosten voor micro-WKK zijn gebaseerd op kosten opgegeven door de leverancier Ceramic Fuel Cells. In deze studie wordt geen onderscheid gemaakt in de kosten voor installaties voor bestaand en nieuwbouw woningen. De kosten in de woning voor aansluiting op een warmtenet zijn afkomstig van Alliander. De kosten betreffen het plaatsen van een warmtewisselaar, leidingwerk en verlagen van de retourtemperatuur. De kosten voor meergezinswoningen zijn een gewogen gemiddelde van 700 euro per woning voor collectief verwarmde flats en 2500 euro per woning voor individueel verwarmde woningen in een flat. Daarbij gaan we uit van 20% collectief verwarmde flats op basis van data uit WoON 2012.

De aansluitkosten (Tabel 14) omvatten de kosten voor de aansluiting van de woning op de hoofdleiding voor gas en elektriciteit. (Bij warmte zijn de kosten van de aansluiting al meegenomen in de distributiekosten). Ook in de aansluitkosten zitten de kosten van de meter (gas, elektriciteit, warmte).

¹⁷ Een rijtjeshuis met 65 m² dak kan 6500 Wp herbergen (100 Wp/m²). Stel dat de prijs 1,90 euro/Wp is 12.000 euro incl BTW inclusief installatie.

Tabel 11: Kosten voor isolatie in de bestaande bouw in euro's exclusief BTW

Woningtype	Isolatiesprong	Kosten (€/woning)			
		2015	2020	2030	2050
Tussenwoning	Laag -> Midden	8.000	7.200	6.500	5.400
Tussenwoning	Laag -> Hoog	30.000	20.000	18.000	15.000
Tussenwoning	Midden -> Hoog	24.000	16.000	14.400	12.000
Hoekwoning	Laag -> Midden	9.500	8.500	7.700	6.500
Hoekwoning	Laag -> Hoog	40.000	26.000	24.000	20.000
Hoekwoning	Midden -> Hoog	32.000	20.800	19.200	16.000
Flat	Laag -> Midden	6.500	5.800	5.200	4.400
Flat	Laag -> Hoog	22.000	15.000	13.500	9.500.
Flat	Midden -> Hoog	17.600	12.000	10.800	9.600
Twee-onder-een-kapwoning	Laag -> Midden	11.500	10.300	9.300	7.800
Twee-onder-een-kapwoning	Laag -> Hoog	40.000	31.000	28.000	24.000
Twee-onder-een-kapwoning	Midden -> Hoog	32.000	24.800	22.400	19.200
Vrijstaande woning	Laag -> Midden	16.000	14.200	13.000	11.000
Vrijstaande woning	Laag -> Hoog	66.000	44.000	40.000	34.000
Vrijstaande woning	Midden -> Hoog	52.800	35.200	32.000	27.200

Tabel 12: Kosten voor isolatie in de nieuwbouw in euro's exclusief BTW

Woningtype	Isolatie niveau	Kosten (€/woning)			
		2015	2020	2030	2050
Tussenwoning	Hoog	13.000	12.000	11.000	9.000
Hoekwoning	Hoog	20.000	18.000	16.000	14.000
Flat	Hoog	10.000	9.000	8.000	7.000
Twee-onder-een-kapwoning	Hoog	21.500	19.000	17.000	15.000
Vrijstaande woning	Hoog	29.000	26.000	23.000	20.000

Tabel 13: Kosten voor technologieën in euro's exclusief BTW

Technologie		Kosten (€/woning)			
		2015	2020	2030	2050
HR107	Alle woningen	1.500	1.350	1.250	1.150
Luchtwarmtepomp	Alle woningen	10.000	7.600	6.400	5.100
Bodemwarmtepomp	Alle woningen	15.000	7.600	11.175	9.300
Hybride warmtepomp	Alle woningen	5.000	3.800	3.200	2.550
Warmtenetten	Eengezinswoningen	2.000	2.000	2.000	2.000
Warmtenetten	Meergezinswoningen	2140	2140	2140	2140
Micro-WKK	Alle woningen	30.500	21.500	13.000	10.500

Tabel 14: Kosten voor aansluitingen in euro's exclusief BTW

Energiedrager		Kosten (€/woning)			
		2015	2020	2030	2050
Elektriciteit		975	975	975	975
Gas		650	650	650	650
Warmte*		450	450	450	450

* Aansluitkosten voor warmte betreffen alleen de kosten voor de warmtemeter. De aansluitleiding is reeds opgenomen in de infrastructuurkosten.

2.4.5 Kosten voor energie

De kosten voor energie zijn berekend op basis van de energievraag per woningtype, de woningvoorraad en de energiekosten:

$$\text{Energiekosten} = \sum_i \sum_j \text{verbruik van energiedrager } i \text{ in woningtype } j \cdot \text{aantal woningen van woningtype } j \cdot \text{kosten van energiedrager } i$$

Voor 2015, 2020 en 2030 zijn de kosten voor elektriciteit en gas afkomstig uit de Nationale energieverkenning (ECN, 2014). Voor 2050 zijn de kosten voor elektriciteit gedefinieerd als de kosten voor de additionele productie. Deze verschillen per scenario en zijn bepaald op basis van het *portfolio generation model* van Ecofys (zie Bijlage V). De kosten voor warmte zijn op vergelijkbare wijze bepaald, met een aangepaste versie van het *portfolio generation model* voor warmteproductie. De toegepast warmtekosten zijn in samenwerking met EnNatuurlijk vergeleken met algemene kentallen van warmteproductie in Nederland. De aannames in deze studie zijn ongeveer 10% lager dan de kosten die uit deze kentallen voortkwamen¹⁸. Voor 2050 zijn de kosten voor gas gedefinieerd op basis van een gelijkblijvende reële prijs in vergelijking met 2030.

Tabel 15: (nationale) kosten voor energiedragers

Energiedrager	Kosten (€/kWh)			
	2015	2020	2030	2050
Elektriciteit	0,042	0,056	0,057	0,067
Gas	0,026	0,030	0,033	0,033
Warmte	0,029	0,029	0,029	0,029

¹⁸ Een evenredige mix van geothermie, restwarmte, biomassa en warmte uit WKK's komt (op basis van SDE-basisbedragen, WKK investerings- en operationele kosten en bestaande restwarmtecontracten zoals aangeleverd door Ennatuurlijk) uit op ongeveer €35 per MWh.

2.4.5.1 Kosten van additionele vraag in piekperiodes

Voor de toekomstige elektriciteitsprijs is rekening gehouden met het feit dat het gebruik van elektriciteit voor verwarming voor additionele vraag zal zorgen tijdens piekuren. De kosten van het produceren van additionele elektriciteit in piekuren is relatief hoog, omdat de elektriciteitsbronnen met lage marginale kosten (kosten per geproduceerde MWh) reeds volledig ingezet zijn. Daarom moet er gebruik gemaakt worden van installaties die hogere marginale kosten hebben. Dit verklaart de hogere kosten van elektriciteit in 2050. Dit wordt nader uitgelegd in Bijlage V.

2.4.5.2 Piekkosten in bufferscenario's

In de 'bufferscenario's worden de kosten berekend die kunnen worden vermeden door het toevoegen van een buffer. Omdat het verschuiven van de piekvraag een invloed heeft op het benodigde opgestelde vermogen, en daarmee de gemiddelde kosten per eenheid van energie, zijn deze kosten voor deze scenario's apart gemodelleerd. Dit wordt nader uitgelegd in Bijlage V.

2.4.5.3 Duurzame energie

De energieprijzen zijn bepaald op basis van de marktprijzen zoals deze verwacht worden. Het is echter buiten beschouwing gelaten dat er bij een hoge vraag naar elektriciteit, zoals voornamelijk in scenario C het geval zal zijn, ook een grotere hoeveelheid duurzame elektriciteit zal moeten worden opgewekt om de emissiefactoren gelijk te laten blijven. Dit zal betekenen dat er meer subsidie zal moeten worden uitgetrokken voor duurzame energie. Dit is niet in de kosten meegenomen.

2.4.6 Kosten voor distributie- en transmissienetten

Woonmilieus zijn van belang voor het bepalen van de kosten voor infrastructuur en netten. Voor elk van de scenario's wordt eenzelfde indeling naar woonmilieus gehanteerd. De indeling naar woonmilieus wordt slechts bepaald voor de huidige woningvoorraad. Voor de toekomstige woningvoorraad wordt aangenomen dat de verhouding in het aantal woningen tussen verschillende woonmilieus gelijk blijft.

Tabel 16: Woningvoorraad naar woonmilieu (ABF Research, 2013)

Woonmilieus	Aantal woningen per woonmilieu
Centrum-stedelijk	524.185
Buiten-centrum	2.973.558
Groen-stedelijk	881.019
Centrum-dorps	2.205.692
Landelijk wonen	803.855
Totaal	7.388.308

Tabel 17: Indeling woningvoorraad naar woonmilieu en woningtype (Ecofys analyse o.b.v. ABF Research, 2013)

Woonmilieu	Woningtype					Totaal
	Tussenwoning	Hoekwoning	Appartement	Twee-onder-een-kapwoning	Vrijstaande woning	
Centrum-stedelijk	1,4%	0,5%	4,5%	0,5%	0,1%	7,1%
Buiten-centrum	12,3%	4,7%	18,0%	4,7%	0,6%	40,2%
Groen-stedelijk	4,3%	1,7%	3,0%	1,7%	1,2%	11,9%
Centrum-dorps	10,5%	4,3%	3,1%	4,3%	7,7%	29,9%
Landelijk wonen	2,4%	1,0%	0,9%	1,0%	5,5%	10,9%
Totaal	31,0%	12,2%	29,4%	12,2%	15,2%	

De kosten voor distributie en transmissie zijn berekend op basis van de piekvraag per woonmilieu en voor heel Nederland. Voor de woonmilieus (distributie) en Nederland (transmissie) zijn kengetallen gedefinieerd die de kosten per eenheid van additioneel vermogen beschrijven.

Tenzij anders aangegeven, worden de distributie- en transmissiekosten bepaald op basis van de toename in piekvraag in woonmilieus en in heel Nederland volgens:

Distributiekosten

$$= \sum_i \sum_j \text{piekvraag van energiedrager } i \text{ in woonmilieu } j \\ \cdot \text{distributiekosten per kW voor energiedrager } i \text{ in woonmilieu } j$$

$$\text{Transmissiekosten} = \sum_i \text{piekraag van energiedrager } i \cdot \text{transmissiekosten per kW voor energiedrager } i$$

2.4.6.1 Kosten voor elektriciteitsnetten

De additionele kosten voor de distributie en transmissie van elektriciteit zijn bepaald op basis van de kennis en ervaring van respectievelijk Alliander en TenneT. De methodiek is nader beschreven in Bijlage IV.

Tabel 18: Kosten voor elektriciteitsdistributie in woonmilieus

Woonmilieu	Kosten additioneel vermogen (€/kW)			
	2015	2020	2030	2050
Centrum-stedelijk	1.600	1.600	1.600	1.600
Buiten-centrum	2.500	2.500	2.500	2.500
Groen-stedelijk	2.500	2.500	2.500	2.500
Centrum-dorps	3.600	3.600	3.600	3.600
Landelijk wonen	4.400	4.400	4.400	4.400

Tabel 19: Kosten voor elektriciteitstransmissie

Kosten
Bij een stijging van de piekbelasting met maximaal 3 GW bedragen de CAPEX 0 euro per kW piektoename
Bij een stijging van de piekbelasting met 3 tot 10 GW bedragen de CAPEX 65 euro per kW piektoename over de levensduur van de assets
Bij een stijging van de piekbelasting met meer dan 10 GW bedragen de CAPEX 500 euro per kW piektoename over de levensduur van de assets
De onderhoudskosten bedragen 7,50 euro per kW per jaar

2.4.6.2 Kosten voor gasnetten

De additionele kosten voor de distributie van gas zijn bepaald op basis van de kennis en ervaring van Alliander (zie Bijlage IV). De netto kosten voor het in stand houden van het gasnet bedragen 132 euro per aansluiting per jaar. De kosten voor de verwijdering van het gasnet bedragen 1.250 euro per aansluiting (eenmalig). Daarbij wordt rekening gehouden met versnelde afschrijving. De methodiek is nader beschreven in Bijlage IV.

Tabel 20: Kosten voor gasdistributie

Instandhouding gasnetten	Verwijdering gasnetten
132 euro per aansluiting per jaar	600 euro per aansluiting voor verwijdering aansluiting
	270 euro per aansluiting voor verwijdering hoofdleiding ¹⁹
	De kapitaalkosten worden over de gehele periode van de verwachte levensduur gedragen. Er wordt vanuit gegaan dat verwijdering plaatsvindt in het 20 ^{ste} jaar van de levensduur.

Voor de kosten voor gastransport wordt er gekeken naar de kosten die bespaard worden in het geval van een all electric scenario. Deze kosten zijn geanalyseerd op basis van kengetallen van Gasunie (zie Tabel 21). Bij deze benadering wordt aangenomen dat het gasnet voor de niet-huishoudelijke gasvraag in stand moet blijven.

De bespaarde kosten wordt als additionele kosten gerekend voor de scenario's waarin gas gebruikt wordt, volgens de volgende formule:

$$\text{Transportkosten} = 48 \text{ miljoen per jaar} * \frac{\text{Gasvraag in scenario } x}{\text{Gasvraag in scenario } A}$$

¹⁹ In dit bedrag is ermee rekening gehouden dat ongeveer 60% van de capaciteit van de hoofdleidingen ingezet wordt voor huishoudens. De overige leidingen blijven liggen.

Tabel 21: Kosten voor gastransport

Kosten	Uitleg	Huidige kosten (miljoen €/jaar)	Toewijzing aan huishoudens (miljoen €/jaar)	Besparing in bij all electric scenario
Energiekosten Transport en balancerings	Deze kosten hangen samen met het volume, en de belasting van het netwerk tijdens het vervoer. Weliswaar is minder dan de helft van het gas voor huishoudens, maar omdat dat gas in relatief drukke perioden moet worden vervoerd, rekenen we toch de helft aan huishoudens toe. Deze kosten verdwijnen in het all electric scenario.	71	35,5	-35,5
Energiekosten Kwaliteitsconversie	Terwijl een vierde van het gasvolume naar huishoudens gaat, gaat ongeveer de helft van het Groningengas (wat met conversie wordt gemaakt) ernaartoe. Daarom wordt de helft aan huishoudens toegewezen. Deze kosten verdwijnen in het all electric scenario.	25	12,5	-12,5
Operationele kosten beheer netwerk Transport en Balancerings	Deze hangen samen met het beheer van het gasnetwerk. Deze worden voor de helft aan huishoudens toegewezen (helft van de capaciteitsreservering). Deze kosten worden echter niet minder – de onderhoudskosten blijven hetzelfde voor een halflege pijp.	206	103	0
Operationele kosten beheer netwerk Kwaliteitsconversie	Deze hangen samen met het beheer van het gasnetwerk. Deze worden voor de helft aan huishoudens toegewezen (helft van de capaciteitsreservering). Deze kosten worden echter niet minder – de onderhoudskosten blijven hetzelfde voor een halflege pijp.	14	7	0

2.4.6.3 Kosten voor warmtenetten

De kosten voor warmtenetten zijn geanalyseerd op basis van beschikbare data uit een eerder door Ecofys uitgevoerd project over investeringskosten van warmtenetten voor verschillende thermische vermogens en warmtevraagdichtheid. Op basis van een geschatte warmtevraag per woning is de warmtevraagdichtheid bepaald. Dit resulteert in de kosten voor warmtenetten per woonmilieu (Tabel 22)²⁰. De methodiek is nader beschreven in Bijlage IV. In deze kosten is aangenomen dat in de warmtevraag moet kunnen worden voorzien tot een gemiddelde effectieve etmaaltemperatuur van - 17°Celsius. Hoewel er mogelijkheden zijn om de kosten van warmtedistributie te verlagen waren er onvoldoende gedragen inzichten om dit in deze analyse mee te nemen.

Tabel 22: Kosten voor warmtenetten

Woonmilieu	Kosten additioneel vermogen (€/kW)			
	2015	2020	2030	2050
Centrum-stedelijk	1,096	1,096	1,096	1,096
Buiten-centrum	1,149	1,149	1,149	1,149
Groen-stedelijk	1,366	1,366	1,366	1,366
Centrum-dorps	1,623	1,623	1,623	1,623
Landelijk wonen	2,059	2,059	2,059	2,059

²⁰ Eén van de beperkingen binnen het model is dat de mate van isolatie en toepassing van technologie wordt gedefinieerd op woningniveau. Verhoudingsgewijs hebben tussenwoningen in een buiten-centrum woonmilieu evenveel stadsverwarming als woningen in het landelijk wonen woonmilieu. In de praktijk zullen bepaalde technologieën echter bij voorkeur in bepaalde woonmilieus worden toegepast. Het effect van deze beperking is klein en wordt verder beperkt door te corrigeren voor de hogere kosten voor additioneel vermogen in de woonmilieus centrum-dorps en landelijk wonen. De kosten voor additioneel vermogen zijn voor deze woonmilieus daarom op 1300 €/kW gezet.

3 Scenario's

De ontwikkeling van de huishoudelijke warmtevoorziening wordt verkend met behulp van tien scenario's. Deze scenario's verkennen de extremen van de mogelijke ontwikkelingen.

3.1 Overzicht scenario's

Er is gekozen voor een werkwijze met scenario's tot en met ca. 2050 waarin verschillende technologieën dominant zijn in de invulling van de warmtevraag van huishoudens, in combinatie met een bepaald isolatieniveau.

Daarbij wordt onderscheid gemaakt tussen een warmtevoorziening voor huishoudens met gasgestookte ketels, warmtelevering via een warmtenet, met elektrische warmtepompen, en hybride warmtepompen met een gasgestookte ketel als back up. De toegepaste technologieën worden beschreven in paragraaf 2.2.2. Tevens is gekeken naar een decentrale invulling van de warmtevoorziening waarin naast elektrische warmtepompen ook micro-WKK wordt ingezet om de benodigde extra elektriciteitsvraag van warmtepompen decentraal in de wijk te produceren om zo de benodigde capaciteit van de elektriciteitsinfrastructuur te beperken.

Uitgangspunt in de Midden Isolatie scenario's is dat alle bestaande woningen worden na-geïsoleerd naar isolatieniveau midden. Dit betekent dat de woning is (na)geïsoleerd tot $R_c=1,3$ voor de gevel (spouwmuurisolatie), $R_c=2,5$ voor dak en vloer en overal voorzien van HR++ glas. Vanaf 1992 zijn alle nieuwbouwwoningen met dit isolatieniveau gebouwd, en dit is tevens het gebruikelijke niveau van na-isolatie. Een woning met dit isolatieniveau en een HR-ketel heeft een energielabel B. In de scenario's met Isolatie Hoog worden alle bestaande woningen na-geïsoleerd tot $R_c=5$ voor de gehele gebouwschil en driedubbel glas. Een nul op de meter woning zoals bij renovaties in het kader van de Stroomversnelling worden gerealiseerd, voldoet aan dit isolatieniveau. Nieuwbouw vanaf 2015 heeft een vergelijkbaar isolatieniveau, hoewel de isolatie-eisen uit het bouwbesluit nog iets lager liggen op $R_c=4,5$ voor de gevel, $R_c=6$ voor het dak en $R_c=3,5$ voor de vloer. Wanneer vanaf 2020 bijna energieneutraal gebouwd moet gaan worden, zal de isolatiegraad zeker voldoen aan de karakteristiek van isolatiegraad Hoog.

In de scenario's zijn we uitgegaan van vier verwarmingstechnologieën (beschreven in paragraaf 2.2.2) als basis. Hierbij is voor elke technologie(-mix) gekeken wat het effect is bij isolatie op midden en hoog niveau (beschreven in paragraaf 2.2.1). In totaal leidt dit tot 10 scenario's, weergegeven in Tabel 23.

Tabel 23: Overzicht scenario's

Naam scenario	Isolatie-niveau	Toegepaste technologie
HR Hoog	Hoog isolatie-niveau	Gas – HR Ketels
Hybride Hoog		Gas en Elektra – Hybride Warmtepompen
Elektrisch Hoog		Elektra – Elektrische Warmtepompen
Warmte Hoog		Gas en warmte – Warmtenetten
Decentraal Hoog		Gas en Elektra – μWKK's en E warmtepompen
HR Midden	Midden isolatie-niveau	Gas – HR Ketels
Hybride Midden		Gas en Elektra – Hybride Warmtepompen
Elektrisch Midden		Elektra – Elektrische Warmtepompen
Warmte Midden		Gas en warmte – Warmtenetten
Decentraal Midden		Gas en Elektra – μWKK's en E warmtepompen

3.2 Beschrijving technologieën in scenario's

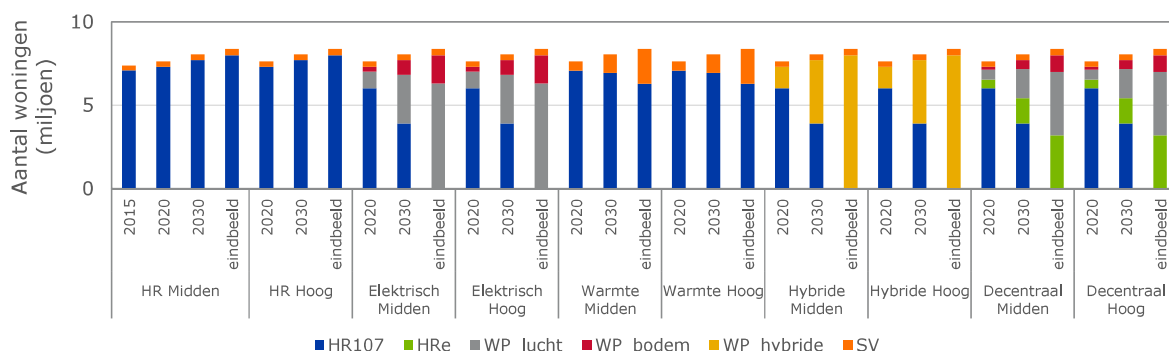
In Tabel 24 worden de toegepaste technologieën in de verschillende scenario's nader beschreven.

Tabel 24: Invulling van scenario's met betrekking tot de inzet van verwarmingstechnologieën

Technologie	Aannames
HR	- HR-ketel blijft de dominante technologie. - De verdeling tussen warmtelevering en gasinfrastructuur in de bestaande bouw verandert niet. Er worden dus geen bestaande woningen alsnog op warmtelevering aangesloten. Het aandeel warmtenetten is wel verschillend per woningtype: 4% tussen woning, 7% meergezinswoning en 1% vrijstaande woning. - Het aandeel warmtelevering in de nieuwbouw houden we gelijk aan wat het nu is per woningtype in recent gebouwde woningen met label A+, A en B.
Elektrische warmtepomp	- Bestaande woningen met een gas-infrastructuur die na-isolatie krijgen stappen over op een lucht-water elektrische warmtepomp. Woningen met warmtelevering blijven op warmte aangesloten. - Het aandeel warmtelevering in de nieuwbouw houden we gelijk aan wat het nu is per woningtype in recent gebouwde woningen label A+, A en B. Alle andere nieuwbouw woningen krijgen een elektrische warmtepomp, bodem gekoppeld systeem.

Technologie	Aannames
Warmte	- Het percentage woningen met warmtenetten neemt lineair toe van 5% in 2015 tot 25% in 2050. Er wordt geen verschil gemaakt tussen bestaande bouw en nieuwbouw. - We gaan ervanuit dat overstap naar warmtenetten bij bestaande woningen gebeurt op het moment van na-isolatie. - De verhouding tussen woningtypen die worden aangesloten op warmtelevering is gelijk aan huidige verdeling woningtypen bij woningen met warmtelevering. - De warmte wordt opgewekt met behulp van geothermie en gasketels²¹.
Hybride	- Bestaande woningen met een gas-infrastructuur die na-isolatie krijgen stappen over op een hybride warmtepomp. Dit betekent in dit geval het bijplaatsen van een elektrische warmtepomp met behoud van een HR-ketel als back-up. Woningen met warmtelevering blijven op warmte aangesloten. - Het aandeel warmtelevering in de nieuwbouw houden we gelijk aan wat het nu is per woningtype in recent gebouwde woningen label A+, A en B. Alle andere nieuwbouw woningen krijgen een hybride warmtepomp.
Decentraal	- In dit scenario wordt zoveel mogelijk elektriciteit lokaal tussen woningen uitgewisseld. - Dit wordt bewerkstelligd door een wijk te voorzien van een combinatie van elektrische warmtepomp en μWKK's. - Met deze combinatie kan ervoor gezorgd worden dat bij grote warmte gelijktijdig elektriciteit voor warmte wordt gebruikt (door de warmtepomp) en wordt opgewekt (door de μWKK's). Er is berekend wat op basis van de piekwarmtevraag de ideale mix zou zijn in de wijk om de gezamenlijke netbelasting te minimaliseren. - De verhouding tussen woningen met een warmtepomp en woningen met een micro WKK wordt zo bepaald dat de gezamenlijke piekvraag geminimaliseerd wordt. Dit betekent dat 40% van de woningen een micro-WKK en 60% van de woningen een elektrische warmtepomp krijgt.

Ontwikkeling technologieën



Figuur 18: Overzicht van de toegepaste technologieën

²¹ Deze aannames zijn relevant voor het bepalen van de emissiefactoren voor warmte, de kosten per MWh en de effecten op de kosten van buffers. Voor de kosten is een vergelijking uitgevoerd met kentallen van EnNatuurlijk om de redelijkheid van de aannames te testen.

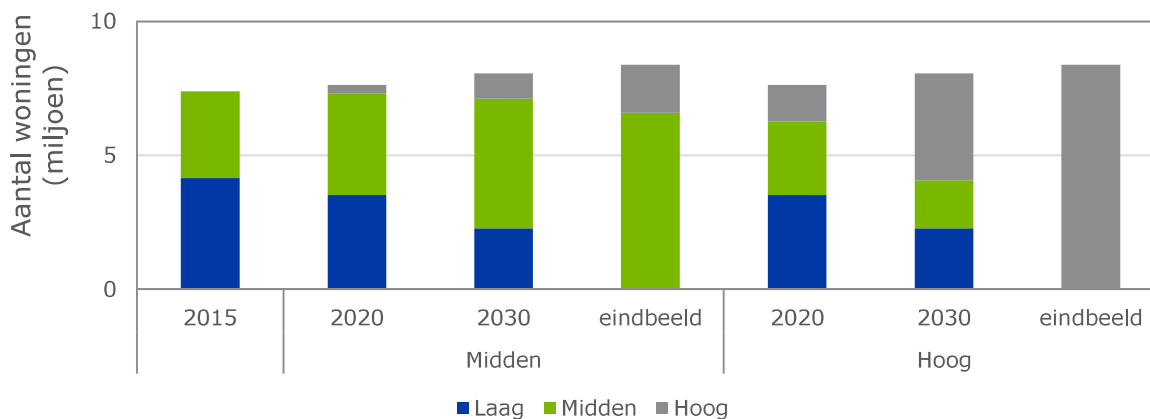
3.3 Beschrijving isolatieniveaus in scenario's

Voor elke technologie is een scenario uitgewerkt met een Hoog en met een Midden isolatieniveau. De definities voor deze isolatieniveaus op woningniveau zijn beschreven in 2.2.1. Voor ontwikkeling van de woningvoorraad geldt:

Tabel 25: Karakteristieken van de isolatieniveaus

Isolatieniveau	Karakteristieken
Isolatie Hoog	- Alle bestaande woningen met een isolatiegraad laag (huidige G t/m D label) of isolatiegraad midden (huidige C t/m A) label krijgen na-isolatie naar niveau hoog in de periode 2015 t/m 2050. - Alle nieuwbouwwoningen krijgen isolatie graad hoog, er wordt geen onderscheid gemaakt tussen woningen gebouwd voor 2020 met EPC 0,4 en na 2020 bijna energieneutraal.
Isolatie Midden	- Alle bestaande woningen met een isolatiegraad laag (G t/m D label) krijgen na-isolatie naar niveau midden (C t/m A) in de periode 2015 t/m 2050. - Alle nieuwbouwwoningen krijgen isolatie graad hoog, er wordt geen onderscheid gemaakt tussen woningen gebouwd voor 2020 met EPC 0,4 en na 2020 bijna energieneutraal.

Ontwikkeling isolatiegraad



Figuur 19: Overzicht van de ontwikkeling van isolatiegraad

De scenario's zijn kwantitatief in detail uitgewerkt in Bijlage II.

3.4 Implementatie van de verschillende scenario's

Het na-isoleren van het volledige Nederlandse huizenbestand is niet alleen een kwestie van kosten, maar ook van tijd. Om alle huizen in 2050 op een hoog isolatieniveau te brengen zullen in 35 jaar tijd ruim 6 miljoen woningen moeten worden gerenoveerd. Dit houdt in dat er 35 jaar lang jaarlijks 170.000 woningen volledig gerenoveerd moeten worden tot een isolatieniveau hoog.

Dit is een zeer grote opgave, vergeleken met bijvoorbeeld de doelstelling van het Stroomversnellingsprogramma. Dat programma beoogt de realisatie van 11.000 'nul op de meter' woningen in de sociale huursector in de periode 2014 - 2016. Het idee is dat de aanpak daarna wordt overgenomen door andere woningcorporaties en tot en met 2020 additioneel tot 100.000 'nul op de meter' woningen leidt, dat zijn er 25.000 per jaar.

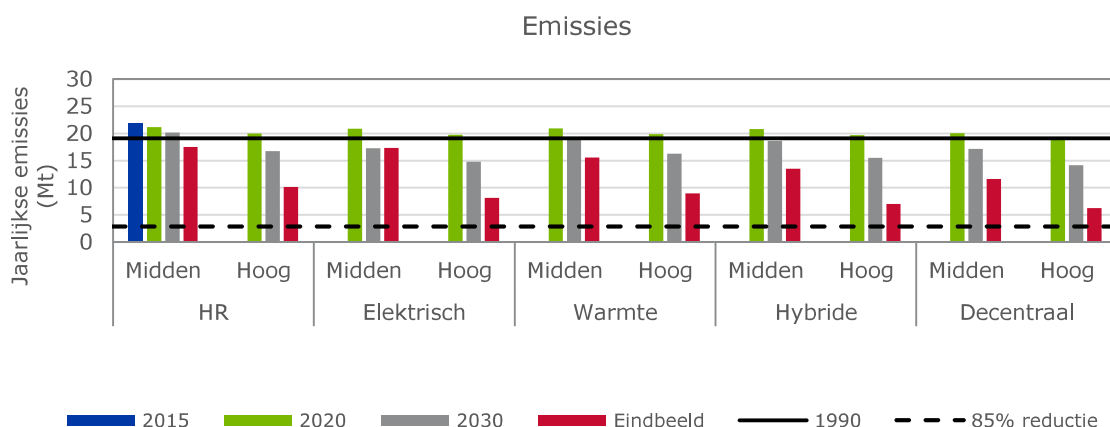
In de opzet van deze studie is door de deelnemers gekozen voor extreme scenario's. Dit heeft tot doel de kosteneffecten van technologiekeuzes geïsoleerd te kunnen bekijken. In werkelijkheid zullen vele verschillende technologieën en isolatieniveaus worden toegepast. Dit is niet in de laatste plaats omdat het beperkt mogelijk zal zijn om bewoners te verplichten een bepaalde technologie toe te passen. Deze mogelijkheden kunnen echter wel vergroot worden door gezamenlijke aanpak op wijkniveau. Het beoordelen van mogelijke en haalbare implementatiepaden vergt nadere analyse.

4 Analyse van de resultaten

In deze sectie worden de resultaten beschreven van de modelberekening voor de verschillende scenario's. De resultaten met betrekking tot emissies worden in Sectie 4.1 beschouwd. Sectie 4.2 gaat vervolgens verder in op de kosten per scenario. Additionele flexibiliteitsscenario's worden besproken in Sectie 4.3. In Sectie 4.4 wordt een overzicht van de belangrijkste scenariokarakteristieken gegeven. In Sectie 4.5 beschrijven we de resultaten van de gevoeligheidsanalyse.

4.1 Analyse effect emissies

Figuur 20 geeft de CO₂ emissies per scenario weer. Per scenario wordt aangegeven hoe deze zich in de tijd ontwikkelen. Er is in de figuur aangegeven welke emissies in 1990 aan de huishoudens kunnen worden toegewezen, en welke mate van emissies overeenkomt met een 85% vermindering ten opzichte daarvan.



Figuur 20: Jaarlijkse CO₂ emissies per scenario

In geen van de scenario's wordt een 85% emissiereductie bereikt in het eindbeeld. De grootste reductie wordt gehaald in het Decentraal scenario met hoge isolatie. Deze wordt op de voet gevolgd door Hybride Hoog. Deze positieve resultaten zijn in eerste instantie te danken aan de hoge isolatiegraad in deze scenario's. Daar komt bij dat ondanks de inzet van gas in deze scenario's, de emissies laag zijn door een relatief grote fractie groen gas. Als het verbruik van gas afneemt, wordt het aandeel groen gas relatief hoger. Bij elektriciteit is hetzelfde principe toegepast. Bij een zeer sterke groei van de elektriciteitsvraag neemt het aandeel duurzame elektriciteit af en gaat de gemiddelde emissiefactor omhoog. In Tabel 26 worden de resulterende emissiefactoren per scenario aangegeven.

Tabel 26: Emissiefactoren per scenario (kgCO₂/kWh)

Energiedrager	HR		Elektrisch		Warmte		Hybride		Decentraal	
	Midden	Hoog	Midden	Hoog	Midden	Hoog	Midden	Hoog	Midden	Hoog
Elektriciteit	0,250	0,250	0,468	0,373	0,250	0,250	0,250	0,250	0,250	0,250
Gas	0,170	0,161	0,000	0,000	0,167	0,156	0,163	0,146	0,165	0,161
Warmte	0,085	0,085	0,085	0,085	0,085	0,085	0,085	0,085	0,085	0,085

Het Decentraal Scenario heeft de laagste uitstoot. Dit is mogelijk doordat er teruglevering van elektriciteit plaatsvindt aan het net. De emissies die hiermee bespaard worden bij de centrale productie worden in mindering gebracht bij de emissies in dit scenario.

Het Elektrisch Hoog scenario presteert relatief slecht. Alle emissies in dat scenario worden veroorzaakt door de sterk toenemende vraag naar elektriciteit. Deze studie gaat ervan uit dat additionele vraag naar elektriciteit ingevuld wordt door ongesubsidieerde duurzame energie. Dit past bij de aanname dat de kosten voor subsidie van duurzame energie bij alle scenario's gelijk zijn. De rest wordt – ook gelet op het vraagprofiel – ingevuld met gascentrales. Dit brengt de emissiefactor voor deze additionele vraag omhoog. Hoge CO₂ prijzen en/of additionele subsidies kunnen het aandeel duurzame elektriciteit doen stijgen en de emissies in dit scenario verder doen dalen.

Tot slot is te zien in scenario HR Hoog dat een aanmerkelijke reductie van emissies behaald kan worden door isolatiemaatregelen alleen. Van de potentiële emissiereductie (emissie HR Midden minus emissie Decentraal Hoog) kan 2/3 worden gerealiseerd met alleen isolatie (HR Hoog). Elektrisch en Warmte leiden daarna nauwelijks tot extra emissiereductie, namelijk 0,6 tot 1,2 Mton. Hybride en Decentraal wel. De extra kosten om dit te realiseren voor decentraal zijn veel hoger dan voor Hybride (1153 €/ton tegenover 584 €/ton). Warmtelevering heeft vooral zin heeft als niet tot een hoog isolatie niveau kan worden na-geïsoleerd.

In de gevoeligheidsanalyse is te zien dat de emissiefactoren van de energiedragers een grote invloed hebben op de uitkomsten. Verlagen van de emissiefactor voor elektriciteit naar 0,05 kgCO₂/kWh resulteert erin dat de emissies in het Elektrisch Hoog scenario het laagste zijn (zie paragraaf 4.5.3). Bij hoge inzet van groen gas wordt het Decentraal Hoog scenario het scenario met de laagste emissies. In scenario Warmte is te zien dat met een maximale inzet van warmtenetten een lichte daling is te bewerkstelligen in vergelijking met het HR scenario.

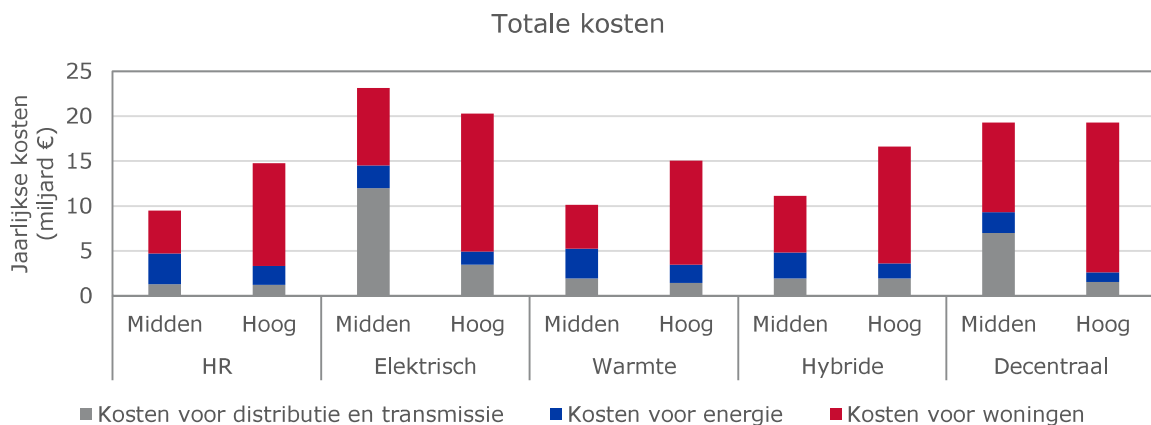
Het is belangrijk hierbij op te merken dat er in vergelijking met gas- en elektriciteitsnetten, een grotere lokale verscheidenheid bestaat in de mogelijkheden om warmtenetten aan te leggen en te voeden. Dit is omdat warmtetransport over grotere afstanden erg veel meer 'netverliezen' oplevert dan in gas- en elektriciteitsnetwerken. Het is daarmee onvermijdelijk dat de aannames voor CO₂ uitstoot en kosten van netwerk tot netwerk sterk zullen verschillen. In deze studie is uitgegaan van geothermie en gasbijstook voor de warmteproductie. Het gebruik van andere bronnen, zoals restwarmte met een lage temperatuur of warmte van afvalverbrandingsinstallaties zal de emissiefactor veranderen.

4.2 Analyse kosten

4.2.1 Totale kosten

Om de geschetste scenario's te realiseren zijn investeringen nodig in woningen (isolatie, technologieën, aansluitingen), in distributie en transmissienetten en in energieproductie. De totale kosten voor de geschetste scenario's worden gegeven in Figuur 21. Hierbij is het belangrijk op te merken dat de gepresenteerde kosten exclusief alle belastingen zijn en dus niet representatief zijn voor de netto kosten voor de eindgebruiker. Getoond zijn de jaarlijkse terugkerende kosten voor het energiesysteem, inclusief kapitaalkosten. Door deze aanpak is wel een goede onderlinge *vergelijking* mogelijk op nationale kosten van de verschillende scenario's.

Het is belangrijk om voor ogen te houden dat de uitgevoerde analyse ook geen maatschappelijke kosten-baten analyse (MKBA) is omdat diverse baten, zoals de baten van emissiereductie, niet zijn gekwantificeerd of meegenomen in de berekening.



Figuur 21: totale kosten per scenario (eindbeeld)

De resultaten laten zien dat een scenario Elektrisch Midden het scenario is met relatief de hoogste kosten. Deze kosten worden met name veroorzaakt door de hoge investeringen in de distributienetten die nodig zijn om aan de hoge piekvraag van elektrische lucht-water warmtepompen in matig geïsoleerde huizen te voldoen.

Ook in Decentraal Midden is dit effect zichtbaar, maar minder doordat lokale afstemming de piekvraag van het netwerk minder doet stijgen dan in het scenario Midden Elektrisch.

Elektrische Hoog en Decentraal Hoog hebben dezelfde kosten. Bij Decentraal Hoog zijn de kosten voor de woningen hoger vanwege de inzet van de relatief dure micro WKK, maar dit wordt gecompenseerd door de besparingen in distributie en transmissie vanwege de lagere piekvraag door betere lokale afstemming van vraag en aanbod.

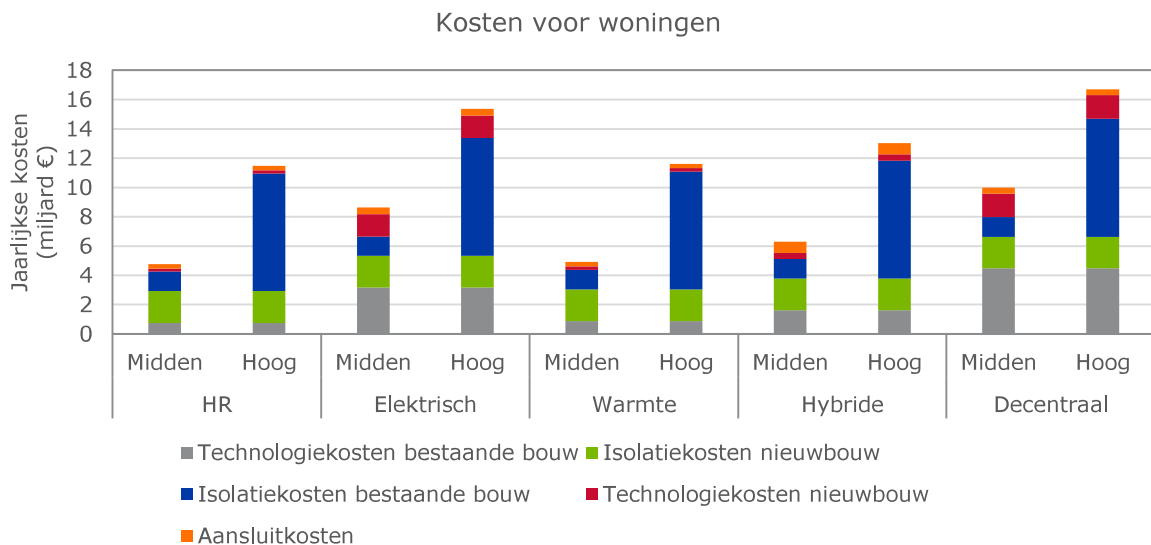
In het decentrale scenario is er een keuze gemaakt voor een micro-WKK (40%) en elektrische warmtepomp (60%) in de woningen. Deze keuze is sterk bepalend voor de uitkomsten. Het decentrale scenario laat een combinatie van (deze) technologieën zien en lokale

elektriciteitsuitwisseling. In de toekomst is warmteuitwisseling niet ondenkbaar net als een grotere diversiteit aan technologieën die onderling geoptimaliseerd kunnen worden.

4.2.2 Analyse kosten op woningniveau

In Figuur 22 worden de kosten op woningniveau uit het totale kostenplaatje gelicht en nader bekeken. In het Elektrisch en Decentraal Hoog scenario zijn de woningkosten het hoogst. Dit wordt verklaard door de inzet van warmtepompen voor piekvraag in beide scenario's, met in het decentrale scenario deels ook micro WKK. Micro WKK's zijn in een vroeg stadium van ontwikkeling en daarom nog relatief kostbaar. Deze technologie is in een vroeg stadium van ontwikkeling en daarom relatief duur.

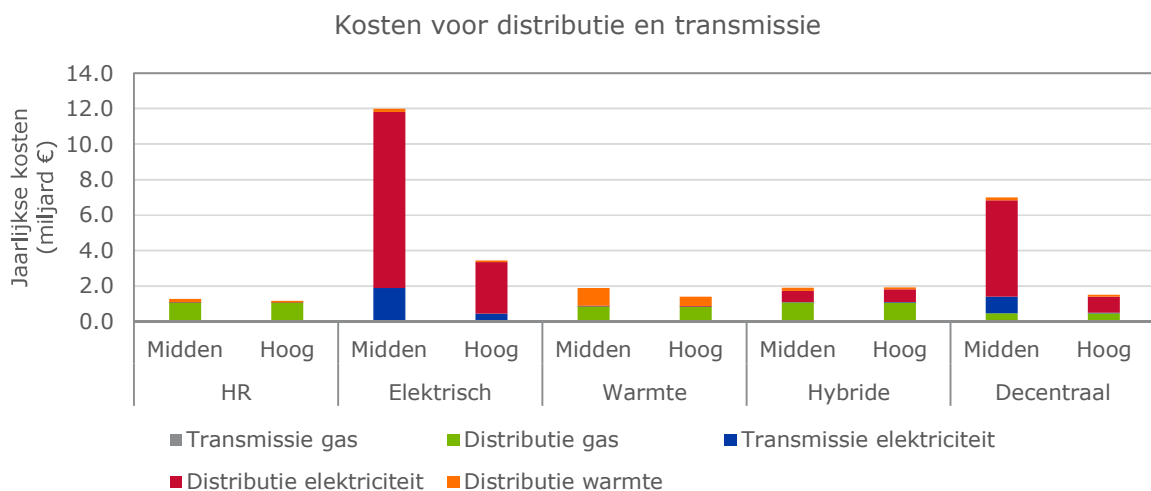
In het Decentraal scenario is het relevant dat de distributiekosten van dit scenario aanmerkelijk wordt verlaagd door de inzet van de micro-WKK. Het is in dit scenario daarom het meest belangrijk dat de eigenaren bij de distributie van deze voordelen voldoende gecompenseerd worden om deze investering daadwerkelijk te doen. Het grote aandeel van de kosten van isolatie geeft aan dat, mede vanwege de grote besparingen die hierdoor mogelijk worden gemaakt, investeringen in R&D voor isolatie een belangrijk speerpunt zijn.



Figuur 22: Kosten voor woningen uitgelicht en nader bekeken (eindbeeld)

4.2.3 Analyse kosten distributie en transmissie

In Figuur 23 worden de kosten voor distributie en transmissie uitgelicht en nader bekeken. Er wordt onderscheid gemaakt tussen gas, elektriciteit en warmte enerzijds en transmissie en distributie anderzijds. Bij warmtenetten is enkel sprake van distributienetten.



Figuur 23: Kosten voor distributie en transmissie (eindbeeld)

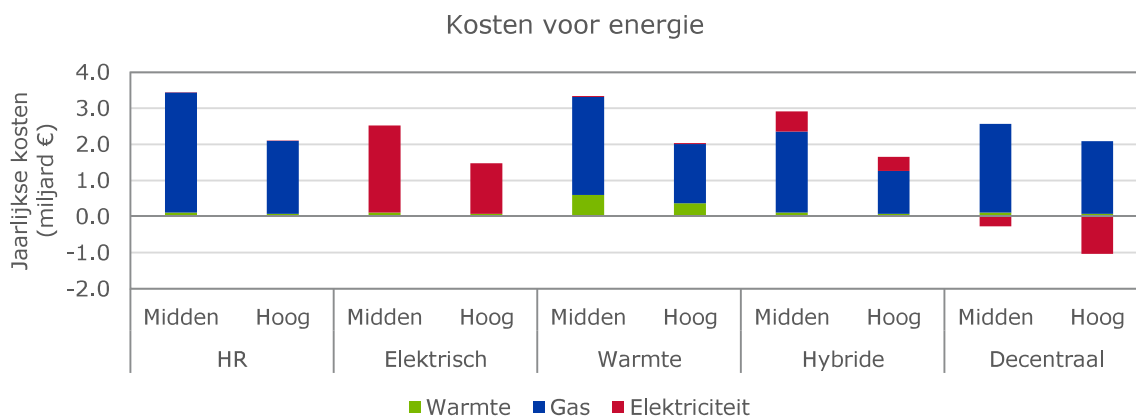
De kosten voor netwerken zijn klein ten opzichte van de kosten die gemaakt moeten worden in de woningen zelf voor het toepassen van isolatie en verwarmingstechnologieën. In absolute zin gaat het echter om grote bedragen. In het Midden Elektrisch scenario zullen de kosten voor elektrische distributienetten met 10 miljard per jaar oplopen, en de kosten van de transmissienetten met bijna 2 miljard per jaar. Daarbij valt op dat bij een hogere isolatiegraad ongeveer 75% aan kosten bespaard kan worden. Dit heeft te maken afvlakken van de piekvraag bij zeer goed geïsoleerde woningen.

Thermostaatinstellingen zijn daarbij belangrijk. Een belangrijke aanname in het creëren van vraagprofielen voor warmtepompen zijn de thermostaatinstellingen die in het model worden ingevoerd. In de scenario's met isolatiegraad Hoog is aangenomen dat er geen nachtverlaging wordt toegepast. Dit zorgt voor een verdere afvlakking van het elektriciteitsprofiel. Nader onderzoek is nodig om na te gaan hoe bewoners hier in de praktijk mee omgaan.

Het aandeel van distributie in de totale kosten is groot. Dit wordt veroorzaakt door de veel grotere totale lengte van dit fijnmazige systeem.

4.2.4 Analyse kosten energie

In Figuur 24 worden de energiekosten per scenario weergegeven.

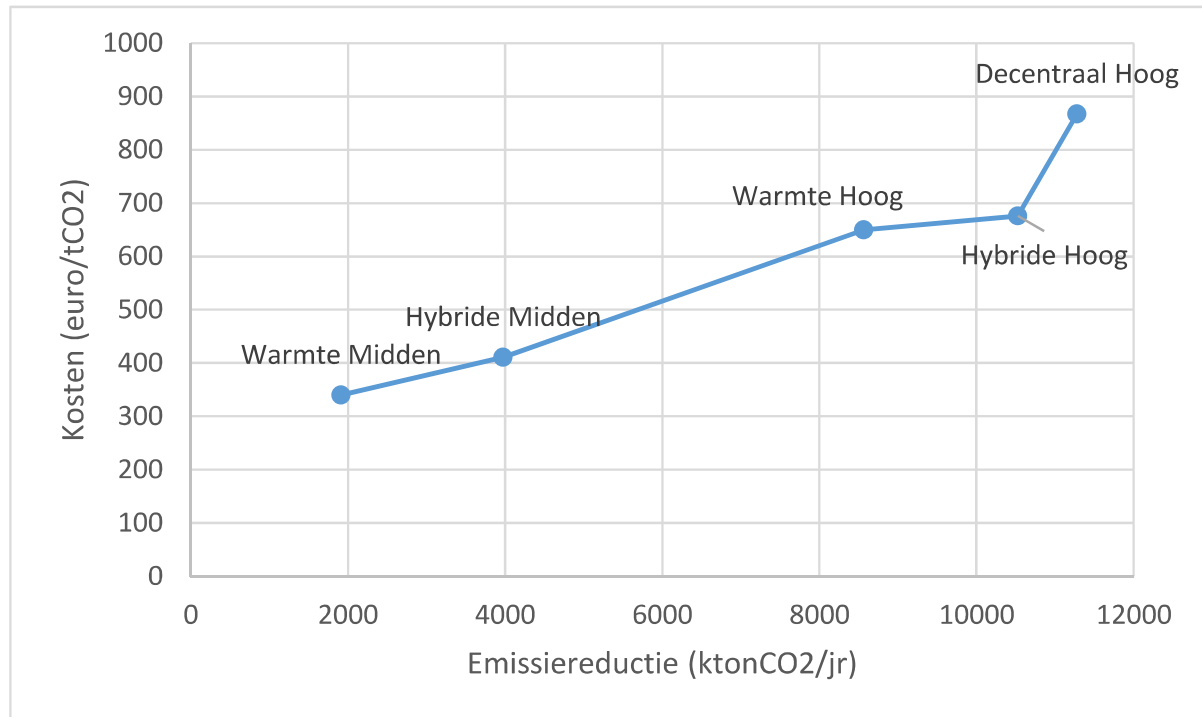


Figuur 24: Kosten energie (eindbeeld)

De resultaten bevestigen logischerwijs dat een hogere isolatiegraad samengaat met lagere energiekosten. Aan de hand van de scenario's met elektrische warmtepompen (Elektrisch, Hybride en Decentraal) is te zien dat deze additionele besparingen op energie mogelijk maken door warmte uit de lucht of bodem aan te trekken. De hogere energiekosten van Hybride en Decentraal hebben te maken met de gedeeltelijke inzet van gas ter vervanging van omgevingswarmte. Hier worden namelijk respectievelijk HR ketels en μ WKK's ingezet.

4.2.5 Kosten emissiereductie

De marginale kosten voor emissiereductie lopen op naarmate de doelstellingen hoger worden. In Figuur 25 zijn, in volgorde van oplopende emissiereductiekosten per eenheid, de scenario's in een grafiek weergegeven. De scenario's waarbij hogere kosten niet samengaan met verdergaande emissiereductie zijn weggelaten.



Figuur 25: Kosten per eenheid bespaarde uitstoot bij oplopende absolute hoeveelheid vermeden emissies

Uit de figuur valt af te lezen dat de meest verreikende reducties bereikt worden met hoge isolatie. Relatief goedkope stappen kunnen echter reeds genomen worden met Warmte en Hybride in het midden isolatieniveau. Het implementeren van het Decentraal scenario in Midden isolatie (niet weergegeven) levert echter zeer hoge kosten op (1.648 €/kton). Dit is dus geen goede tussenstap.

De kosten lijken hoog in vergelijking met huidige prijzen die op markt gelden voor emissierechten bij grootverbruikers van energie. Deze liggen al een aantal jaren typisch tussen de 5 en 15 €/tCO₂. Dit verschil is niet nieuw en bestaat nu ook al op veel meer terreinen tussen de energie/klimaatmaatregelen bij kleinverbruikers (energiebelasting, nieuwbouwnormen, benzineprijzen). Het geeft wel aan dat er tegelijkertijd goede mogelijkheden moeten zijn om in de industrie en elektriciteitsproductie met goedkopere maatregelen CO₂ te besparen.

Het valt op dat in HR Hoog, waar de isolatie in vergelijking met HR Midden sterk verbetert, de kosten stijgen. Dit geeft aan dat op maatschappelijk niveau de kosten van isolatie niet worden terugverdiend met verlaagde kosten voor energie. Daarbij moet steeds goed voor ogen worden gehouden dat:

- Maatschappelijke kosten en baten niet zijn meegenomen in deze kostenanalyse. Voorbeelden hierbij is de gerealiseerde vermeden uitstoot van CO₂, uitstoot van fijnstof en roet bij elektriciteitsproductie, geopolitieke onafhankelijkheid, adaptatiekosten, werkgelegenheid en minder afhankelijkheid van Groningen gas met de daarbij behorende maatschappelijke kosten.
- Goede isolatie verbetert het comfort van de woning. Dit is niet als baat meegenomen.
- De energiekosten van huishoudens zijn inclusief energiebelasting hoger dan de energiekosten waar we in deze studie me rekenen. De baten zijn voor een individueel huishouden daardoor gunstiger dan hier wordt gesuggereerd.

Daarnaast is te zien dat het inzetten van elektrische warmtepompen (zoals in Elektrisch en Decentraal) de systeemkosten bij isolatiegraad Hoog aanmerkelijk lager zijn dan bij isolatiegraad Midden. Het verhogen van het isolatieniveau faciliteert dus de kostenefficiënte inzet van warmtepompen, en brengt uiteindelijk de kosten voor verregaande emissieverlagingen sterk omlaag. Bij het beleid moet er rekening mee worden gehouden dat de investering in isolatie bij het huishouden ligt. Bij het ontwerp van beleid kan worden overwogen om de bespaarde systeemkosten ten dele aan deze huishoudens ten goede te laten komen.

4.3 Flexibiliteitsscenario's

Als toevoeging op de hoofdscenario's is er ook gekeken naar zogenaamde 'flexibiliteitsscenario's', waarbij gekeken wordt naar de mogelijkheden om met extra buffers kosten te besparen.

4.3.1 Flexibiliteitsscenario Elektrisch

Als eerste flexibiliteitsscenario is bij het Elektrisch Hoog scenario gekeken naar de mogelijkheden om met buffers in woningen, gekoppeld aan de elektrische warmtepompen, de systeemkosten te verlagen. Dit houdt in dat, in aanvulling op de reeds bestaande buffer die bij een warmtepomp operationeel noodzakelijk is, een extra opslagmogelijkheid voor warm water wordt gecreëerd. Hiermee zou in principe een elektriciteitsvraag op het piekmoment kunnen worden vermeden door op een voorgaand moment reeds warm water aan te vullen.

Om deze oplossing te onderzoeken is gekeken naar de mogelijkheden om de piek op de koudst mogelijke dag te spreiden. Het blijkt dat op deze momenten de warmtepomp over een langere periode vrijwel volledig wordt ingezet. Dit betekent dat er geen mogelijkheden zijn om extra water te verwarmen in de momenten rond de piek. De piek kan dus niet worden verlaagd om netwerkkosten te besparen. De volle inzet van de warmtepomp op de koudste dagen heeft ermee te maken dat het vermogen van de warmtepomp een grote invloed heeft op de kosten van de installatie. Om deze reden wordt een zo klein mogelijke warmtepomp geplaatst. Het vergroten van de warmtepomp zou een mogelijkheid zijn om flexibiliteit te vergroten. De additionele kosten van de warmtepomp worden echter niet terugverdiend met de besparingen in infrastructuur.

4.3.2 Flexibiliteitsscenario Warmte

Als tweede flexibiliteitsscenario is bij het Warmtescenario gekeken naar de mogelijkheden voor buffers in warmtenetten. Er wordt in deze studie aangenomen dat buffers centraal worden aangelegd, in de buurt van de warmtebron. Het doel van de buffers is om piekcapaciteit van de warmteproductie-installaties te kunnen verlagen, de piek elektriciteitsvraag (voor de geothermische pomp) omlaag te brengen, en daarmee de draaiuren van de bestaande installaties omhoog.

Om de eventuele voordelen van een dergelijke buffer in te schatten zijn de volgende stappen ondernomen.

- Er is gemodelleerd op welke wijze warmte kan worden ingevoed in een warmtenet. Als installatie is een combinatie van geothermie met een gasketel als piekvermogen aangenomen.
- Op basis van het Portfolio Generation Model (zoals beschreven in Bijlage V.1., met details rond warmtenetten in Bijlage V) is berekend wat de kosten zijn van het invoeden van een systeem zonder buffer capaciteit.
- Door het model te draaien met oplopende opslag grootte, en resulterende kosten inclusief opslag, is de optimale grootte van de opslag bepaald.
- Vervolgens wordt voor de optimale grootte van de opslag aangegeven wat de totale kosten van het maken van warmte zijn als opslag wordt ingezet.

Het blijkt dat de kosten voor warmte per MWh door opslag naar beneden gebracht kunnen worden van ongeveer 29 tot 26 euro/MWh, een verlaging van ongeveer 10%. In absolute waarden gaat het om ongeveer 35 miljoen euro per jaar. Op de algehele kosten van scenario Warmte betekent dit een verlaging van ongeveer 2% in de kosten.

Ten aanzien van de investering in de warmtenetten zelf kan geen besparing worden gerealiseerd omdat ook met een opslag de piekvraag door de netten naar de huizen moet stromen.

Specifieke mogelijkheden voor Power-to-Heat zijn in dit scenario niet onderzocht. Deze kunnen additionele waarde creëren.

4.4 Resultaten per scenario

Tabel 27: Overzicht resultaten eindbeeld scenario's (jaarlijkse kosten in miljoenen tenzij anders vermeld)

Hoofdenenergiedrager Verwarmingstechniek Isolatie niveau	Gas			Elektriciteit			Warmte			Gas/elektriciteit			Mix		
	Midden	Hoog	Midden	Midden	Hoog	Midden	Midden	Hoog	Midden	Midden	Hoog	Midden	Midden	Hoog	Hoog
Kosten															
Totaal, waarvan:	9,491	14,767	23,164	20,288	10,142	15,059	11,124	16,611	19,282	16,611	19,282	19,277			
Woningen	4,765	11,484	8,652	15,370	4,900	11,618	6,312	13,030	9,984	13,030	9,984	16,702			
Infrastructuur	1,276	1,180	11,988	3,441	1,897	1,403	1,904	1,921	7,010	1,904	7,010	1,510			
Energie	3,450	2,104	2,525	1,477	3,346	2,038	2,909	1,659	2,288	2,909	2,288	1,066			
Woningen															
Isolatie	3,503	10,222	3,503	10,222	3,503	10,222	3,503	10,222	3,503	10,222	3,503	10,222			
Installaties	1,262	1,262	5,148	5,148	1,396	1,396			6,480	2,808	6,480	6,480			
Infrastructuur															
Elektriciteitsdistributie	7	7	9,926	2,887	37	37	618	724	5,435	618	5,435	904			
Elektriciteitstransmissie	0	0	1,847	421	2	2	29	34	927	29	927	45			
Gasdistributie	1,056	1,056	37	37	836	836	1,056	1,056	443	1,056	443	443			
Gastransmissie	35	22	0	0	29	17	24	13	26	24	26	21			
Warmtedistributie	178	95	178	95	993	510	178	95	178	178	178	95			
Energie															
Elektriciteit	4	4	2,418	1,407	24	24	550	391	-275	550	-275	-1,028			
Gas	3,339	2,030	0	0	2,717	1,639	2,252	1,198	2,457	2,252	2,457	2,024			
Warmte	106	70	106	70	605	375	106	70	106	106	106	70			
Verbruik															
Elektriciteit [GWh]	66	66	36,365	21,165	358	358	8,270	5,885	-4,129	8,270	-4,129	-15,463			
Gas [GWh]	101,178	61,504	0	0	82,342	49,661	68,248	36,298	74,443	68,248	74,443	61,342			
Warmte [GWh]	3,670	2,409	3,670	2,409	20,853	12,948	3,670	2,409	3,670	3,670	3,670	2,409			

Hoofdenenergiedrager Verwarmingstechniek Isolatie ­ niveau	Gas		Elektriciteit		Warmte		Gas/elektriciteit		Mix	
	Midden	Hoog	Midden	Hoog	Midden	Hoog	Midden	Hoog	Midden	Hoog
Emissies										
Totaal, waarvan	17,503	10,136	17,331	8,104	15,590	8,937	13,528	6,978	11,562	6,224
Elektriciteit [ktonCO2]	16	16	17,019	7,899	89	89	2,067	1,471	-1,032	-3,866
Gas [ktonCO2]	17,175	9,914	0	0	13,728	7,747	11,149	5,302	12,282	9,885
Warmte [ktonCO2]	312	205	312	205	1,772	1,101	312	205	312	205
Kosten per eenheid van emissiereductie	-	716	79474	1149	340	650	411	676	1648	868

4.5 Gevoeligheidsanalyse

Om de impact van de aannames te onderzoeken zijn diverse gevoeligheidsanalyses uitgevoerd. In Tabel 28 wordt een overzicht gegeven van de uitgevoerde gevoeligheidsanalyses.

Tabel 28: Overzicht van toegepaste gevoeligheidsanalyses

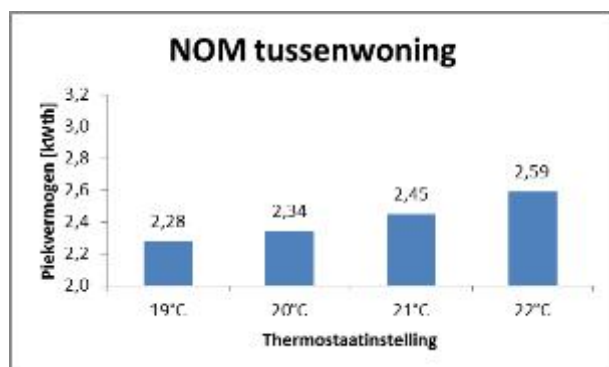
Gevoeligheidsanalyse	Specificatie
Vraagprofielen – Thermostaatinstelling	Bij isolatiegraad hoog is verondersteld dat de woning continu, dag en nacht, tot 21°C wordt verwarmd. In de gevoeligheidsanalyse is in kaart gebracht wat het effect is op de piekvraag wanneer de woning op een andere temperatuur wordt gehouden (19, 20 of 22°C) en wanneer dezelfde thermostaatinstelling wordt gehanteerd als bij isolatiegraad midden ('s nachts 18°C, overdag 19°C en 's avonds 20,5°C).
Vraagprofielen – Isolatie niveaus	Bij isolatiegraad hoog gaan we uit van Rc=5 voor dak, vloer en gevel. In de gevoeligheidsanalyse is gekeken wat het effect is op de piekvraag wanneer de Rc-waarde van de woningschil lager is (Rc= 2,5) of hoger (Rc=7).
Kosten – Rentepercentage	Berekening van jaarlijkse kosten met rentepercentage van 2,5%, 5% (default), 7,5% en 10%
Kosten – Levensduur investeringen	Berekening van jaarlijkse kosten voor technologieën met een levensduur van 10, 15 (default), 20 of 25 jaar. Berekening van totale jaarlijkse kosten met levensduur -25%, 0% (default) en +25%.
Kosten – Distributiekosten	Berekening van jaarlijkse kosten voor distributie met een range in distributiekosten -25%, 0% (default) en +50%.
Kosten – Transmissiekosten elektriciteit	Transmissiekosten bij sterke stijging vanaf 6 GW of vanaf 14 GW.
Kosten – Energieprijzen	Berekening van jaarlijkse kosten voor energie met een range in energiekosten van -50%, 0% (default) en +100%.
Emissies – Emissiefactoren en inzet van groen gas	Drie additionele scenario's voor emissiefactoren: hoge emissiefactor elektriciteit, lage emissiefactor elektriciteit, inzet van groen gas.

4.5.1 Gevoeligheid als gevolg van aannames vraagprofielen

4.5.1.1 Thermostaatinstelling

In een woning met isolatiegraad hoog gaan we uit van een constante thermostaatinstelling die dag en nacht gelijk is op 21°C. In Figuur 26 wordt de gevoeligheid van de maximale piekwarmtevraag voor de stooktemperatuur weergegeven bij een thermostaatinstelling van 19, 20, 21 of 22°C. Deze variatie in thermostaatinstelling heeft weinig invloed op de maximale piekwarmtevraag voor zowel de tussenwoning met een isolatiegraad hoog. Dat betekent dat de inschatting van de piekvraag bij isolatieniveau hoog nauwelijks wordt beïnvloed door de thermostaatinstelling van bewoners, zolang geen nachtverlaging wordt toegepast.

Nachtverlaging en variatie in thermostaatinstelling gedurende de dag heeft grote invloed op de maximale piekwarmtevraag voor zowel isolatiegraad midden als hoog (zie paragraaf 5.1.2).



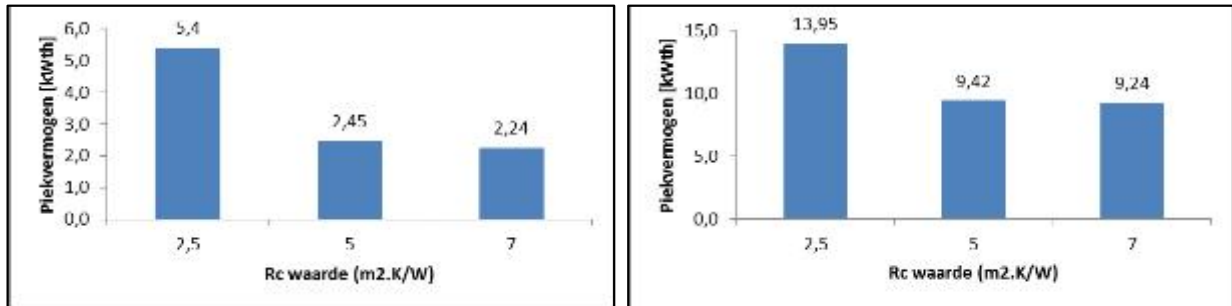
Figuur 26: Resultaten gevoeligheidsanalyse piekvraag voor thermostaatinstellingen

4.5.1.2 Isolatieniveaus

In een woning met isolatiegraad midden gaan we uit van Rc 2,5 voor de schil, in een woning met isolatiegraad hoog gaan we uit van Rc 5. In Figuur 27 wordt de gevoeligheid van de maximale piekwarmtevraag voor de isolatiewaarden van de schil weergegeven. Daarbij wordt Rc 2,5 gecombineerd met natuurlijke ventilatie en HR++glas en Rc 5 en Rc 7 met balansventilatie met warmteterugwinning en driedubbelglas. Links staat de situatie met een constante thermostaatinstelling op 21°C en rechts de situatie met een hogere stooktemperatuur in de avond en nachtverlaging (nacht=18°C; dag=19°C; avond=20,5°C).

Een tussenwoning met een isolatiegraad hoog (Rc 5 of hoger) heeft bij een thermostaatinstelling met nachtverlaging een viermaal grotere piekwarmtevraag dan bij een constante thermostaatinstelling. Dat komt doordat 's ochtends na een koude nacht de woning moet worden opgewarmd. Een woning met Rc 5 heeft een vergelijkbare piekwarmtevraag als een woning met Rc 7. Een tussenwoning met isolatieniveau midden (Rc 2,5) heeft bij een constante thermostaatinstelling gedurende het jaar een 2x zo grote maximale piekwarmtevraag dan een woning met isolatieniveau hoog (Rc 5).

Dit betekent dat niet alleen de isolatiewaarde van belang is voor de piekvraag maar ook de manier van stoken, met een constante thermostaatinstelling of met nachtverlaging.

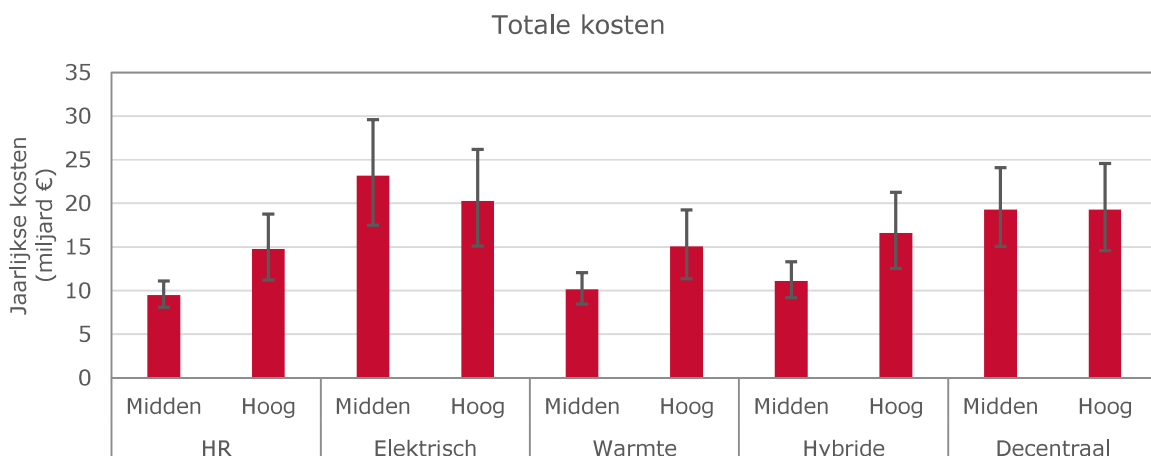


Figuur 27: Resultaten gevoeligheidsanalyse piekvraag voor isolatiewaarden bij verschillende thermostaatinstellingen (links constante thermostaatinstelling, rechts variabele thermostaatinstelling met nachtverlaging)

4.5.2 Gevoeligheid als gevolg van aannames voor kosten

4.5.2.1 Rentepercentage

De jaarlijkse kosten worden berekend op basis van de investeringsomvang en een annuïteitfactor. De annuïteitfactor is afhankelijk van de afschrijvingstermijn en een rentepercentage, zie paragraaf 2.4.3. De berekeningen in deze studie zijn gebaseerd op een rentepercentage van 5%. In Figuur 28 wordt de gevoeligheid van de totale jaarlijkse kosten weergegeven voor een rentepercentage van 2,5%, 5% (default) en 7,5%. Hierbij wordt duidelijk dat dit een belangrijke parameter met de grootste invloed op het absolute kostenniveau, vergeleken met andere parameters beschouwd in deze gevoeligheidsanalyse. De relatieve verschillen tussen de scenario's blijven echter gelijk. Het rentepercentage is dus wel van belang bij conclusies over absolute cijfers over jaarlijkse kosten, maar niet voor de verschillen tussen de scenario's.



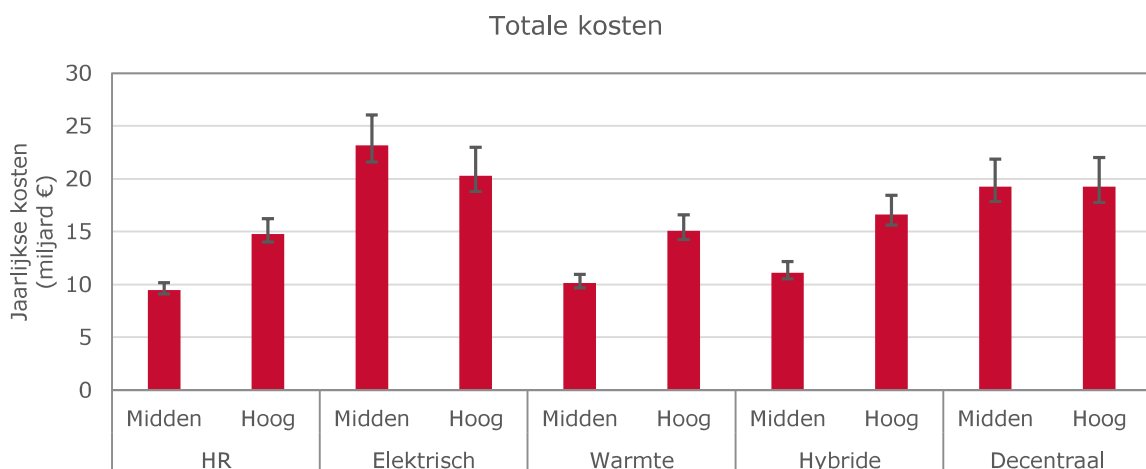
Figuur 28: Gevoeligheid van jaarlijkse kosten voor rentepercentage

4.5.2.2 Levensduur investeringen

De jaarlijkse kosten worden berekend op basis van de investeringsomvang en een annuïteitfactor. De annuïteitfactor is afhankelijk van de afschrijvingstermijn en een rentepercentage, zie paragraaf 2.4.3. Vergelijkbaar met het rentepercentage is ook de afschrijvingstermijn of levensduur van invloed op de annuïteitsfactor. Ter indicatie worden in de jaarlijkse kosten voor technologieën gegeven bij verschillende levensduren. In Figuur 29 wordt de gevoeligheid van de totale jaarlijkse kosten weergegeven een levensduur die 25% minder of 25% meer is dan de aanname in paragraaf 2.4.3.

Tabel 29: Gevoeligheid van de jaarlijkse kosten voor technologieën bij een levensduur van 10, 15, 20 of 25 jaar

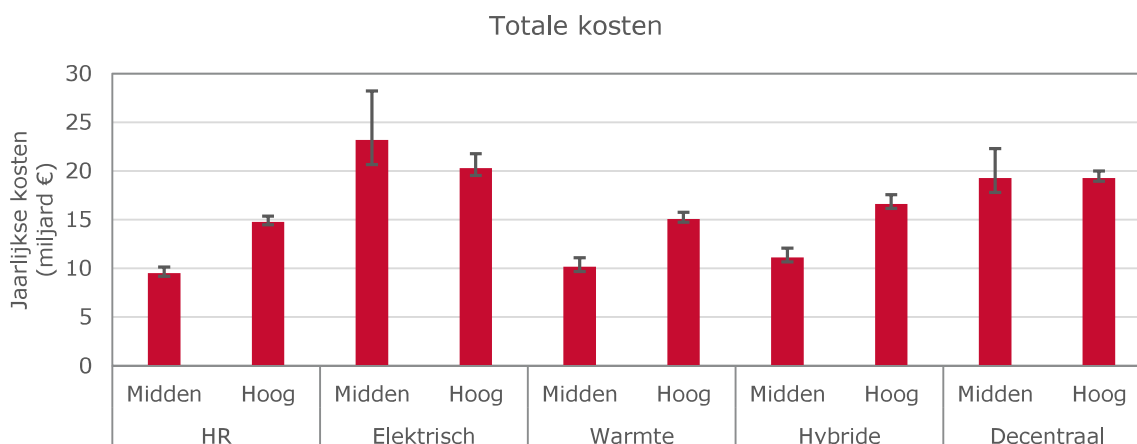
Technology	Jaarlijkse kosten in 2030 bij levensduur van ... (€/woning)			
	10 jaar	15 jaar	20 jaar	25 jaar
HR107	162	121	101	89
HRe	1.684	1.252	1.043	922
Luchtwarmtepomp	829	617	514	454
Bodemwarmtepomp	1.447	1.077	897	793
Hybride warmtepomp	414	308	257	227
Warmtenetten	259	193	160	142



Figuur 29: Gevoeligheid van jaarlijkse kosten voor de levensduur van investeringen

4.5.2.3 Distributiekosten

De jaarlijkse kosten worden berekend op basis van de investeringsomvang en een annuïteitfactor die afhankelijk is van de afschrijvingstermijn en een rentepercentage. In Figuur 30 wordt de gevoeligheid van de totale jaarlijkse kosten weergegeven voor een range in de investeringsomvang van -25% tot +50%.



Figuur 30: Gevoeligheid van jaarlijkse kosten voor de investeringsomvang van distributienetten

4.5.2.4 Transmissiekosten elektriciteit

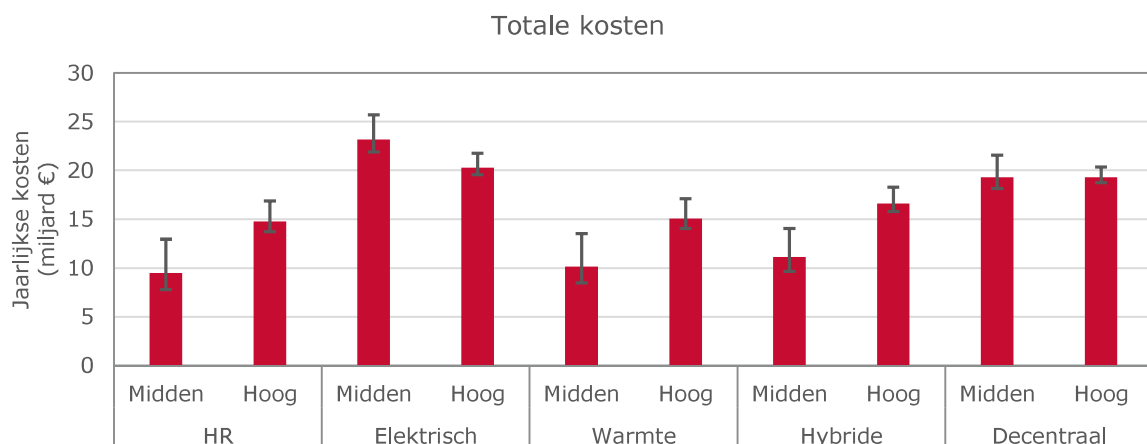
De kosten van elektriciteitstransmissie laten een sterke stijging zien vanaf 10 GW additionele capaciteit. In Tabel 30 wordt de gevoeligheid van de totale investeringskosten voor elektriciteitstransmissie gegeven voor hogere kosten vanaf 6 GW en hogere kosten vanaf 14 GW.

Tabel 30: Totale investeringskosten voor transmissienet bij verschillende kantelpunten van sterke prijsstijging

Scenario	HR Midden	HR Hoog	Elektrisch Midden	Elektrisch Hoog	Warmte Midden	Warmte Hoog	Hybride Midden	Hybride Hoog	Decentra al Midden	Decentra al Hoog
Piekvraag (GW)	0.0	0.0	55,3	16,3	0,2	0,2	3,6	4,1	30,1	5,0
Kosten bij basiscurve (M€)	0	0	24.587	5.123	0	0	36	69	12.029	131
Kosten bij sterke stijging vanaf 6 GW (M€)	0	0	26.327	6.863	0	0	36	69	13.769	131
Kosten bij sterke stijging vanaf 14 GW (M€)	0	0	22.847	3.383	0	0	36	69	10.289	131

4.5.2.5 Energieprijzen

De jaarlijkse kosten worden berekend op basis van de energievraag en de kosten per eenheid van energie. De energieprijzen zoals gehanteerd in deze studie zijn vermeld in tabel 15 in paragraaf 2.4.5. Wanneer de energieprijzen in 2050 hoger of lager zijn dan verondersteld zullen de energiekosten navenant hoger of lager zijn. In Figuur 31 wordt de gevoeligheid van de totale jaarlijkse kosten weergegeven voor een range in energieprijzen van -50% tot +100%. Het effect op de totale kosten is beperkt omdat de kosten voor energie een afnemend deel zijn van de totale kosten. De totale jaarlijkse kosten worden vooral bepaald door kosten voor isolatie en installatie in woningen en de netwerkkosten.



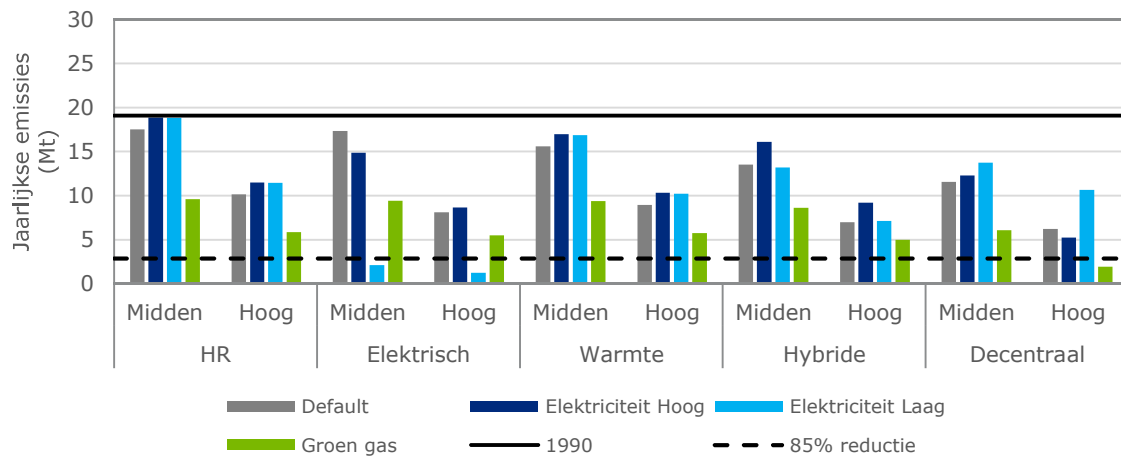
Figuur 31: Gevoeligheid van jaarlijkse kosten voor kosten van elektriciteit, gas en warmte

4.5.3 Gevoeligheid als gevolg van aannames emissiefactoren

De emissies in de scenario's worden berekend op basis van de energievraag en de emissiefactoren van de desbetreffende energiedrager elektriciteit, gas of warmte, zie paragraaf 2.4.2., Tabel 9. De ontwikkeling van deze emissiefactoren is sterk afhankelijk van de inzet van duurzame elektriciteit en groen gas. De gevoeligheid voor deze emissiefactoren is daarom geanalyseerd met behulp van een drietal sets aan emissiefactoren (Tabel 31). In Figuur 32 wordt zichtbaar dat de emissiefactor van elektriciteit een grote invloed heeft op de gerealiseerde emissiereductie. Bij de inzet van technologieën op gas (HR107, HRe en hybride warmtepompen) kan de emissiereductie vergroot worden door de inzet van groen gas.

Tabel 31: Gevoeligheidsanalyse met betrekking tot de emissiefactor

Scenario	Emissiefactor (kgCO ₂ /kWh)		
	Elektriciteit	Gas	Warmte
Basisscenario's	Scenario afhankelijk	Scenario afhankelijk	0,09
Hoge emissiefactor elektriciteit	0,4	0,183	0,09
Lage emissiefactor elektriciteit	0,05	0,183	0,09
Inzet van groen gas	0,25	0,092	0,09



Figuur 32: Gevoeligheid van jaarlijkse emissies voor de emissiefactor

5 Conclusies

Dit is de eerste studie die uitspraken doet over de integrale kosten van een aantal scenario's voor de warmtevoorziening van Nederland voor de komende decennia. In verschillende scenario's verkent deze studie vraag- en aanbodopties voor de invulling van de huishoudelijke warmtevraag. De onderzochte keuzes zijn de mate van isolatie, keuze van warmtetechniek (HR ketel, warmtepomp, μWKK, warmtenet) en keuze van energiedrager (gas, elektriciteit of warmte). De randvoorwaarde hierbij is het behoud van het huidige comfort en mate van betrouwbaarheid.

De uiteindelijke oplossingsrichting is zeker niet één van de extremen die in deze studie geschetst zijn, maar zal een mix van de verkende richtingen zijn. Door belangrijke lokale verschillen in woningenvoorraad, woningdichtheid en bestaande infrastructuur, zal deze mix ook voor elk gebied verschillend uitpakken.

In de studie wordt het HR Midden scenario als basisscenario gezien. De andere scenario's worden met dit scenario vergeleken. Op basis hiervan kunnen we de volgende conclusies trekken:

Emissies

Verregaande maatregelen nodig om emissies in de gebouwde omgeving sterk te verminderen – Er zijn verregaande maatregelen nodig om in alle woningen 85% CO₂-reductie te realiseren. Geen van de scenario's bereikt 85% reductie. De gevoeligheidsanalyse op emissiefactoren laat zien dat deze reductie alleen gehaald kan worden in het scenario met elektrische warmtepompen of het scenario decentrale energieopties als de landelijke inzet van respectievelijk duurzame elektriciteit en groen gas verder wordt vergroot dan nu verondersteld.

De emissiefactor voor gas en elektriciteit heeft een sterke invloed op de te bereiken CO₂ reductie – De emissie in de scenario's kunnen verder omlaag worden gebracht door het aandeel duurzame elektriciteit en groen gas verder te verhogen. Hier kunnen echter kosten mee gemoeid zijn die in deze studie niet zijn meegenomen in de vergelijking. De aanname dat er een absoluut beperkte hoeveelheid duurzame elektriciteit beschikbaar is voor de huishoudelijke markt heeft een belangrijke invloed op de resultaten van deze studie.

Voor warmte is in deze studie gekozen voor warmteopwekking met geothermie met een gasgestookte back up. Dit is een duurzamere invulling dan de huidige praktijk waarbij warmtenetten meestal gevoed worden vanuit elektriciteitscentrales en AVI's.

Scenario's met hoge isolatie en veel decentrale opties of hybride warmtepompen geven de meeste emissiereductie – Deze positieve resultaten zijn in eerste instantie te danken aan de hoge isolatiegraad in deze scenario's. Daar komt bij dat ondanks de inzet van gas in deze scenario's, de emissies laag zijn door een relatief grote fractie groen gas, die mogelijk wordt gemaakt door sterke besparingen in het gasgebruik. Het Decentraal Scenario heeft de laagste uitstoot. Dit is mogelijk doordat er teruglevering van elektriciteit plaatsvindt aan het net. De emissies die hiermee bespaard worden bij de centrale productie worden meegerekend.

Welk scenario optimaal is, is afhankelijk van het ambitieniveau ten aanzien van CO₂ reductie. De meest kosteneffectieve keuze afhankelijk van de ambitie ziet het er als volgt uit.

- Gematigd: alleen hybride warmtepompen en warmtenetten;
- Hoog: hoog isolatieniveau;
- Zeer hoog: Isolatie + hybridewarmtepompen;
- Maximaal: isolatie + combinatie van elektrische warmtepompen en micro-WKK.

Indien maximale reductie van CO₂ uitstoot in de non-ETS sector voorop staat dan vallen technieken die in een huis CO₂ uitstoot veroorzaken af en blijven warmtenetten en elektrificatie over in combinatie met isolatie.

Indien naar de meest kosten effectieve besparing gekeken wordt, dan is bij Midden isolatie de aanleg van een warmtenet een goede keuze of de installatie van een hybride warmtepomp. Uitgaande van een hoog isolatieniveau is verdere substantiële emissiereductie met name realiseerbaar door grootschalig gebruik te maken van hybride warmtepompen of de combinatie van elektrische warmtepompen met micro-WKK. De kosten per vermeden ton CO₂ voor de combinatie zijn echter circa het dubbele van die voor de hybride warmtepomp (1.153 €/ton tegenover 584 €/ton).

Van de potentiële emissiereductie kan twee derde worden gerealiseerd met alleen isolatie, hetgeen te zien is in het scenario HR Hoog – De scenario's Elektrisch en Warmte leiden daarna nauwelijks tot extra emissiereductie, namelijk 0,6 tot 1,2 Mton. Dat komt bij de elektrische warmtepomp door de grote hoeveelheid elektriciteit die daarvoor nodig is en die niet allemaal duurzaam kan worden opgewekt, wat tot uiting komt in de emissiefactor van elektriciteit. Bij warmtenetten hangt dat samen met het uitgangspunt dat warmtenetten maximaal 25% van de woningen van warmte kunnen voorzien. Hybride en Decentraal leiden wel tot extra emissiereductie.

Kosten

Alle scenario's leiden tot een substantiële stijging van de systeemkosten Het invoeren van de meeste verregaande maatregelen betekent meer dan een verdubbeling van de kosten die op dit moment met de verwarming van woningen gemoeid zijn. **De grootste investering ligt in de woningen zelf.** In de geschetste scenario's vormen investeringen in isolatie en technologieën (zoals warmtepompen) een groot deel van de kosten voor de warmtevoorziening. Vooral als gevolg van deze investeringen nemen de jaarlijkse kosten voor de warmtevoorziening toe ten opzichte van de huidige situatie. Dit betekent dat huishoudens zelf het grootste deel van de investeringskosten moeten dragen. Deze eenmalige grote investeringsbeslissingen zullen naar verwachting ingrijpender zijn dan de, relatief, beperkte energie-infrastructuurkosten die maandelijks worden doorberekend door de netbeheerders.

Isolatie heeft grote invloed op de kosten van infrastructuur bij inzet van elektrische warmtepompen Het is gebleken dat de mate van isolatie cruciaal is voor de omvang en de vorm van de warmtevraag. Isoleren naar een gemiddeld isolatieniveau leidt tot een patroon dat vergelijkbaar is met het bestaande patroon, terwijl maximale isolatie het vraagpatroon zeer sterk afvlakt. De studie toont aan dat het grootschalig toepassen van elektrische warmtepompen zonder afdoende isolatie de infrastructuurkosten zeer sterk (tienvoudig) doet stijgen.

Het Elektrisch Midden scenario is daarmee het enige scenario waar de infrastructuurkosten dominant zijn in de totale kosten. Een hoge isolatiegraad zorgt ervoor dat de kosten voor netverzwaring met een factor 4 worden teruggebracht. De kosten van de isolatie worden hiermee in dit scenario – op maatschappelijk niveau – ruimschoots terugverdiend. Evengoed zullen de netwerkkosten voor elektriciteit bij toepassing van elektrische warmtepompen samen met een hoog isolatieniveau een factor 2 tot 3 hoger zijn dan nu.

Lokale optimalisatie leidt tot lagere netwerkkosten – Door grootschalige invoering van warmtepompen nemen de kosten van de energie-infrastructuur sterk toe. Door lokale vraag te optimaliseren met lokale productie zoals Micro-WKK's kunnen de infrastructuurkosten worden verlaagd. De verscheidenheid aan mogelijke technieken, slimme regelingen of vraagrespons op real time pricing zijn in deze studie niet onderzocht.

6 In perspectief

De in deze studie gepresenteerde kosten zijn systeemkosten. De studie geeft een beeld van de totale te verwachten financiële kosten voor het energiesysteem voor verschillende scenario's. De verdeling van deze kosten over huishoudens, overheid of andere partijen wordt daarbij niet beschouwd. Er zijn verschillende kostenperspectieven mogelijk op het energiesysteem: maatschappelijk, consumenten, energieleveranciers, netbeheerders, overheid, etc. In deze studie is gekozen om de systeemkosten te hanteren. **Bij het interpreteren van de resultaten is het belangrijk om in gedachten te houden dat de getoonde kosten niet de werkelijke uitgaven voor de gebruiker laten zien.** Deze worden namelijk voor een aanmerkelijk deel bepaald door belastingen en subsidies, die in de systeemkosten niet meetellen aangezien deze alleen een distributief effect hebben (en dus voor het geheel per saldo nul). Dat betekent dat vanuit de gebruiker gezien verregaand isoleren wel degelijk een verstandige keuze kan zijn, aangezien de kosten per eenheid energie hoger zijn dan vanuit maatschappelijke oogpunt. Daarnaast is het belangrijk om te realiseren dat de studie heeft gekeken naar *financiële* kosten. Dit betekent dat externaliteiten, zoals verminderde uitstoot van CO₂ en fijnstof, geopolitieke onafhankelijkheid, adaptatiekosten en werkgelegenheid, niet zijn meegenomen. Dit zijn echter belangrijke afwegingen bij beleidsbeslissingen op dit gebied. Deze studie is te beschouwen als een inventarisatie van de kosten die nodig zijn om deze andere doelen te bereiken. In de studie zijn keuzes gemaakt om de toekomstige ontwikkeling van de warmtevoorziening van woning te verkennen. Deze keuzes leiden tot enkele belangrijke kanttekeningen.

Er zijn veel factoren die snelheid en richting van de warmtetransitie in de gebouwde omgeving zullen gaan bepalen. Een aantal daarvan zijn verkend binnen de bandbreedte aan scenario's gebruikt in deze studie. De scenario's geven extremen weer, waarbij individuele technologieën in extreme mate wordt toegepast. In werkelijkheid zal elke wijk en elk huis zijn unieke eigenschappen hebben die de optimale oplossing voor dat geval bepalen. **De uiteindelijke oplossingsrichting is daarom zeker niet één van de extremen die in deze studie geschetst zijn, maar zal een mix van de verkende richtingen zijn.**

Deze studie heeft een aantal scenario's verkend op eindpunten en voor Nederland als geheel. Er is weinig aandacht besteed aan **implementatie aspecten en omgeving die daarvoor nodig is.** Bij de totstandkoming van dit werk realiseerden deelnemers zich steeds sterker de spanning tussen enerzijds de lokale differentiatie en anderzijds de nationale systeemeffecten. Vanwege de grote invloed van individuele keuzes en systeemkosten is het raadzaam om te onderzoeken of meer regie en beslissingsbevoegd op regionaal niveau nodig is

Deze studie richt zich op de ontwikkelingen in de huishoudelijke warmtevoorziening. Deze afbakening leidt er toe dat ontwikkelingen met betrekking tot de overige huishoudelijk energievraag (elektrische apparaten, elektrisch vervoer) niet expliciet onderzocht zijn. De kosten die gemaakt worden om het energiesysteem aan de nieuwe eisen voor duurzame warmtevoorziening te laten voldoen zijn volledig toegerekend aan de warmtevoorziening. **In werkelijkheid wordt deze zelfde infrastructuur ook gebruikt voor andere toepassingen en gebruikers.** De meest in het oog springende technologie die kan worden gefaciliteerd is zon-PV.

De netwerkinfrastructuur die aangelegd is voor het voorzien van de piekvraag van warmtepompen, kan ook gebruikt worden voor het terugleveren van zonne-energie aan het net. Dit geeft synergie tussen aanpassingen in het net voor zonnepanelen en warmtepompen. De mate waarin zonnepanelen worden geïnstalleerd en daarmee het ontstaan van een dergelijk synergievoordeel zal sterk verschillen per geografisch gebied.

De in deze studie gepresenteerde kosten zijn *nationale kosten*. De studie geeft dus een beeld van de totale te verwachten financiële kosten voor verschillende scenario's. De verdeling van deze kosten over huishoudens, overheid of andere partijen wordt daarbij niet beschouwd. Er zijn verschillende kostenperspectieven mogelijk op het energiesysteem: maatschappelijk, consumenten, energieleveranciers, netbeheerders, overheid, etc. In deze studie is gekozen om de nationale kosten te hanteren die samenhangen met het systeem als geheel. **Bij het interpreteren van de resultaten is het belangrijk om in gedachten te houden dat de getoonde kosten niet de werkelijke uitgaven voor de gebruiker laten zien.** Deze worden namelijk voor een aanmerkelijk deel bepaald door belastingen en subsidies, die in deze studie niet zijn meegenomen. Daarnaast is het belangrijk om te realiseren dat de studie heeft gekeken naar *financiële* kosten. Dit betekent dat externaliteiten, zoals verminderde uitstoot van CO₂ en fijn stof, geopolitieke onafhankelijkheid, adaptatiekosten en werkgelegenheid niet zijn gewaardeerd in euro's zoals in een maatschappelijke kosten baten analyse.

Binnen deze studie is een groot aantal woningtypen, ambitieniveaus voor isolatie en toegepaste warmtetechnologieën onderzocht. **De veelzijdigheid is in werkelijkheid nog veel groter.** Ook zijn diverse gedragsfactoren (deel van het huis dat verwarmd wordt, stooktemperatuur, etc.) van groot belang. In de scenario's worden zowel technologieën ingezet die al lange tijd op de markt zijn (HR107, warmtenetten) als technologieën die zich nog in een opkomende fase bevinden (warmtepompen, brandstofcellen). De kosten van deze nieuwe technologieën zijn nu nog erg hoog, maar kunnen in de toekomst sterk dalen. Hoe groot deze daling zal zijn is echter een grote onzekerheidsfactor.

Gedrag warmtepompen is belangrijk en onzeker – Deze studie heeft voor het eerst het gedrag van warmtepompen tijdens extreem koude periodes gemodelleerd. Bij aanvang van de studie bleken er sterk verschillende perspectieven van betrokken partijen. Dit wijst erop dat er nog aanmerkelijke onzekerheid bestond over het gedrag van elektrische warmtepompen, en de bijbehorende elektriciteitsvraag, in periodes van extreme koude. Hierin heeft de studie meer duidelijkheid gegeven. Omdat er echter geen enkele praktijkervaring is met het gedrag van warmtepompen bij een extreme koudepiek kunnen modelresultaten niet gekalibreerd worden met praktijkmetingen waarin het daadwerkelijke gedrag van bewoners en technologie is geobserveerd.

Er moet worden onderzocht hoe de kosten voor warmtenetten kunnen worden verlaagd – Opties zijn aangedragen om de kosten op termijn te verlagen door goede locatiekeuze, door een langere levensduur en door innovatie in de warmte-isolatie van de netten. Het hergebruik van warmte vanuit de industrie (vuilverbranding, procesindustrie) geeft andere resultaten. Dit moet in meer detail onderzocht worden. Ook kan worden onderzocht of een positief effect kan worden bereikt door de netten open te stellen, waardoor concurrentie tussen warmte-aanbieders ontstaat. Naarmate het beter lukt dit kostenpatroon te verlagen, zal het voor meer huishoudens een goede oplossing zijn.

Bij de warmtescenario's is het daarnaast belangrijk om in het hoofd te houden dat deze scenario's voor 75% van de woningen bepaald worden door een andere technologie. In dit geval is deze gelijk aan het HR scenario. Hierdoor is het effect van warmtenetten minder sterk zichtbaar.

7 Bronnen

ABF Research (2015): SysWov en Primos data over woningvoorraad. Beschikbaar op <http://www.datawonen.nl/>

ABF Research (2013) Ontwikkelingen op de woningmarkt – Socrates 2013

ABF Research (2005) Methodiek en toelichting Socratesmodel

ABF Research (-) Woonmilieutypologie

Arcadis, 2013 Investeringskosten maatregelen EPA maatwerkadvies bestaande woningbouw 2013. Beschikbaar op: <http://www.rvo.nl/onderwerpen/duurzaam-ondernehmen/gebouwen/woningbouw/particuliere-woningen/investeringskosten>

CE, 2013 VESTA 2.0, Uitbreidingen en dataverificaties. Beschikbaar op: <http://www.pbl.nl/sites/default/files/cms/publicaties/pbl-2014-ce-delft-vesta-2-uitbreidingen-en-dataverificaties.pdf>

ECN, 2009 Gasverbruik voor warm tapwater en koken. Analyses t.b.v. formules in HOME, ECN in samenwerking met Methonder, EnergieNed, SenterNovem, Millward Brown, ECN-X-09-107.

ECN, 2013: Energiebesparing: Een samenspel van woning en bewoner - Analyse van de module Energie WoON 2012. Beschikbaar op: <https://www.ecn.nl/publicaties/ECN-E--13-037>.

ECN (2014) Nationale Energieverkenning 2014. Beschikbaar op: <https://www.ecn.nl/nl/energieverkenning/>

ECN 20014b Correctie elektriciteitsverbruik koken, ECN-N-14-024. Beschikbaar op: <https://www.ecn.nl/publicaties/ECN-N--14-024>

Energinet. (2012). Generation of Electricity and District Heating, Energy Storage and Energy Carrier Generation and Conversion.

Energy Matters (2014) Eindrapportage veldtesten, Energieprestaties van 5 warmtetechnieken bij woningen in de praktijk. Beschikbaar op: <http://www.rvo.nl/sites/default/files/Praktijkprestaties%20van%20warmtetechnieken%20bij%20huishoudens.pdf>

European Commission (2011) Roadmap for moving to a competitive low-carbon economy in 2050. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52011DC0112>

IRENAb. (2013). Technology Brief 4: Thermal Storage.

L.Kramers, & M.Pluymaekers. (2013). ThermoGISExpert: Manual (pp. 1–53).

Ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties (BZK); Centraal Bureau voor de Statistiek (CBS)(2011): WoON2012: release 1.0 - WoonOnderzoek Nederland 2012 (voor overheid, universiteiten en overige partijen). DANS.

Ministerie van Economische Zaken (2015) Kamerbrief Warmtevisie. Beschikbaar op:
<http://www.rijksoverheid.nl/documenten-en-publicaties/kamerstukken/2015/04/02/kamerbrief-warmtevisie.html>

NTB (2015) Test resultaten van het Heat Pump Test Center WPZ in Buchs, Zwitserland. Beschikbaar op: <http://www.wpz.ch/en/ies/competences/heat-pump-test-center-wpz.html>

Pensini, A., Rasmussen, C. N., & Kempton, W. (2014). Economic analysis of using excess renewable electricity to displace heating fuels. *Applied Energy*, 131, 530–543.
doi:10.1016/j.apenergy.2014.04.111

RVO (2011) Brochure Voorbeeldwoningen bestaande bouw 2011. Beschikbaar op:
<http://www.rvo.nl/sites/default/files/bijlagen/4.%20Brochure%20Voorbeeldwoningen%202011%20bestaande%20bouw.pdf>

SER (2013) Energieakkoord voor duurzame groei.

Straathof, D. (2012). Thesis Costs of Deep Geothermal Energy in the Netherlands

TNO, 2015 Resultaten uit monitoring over: Concepten Nul op de meter en 80% besparing, TNO, RIGO, Van Beek, Energiesprong | Platform 31, Beschikbaar op:
http://www.energielinq.nl/uploads/attachment/file/6/52/Concepten_DEF-1433841577.pdf

UN FCCC (2009) Copenhagen Accord. Beschikbaar op:
<http://unfccc.int/resource/docs/2009/cop15/eng/11a01.pdf>

Bijlage I. Vraagprofielen

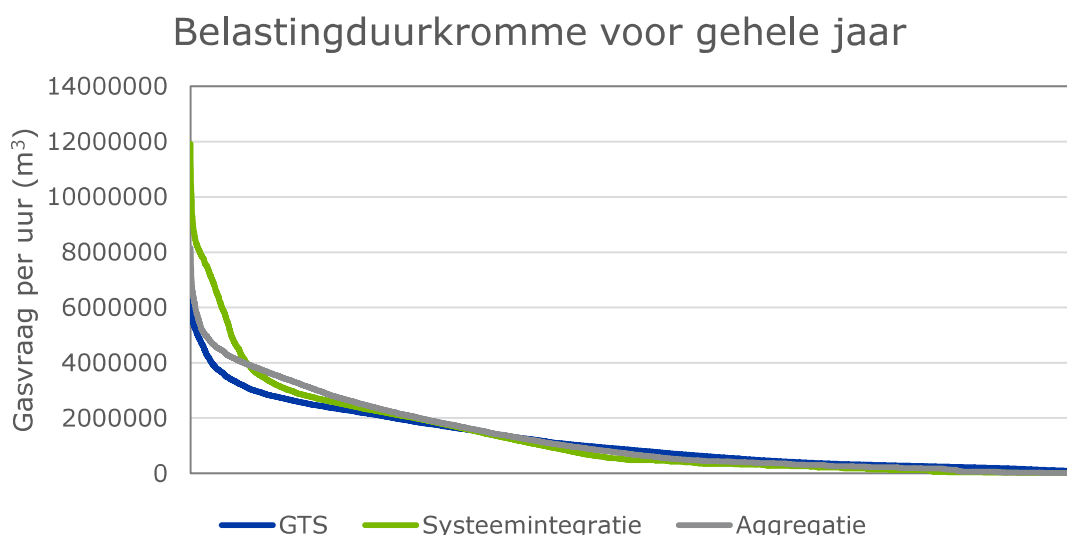
I.1. Validatie en kalibratie gasvraagprofiel in scenario A

Onderstaande sectie bevat een vergelijking van de gasvraagprofielen voor huishoudens op basis van Gasunie ("GTS")-profielen en Systeemintegratieprofielen

I.1.1. Samenstelling van GTS-profiel voor huishoudens

GTS publiceert op haar website de profielen per uur die gemeten worden op GOS niveau. Voor de vergelijking met de profielen in het Systeemintegratieproject is gekeken naar het jaar 2012. Wanneer de *allocated quantities* voor heel 2012 bij worden opgeteld voor de categorie G1A (verbruik lager dan 5000 m³) dan geeft dat een gasverbruik van 10,2 miljard m³ en voor G2A (verbruik hoger dan 5000 m³) een gasverbruik van 2,4 miljard m³. Op basis van een analyse van CBS kan worden geconcludeerd dat er ook veel bedrijven zijn met een verbruik lager dan 5000 m³. Het verbruik van bedrijven in de categorie G1A is 1,7 miljard m³, de rest van het gasverbruik van G1A is dus huishoudens 8,5 miljard m³.

Het aardgasverbruik in 2012 van huishoudens was volgens CBS 337 PJ²², dit komt overeen met een gasverbruik voor huishoudens van 10,7 miljard m³. Daarvan zou dus 8,5 miljard m³ vallen in de categorie G1A en 2,2 miljard m³ in de categorie G2A. Het GTS profiel voor alle huishoudens is daarom samengesteld door 83% keer het profiel G1A op te tellen bij 90% van G2A profiel. De belastingduurkromme van dit profiel is weergegeven in Figuur 33 (blauw).



Figuur 33: Belastingduurkromme van GTS profiel, Systeemintegratieprofiel en Geaggregeerd systeemintegratieprofiel voor het gehele jaar

²² Beschikbaar op: <http://statline.cbs.nl/Statweb/publication/?VW=T&DM=SLNL&PA=82375NED&D1=0&D2=6-7&D3=15-37&HD=150324-0912&HDR=T,G1&STB=G2>

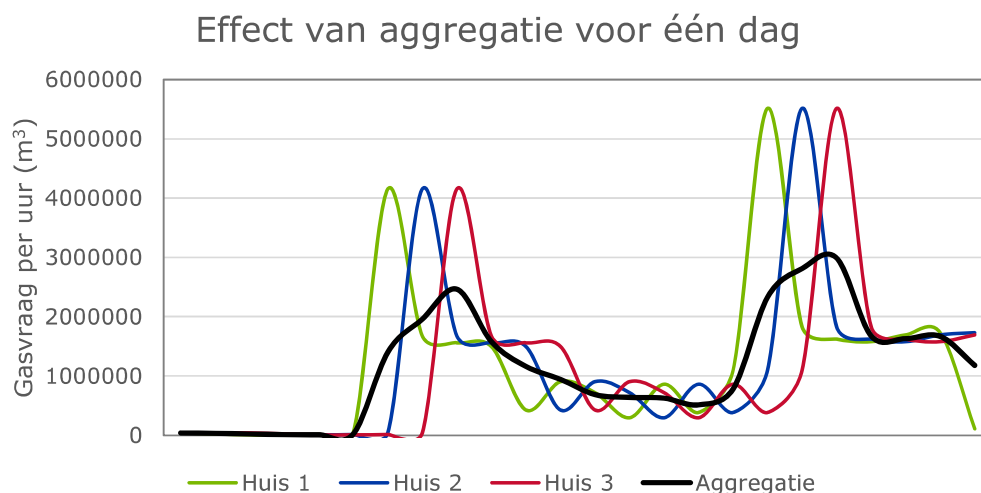
I.1.2. Samenstelling van Systeemintegratieprofiel voor huishoudens

Binnen het Systeemintegratieproject wordt gewerkt met klimaatjaar 1987. Om de uitkomsten te kunnen vergelijken met de gemeten profielen van GTS in 2012 is de warmteverliesberekening ook uitgevoerd voor klimaatjaar 2012. Op basis van deze profielen is in het Systeemintegratiemodel het vraagprofiel voor de gehele woningvoorraad samengesteld. Dit profiel is echter samengesteld voor de 7,4 miljoen huishoudens in 2015. Volgens is het Wonen onderzoek waren er 7,2 miljoen huishoudens in 2012, waarbij tevens rekening gehouden moet worden met een aandeel leegstand. Als gevolg van beide effecten zal het profiel geschaald worden met een factor 0.93. De belastingduurkromme van dit profiel is weergegeven in Figuur 33 (groen). Op basis van het Systeemintegratiemodel komen we uit op een volume van 11,4 miljard m³.

I.1.3. Vergelijking van belastingduurkrommen

Het jaarlijkse gasverbruik van de totale woningvoorraad in het Systeemintegratiemodel is 11,4 miljard m³. Dit is circa 7% hoger dan de 10,7 miljard m³ van CBS voor 2012. De berekende piekvraag is echter significant hoger. Waar de piekvraag van de totale woningvoorraad in de Systeemintegratiemodel 12 miljoen m³ per uur bedraagt, komt GTS uit op een piekvraag van 6,3 miljoen m³ per uur. Het verschil komt door ongelijktijdigheid.

In de warmtevraagprofielen gaan we ervan uit dat ieder huishouden hetzelfde stookgedrag heeft, i.e. iedereen begint met het opwarmen van het huis om zeven uur 's ochtends. In werkelijkheid is dat niet zo en middelt dat uit. Het effect daarvan is vrij groot, dat is te zien als we de warmtevraagpatronen van drie opeenvolgende uren middelen. De piek van dit geaggregeerde profiel ligt 32% lager dan de piek van afzonderlijke woningen (Figuur 34). Het resultaat van deze aggregatie op de belastingduurkromme is gevisualiseerd in Figuur 33 (grijs).



Figuur 34: Effect van aggregatie van drie opeenvolgende uren op de piekvraag

Tabel 32: Vergelijking van volume en piekvraag van GTS profiel, Systeemintegratieprofiel en Geaggregeerd systeemintegratieprofiel

Profiel	Volume (miljard m ³)	Piekvraag (miljoen m ³)
GTS	10,6	6,3
Systeemintegratie	11,4	11,0
Systeemintegratie na toepassing van aggregatie	11,4	8,2

I.1.4. Toepassing van gelijktijdigheidsfactoren voor piekvraagberekeningen

De ontwikkeling van de ongelijktijdigheid per scenario en per zichtjaar is afhankelijk van de isolatiegraad en de toegepaste technologieën. In woningen met een laag of midden isolatieniveau zal de gelijktijdigheid nog beperkt zijn, omdat deze woningen met HR107 ketels of warmtenetten worden verwarmd en er een sterke piek zichtbaar is aan het begin van de dag. In woningen met een hoog isolatieniveau en laag temperatuursysteem warmtepompen wordt geadviseerd de thermostaatinstelling constant te houden waardoor de gelijktijdigheid naar één gaat. In de verschillende scenario's is de gelijktijdigheid daarom afhankelijk van het aandeel huizen met isolatieniveau hoog.

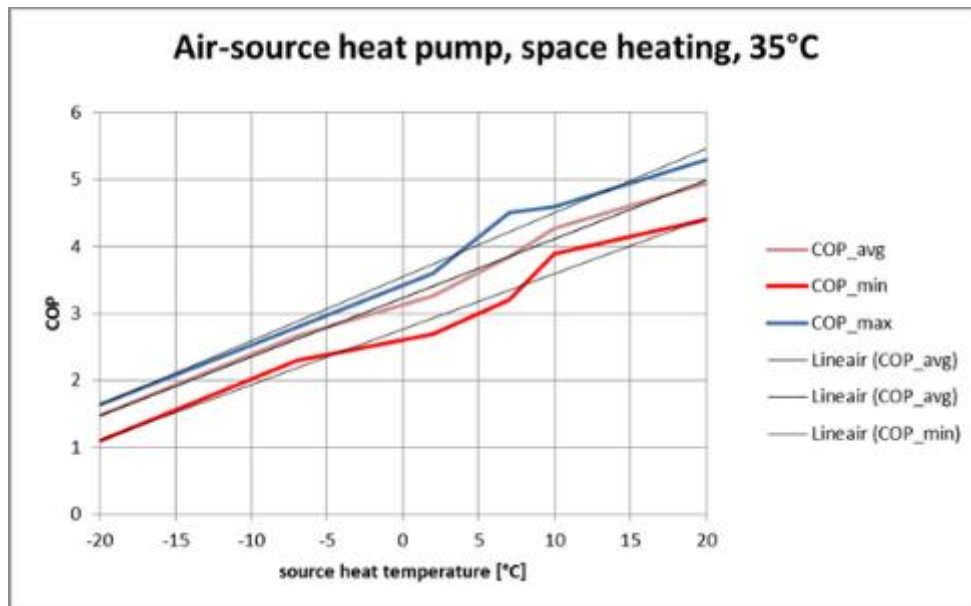
In het Systeemintegratiemodel zal de piekvraag van de woningen met het isolatieniveau laag of midden worden geschaald met een gelijktijdigheidsfactor van 0,53²³. In de tot dusver gedefinieerde basisscenario's is dit alleen relevant voor de piekvraag in gas en in warmte. All electric technologieën worden namelijk alleen toegepast in woningen met een hoog isolatieniveau. Wanneer warmtepompen ook ingezet worden in woningen met een isolatieniveau midden, zal ook hier een gelijktijdigheidsfactor worden toegepast.

²³ Deze gelijktijdigheidsfactor is berekend door de piekvraag in het GTS profiel te delen door de piekvraag in het niet-geaggregeerde systeemintegratieprofiel.

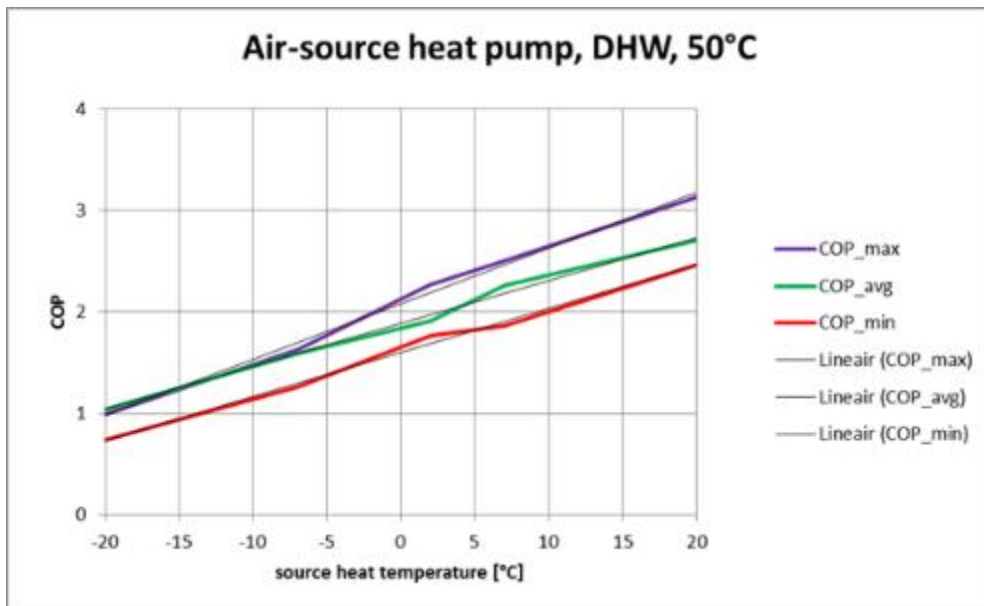
Bijlage II. Specificaties Warmtepompen

II.1. Lucht-water warmtepomp

Bij een lucht-water warmtepomp is het rendement afhankelijk van de buitenluchttemperatuur. Op basis van de testresultaten van 17 verschillende lucht-water warmtepompen is doormiddel van een lineaire fit de maximale, minimale en gemiddelde *coëfficiënt of performance (COP)* curve voor zowel ruimteverwarming als tapwaterverwarming samengesteld (Figuur 35 en Figuur 36). De lineaire fit van de gemiddelde COP-curve wordt als input voor de berekeningen gebruikt, waarbij deze curve is geëxtrapoleerd van -7 naar -20°C.



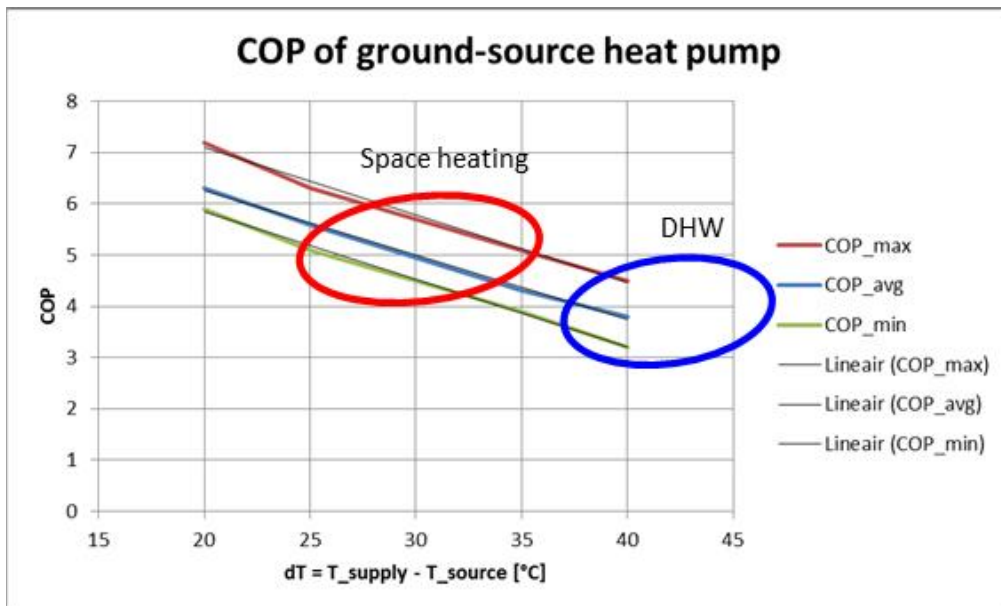
Figuur 35: Efficiency curve ruimteverwarming lucht-water warmtepomp



Figuur 36: Efficiencycurve tapwaterverwarming lucht-water warmtepomp

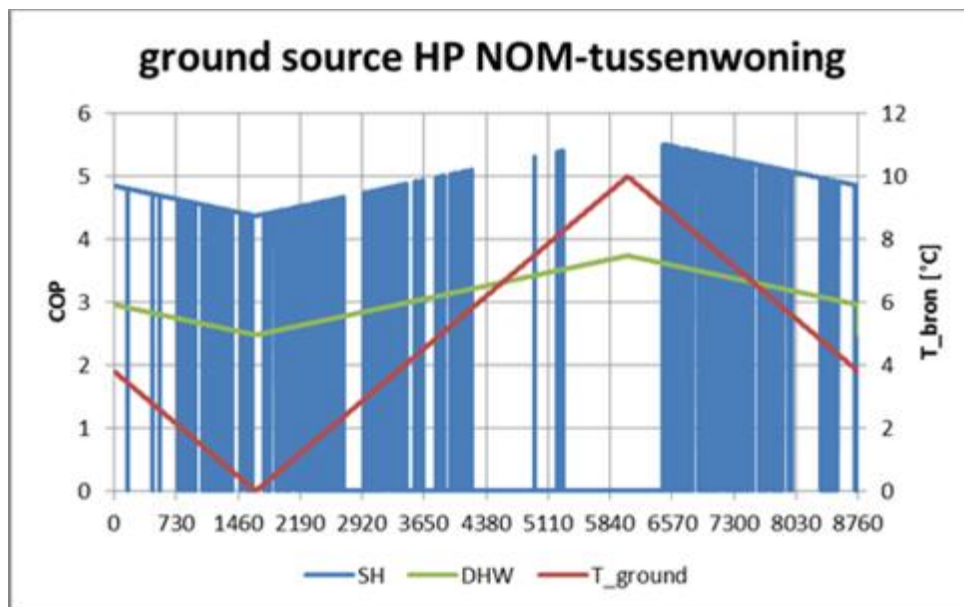
I.1. Bodem-water warmtepomp

Bij een bodemwarmtepomp geldt dat het rendement afhankelijk is van de brontemperatuur. Op basis van de testresultaten van 25 verschillende bodem-water warmtepompen is door middel van een lineaire fit de maximale, minimale en gemiddelde COP-curve samengesteld (Figuur 37). Hierbij is geen onderscheid gemaakt in ruimteverwarming en tapwaterverwarming, maar is gekozen voor een weergave op basis van het temperatuurverschil (ΔT) tussen aanvoertemperatuur en brontemperatuur. De lineaire fit van de gemiddelde COP-curve (COP_{avg}) is als input voor de berekeningen gebruikt. De COP voor ruimteverwarming varieert tussen de 4,5 tot 5,5 ($T_{aanvoer} = 35^\circ\text{C}$) en de COP voor warm tapwater varieert tussen de 2,75 tot 3,75 ($T_{aanvoer} = 50^\circ\text{C}$).



Figuur 37: Efficiency curve bodem warmtepomp afhankelijk van temperatuursprong met relevante waarden voor ruimteverwarming en warm tapwater bereiding (Domestic Hot Water)

Voor de bodembron is verondersteld dat de temperatuur aan het eind van de zomer gelijk is aan 10 °C en eind van de winter door warmteonttrekking is afgekoeld tot 0 °C. Dit bepaald dan het rendement van de bodem gekoppelde warmtepomp.



Figuur 38: Temperatuur bodem bron en COP voor ruimteverwarming en tapwater bodem warmtepomp

Bijlage II. Scenario's

Elke scenario bestaat uit een combinatie van isolatiegraad en een verdeling van technologie keuze. Daarbij maken we onderscheid naar verschillende woningtypes en bestaande en nieuw te bouwen woningen.

Op basis van de brochure "Voorbeeldwoningen bestaande bouw 2011" (RVO, 2011) zijn de gemiddelde karakteristieken van de geometrie van verschillende woningtypes in de Nederlandse woningvoorraad bepaald (zie Tabel 33). Het berekende gemiddelde dak-, gevel- en vloeroppervlak wordt gebruikt in de warmteverliesberekening waarmee de warmtevraagprofielen zijn berekend.

Tabel 33: Karakteristieken van de gemodelleerde woningtypes

Woningtypen	Gebruiksoppervlakte [m ²]	Begane grondvloer [m ²]	Dak [m ²]	Gesloten gevel [m ²]	Ramen [m ²]
Tussenwoning	103	52	65	44	22
Hoekwoning	103	52	65	99	23
Twee-onder-een-kapwoning	120	65	85	101	28
Vrijstaande woning	145	97	129	146	33
Appartement	74	63	75	32	17

De ontwikkeling van het totaal aantal woningen en het cumulatieve aantal woningen gebouwd na 2015 is gebaseerd op Primos prognose van ABF Research. Deze prognose loopt tot 2040. Voor de cijfers van 2050 is een extrapolatie gemaakt. Het verloop van de bestaande woningvoorraad is het verschil tussen het totaal aantal woningen en de nieuwbouw woningen na 2015. De verdeling naar verschillende woning types is gemaakt op basis van cijfers uit het ECN huishoud model SAWEC dat gebruik heeft gemaakt van data van ABF Research en WoON2012 onderzoek (ABF, 2015 en BZK/CBS, 2011).

Tabel 34: Woningvoorraad bestaande bouw (ECN analyse o.b.v. ABF en WoON2012)

	Woningtypen	Aantal woningen per woningtype (x1000)			
		2015	2020	2030	2050
Bestaande woningen	Tussenwoning	2.288	2.284	2.261	2.123
	Hoekwoning	901	877	829	751
	Appartement	2.176	2.169	2.137	1.984
	Twee-onder-een-kapwoning	901	877	829	751
	Vrijstaande woning	1.122	1.102	1.060	976
	Subtotaal bestaande woningen	7.388	7.310	7.116	6.585

	Woningtypen	Aantal woningen per woningtype (x1000)			
Nieuwe woningen	Tussenwoning	-	98	297	579
	Hoekwoning	-	38	109	205
	Appartement	-	93	281	541
	Twee-onder-een-kapwoning	-	38	109	205
	Vrijstaande woning	-	47	139	266
	Subtotaal nieuwe woningen	-	314	935	1.796
	TOTAAL	7.388	7.624	8.050	8.381

Tabel 34 bevat een beschrijving van de Nederlandse woningvoorraad naar woningtype. De verdeling van woningen naar woonmilieu wordt gegeven in de studie "Ontwikkelingen op de woningmarkt" van ABF Research (2013). Voor het berekenen van de distributiekosten en transmissiekosten is echter ook een karakterisering van de woningvoorraad naar woningtype en woonmilieu noodzakelijk. Deze verdeling is bepaald op basis van de woningvoorraad naar woningtype en aanvullende informatie over woonmilieus afkomstig van ABF Research (2005) en is weergegeven in sectie 2.4.6.²⁴.

Voor de toekomst hebben we aannames gemaakt over de ontwikkelingen in isolatiegraad en verschuivingen in technologie.

Scenario A: Alle bestaande woningen met een isolatiegraad laag (G t/m D label) worden na-geïsoleerd naar niveau midden (C t/m A) in de periode 2015 t/m 2050. We nemen aan dat het aandeel midden lineair toe neemt tot 100%. De verdeling naar technologie blijft per woningtype gelijk. De verdeling tussen warmtelevering en gasinfrastructuur in de bestaande bouw verandert niet. Er worden dus geen bestaande woningen alsnog op warmtelevering aangesloten. In de tabel hieronder staat aangegeven hoe in geval van tussenwoning de verdeling er uit ziet in scenario A.

²⁴ In het rapport "Methodiek en toelichting Socratesmodel" van ABF Research (2005) worden dertien woonmilieus gekarakteriseerd, o.a. met de parameters "aantal", "aandeel eengezinswoningen" en "aandeel vrijstaande woningen". Op basis van de publicatie "Woonmilieutypologie" van ABF Research (-) heeft het project team de dertien woonmilieus gekoppeld aan één van de vijf woonmilieus in deze studie (centrum-stedelijk, buiten-centrum, groen-stedelijk, centrum-dorps en landelijk wonen). Vervolgens is aan de hand van de parameter "aantal" het gewogen "aandeel eengezinswoningen" en het gewogen "aandeel vrijstaande woningen" bepaald. Het aandeel appartementen is vervolgens gedefinieerd als $1 - \text{"aandeel eengezinswoningen"}$. Het aandeel tussenwoningen, hoekwoningen en twee-onder-een-kapwoningen zijn berekend op basis van het "aandeel eengezinswoningen" - "aandeel vrijstaande woningen". Hierbij is aangenomen dat in elk woonmilieu de verdeling tussen de resterende eengezinswoningen constant is. Het uiteindelijke resultaat is geoptimaliseerd op basis van de verdeling van woningen naar woningtype en het aantal woningen per woonmilieu zoals gedefinieerd in Tabel 16, Tabel 17 en Tabel 18.

Tabel 35: Projecties toekomstige verdeling naar isolatiegraad en technologie voor bestaande tussenwoning in Midden Isolatie

Woningtype	Isolatiegraad		2015	2020	2030	2050
Tussenwoning	Laag	HR107	57%	49%	32%	0%
Tussenwoning	Midden	HR107	39%	47%	63%	96%
Tussenwoning	Hoog	HR107	0%	0%	0%	0%
Tussenwoning	Laag	SV	0.76%	0.65%	0.43%	0.00%
Tussenwoning	Midden	SV	3.5%	3.6%	3.9%	4%
Tussenwoning	Hoog	SV	0%	0%	0%	0%

Alle nieuw te bouwen huizen hebben isolatiegraad hoog. Het aandeel warmtenetten in toekomstig te bouwen woningen is gelijk gehouden aan het percentage warmtenetten van recent gebouwde woningen (woningen met label B of hoger). Deze percentage verschillen per woningtype. Voor tussenwoningen was dit 9%.

Tabel 36: Projecties toekomstige verdeling naar isolatiegraad en technologie nieuwe tussenwoning in Midden Isolatie

Woningtype	Isolatiegraad		2015	2020	2030	2050
Tussenwoning	Hoog	HR107		91%	91%	91%
Tussenwoning	Hoog	SV		9%	9%	9%

De verdeling naar isolatiegraad en technologie voor bestaande bouw en nieuwbouw worden opgeteld voor de totale woningvoorraad gebruik makend van de ontwikkeling van het aantal bestaande en nieuwbouwwoningen, zie figuur 14 in paragraaf 2.3.1.

Tabel 37: Projecties toekomstige verdeling naar isolatiegraad en technologietussenwoning in Midden Isolatie

Woningtype	Isolatiegraad		2015	2020	2030	2050
Tussenwoning	Laag	HR107	57%	47%	29%	0%
Tussenwoning	Midden	HR107	39%	45%	56%	75%
Tussenwoning	Hoog	HR107	0%	4%	11%	19%
Tussenwoning	Laag	SV	1%	1%	0%	0%
Tussenwoning	Midden	SV	4%	3%	3%	3%
Tussenwoning	Hoog	SV	0%	0%	1%	2%

Voor de overige scenario's wordt dezelfde aanpak gehanteerd. De verdeling naar isolatie niveau en technologie per woningtype zijn in de onderstaande tabellen per scenario weergegeven.

Scenario B t/m E: wat betreft isolatiegraad geldt voor deze vier scenario's hetzelfde. Alle bestaande woningen met een isolatiegraad laag (G t/m D label) en niveau midden (C t/m A) krijgen na-isolatie naar niveau hoog in de periode 2015 t/m 2050. We nemen aan dat percentage laag en midden lineair dalen naar 0%. Als resultaat hiervan neemt het percentage woningen met isolatiegraad hoog neemt toe tot 100% in 2050.

De verdeling naar technologie is per scenario anders. In scenario B blijft, net zoals in scenario A, de technologieverdeling per type woning gelijk aan de huidige situatie. In scenario C krijgen alle woningen in de periode 2015 t/m 2050 een elektrische warmtepomp, een bodem gekoppelde warmtepomp in de bestaande bouw en een lucht warmtepomp in de nieuwbouw. In scenario D worden meer woningen op warmtenetten aangesloten, zowel in de nieuwbouw als in de bestaande bouw, om het aandeel woningen op warmtenetten te laten groeien van ca. 5% nu naar 25% in 2050. In scenario E worden alle woningen in de periode 2015 t/m 2050 van een hybride warmtepomp voorzien. In scenario F is een combinatie gemaakt van elektrische warmtepompen en micro-WKK, waarbij 40% van de in scenario C opgestelde warmtepompen wordt vervangen door micro-WKK's.

Tabel 38: Verdeling naar isolatiegraad en technologie per woning scenario HR Midden

Woningtype	Isolatiegraad	Technologie	2015	2020	2030	2050
Tussenwoning	Laag	HR107	56,9%	46,7%	28,7%	0,0%
Tussenwoning	Midden	HR107	38,8%	45,0%	55,9%	75,2%
Tussenwoning	Hoog	HR107	0,0%	3,7%	10,5%	19,4%
Tussenwoning	Laag	SV	0,8%	0,6%	0,4%	0,0%
Tussenwoning	Midden	SV	3,5%	3,5%	3,4%	3,4%
Tussenwoning	Hoog	SV	0,0%	0,4%	1,1%	2,0%
Hoekwoning	Laag	HR107	58,6%	48,2%	29,6%	0,0%
Hoekwoning	Midden	HR107	38,4%	44,9%	56,2%	76,3%
Hoekwoning	Hoog	HR107	0,0%	3,7%	10,4%	19,2%
Hoekwoning	Laag	SV	0,3%	0,3%	0,2%	0,0%
Hoekwoning	Midden	SV	2,6%	2,6%	2,5%	2,3%
Hoekwoning	Hoog	SV	0,0%	0,4%	1,2%	2,2%
Flat	Laag	HR107	54,8%	45,1%	27,7%	0,0%
Flat	Midden	HR107	38,6%	44,5%	54,9%	73,4%
Flat	Hoog	HR107	0,0%	3,9%	10,9%	20,2%
Flat	Laag	SV	3,0%	2,4%	1,5%	0,0%
Flat	Midden	SV	3,6%	3,9%	4,3%	5,2%
Flat	Hoog	SV	0,0%	0,2%	0,7%	1,2%
2 onder 1 kap	Laag	HR107	51,2%	42,0%	25,8%	0,0%
2 onder 1 kap	Midden	HR107	47,0%	52,0%	60,9%	77,1%
2 onder 1 kap	Hoog	HR107	0%	4%	11%	21%
2 onder 1 kap	Laag	SV	0,2%	0,1%	0,1%	0,0%
2 onder 1 kap	Midden	SV	1,7%	1,7%	1,6%	1,5%
2 onder 1 kap	Hoog	SV	0,0%	0,2%	0,5%	0,9%
Vrijstaande woning	Laag	HR107	51,8%	42,6%	26,2%	0,0%
Vrijstaande woning	Midden	HR107	47,4%	52,6%	61,6%	78,0%
Vrijstaande woning	Hoog	HR107	0,0%	4,1%	11,4%	21,1%
Vrijstaande woning	Laag	SV	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Vrijstaande woning	Midden	SV	0,7%	0,7%	0,6%	0,6%
Vrijstaande woning	Hoog	SV	0,0%	0,1%	0,2%	0,4%

Tabel 39: Verdeling naar isolatiegraad en technologie per woningtype in scenario HR Hoog

Woningtype	Isolatiegraad	Technologie	2015	2020	2030	2050
Tussenwoning	Laag	HR107	56,9%	46,7%	28,7%	0,0%
Tussenwoning	Laag	SV	0,8%	0,6%	0,4%	0,0%
Tussenwoning	Midden	HR107	38,8%	31,9%	19,6%	0,0%
Tussenwoning	Midden	SV	3,5%	2,9%	1,8%	0,0%
Tussenwoning	Hoog	HR107	0,0%	16,8%	46,8%	94,6%
Tussenwoning	Hoog	SV	0,0%	1,0%	2,7%	5,4%
Hoekwoning	Laag	HR107	58,6%	48,2%	29,6%	0,0%
Hoekwoning	Laag	SV	0,3%	0,3%	0,2%	0,0%
Hoekwoning	Midden	HR107	38,4%	31,6%	19,4%	0,0%
Hoekwoning	Midden	SV	2,6%	2,2%	1,3%	0,0%
Hoekwoning	Hoog	HR107	0,0%	17,0%	47,2%	95,5%
Hoekwoning	Hoog	SV	0,0%	0,8%	2,3%	4,5%
Flat	Laag	HR107	54,8%	45,1%	27,7%	0,0%
Flat	Laag	SV	3,0%	2,4%	1,5%	0,0%
Flat	Midden	HR107	38,6%	31,7%	19,5%	0,0%
Flat	Midden	SV	3,6%	3,0%	1,8%	0,0%
Flat	Hoog	HR107	0,0%	16,7%	46,3%	93,6%
Flat	Hoog	SV	0,0%	1,1%	3,2%	6,4%
2 onder 1 kap	Laag	HR107	51,2%	42,0%	25,8%	0,0%
2 onder 1 kap	Laag	SV	0,2%	0,1%	0,1%	0,0%
2 onder 1 kap	Midden	HR107	47,0%	38,6%	23,7%	0,0%
2 onder 1 kap	Midden	SV	1,7%	1,4%	0,9%	0,0%
2 onder 1 kap	Hoog	HR107	0,0%	17,4%	48,3%	97,6%
2 onder 1 kap	Hoog	SV	0,0%	0,4%	1,2%	2,4%
Vrijstaande woning	Laag	HR107	51,8%	42,6%	26,2%	0,0%
Vrijstaande woning	Laag	SV	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Vrijstaande woning	Midden	HR107	47,4%	39,0%	24,0%	0,0%
Vrijstaande woning	Midden	SV	0,7%	0,6%	0,4%	0,0%
Vrijstaande woning	Hoog	HR107	0,0%	17,7%	49,0%	99,1%
Vrijstaande woning	Hoog	SV	0,0%	0,2%	0,5%	0,9%

Tabel 40: Verdeling naar isolatiegraad en technologie per woningtype in scenario All-Electric Hoog

Woningtype	Isolatiegraad	Technologie	2015	2020	2030	2050
Tussenwoning	Laag	HR107	56,9%	46,7%	28,7%	0,0%
Tussenwoning	Laag	SV	0,8%	0,6%	0,4%	0,0%
Tussenwoning	Midden	HR107	38,8%	31,9%	19,6%	0,0%
Tussenwoning	Midden	SV	3,5%	2,9%	1,8%	0,0%
Tussenwoning	Hoog	WP_lucht	0,0%	13,1%	36,3%	75,2%
Tussenwoning	Hoog	WP_bodem	0,0%	3,7%	10,5%	19,4%
Tussenwoning	Hoog	SV	0,0%	1,0%	2,7%	5,4%
Hoekwoning	Laag	HR107	58,6%	48,2%	29,6%	0,0%
Hoekwoning	Laag	SV	0,3%	0,3%	0,2%	0,0%
Hoekwoning	Midden	HR107	38,4%	31,6%	19,4%	0,0%
Hoekwoning	Midden	SV	2,6%	2,2%	1,3%	0,0%
Hoekwoning	Hoog	WP_lucht	0,0%	13,3%	36,8%	76,3%
Hoekwoning	Hoog	WP_bodem	0,0%	3,7%	10,4%	19,2%
Hoekwoning	Hoog	SV	0,0%	0,8%	2,3%	4,5%
Flat	Laag	HR107	54,8%	45,1%	27,7%	0,0%
Flat	Laag	SV	3,0%	2,4%	1,5%	0,0%
Flat	Midden	HR107	38,6%	31,7%	19,5%	0,0%
Flat	Midden	SV	3,6%	3,0%	1,8%	0,0%
Flat	Hoog	WP_lucht	0,0%	12,8%	35,4%	73,4%
Flat	Hoog	WP_bodem	0,0%	3,9%	10,9%	20,2%
Flat	Hoog	SV	0,0%	1,1%	3,2%	6,4%
2 onder 1 kap	Laag	HR107	51,2%	42,0%	25,8%	0,0%
2 onder 1 kap	Laag	SV	0,2%	0,1%	0,1%	0,0%
2 onder 1 kap	Midden	HR107	47,0%	38,6%	23,7%	0,0%
2 onder 1 kap	Midden	SV	1,7%	1,4%	0,9%	0,0%
2 onder 1 kap	Hoog	WP_lucht	0,0%	13,4%	37,2%	77,1%
2 onder 1 kap	Hoog	WP_bodem	0,0%	4,0%	11,1%	20,5%
2 onder 1 kap	Hoog	SV	0,0%	0,4%	1,2%	2,4%
Vrijstaande woning	Laag	HR107	51,8%	42,6%	26,2%	0,0%
Vrijstaande woning	Laag	SV	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Vrijstaande woning	Midden	SV	0,7%	0,6%	0,4%	0,0%
Vrijstaande woning	Hoog	WP_lucht	0,0%	13,6%	37,6%	78,0%
Vrijstaande woning	Hoog	WP_bodem	0,0%	4,1%	11,4%	21,1%
Vrijstaande woning	Hoog	SV	0,0%	0,2%	0,5%	0,9%

Tabel 41: Verdeling naar isolatiegraad en technologie per woningtype in scenario Warmte Hoog

Woningtype	Isolatiegraad	Technologie	2015	2020	2030	2050
Tussenwoning	Laag	HR107	56,9%	46,7%	28,7%	0,0%
Tussenwoning	Laag	SV	0,8%	0,6%	0,4%	0,0%
Tussenwoning	Midden	HR107	38,8%	31,9%	19,6%	0,0%
Tussenwoning	Midden	SV	3,5%	2,9%	1,8%	0,0%
Tussenwoning	Hoog	WP_lucht	0,0%	9,7%	27,4%	58,1%
Tussenwoning	Hoog	WP_bodem	0,0%	3,8%	9,9%	15,8%
Tussenwoning	Hoog	SV	0,0%	4,3%	12,2%	26,0%
Hoekwoning	Laag	HR107	58,6%	48,2%	29,6%	0,0%
Hoekwoning	Laag	SV	0,3%	0,3%	0,2%	0,0%
Hoekwoning	Midden	HR107	38,4%	31,6%	19,4%	0,0%
Hoekwoning	Midden	SV	2,6%	2,2%	1,3%	0,0%
Hoekwoning	Hoog	WP_lucht	0,0%	10,8%	30,0%	62,9%
Hoekwoning	Hoog	WP_bodem	0,0%	3,9%	10,4%	17,2%
Hoekwoning	Hoog	SV	0,0%	3,1%	9,1%	19,9%
Flat	Laag	HR107	54,8%	45,1%	27,7%	0,0%
Flat	Laag	SV	3,0%	2,4%	1,5%	0,0%
Flat	Midden	HR107	38,6%	31,7%	19,5%	0,0%
Flat	Midden	SV	3,6%	3,0%	1,8%	0,0%
Flat	Hoog	WP_lucht	0,0%	7,6%	21,7%	46,8%
Flat	Hoog	WP_bodem	0,0%	3,6%	9,0%	12,8%
Flat	Hoog	SV	0,0%	6,6%	18,8%	40,5%
2 onder 1 kap	Laag	HR107	51,2%	42,0%	25,8%	0,0%
2 onder 1 kap	Laag	SV	0,2%	0,1%	0,1%	0,0%
2 onder 1 kap	Midden	HR107	47,0%	38,6%	23,7%	0,0%
2 onder 1 kap	Midden	SV	1,7%	1,4%	0,9%	0,0%
2 onder 1 kap	Hoog	WP_lucht	0,0%	11,9%	32,9%	68,6%
2 onder 1 kap	Hoog	WP_bodem	0,0%	4,0%	10,8%	18,7%
2 onder 1 kap	Hoog	SV	0,0%	2,0%	5,8%	12,7%
Vrijstaande woning	Laag	HR107	51,8%	42,6%	26,2%	0,0%
Vrijstaande woning	Laag	SV	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Vrijstaande woning	Midden	HR107	47,4%	39,0%	24,0%	0,0%
Vrijstaande woning	Midden	SV	0,7%	0,6%	0,4%	0,0%
Vrijstaande woning	Hoog	WP_lucht	0,0%	13,0%	36,0%	74,9%
Vrijstaande woning	Hoog	WP_bodem	0,0%	4,1%	11,3%	20,4%
Vrijstaande woning	Hoog	SV	0,0%	0,7%	2,2%	4,7%

Tabel 42: Verdeling naar isolatiegraad en technologie per woningtype in scenario Hybride Hoog

Woningtype	Isolatiegraad	Technologie	2015	2020	2030	2050
Tussenwoning	Laag	HR107	56,9%	46,7%	28,7%	0,0%
Tussenwoning	Laag	SV	0,8%	0,6%	0,4%	0,0%
Tussenwoning	Midden	HR107	38,8%	31,9%	19,6%	0,0%
Tussenwoning	Midden	SV	3,5%	2,9%	1,8%	0,0%
Tussenwoning	Hoog	WP_hybride	0,0%	16,8%	46,8%	94,6%
Tussenwoning	Hoog	SV	0,0%	1,0%	2,7%	5,4%
Hoekwoning	Laag	HR107	58,6%	48,2%	29,6%	0,0%
Hoekwoning	Laag	SV	0,3%	0,3%	0,2%	0,0%
Hoekwoning	Midden	HR107	38,4%	31,6%	19,4%	0,0%
Hoekwoning	Midden	SV	2,6%	2,2%	1,3%	0,0%
Hoekwoning	Hoog	WP_hybride	0,0%	17,0%	47,2%	95,5%
Hoekwoning	Hoog	SV	0,0%	0,8%	2,3%	4,5%
Flat	Laag	HR107	54,8%	45,1%	27,7%	0,0%
Flat	Laag	SV	3,0%	2,4%	1,5%	0,0%
Flat	Midden	HR107	38,6%	31,7%	19,5%	0,0%
Flat	Midden	SV	3,6%	3,0%	1,8%	0,0%
Flat	Hoog	WP_hybride	0,0%	16,7%	46,3%	93,6%
Flat	Hoog	SV	0,0%	1,1%	3,2%	6,4%
2 onder 1 kap	Laag	HR107	51,2%	42,0%	25,8%	0,0%
2 onder 1 kap	Laag	SV	0,2%	0,1%	0,1%	0,0%
2 onder 1 kap	Midden	HR107	47,0%	38,6%	23,7%	0,0%
2 onder 1 kap	Midden	SV	1,7%	1,4%	0,9%	0,0%
2 onder 1 kap	Hoog	WP_hybride	0,0%	17,4%	48,3%	97,6%
2 onder 1 kap	Hoog	SV	0,0%	0,4%	1,2%	2,4%
Vrijstaande woning	Laag	HR107	51,8%	42,6%	26,2%	0,0%
Vrijstaande woning	Laag	SV	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Vrijstaande woning	Midden	HR107	47,4%	39,0%	24,0%	0,0%
Vrijstaande woning	Midden	SV	0,7%	0,6%	0,4%	0,0%
Vrijstaande woning	Hoog	WP_hybride	0,0%	17,7%	49,0%	99,1%
Vrijstaande woning	Hoog	SV	0,0%	0,2%	0,5%	0,9%

Tabel 43: Verdeling naar isolatiegraad en technologie per woningtype in scenario Decentraal Hoog

Woningtype	Isolatiegraad	Technologie	2015	2020	2030	2050
Tussenwoning	Laag	HR107	56,9%	46,7%	28,7%	0,0%
Tussenwoning	Laag	SV	0,8%	0,6%	0,4%	0,0%
Tussenwoning	Midden	HR107	38,8%	31,9%	19,6%	0,0%
Tussenwoning	Midden	SV	3,5%	2,9%	1,8%	0,0%
Tussenwoning	Hoog	WP_lucht	0,0%	5,8%	16,4%	34,9%
Tussenwoning	Hoog	WP_bodem	0,0%	2,3%	5,9%	9,5%
Tussenwoning	Hoog	SV	0,0%	4,3%	12,2%	26,0%
Tussenwoning	Hoog	Micro-WKK	0,0%	5,4%	14,9%	29,6%
Hoekwoning	Laag	HR107	58,6%	48,2%	29,6%	0,0%
Hoekwoning	Laag	SV	0,3%	0,3%	0,2%	0,0%
Hoekwoning	Midden	HR107	38,4%	31,6%	19,4%	0,0%
Hoekwoning	Midden	SV	2,6%	2,2%	1,3%	0,0%
Hoekwoning	Hoog	WP_lucht	0,0%	6,5%	18,0%	37,7%
Hoekwoning	Hoog	WP_bodem	0,0%	2,3%	6,2%	10,3%
Hoekwoning	Hoog	SV	0,0%	3,1%	9,1%	19,9%
Hoekwoning	Hoog	Micro-WKK	0,0%	5,9%	16,2%	32,0%
Flat	Laag	HR107	54,8%	45,1%	27,7%	0,0%
Flat	Laag	SV	3,0%	2,4%	1,5%	0,0%
Flat	Midden	HR107	38,6%	31,7%	19,5%	0,0%
Flat	Midden	SV	3,6%	3,0%	1,8%	0,0%
Flat	Hoog	WP_lucht	0,0%	4,6%	13,0%	28,1%
Flat	Hoog	WP_bodem	0,0%	2,2%	5,4%	7,7%
Flat	Hoog	SV	0,0%	6,6%	18,8%	40,5%
Flat	Hoog	Micro-WKK	0,0%	4,5%	12,3%	23,8%
2 onder 1 kap	Laag	HR107	51,2%	42,0%	25,8%	0,0%
2 onder 1 kap	Laag	SV	0,2%	0,1%	0,1%	0,0%
2 onder 1 kap	Midden	HR107	47,0%	38,6%	23,7%	0,0%
2 onder 1 kap	Midden	SV	1,7%	1,4%	0,9%	0,0%
2 onder 1 kap	Hoog	WP_lucht	0,0%	7,1%	19,7%	41,2%
2 onder 1 kap	Hoog	WP_bodem	0,0%	2,4%	6,5%	11,2%
2 onder 1 kap	Hoog	SV	0,0%	2,0%	5,8%	12,7%
2 onder 1 kap	Hoog	Micro-WKK	0,0%	6,4%	17,5%	34,9%
Vrijstaande woning	Laag	HR107	51,8%	42,6%	26,2%	0,0%
Vrijstaande woning	Laag	SV	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Vrijstaande woning	Midden	HR107	47,4%	39,0%	24,0%	0,0%
Vrijstaande woning	Midden	SV	0,7%	0,6%	0,4%	0,0%
Vrijstaande woning	Hoog	WP_lucht	0,0%	7,8%	21,6%	44,9%
Vrijstaande woning	Hoog	WP_bodem	0,0%	2,5%	6,8%	12,2%
Vrijstaande woning	Hoog	SV	0,0%	0,7%	2,2%	4,7%
Vrijstaande woning	Hoog	Micro-WKK	0,0%	6,8%	18,9%	38,1%

Bijlage III. Kosten woningen

III.1. Kosten isolatie

III.1.1. Kosten 2015

De kosten voor na- isolatie van de niveaus laag naar midden en van midden naar hoog zijn gebaseerd op de kosten gegeven in het rapport "Maatregelen EPA-Maatwerkadvies Bestaande Woningbouw 2013" (Arcadis, 2013). Voor nieuwbouw woningen, met isolatieniveau hoog, worden alleen materiaal kosten meegenomen.

In het "Maatregelen EPA-Maatwerkadvies Bestaande Woningbouw 2013" rapport worden kosten per m² gegeven voor verschillende maatregelen. Hierin wordt onderscheid gemaakt naar eengezinswoningen en meergezinswoningen, op een zelfstandig of op een natuurlijk vervangingsmoment, en tussen de kosten voor een enkele woning of een project matige aanpak van meerdere woningen. Voor eengezinswoningen gebruiken we de cijfers voor een enkele woning, op een zichzelf staand moment en voor de flat gebruiken we de kosten van een projectmatige aanpak en op een natuurlijk moment.

Tabel 35 geeft een overzicht welke maatregelen uit "Maatregelen EPA-Maatwerkadvies Bestaande Woningbouw 2013" gekozen zijn voor vloer, dak, gevel en glas isolatie voor eengezinswoningen. Tabel geeft de keuze voor isolatiemaatregelen weer voor meergezinswoningen. Om isolatieniveau hoog te bereiken wordt bovendien aangenomen dat er extra ventilatie moet worden geïnstalleerd.

Tabel 44: Welke maatregelen uit "Maatregelen EPA-Maatwerkadvies Bestaande Woningbouw 2013" gekozen zijn voor vloer, dak, gevel en glas isolatie voor eengezinswoningen.

	Laag naar midden	Midden naar hoog	Nieuwbouw (alleen materiaal kosten)
Vloer	002d: Vloerisolatie: eps isolatieplaten 100mm aan onderzijde steenachtige vloer		Dubbele materiaal kosten (van optie 002d)
Dak	005: Dakisolatie: 100mm binnenzijde schuin dak-afwerking met gipsplaten	005	Dubbele materiaal kosten (van optie 005)
Gevel	009a: Spouwisolatie: 50mm minerale wol	gem 008a/008b: Buitengevelisolatie: minerale wol 100mm – sierpleister / Buitengevelisolatie: EPS 100mm – sierpleister	Dubbele materiaal kosten (= gem. materiaal kosten 008a/008b)
Glas	019b: Isolatieglas gasgevuld (U=1,2) (i.p.v. standaard isolatieglas)	Driedubbel glas (ongeveer 50% duurder dan HR++)	Extra kosten driedubbel glas t.o.v. HR++
Ventilatie		Gem 088/090: Mechanische ventilatie / Gebalanceerde ventilatie met WTW	

Tabel 45: Keuze van maatregel uit het "Maatregelen EPA-Maatwerkadvies Bestaande Woningbouw 2013" voor de verschillende na-isolatie voor meergezinswoningen per isolatiestap

	Laag naar midden	Midden naar hoog	Nieuwbouw (alleen materiaal kosten)
Vloer	002d: Vloerisolatie: eps isolatieplaten 100mm aan onderzijde steenachtige vloer		
Dak	gem. 006a t/m 007d	gem. 006a t/m 007d	Dubbele materiaal kosten (van optie gem. 006a t/m 007d)
Gevel	009a: Spouwisolatie: 50mm minerale wol	gem 008a/008b: Buitengevelisolatie: minerale wol 100mm – sierpleister / Buitengevelisolatie: EPS 100mm – sierpleister	Dubbele materiaal kosten (= gem. materiaal kosten 008a/008b)
Glas	019b: Isolatieglas gasgevuld (U=1,2) (i.p.v. standaard isolatieglas)	Driedubbel glas (ongeveer 50% duurder dan HR++)	Extra kosten driedubbel glas t.o.v. HR++
Ventilatie		Gem 088/090: Mechanische ventilatie / Gebalanceerde ventilatie met WTW	

De kosten "Maatregelen EPA-Maatwerkadvies Bestaande Woningbouw 2013" worden gegeven per m². De totale isolatiekosten per type woning worden berekend door voor elke maatregel de kosten per m² te vermenigvuldigen met het dak-, gevel-, raam en vloeroppervlak (zie Tabel 33) en deze op te tellen.

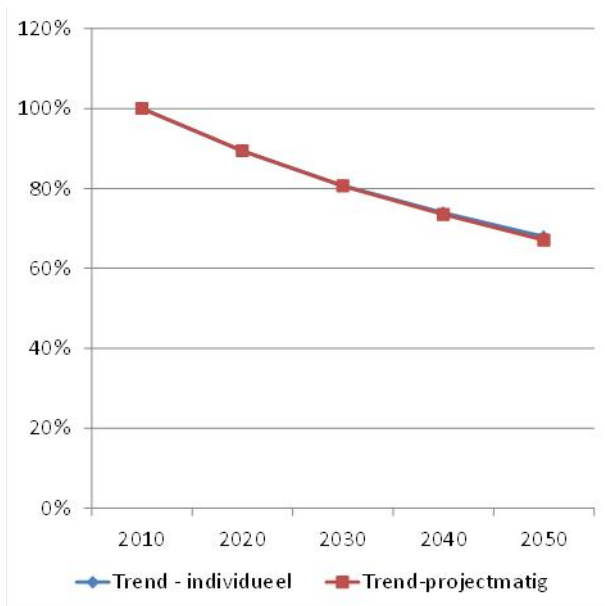
Voor de kosten van isolatie van laag naar hoog maken we gebruik van een kosteninschatting voor nul op de meter renovatie van rijtjeswoning, deze bedraagt €19.000²⁵. De kosten voor andere woningtypes worden bepaald door een schalingsfactor gebaseerd op het schil oppervlak t.o.v. tussenwoning.

III.1.2. Kostendaling over de tijd

Voor een inschatting van kostendaling over de tijd maken we gebruik van leercurves voor woningverbetering aan de schil²⁶. Hierin wordt een range van minimale en maximale ontwikkeling gegeven op basis waarvan er voor deze studie een gemiddelde trend is afgeleid, zie Figuur 39. Het verschil tussen kostendaling voor individuele en projectmatig uitgevoerde isolatie maatregelen is minimaal.

²⁵ Bron: http://www.energieling.nl/uploads/attachment/file/6/52/Concepten_DEF-1433841577.pdf

²⁶ <http://www.pbl.nl/sites/default/files/cms/publicaties/pbl-2014-ce-delft-vesta-2-uitbreidingen-en-dataverificaties.pdf>



Figuur 39: Leercurve voor woningverbetering aan de schil (ECN analyse op basis van CE, 2013)

III.2. Kosten technologieën

III.2.1. Kosten 2015

Voor de kosten van voor HR ketel (HR107) en warmtenetten is gebruik gemaakt van de kosten zoals gegeven in "Maatregelen EPA-Maatwerkadvies Bestaande Woningbouw 2013". Voor warmtepompen hebben we kosten inschattingen van de Dutch Heat Pump Association (DHPA) gebruikt. Er wordt geen onderscheid in kosten gemaakt voor bestaand en nieuwbouw woningen. De kosten voor micro-WKK zijn gebaseerd op kosten opgegeven door de leverancier Ceramic Fuel Cells.

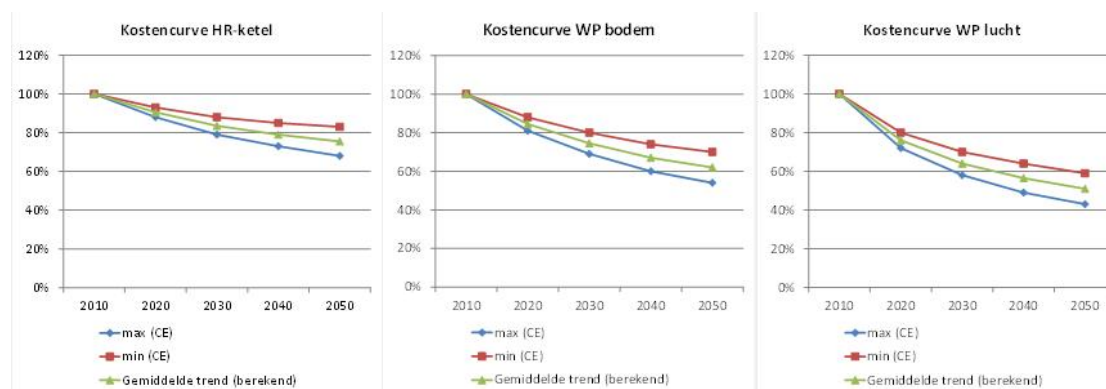
Tabel 46

	Technologie	Opmerking
HR107	042b :Combi Tap Quinta HR-107 (i.p.v. Combi Tap VR). Bron: EPA maatregelen	Kosten van rookgasafvoer en condensleiding niet meegenomen. Enkele woning. Geen indexering van kosten meegenomen.
WP_lucht	Kosten lucht warmtepomp voor rijwoning gebaseerd op nul op de meter renovaties. 9.000 euro. Bron: DHPA	Voor hoekwoning en flat woning dezelfde kosten als voor tussenwoning. Voor overige woningtypen 10.000 euro.
WP_bodem	Kosten bodem warmtepomp 15.000 euro. Bron: DHPA	
WP_hybride	Kosten hybride warmtepomp 5000 euro Bron DHPA	
StadsVerw	131 : Van individueel naar warmte derden. Bron: EPA maatregelen	Kosten verwijderen keuken geiser en waterleidingen niet meegenomen. Projectmatige kosten genomen. Geen indexering van kosten meegenomen. Kosten SV meergezinswoning gelijk genomen aan eengezinswoning.
Micro-WKK	Kosten Micro-WKK 30.500 Euro Bron: Ceramic Fuel Cells	De kosten zijn inclusief HR107 voor warmwater en herinvesteringskosten van brandstofcel stack.

III.2.2. Kostendaling over de tijd

Toekomstige kosten dalingen voor de verschillende energietechnologieën zijn net als voor isolatiemaatregelen gebaseerd op een studie van CE voor het VESTA model van PBL (CE, 2013). Hoewel de leercurves hierin beschreven worden als maximale en minimale trend, wordt in deze studie gerekend met een gemiddelde trend, zie Figuur 40.

Voor hybride warmtepompen wordt aangenomen dat zij dezelfde leercurve hebben als lucht warmtepompen. Voor warmtenetten wordt geen verdere kostendaling aangenomen.



Figuur 40: Kostendalingen technologieën

Voor de kostendaling van micro-WKK is aangenomen dat de brandstofcel stack na 2020 gelijke kostendaling zal doormaken als bodem warmte pomp nu al doen. Herinvesteringen in brandstofcel stack is hier ook op gebaseerd. Er wordt aan genomen dat kosten voor installatie tussen 2020 en 2030 met 25% zullen dalen en daarna constant blijven. Daarnaast dalen de kosten voor de extra benodigde HR107 zoals hierboven aangegeven.

Bijlage IV. Kosten netwerk

Deze bijlage geeft een nadere beschrijving van de netwerkkosten voor elektriciteitsdistributie, gasdistributie en elektriciteitstransmissie. De kosten van gastransport worden volledig in het rapport zelf behandeld.

IV.1. Kosten elektriciteitsdistributie

IV.1.1. Toelichting aanpak kentallen: TKI Systeem integratie warmtevraag huishoudens Ecofys

Doel: Bepalen van de kosten voor netverzwaring per woonmilieu

Tabel 47: Template voor kostenindicaties woonmilieus

Woonmilieu	Kosten				Eenheid
	2015	2020	2030	2050	
Centrum-stedelijk					€/kW
Buiten-centrum					€/kW
Groen-stedelijk					€/kW
Centrum-dorps					€/kW
Landelijk wonen					€/kW

IV.1.2. Aanpak

1. Selectie van representatieve netdelen voor de verschillende woonmilieus (zie hieronder).
2. Vaststellen van aantallen, type en kosten netcomponenten per woonmilieu.
Inclusief: HS: Trafo+Rail+Station, MS: MSR+Kabel, LS: Aansluiting+Hoofdkabel.
 - Kabellengtes en kabel types op basis van werkelijke systeem gegevens;
 - Aantal componenten en componenttypes op basis van werkelijke systeem gegevens;
 - Kosten op basis van productbladen (productkosten incl. realisatie).
3. Vaststellen benodigde netcomponenten met gerelateerde kosten voor verwarming.
 - Benodigde kabels en componenten bepalen voor een verdrievoudiging van het vermogen;
 - Bepalen van de resulterende kosten voor verzwaring.
4. Combineren van aantallen, kosten en vermogen tot een €/kW per woonmilieu.

IV.1.3. Aannames

- Alliander verzorgingsgebied (Nederlands net).
- Verhogen van het gelijktijdig aansluitvermogen van 1,1kW naar 3,3kW
Na besparing en toepassing van warmtebuffers is er nog een gelijktijdig extra vermogen nodig van 2,2 kW bovenop de bestaande 1,1 kW om huizen elektrisch te verwarmen.
- Kosten van net van Liander LS tot en met OS station. De HS kabels van TenneT zijn dus niet meegenomen in de verzwaring en resulterende kosten.
- De capaciteit van het net dient verdrievoudigd te worden, zowel op HS, MS en LS-niveau.

- Om kosten te besparen wordt de middenspanning verhoogd van 10 naar 20 kV wat momenteel in verschillende gebieden wordt uitgevoerd → 100% extra kabels en OS-stations nodig.
- Voor de netverzwaring in het laag spanning net wordt geen spanningsverhoging toegepast (spanning blijft 230V) → 200% extra kabels en MSR-stations nodig.
- De aansluitkabel naar de huizen toe heeft voldoende capaciteit en hoeft niet verzwakt te worden.
- Geen indexatie van kosten en exclusief BTW.

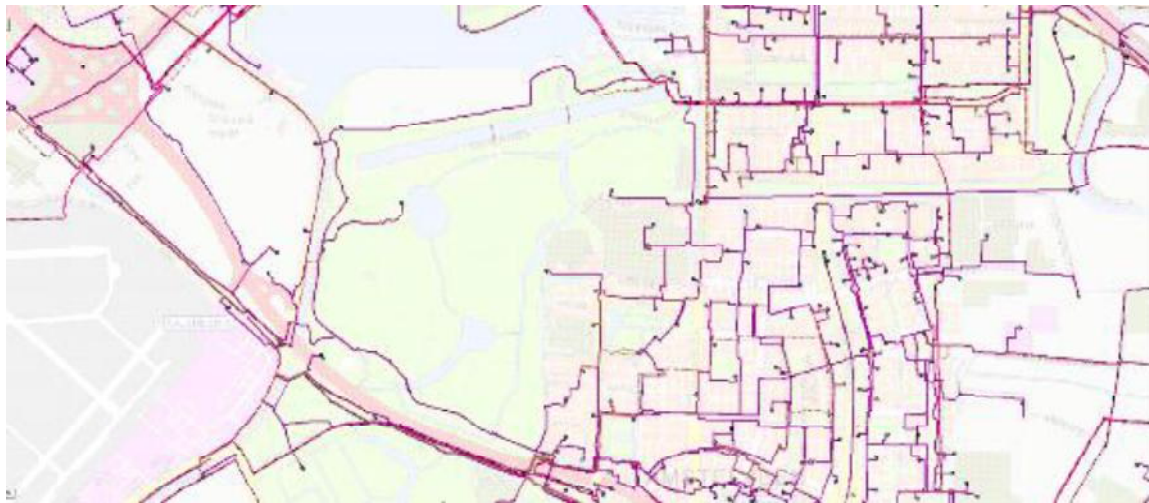
IV.2. Topografie woonmilieus



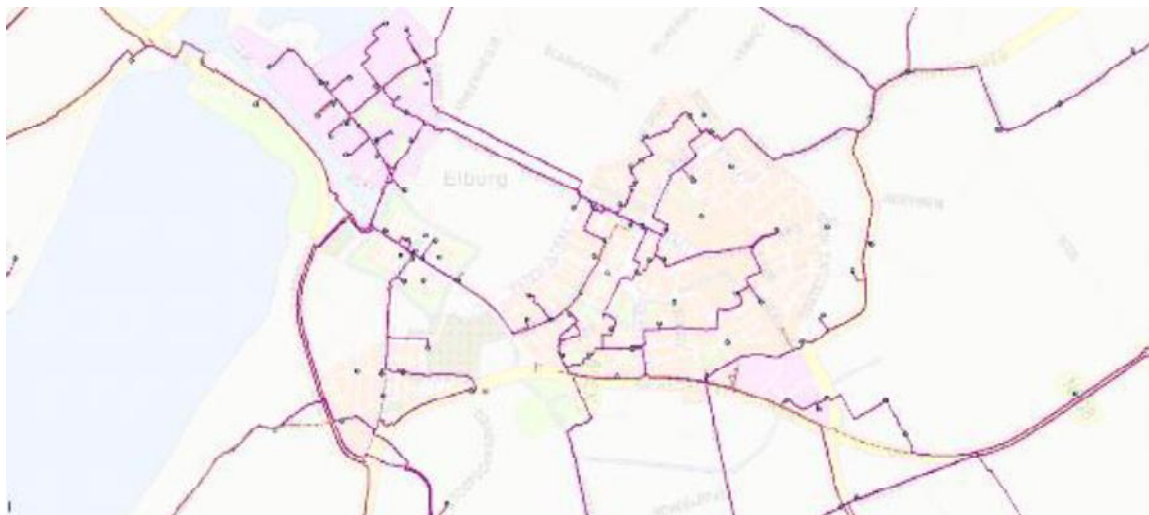
Figuur 41: Centrum Stedelijk



Figuur 42: Buiten Stedelijk



Figuur 43: Groen Stedelijk



Figuur 44: Landelijk Wonen



Figuur 45: Centrum Dorps

IV.3. Kosten elektriciteitstransmissie

Deze sectie beschrijft de achtergrond van de kosten voor de elektriciteitstransmissie. Allereerst wordt ingegaan op de aspecten van de keuze van de scope van het project en de opzet van het kostenmodel die invloed hebben op de inschatting van de kosten van het transmissienet voor elektriciteit. Daarna wordt beschreven welke aanpak gehanteerd is om tot de kosteninschatting te komen. Aansluitend wordt een overzicht gegeven van de gehanteerde aannames.

IV.3.1. Afbakening en vereenvoudiging

Zoals eerder in dit document beschreven, zijn er voor de haalbaarheid van de studie keuzes gemaakt over de te beschouwen scope en de complexiteit van het kostenmodel. Ten aanzien van de scope zijn voor de inschatting van de kosten voor het transmissienetwerk voor elektriciteit een aantal keuzes van belang.

De scope die voor het project gekozen is, bevat een aantal elementen die tot gevolg hebben dat er voor het opstellen van de kosteninschatting van het hoogspanningsnetwerk aannames gedaan moeten worden.

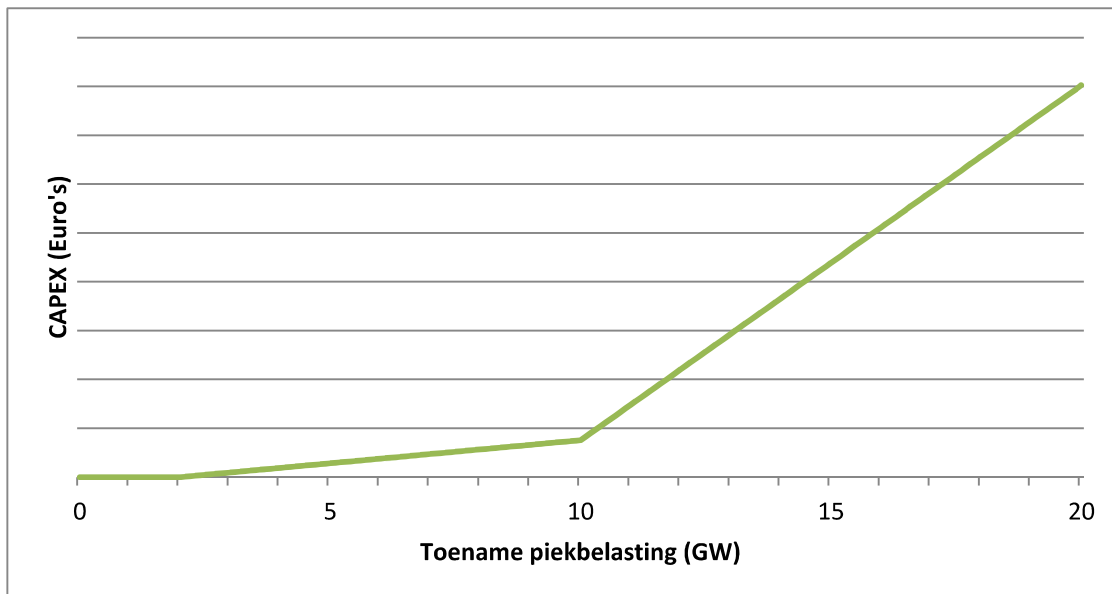
- Ten eerste is er voor gekozen om de ontwikkeling van centrale energieproductie en centrale energieopslag buiten beschouwing te laten. Omdat dit van invloed is op de vraag naar transmissiecapaciteit, worden hier aannames voor gedaan.
- Daarnaast wordt decentrale opwekking buiten beschouwing gelaten. Voor de behoefte aan transmissiecapaciteit is het effect hiervan dat deze waarschijnlijk overschat wordt. Hier worden geen aanvullende aannames over gedaan bij het opstellen van de kosten per kW piektoename. Reden hiervoor is dat dit aspect terugkomt in de inschatting van de piektoename en niet zozeer bij de inschatting van de kosten per kW extra piekbelasting.
- Ook het elektriciteitsverbruik in de overige sectoren valt buiten de scope van het project. Net als de decentrale opwekking zal ook dit aspect voor het hoogspanningsnet vooral invloed hebben op de inschatting van de piektoename en niet op de inschatting van de kosten per kW extra piekbelasting.

Voor de modellering van de kosten is gekozen om de kostenontwikkeling voor het hoogspanningsnet uit te drukken in kosten per kW toename van de piekbelasting. In werkelijkheid is het moment met de piekvraag niet per definitie het moment waarop het netwerk het zwaarste belast wordt. De aanpak om de investeringskosten alleen te relateren aan de toename van het piekvermogen leidt tot een overschatting van de investeringskosten voor het transmissienetwerk. Omdat het in dit project gaat om een ordegrootte inschatting waarmee verschillende alternatieven vergeleken worden, is de gekozen aanpak een goed werkbare benadering.

Ecofys heeft op basis van een aantal scenario's bepaald dat de stijging van de piekbelasting in het hoogspanningsnet in het meest extreme geval 20 GW bedraagt.

Figuur 46 illustreert de inschatting van de investeringskosten. Te zien valt dat pas bij piektoenames vanaf 3 GW investeringen worden voorzien, waarbij de omvang van de investeringen vanaf 10 GW aanzienlijk toeneemt.

In werkelijkheid worden investeringen in het transmissienet trapsgewijs gedaan. Voor de hanteerbaarheid van het model is er binnen het project voor gekozen om de kosten per extra kW piekvermogen te modelleren.



Figuur 46: Illustratie kostentoeename transmissie elektriciteit (vereenvoudigde weergave) (TenneT analyse)

IV.3.2. Aannames en uitgangspunten

Als gevolg van de in het project gekozen afbakening en modelinrichting zijn er een aantal aannames gemaakt om tot een inschatting van de ordegrootte van de investeringskosten voor het hoogspanningsnet te komen. De gehanteerde uitgangspunten worden hieronder opgesomd:

- De reeds door TenneT geplande investeringen zijn uitgevoerd.
- De situatie ten aanzien van import en export blijft in lijn met de huidige situatie. Dit geldt voor zowel de (geplande) interconnectiecapaciteit als het patroon van de import en export flows.
- Het extra aanbod van elektriciteit (geleverd uit directe productie of opslag) dat nodig is om te voldoen aan de extra vraag, wordt gerealiseerd nabij het huidige grootschalige aanbod en eventueel op 110/150kV-niveau.
- De kosten van deze elektriciteitsproductie en opslag van elektriciteit vallen buiten de scope van dit project.
- Ook de kosten van een overlay grid vallen buiten de scope van dit project.
- De verzwaring van het net wordt op de huidige locaties gerealiseerd.
- Ten behoeve van de eenvoud van het model is de uitbreiding uitgedrukt in euro's per kW piektoename. In praktijk is het uitbreidingspatroon minder continu, maar meer trapsgewijs.
- De kosten zijn uitgedrukt in het prijsniveau van 2015.

IV.4. Kosten gasdistributie

Voor het bepalen van de kosten voor gasdistributie zijn de kosten voor de instandhouding van het gasnet afgezet tegen de kosten van de verwijdering. De netto kosten of baten worden naar rato van het aantal gasaansluitingen toegekend aan het desbetreffende scenario.

IV.4.1. Instandhouding gasaansluiting

De kosten voor de instandhouding van de gasaansluiting zijn gebaseerd op de kosten die aan de klant worden doorberekend, eventueel minus de gereguleerde vergoeding van 6%. De klanten die vallen in de categorie van een capaciteit t/m 10 m³/h, met een jaarverbruik tussen 500 en 4000 m³/j, betalen 160 euro per jaar (incl. BTW). De kosten voor de instandhouding van het gasnet bedragen dus 132 euro per jaar (excl. BTW). Wanneer gerekend wordt met een levensduur van 40 jaar zijn de kosten per aansluiting 5.280 euro. Kanttekening bij deze aanpak is echter wel dat wanneer het aantal klanten substantieel kleiner wordt, de gemiddelde kosten per aansluiting zullen toenemen. De totale systeemkosten veranderen niet.

IV.4.2. Verwijdering gasaansluiting

De kosten gerelateerd aan de verwijdering van de gasaansluiting worden gevormd door de volgende kostenposten:

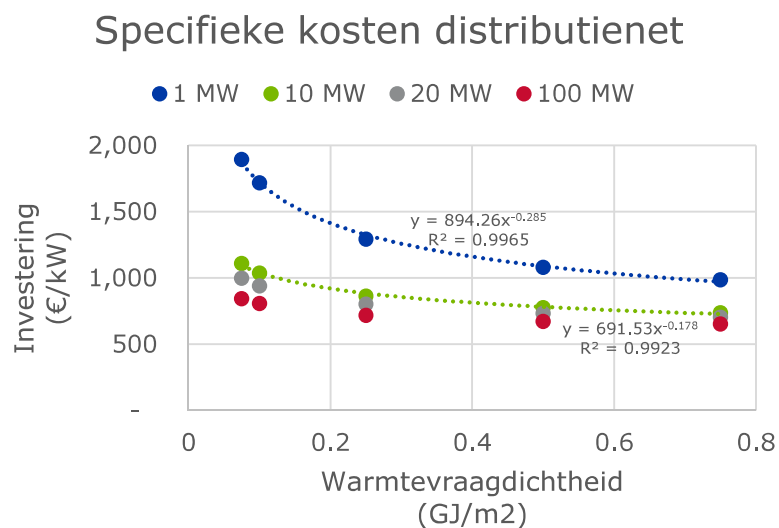
1. Verwijdering van de gasaansluiting: Bij Liander is er op dit moment nog geen tarief voor het verwijderen van de aansluiting, omdat het nu nog om incidentele gevallen gaat, zitten de kosten nog verwerkt in de totale kosten. DNV GL heeft in een studie voor Liander gebruikt gemaakt van een technisch tarief van € 600,- per aansluitleiding. Dit omvat het weghalen van één aansluiting terwijl de resterende infrastructuur intact blijft.
2. Verwijdering van de hoofdleiding: Wanneer gasaansluitingen op grote schaal worden verwijderd, hoort hier ook het opruimen van de hoofdleiding bij. Voor iedere aansluiting heeft Liander gemiddeld 15 meter hoofdleiding in bedrijf. Met een kental van €30/meter betekent dat additionele kosten van €450 per aansluiting. Dit wordt gecorrigeerd met een factor 0,6 omdat niet alle leidingen verwijderd zullen worden, aangezien een aantal leidingen beschikbaar moeten blijven om aan niet-huishoudelijke vraag te voldoen. Dit resulteert in een bedrag van €270 per aansluiting. Zeer waarschijnlijk zullen de kosten voor deze post in landelijk gebied hoger zullen zijn dan in stedelijk gebied (gemiddeld minder aansluitingen per meter hoofdleiding).
3. Versnelde afschrijving van het gasnet: De hele tarifiering is gebaseerd op het langdurig in bedrijf hebben van netten, zodat de kosten over een lange periode terugverdiend wordt. Als die periode korter wordt, valt er een financieel gat omdat de investeringen wel zijn gedaan, maar niet terugverdiend worden. Dat staat dus los van de hiervoor genoemde technische verwijderingskosten. Daarom wordt het netwerktaarif gedurende de niet gebruikte restlevensduur doorberekend. Rekenend met een levensduur van 40 jaar en de aanname dat de netwerken gemiddeld halverwege de levensduur worden verwijderd, bedraagt de niet gebruikte periode 20 jaar.

Tabel 48: Kosten gasnet

Instandhouding van het gasnet	Verwijdering van het gasnet
132 euro per aansluiting per jaar	600 euro per aansluiting voor verwijdering aansluiting
	270 euro per aansluiting voor verwijdering hoofdleiding
	20 jaar doorbetaalde lasten

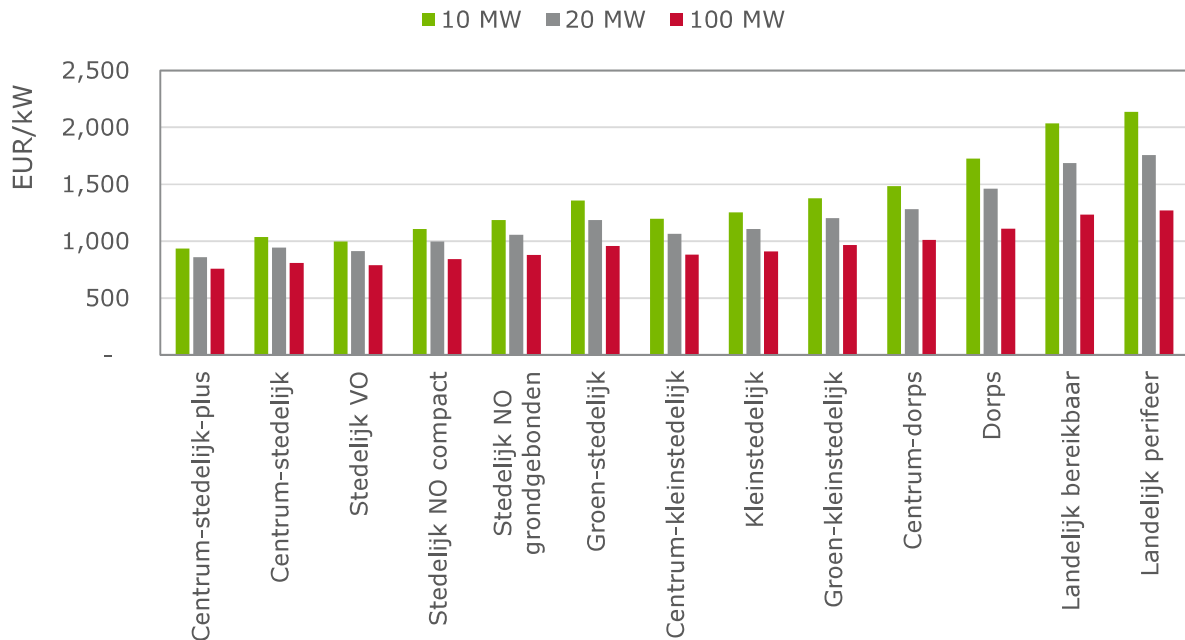
IV.5. Kosten warmtenetten

De kosten voor warmtenetten zijn geanalyseerd op basis beschikbare data (Eneco/Ecofys, 2013) over investeringskosten van warmtenetten voor verschillende thermische vermogens en warmtevraagdichtheid (Figuur 47). Op basis van een geschatte warmtevraag per woning is de warmtevraagdichtheid bepaald. Dit resulteert in de kosten voor warmtenetten per woonmilieu (Figuur 48).



Figuur 47: Investeringskosten warmtenetten naar warmtevraagdichtheid en vermogen

Specifieke kosten warmtedistributienet per woonmilieu o.b.v. **dichtheid totaal**



Figuur 48: Investeringskosten warmtenetten naar woonmilieu en vermogen

Bijlage V. Kosten energie

V.1. Portfolio generation model

In een aantal scenario's neemt de piekvraag naar elektriciteit sterk toe. Met behulp van het *portfolio generation model* worden de additionele kosten van de elektriciteitsvraag berekend wanneer deze worden opgewekt met een productiemix van gas, CCGT en kolen. De resultaten geven een indicatie van de stijging van de elektriciteitsprijs voor de additionele productie.

V.1.1. Methode

Er is gekozen om drie technologieën op te nemen in de productiemix: single cycle gasturbines (gas), combined cycle gasturbines (CCGT) en kolencentrales (kolen). De aannames die per technologie zijn gedaan, zijn te vinden in Tabel 49. Overige aannames zijn gelijkblijvende energiekosten en een disconteringsvoet van 0%.

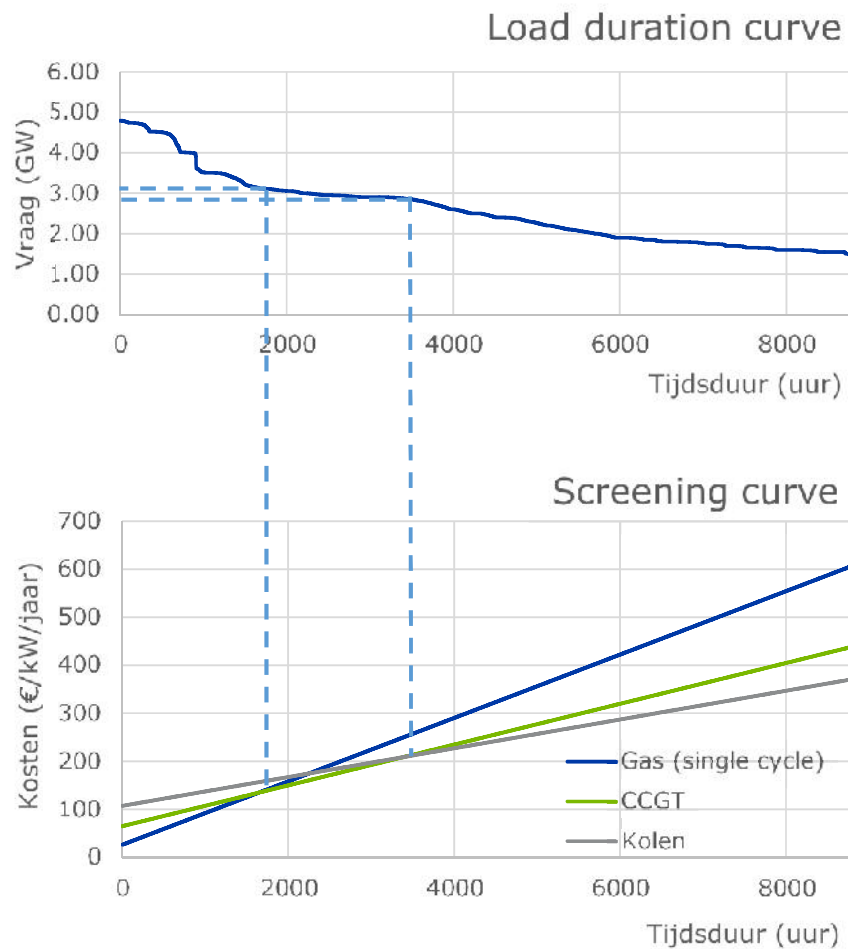
Tabel 49: Aannames per technologie

Technologie	Installatie kosten (€/MW)	FOPEX (€/MW/jaar)	VOPEX (€/MWh)	Brandstofkosten (Euro/MWh)	Efficiëntie	Levensduur (jaar)
Gas	650000	0	3,2	22	35%	25
CCGT	870000	30000	2,5	22	55%	25
Kolen	2000000	57200	2	13	46%	40

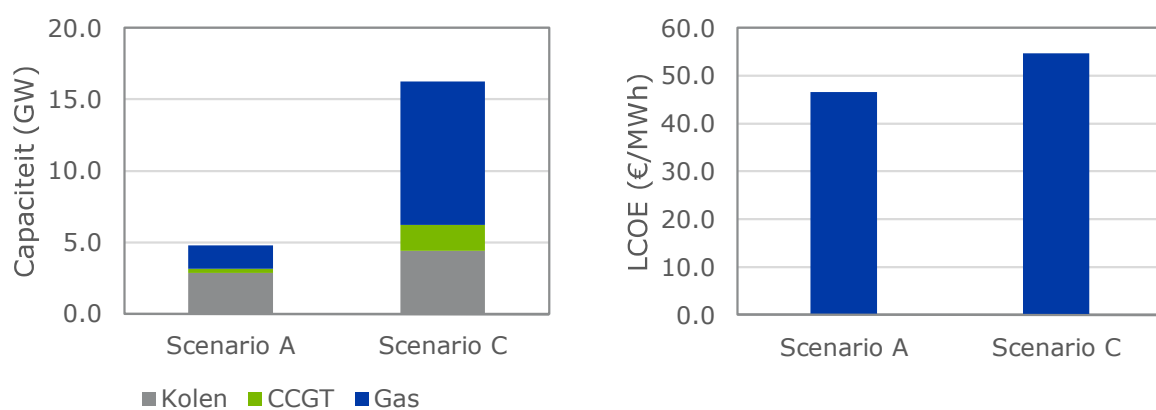
Om de benodigde installatiegrootte van de verschillende technologieën vast te stellen, is gebruik gemaakt van de methode van *screening curves*. Deze methode maakt het mogelijk te bepalen bij welk aantal draaiuren welke technologie het meest aantrekkelijk is. Wanneer dit wordt gekoppeld aan een load duration curve, kan de benodigde installatiecapaciteit per technologie bepaald worden. De load duration curve werd opgesteld door het aanbod aan hernieuwbare energie (zon en wind) af te trekken van de totale huishoudelijke elektriciteitsvraag van de verschillende scenario's (warmte + non-warmte).

V.1.2. Resultaten

Door de elektrificatie in scenario All-Electric is er relatief meer piekcapaciteit nodig, dit zorgt voor een steilere load duration curve (Figuur 49). Als gevolg van deze steilere load duration curve zijn de *levelised cost of energy* (LCOE) in scenario C ruim 15% hoger dan in scenario A (Figuur 50).



Figuur 49: Load duration curve en screening curve



Figuur 50: Benodigde capaciteit en levelised cost of electricity (LCOE) voor de verschillende scenario's

Figuur 50 beschrijft de gemiddelde kosten van alle geproduceerde elektriciteit. Hierbij wordt de kostenstijging als gevolg van de elektrificatie van de warmtevraag verdeeld over de gehele elektriciteitsvraag. In Tabel 50 worden de additionele kosten volledig toegekend aan de additionele elektriciteitsvraag. De resulterende stijging in de elektriciteitsprijs bedraagt ruim 40%.

Tabel 50: Additionele vraag en kosten bij additionele elektriciteitsvraag

Scenario	Totale kosten (€/jaar)	Totale vraag (kWh)	Totale kosten (€/MWh)	Additionele kosten (€/MWh)
Non-warmte Elektriciteit	1100129952	23610950000	46,6	46,6
Scenario C	2173300093	39752832484	54,7	66,5
Scenario A	1104729723	23687804421	46,6	59,9

Optimal storage capacity

Deze paragraaf beschrijft de werkwijze rond het inschatten van de kostenbesparingen die mogelijk zijn in het flexibiliteitsscenario onder Warmte. Deze tekst is in Engels opgesteld. Een vertaling is op verzoek bij de hoofdauteur verkrijgbaar.

There are many different types of heat supply sources for a district-heating network. Including geothermal, waste heat from industry or CHPs. In this study we assume a mix of heat supply by deep geothermal plant and district heating gas boilers. According to the CAPEX and OPEX of each technology, it was calculated the maximum capacity that has to be installed, either geothermal or gas boilers, in order to meet the hourly heat demand in the Netherlands in 2050. The heat demand profile for scenario D was used in the modelling. By varying the size of the storage and observing the possible savings achievable, the optimum capacity of the storage found. The optimal size (MWh) of the storage is derived when the savings obtained start decreasing with the increase of the storage size. The cost of the geothermal/gas district heating network was derived in cost (€) per year. In order to calculate the unit technical cost of heat (levelized cost of heat, the total costs in that year were divided by the total annual heat supplied (MWh).

The initial heat demand profile was analysed and the peak hours in an average day in each month were determined. An algorithm was developed that lowers the peaks in the day by producing heat in the low peak hours and storing it for later use. Moreover, heat loss of the heat storage was considered, which led to higher heat demand volume per year.

Tabel 51: Aannames per technologie

Technologies	Capex_TechX (€/MW)	Vopex_TechX (€/MWh)	Levensduur_TechX (yr)	Fopex_TechX (€/MW/yr)
Gas	211000	22	30	37001
Geothermal	1130300	3,9	35	0
Storage Size (varying)	0			

Literature was consulted for the current cost of thermal energy storage. The values found in the literature and the values used in the model are shown in Table 51.

Tabel 52: Thermal Energy Storage technology data

Source	Technology	Investment cost €/kWh	O&M % investment/yr	Heat loss rate % of TES/h	Lifetime
IRENA[1]	TES	0,5-3	0,7	0,03	30
Pensini et al.[2]	TES	3	0,7	0,03	35
Used in the model	TES	0,122	0,7	0,03	30

Geothermal CAPEX and OPEX were calculated according to these formulas:

$$E_{cashout_{year}} = E_{capex_{year}} + E_{opex_{year}}$$

$$E_{capex_{year}} (M\text{€}) = 2E_{capex_{well}} + E_{capex_{exc.}} + E_{capex_{pump}}$$

$$E_{capex_{well}} = W * (0,2 * d^2 + 700d + 250.000)$$

$$E_{opex_{year}} (M\text{€}) = E_{pumphours} * E_{pump} * E_{price_{buy}}$$

ThermoGIS was used to obtain the geological parameters needed for calculating the power of the geothermal doublet and the related parameters. It must be noted that these values are different for each area of the Netherlands. In a study by Kramers et al., it was shown that the Potential Recoverable heat for spatial heating in the Netherlands is more than 20000 PJ/km² (Kremers et al., 2009).

Buying price for electricity was assumed to be 58,3 €/MWh. Values for the heat exchanger and pump were obtained from literature (L.Kramers & M.Pluymaekers, 2013), (Straathof, 2012).

Scenario A

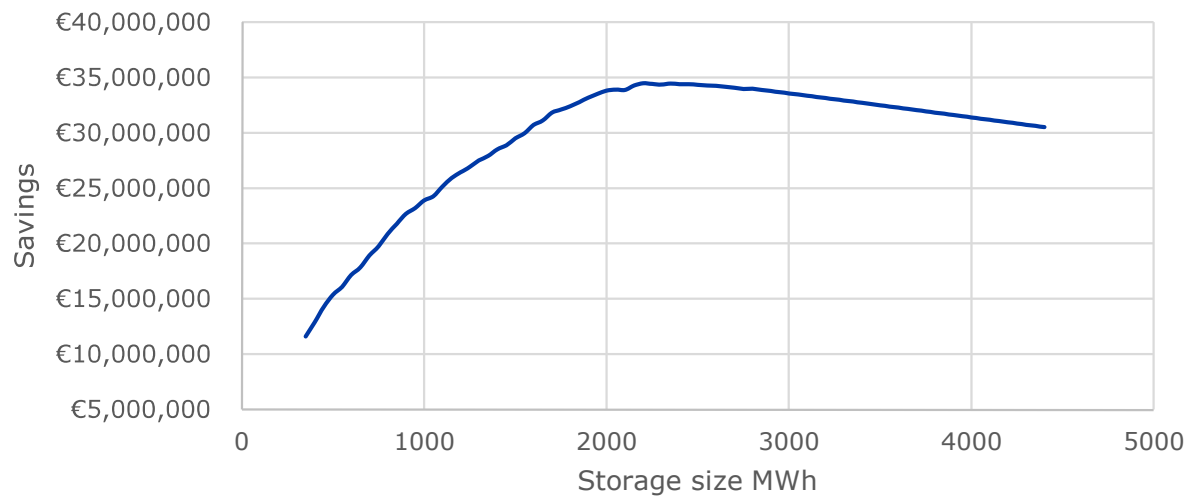
Onderstaande resultaten beschrijven de kosten voor warmtenetten in scenario A. Op basis van het model met en zonder opslag worden de voordelen van buffering bepaald.

Tabel 53: Resultaten scenario A

Technologies	Capacities (MW)	Capex (€/yr)	Vopex (€/yr)	Total (€/yr)
Gas	2407	16.929.343	58.638.095	75.567.438
Geothermal	1283	41.442.509	53.626.049	95.068.558
Total	3690	58.371.852	112.264.143	170.635.995

Tabel 54: Resultaten scenario A

	€/MWh	€/kWh	Total (€/yr)
Average heat price no storage	44,65	0,0447	170.635.995
Average heat price optimal storage	34,28	0,0343	130.990.401



Figuur 51: Optimal size of the storage vs the savings it provides in the overall system

Warmtescenario

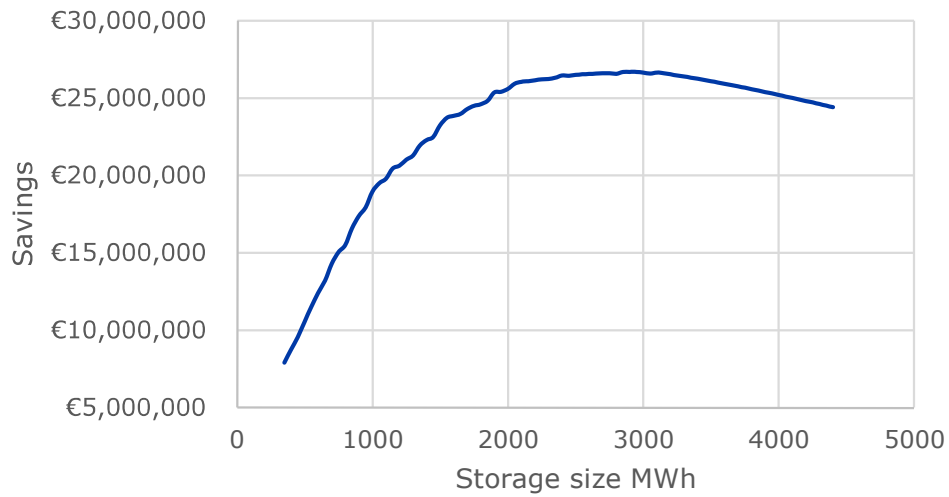
Vergelijkbaar met scenario HR zijn hieronder de resultaten beschrijven de kosten voor warmtenetten in scenario Warmte. Op basis van het model met en zonder opslag worden de voordelen van buffering bepaald. Hieruit blijkt dat de kosten zonder en met buffering respectievelijk 0,029 €/kWh en 0,026 €/kWh bedragen.

Tabel 55: Resultaten scenario D

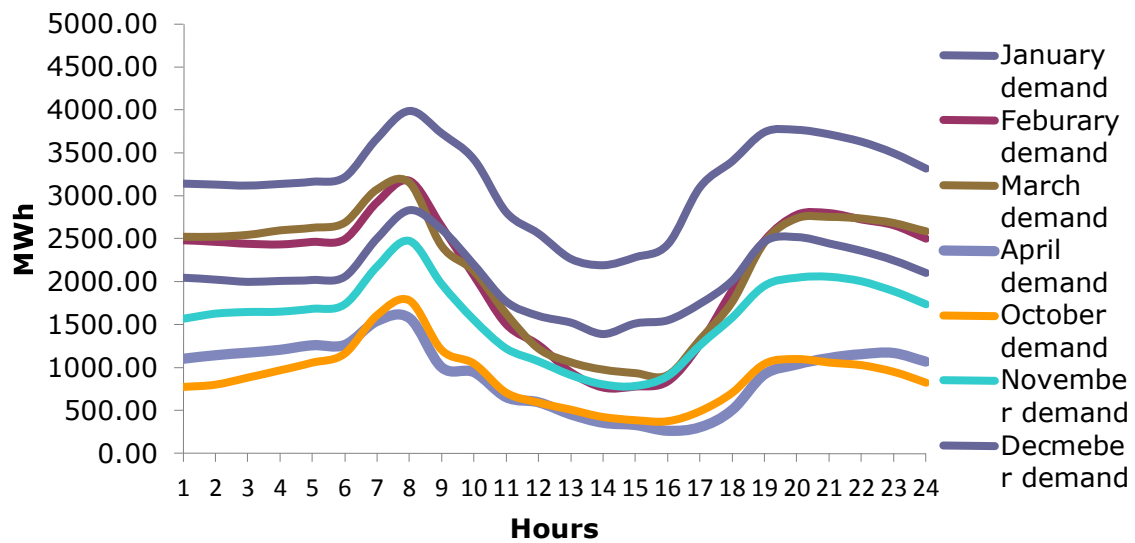
Technologies	Capacities (MW)	Capex (€/yr)	Vopex (€/jaar)	Total (€/r)
Gas	3155	22.190.240	102.738.625	124.928.865
Geothermal	2629	84.905.508	118.517.864	203.423.372
Total	5784	107.095.748	221.256.489	328.352.237

Tabel 56: Resultaten scenario D

	€/MWh	€/kWh	Total (€/yr)
Average heat cost no storage	28,765	0,029	328.352.237
Average heat cost at the optimal storage size	25,870	0,026	295.302.009



Figuur 52: Optimal size of the storage vs the savings it provides in the overall system



Figuur 53: Demand profiles for various months

