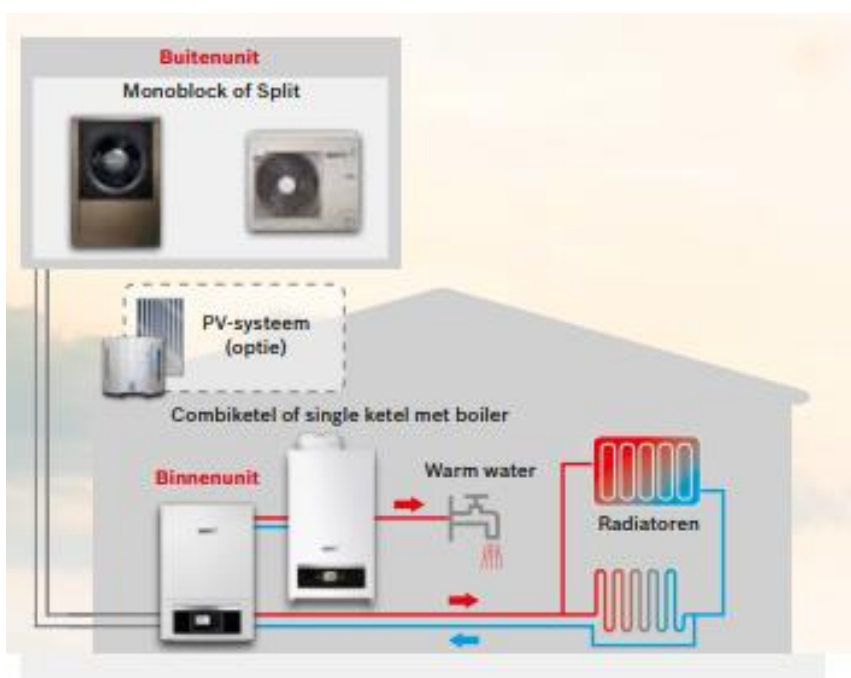


Duurzame warmte in de bestaande woningbouw

Een optimalisatie van de kosten op weg naar Energie Neutraal



Op de voorpagina:
Principeschema van een warmtepomp volgens Nefit Bosch

Met dank aan:

*Gemeente Steenwijkerland
Expertisecentrum Warmte
Buurteam Energiek rondom de Middenweg
KIWA Nederland BV
Bosch Thermotechniek BV
Nibe Energie Techniek BV
Installatiebedrijf Dick van Dijk*

voor hun bijdrage aan de totstandkoming van dit rapport.

Disclaimer:

Aan de in dit rapport vermelde besparingsmogelijkheden kunnen geen rechten worden ontleend.
Aan de samenstelling van dit rapport is de grootst mogelijke zorg besteed.

Auteur: Ing. H. M. van der Vegt.

*Gepensioneerd Productontwikkelaar en Procestechnoloog bij N.V. Philips Gloeilampen fabrieken en Gecertificeerd EPA adviseur en Kwaliteitszorgmanager bij Energie Service Centrum Nederland B.V.
Lid van het Buurteam Energiek rondom de Middenweg in de gemeente Steenwijkerland.*

De auteur heeft als procestechnoloog een ruime ervaring in het ontwerpen en optimaliseren van transformatieprocessen ten behoeve van de productie van componenten. Daarbij werd gebruik gemaakt van zowel fundamenteel modelonderzoek als statische analyses. In dit rapport zijn beide gereedschappen toegepast om de meest kosteneffectieve toepassing van warmtepompen voor bestaande woningen te kunnen adviseren. Daarbij is dankbaar gebruik gemaakt van de uitgebreide set SCOP waarden die gepubliceerd werd bij de beoordeling van een NEFIT luchtwarmtepomp volgens de norm NEN 7120.

Inhoud

1. SAMENVATTING	4
2. CONCLUSIES	5
3. ADVIEZEN.....	7
3.1 Advies voor beleidsmakers	7
3.2 Advies voor bewoners	8
4. INLEIDING	10
5. DE ENERGIETRANSITIE	11
6. DOEL VAN HET ONDERZOEK.....	12
7. UITGANGSPUNTEN	13
7.1 Rekenmethodiek	13
7.2 Gegevens per woning.....	13
7.3 Primaire Energie Factor en CO ₂ emissie	14
7.4 Klimaat en stookseizoen.....	15
8. FINANCIËLE KENTALLEN.....	15
9. INSTALLATIETECHNIEK.....	16
9.1 Ruimteverwarming	16
9.1.1 De HR ketel.....	16
9.1.2 De pellet-kachel	17
9.1.3 De warmtepomp.	17
9.1.4 Warmtedistributie	18
9.2 Koeling	19
9.2.1 Koelvraag	19
9.2.2 Koude-opwekking en distributie	20
9.2.3 Energieverbruik voor koelen	21
9.3 Tapwater	21
9.4 Koken.....	21
9.5 Netwerkkosten	21
10. OPZET VAN HET ONDERZOEK	22
11. RESULTATEN	24
11.1 Investerings.....	24
11.2 Jaarkosten met een HR ketel.....	26
11.3 Jaarkosten met een warmtepomp.....	27
11.4 Kostenoptimalisatie warmtepompen.....	28
11.4.1 Hybride warmtepomp	28
11.4.2 Bodemwarmtepomp	43
11.5 Netwerkkosten	44
11.6 Saldering en Energie Neutraal.....	44
11.7 Koelen.....	47

11.8	Vergelijking geoptimaliseerde warmteopwekkings-systemen	47
11.8.1	Kosten	49
11.8.2	Netbelasting	54
11.8.3	Duurzaamheid	55
12.	KEUZES VOOR DE KORTE TERMIJN	56
13.	LITERATUUR.....	57
14.	BIJLAGEN.....	58
14.1	Bijlage-1 Financiële kentallen	58
14.2	Bijlage-2 Kenmerken warmtepomp	60
14.2.1	De werking van een warmtepomp.	60
14.2.2	De thermodynamische formule voor de COP	60
14.2.3	Seizoengemiddelde SCOP.....	61
14.2.4	Formule voor SCOP lucht/water warmtepomp	62
14.2.5	Formule voor SCOP bodemwarmtepomp	64
14.2.6	Vermogen	64
14.2.7	Optimalisatie bivalent warmtepompsysteem	64
14.2.8	Kleinere pomp	67
14.3	Bijlage -3 Kostencalculaties voor ruimteverwarming en tapwater	68

1. Samenvatting

In dit rapport is een onderzoek beschreven om vast te stellen welke configuratie het best kan worden toegepast voor de opwekking van duurzame warmte bij het verduurzamen van bestaande woningen in 3 woonwijken van Steenwijkerland. Daartoe zijn de kosten voor diverse warmte-opwekkingssystemen met een warmtepomp en/of HR ketel en diverse warmte-distributiesystemen onderzocht. Bij alle onderzochte varianten is de aanschaf van een inductiekooktoestel meegenomen. Onderzocht is welke investeringen nodig zijn om de woningen volledig energie-neutraal te maken, alsmede de daartoe benodigde duurzaam op te wekken elektra en de belasting van het elektriciteitsnet. De temperatuur waarbij de hulpverwarming van een luchtwarmtepomp wordt ingeschakeld is gebruikt is om de jaarlijkse kosten voor luchtwarmtepompen verder te optimaliseren. De onzekere toekomstige consumentenprijs voor aardgas, biogas en/of waterstof, en toekomstige reducties in de warmtevraag zijn belangrijke variabelen. Een diagram is ontworpen om afhankelijk van de waarde van deze variabelen de optimale warmteopwekkingsmethode te bepalen. Aangetoond wordt dat zowel de overgang naar inductiekoken als de aanschaf van een hybride warmtepomp in de bestaande woningbouw op dit moment niet rendabel is.

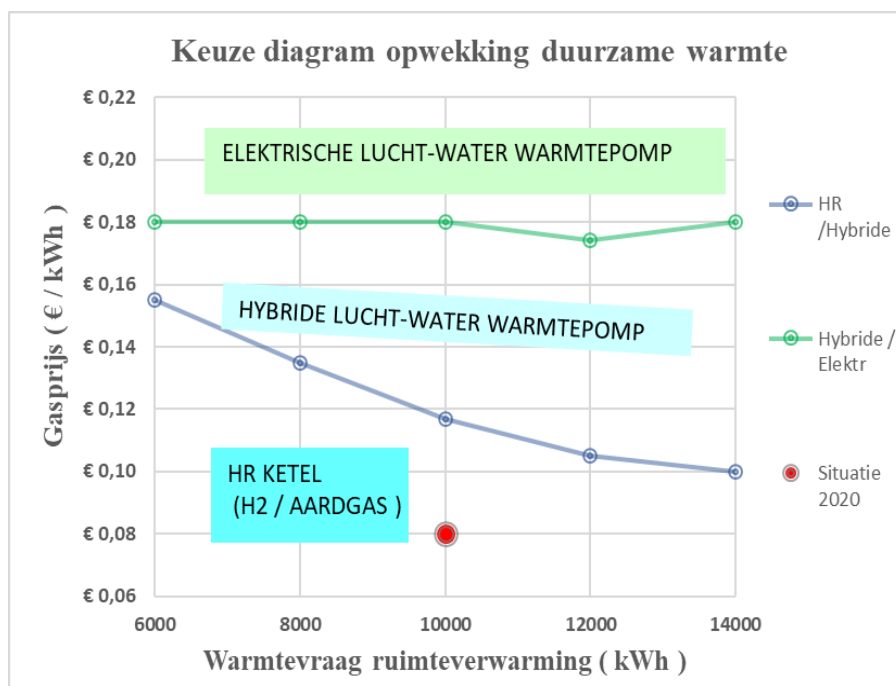
2. Conclusies

1 Het meest voordelige toestel voor het opwekken van duurzame warmte voor ruimteverwarming, tapwater en koken is afhankelijk van de warmtevraag en de gasprijs (voor aardgas, biogas of waterstof). In geval voor duurzaam koken een inductiekookplaat wordt gebruikt, geldt:

Bij een gasprijs boven de € 0.18 /kWh is de elektrische luchtwarmtepomp het meest voordelig.

Bij een gasprijs onder de € 0.10 / kWh is de HR ketel het meest voordelig.

Bij een gasprijs tussen deze 2 waarden is dit afhankelijk van de warmtevraag. Dit kan een HR ketel op biogas of waterstof, of een hybride warmtepomp zijn, zoals aangegeven in onderstaand diagram:



Toelichting bij het diagram:

Elk punt in het x-y vlak is bepaald door een bepaalde warmtevraag en een bepaalde gasprijs.

Voor elk punt onder de blauwe lijn in dit diagram is de HR-ketel voordeliger. Daarboven is een luchtwarmtepomp voordeliger. In het gebied tussen de blauwe lijn en de groene lijn is de hybride luchtwarmtepomp het meest voordelig. Boven de groene lijn is de elektrische luchtwarmtepomp voordeliger.

Een gemiddelde woning in de woonwijk heeft een warmtevraag van 10 000 kWh en een gasprijs 0.08 / kWh. Deze is in het diagram weergegeven met een rode stip. Deze stip ligt onder de blauwe lijn, dus is het gebruik van een hybride warmtepomp op dit moment nog duurder dan een HR ketel

1m³ aardgas of biogas = 9.77 kWh,

1 kg H₂ = 39.39 kWh

2 De bodemwarmtepomp en de lucht-lucht warmtepomp zijn meestal niet aan te bevelen:

- De bodemwarmtepomp is zowel qua investering als jaarlijkse kosten een veel kostbaardere oplossing dan een lucht-water warmtepomp.
- De aanleg van luchtverwarming is achteraf meestal niet goed mogelijk.

3 De elektrische luchtwarmtepomp heeft het nadeel dat het elektriciteitsnet zwaar belast wordt, omdat bij een piekvraag in de winter alle warmte geleverd wordt door een elektrische spiraal.

De hybride warmtepomp heeft het voordeel dat het elektriciteitsnet in dat geval juist ontlast wordt, omdat volledig kan worden overgeschakeld naar de HR ketel op waterstof of biogas.

4 Voor een succesvolle uitrol van hybride warmtepompen is een gasprijs van tenminste 0.10 / kWh, ofwel voor aardgas een prijs van € 1,- nodig. Naarmate de warmtevraag voor een woning lager wordt, is een hogere gasprijs nodig om de warmtepomp rendabel te maken.

Verder is een garantie nodig dat na het sluiten van de aardgaskraan er biogas of waterstof voor een prijs onder de € 0.18 / kWh geleverd zal worden. Zonder deze levergarantie wordt de investering in een hybride warmtepomp riskant en zal veel eerder voor een elektrische lucht-water warmtepomp gekozen worden.

5 Een HR ketel op biogas of groene waterstof is op korte termijn een goed alternatief voor een dure warmtepomp installatie. Deze vraagt voor de bewoners de laagste investering. Daardoor wordt een snelle uitrol van duurzame warmteopwekking meer kansrijk.

6 Vloerverwarming leidt bij geen van de onderzochte warmteopwekkingsmethoden tot de laagste kosten. Aanleg van vloerverwarming is in de bestaande woningbouw alleen nodig voor een comfortabele koeling.

Bij gebruik van convectoren of radiatoren met een ventilator, kan in beperkte mate gekoeld worden. De meerkosten hiervoor zijn ca 120,-/ jaar

7 In geval men geen koeling nodig heeft en de warmtevraag voor ruimteverwarming wordt teruggebracht tot onder de 8 000 kWh-th is bij luchtwarmtepompen helemaal geen aanpassing van het warmtedistributiesysteem meer nodig.

De goedkope koelapparaten in bouwmarkten en warenhuizen zijn energieslurpers, omdat geen recirculatie wordt toegepast en de COP erg laag is.

8 In geval men een warmtepomp wil plaatsen en de warmtevraag van de woning in de toekomst nog met ca 20% wil verminderen, kan men een hybride lucht-water warmtepomp met eveneens een 20% te kleine capaciteit plaatsen. De warmtepomp zal dan bij een buitentemperatuur lager dan +1 °C geen warmte meer leveren. Hierdoor is ca 3 % minder gasbesparing mogelijk. Nadat de energiebesparende maatregelen zijn uitgevoerd moet mogelijk de instelling van de warmtepomp worden aangepast om gedurende meer bedrijfsuren zonder hulpverwarming aan de warmtevraag te voldoen.

9 De totale hoeveelheid benodigde duurzame elektriciteit voor het bereiken van Energie Neutrale woningen, bij een warmtevraag voor ruimteverwarming van 10 000 kWh-th, bedraagt:

Bij HR ketel met groene waterstof	: 30 000 kWh-e (bewoners 7 m ²)
Bij hybride lucht-water warmtepomp met groene waterstof:	9 236 kWh-e (bewoners 16 m ²)
Bij elektrische lucht-water warmtepomp	: 4 200 kWh-e (bewoners 18 m ²)
Bij bodemwarmtepomp	: 3600 kWh-e (bewoners 21 m ²)

10 Door afschaffing van de salderingsregeling stijgen de jaarlijkse kosten voor een energieneutrale woning met een hybride warmtepomp met ca 12 %. Men kan de energietransitie versnellen door deze regeling te handhaven voor energieneutrale woningen.

3. Adviezen

3.1 Advies voor beleidsmakers

1 In woonwijken waar een warmtenet niet rendabel is worden de laagste kosten voor het opwekken van duurzame warmte in de bestaande woningbouw in de meeste gevallen bereikt met een lucht-water warmtepomp.

- Voor de aanschaf van lucht/water warmtepompen moet bekend zijn of en tegen welke prijs biogas of groene waterstof in een voldoende hoeveelheid beschikbaar komt. Zolang hierover onzekerheid bestaat kan geen keuze gemaakt worden tussen een hybride warmtepomp of een elektrische warmtepomp.
- De hybride warmtepomp is veelal de meest voordelige oplossing zolang de gasprijs tussen de € 0.10 en de 0.18 /kWh blijft. Bij een prijs hoger dan € 0.18 / kWh is de elektrische lucht/water warmtepomp voordeliger en bij een prijs onder de € 0.10 / kWh is de HR ketel voordeliger.
- Bij gebruik van hybride warmtepompen behoeft het elektriciteitsnet minder verzwaard te worden.
Met een inductiekooktoestel en een elektrische lucht-water warmtepomp stijgt de maximale netbelasting voor een woning van ca 7 KW naar ca 24 kW, maar bij aanschaf van een hybride lucht/water warmtepomp blijft deze stijging beperkt tot ca 17 kW.
Ook stabiliseert een hybride warmtepompsysteem het elektriciteitsnet in de winter, omdat bij buitentemperaturen beneden de -2 °C de warmtelevering geheel door de HR ketel kan worden overgenomen. Hierdoor daalt de belasting van het elektriciteitsnet, terwijl bij andere typen warmtepompen de vraag naar elektra snel oploopt. Hiermee wordt voor slechts 2 % van de warmtevraag voor ruimteverwarming extra gas verbruikt.
- Het bezwaar van geluidsoverlast door de buitenunit van lucht/water warmtepompen wordt door nieuwe regelgeving per 1-4-2021 verminderd. Bij voldoende subsidies op PVT panelen met voldoende hoge capaciteit zijn ook geen buitenunits meer nodig.

2 Het is op dit moment niet verantwoord om bewoners te adviseren een warmtepomp op aardgas aan te schaffen. De investeringen voor het opwekken van duurzame warmte zijn niet binnen de technische levensduur van de installaties terug te verdienen. Naarmate de woning beter geïsoleerd wordt, is zelfs een hogere gasprijs nodig om een kostenneutrale transitie te realiseren. Het verhogen van de subsidie SDE op de warmtepomp is minder effectief. Verhogen van de aardgasprijs tot een waarde tussen de € 1,- en € 1.50 /m³ heeft een groter effect.

3 De benodigde investering voor inductiekoken is in bestaande woningen zeer onrendabel omdat hiervoor vaak de aansluiting op het elektriciteitsnet moet worden verzwaard. Dit duurzame alternatief is alleen te adviseren voor een beter comfort en/of veiligheid.

4 Overwogen moet worden om bij woningen die geheel energieneutraal zijn gemaakt, de salderingsregeling te continueren. Dit stimuleert de groei van het aantal energieneutrale woningen en bevordert de decentrale opwekking van duurzame elektra.

5 Een HR ketel op waterstof kan bij de energietransitie een nuttige rol vervullen:

- De benodigde investering is laag, dus geschikt voor huiseigenaren met een klein inkomen.
- Deze geeft bij gebruik van groene waterstof de hoogste CO₂ besparing.

3.2 Advies voor bewoners

1 Om de warmteopwekking in woningen te verduurzamen is een lucht/water warmtepompsysteem voor ruimteverwarming en tapwater en voor koken een inductiekooktoestel voor de meeste woningen de meest voordelige oplossing. Dit lucht/water warmtepompsysteem kan een elektrische luchtwarmtepomp met een boiler voor tapwater of een hybride luchtwarmtepomp met een HR combi tap zijn.

2 De meest voordelige keuze voor een lucht/water warmtepompsysteem is bepaald door de leverbaarheid van gas in de toekomst, de gasprijs en de warmtevraag.

Bij het sluiten van de aardgaskraan kan aardgas vervangen worden door biogas en/of waterstof. Deze keuze voor leverbaarheid ligt bij de gemeenteraad.

De gasprijs voor consumenten wordt grotendeels door de rijksoverheid bepaald. Ieder jaar wordt de belasting op gas verhoogd.

Aanbevolen wordt geen lucht-water warmtepompsysteem aan te schaffen voordat duidelijk is of en tegen welke prijs via het bestaande gasnet biogas of groene waterstof geleverd gaat worden.

In geval het bestaande warmteopwekkings-toestel op korte termijn vervangen moet worden wordt aanbevolen (weer) een HR ketel te plaatsen. Daar kan men in een later stadium een lucht/water warmtepomp bij plaatsen. Op dat moment is een hybride warmtepompsysteem gerealiseerd.

3 Bij een gasprijs boven de € 1.80 / m³ is een elektrische luchtwarmtepomp de meest voordelige keuze.

Bij een gasprijs tussen de € 1,50 en € 1,80 is de hybride warmtepomp de meest voordelige keuze.

Bij een gasprijs tussen de € 1.00 en € 1.50 is de meest voordelige keuze afhankelijk van de warmtevraag:

Bij een gasprijs van € 1.50 is de HR ketel voordeliger dan een hybride warmtepomp bij een jaarlijks gasverbruik tot 1000 m³ gas.

Bij een gasprijs van € 1.00 is de HR ketel voordeliger dan een hybride warmtepomp bij een jaarlijks gasverbruik tot 1850 m³ aardgas

Bij tussenliggende gasverbruiken ligt het omslagpunt daar tussenin.

N.B. De genoemde gasverbruiken gelden bij een aardgasverbruik voor tapwater en koken van ca 24 m³ gas /maand

4 Zolang de gasprijs nog onder de € 1,- /m³ blijft, is het voordeliger nog geen warmtepomp aan te schaffen. Aanbevolen wordt het gasverbruik eerst te verminderen door te investeren in meer rendabele maatregelen op het gebied van isolatie, kierdichting, ventilatie en stookgedrag.

5 In geval men een warmtepomp wil plaatsen en de warmtevraag van de woning in de toekomst nog met ca 20% wil verminderen, kan men een hybride lucht-water warmtepomp met eveneens een 20% te kleine capaciteit plaatsen. De warmtepomp zal dan bij een buitentemperatuur lager dan +1 °C geen warmte meer leveren. Hierdoor is ca 3 % minder gasbesparing mogelijk. Nadat de energiebesparende maatregelen zijn uitgevoerd eventueel de instelling van de warmtepomp worden aangepast om gedurende meer bedrijfsuren zonder hulpverwarming aan de warmtevraag te voldoen.

6 Indien men het jaarlijkse gasverbruik tot onder de 1200 m³ heeft teruggedrongen is meestal geen aanpassing van het warmtedistributiesysteem meer nodig.

Bij een gasverbruik van 1200-1700 m³ zijn Lage Temperatuur Radiatoren met een maximale aanvoertemperatuur van 45 °C het meest kosteneffectief.

Bij een gasverbruik van 1700-2000 m³ is het aantrekkelijker om boosters onder de bestaande radiatoren te plaatsen. Dit vergt een wat zwaardere warmtepomp, maar boosters zijn veel goedkoper dan lage temperatuur radiatoren. Met deze lagere investering blijven de jaarkosten even hoog.

7 Aanleg van dure vloerverwarming is alleen nodig voor een comfortabele koeling.

Met Lage Temperatuur Radiatoren kan in beperkte mate gekoeld worden. De meerkosten voor deze koeling zijn ca € 120,- per jaar. Hiervoor moeten de radiatoren voorzien zijn van een ventilator .

8 De buitenunit van luchtwarmtepopen geven wat geluidsoverlast. Door nieuwe regelgeving is het te verwachten dat nieuwe luchtwarmtepompen na 1-4-2021 aanzienlijk minder geluid zullen maken en bij toepassing van PVT panelen is zelfs helemaal geen buitenunit meer nodig.

9 De aanschaf van een inductiekooktoestel is niet rendabel, maar biedt wel een zeer veilige en comfortabele kookwijze.

4. Inleiding

In de gemeente Steenwijkerland is door bewoners een buurtteam “Energiek rondom de Middenweg” opgericht dat als doelstelling heeft de woningen in de bestaande wijken Nieuwe gagels, Oostermeenthe en Woldmeenthe te verduurzamen. Uitgangpunt is dat het gebruik van aardgas komt te vervallen. Hierbij wordt gekeken naar de mogelijkheid van een hoog-thermisch warmtenet en als alternatief de opwekking van duurzame warmte met een warmtepomp en/of een HR ketel op waterstof of biogas.

Door Syntraal is vastgesteld dat voor deze wijken voldoende Thermische Energie uit Oppervlaktewater aanwezig is om in de zomer de benodigde warmte te leveren voor een WKO in de bodem, maar volgens onderzoek van DWA is dat voor het grootste deel van de wijk niet rendabel te maken. Dit wordt veroorzaakt doordat er vrijwel geen hoog-thermische afvalwarmte beschikbaar is en de bebouwingsdichtheid te laag is. Voor de wijk Oostermeenthe zou dit misschien nog een oplossing kunnen zijn, maar in het onderzoek van DWA waren nog niet alle kosten meegenomen.

Dit rapport is een handreiking om verantwoorde keuzes te kunnen maken voor het individueel opwekken van duurzame warmte met een warmtepomp en/of een HR ketel op groen gas.

5. De energietransitie

De energietransitie beoogt de CO₂ uitstoot van Nederland te verminderen door het uitbannen van het gebruik van fossiele brandstof, zoals steenkool en aardgas.

De overheid heeft daartoe bepaald dat in 2050 de gebouwde omgeving Energie Neutraal moet zijn.

Voor nieuwbouwwoningen is de bestaande methodiek van EPC per 1-1-2021 vervangen door een nieuwe stelsel van eisen voor het realiseren van een Bijna Energie Neutraal Gebouw, genaamd BENG-1, -2 en -3.

BENG-1 stelt eisen aan de kwaliteit van de schil, ofwel de specifieke warmtevraag (kWh / m² gebruiksoppervlak).

BENG-2 stelt eisen aan het gebruik van primaire (= fossiele) energie van de woning.

BENG-3 Stelt eisen aan de hoeveelheid zelf op te wekken duurzame energie.

Volgens BENG-3 dienen bewoners een deel van de benodigde energie voor hun woning zelf duurzaam op te wekken. Voor grondgebonden woningen geldt een eis van minimaal 50%, voor woongebouwen 40%.

De overheid gaat zorgen dat de dan nog benodigde energie uit het net duurzaam wordt opgewekt. Productie van biogas (methaan) wordt gestimuleerd als een vervanger van aardgas. De mogelijke productie van biogas is veel kleiner dan de vraag. Op de lange termijn is de overgang naar waterstof onvermijdelijk.

Tot 2030 wordt vooral geïnvesteerd in capaciteit voor de opwekking van duurzame elektra.

Na 2030 kan ook duurzame opwekcapaciteit worden aangewend voor de productie van waterstof.

De eisen voor BENG worden periodiek aangescherpt zodat in 2050 alle nieuwe woningen energieneutraal zullen zijn. Per saldo wordt dan geen primaire energie meer verbruikt.

Dit wordt met Energie Neutraal (EN) aangeduid.

De overheid heeft met de woningcorporaties afgesproken dat hun woningbezit in 2050 energieneutraal zal zijn. Voor de overige bestaande woningen wordt via subsidies en energiebelasting de eigenaar gestimuleerd de benodigde maatregelen uit te voeren. In dit kader heeft de overheid ook beslist dat de levering van aardgas wordt stop gezet. Woningeigenaren worden zo aangespoord om de woning energiezuiniger te maken en zelf duurzame energie op te wekken.

6. Doel van het onderzoek

De warmtevraag voor een woning bestaat uit energie voor ruimteverwarming, tapwater, koken en koelen. Ruimteverwarming vergt normaliter de meeste energie.

Dit onderzoek heeft tot doel het meest kosteneffectieve individuele warmte-opwekkingssysteem met warmtepompen en/of HR ketels te kunnen selecteren, rekening houdend met de warmtevraag van de woning en het feit dat in 2050 alle woningen energieneutraal moeten zijn.

In dit rapport worden de benodigde investeringen en de totale jaarlijkse kosten voor de warmtevraag berekend bij gebruik van hybride luchtwarmtepompen, elektrische luchtwarmtepompen, bodemwaterpompen en een HR ketel op waterstof of biogas. Dat is uitgevoerd bij verschillende varianten, waarbij de maximale aanvoertemperatuur van het warmtedistributiesysteem gevarieerd werd van 35-70 °C.

Bij luchtwarmtepompen is er een extra vrijheidsgraad: Men kan (indirect) de buitentemperatuur instellen waarbij de hulpverwarming wordt ingeschakeld. Hiermee kunnen de jaarkosten voor de warmteopwekking geoptimaliseerd worden.

De volgende situaties zijn doorgerekend:

- Een variabele warmtevraag voor ruimteverwarming die tot 40% hoger of lager is dan de gemiddelde warmtevraag in de woonwijk.
- Een variabel tarief voor aardgas, biogas en/of waterstof.
- Gevolgen van tariefstijgingen van netwerkkosten vanwege de ombouw van het gasnet naar waterstof en de uitbreiding van het hoofdtransportnet elektra.
- De kosten voor energiezuinige koeling van de woning en de invloed daarop van de buitentemperatuur waarbij deze koeling wordt ingeschakeld.

Voor de benodigde investeringen wordt daartoe uitgegaan van een woning met een gemiddelde grootte.

Om te voorkomen dat men keuzes maakt die men in een later stadium zal betreuren, wordt voor de meest kosteneffectieve varianten tevens aangegeven hoeveel duurzame elektra door de bewoner moet worden opgewekt om de woning te laten voldoen aan de eisen van een Energie Neutrale woning (EN) en welke investering en kosten dat met zich mee brengt. Ook wordt de belasting van het elektriciteitsnet zichtbaar gemaakt.

Bij gebruik van groene waterstof als energiedrager moet door de leverancier ook duurzame elektrische energie worden opgewekt. De totale hoeveelheid benodigde duurzame elektrische energie is de som van de vereiste productie door de bewoners om energieneutraal te worden en de vereiste productie duurzame elektra door de waterstofleverancier. Deze som is eveneens bepaald.

Bij de teruglevering aan het net van duurzaam opgewekte elektra kan de nu nog de bestaande salderingsregeling worden toegepast, maar deze wordt vanaf 2023 in 8 jaar afgebouwd. Voor de kostenoptimalisatie voor het opwekken van duurzame warmte is de salderingsregeling niet relevant. Het heeft alleen gevolgen voor de rentabiliteit voor het opwekken van duurzame elektra in een energieneutrale woning. De gevolgen vanwege deze afschaffing worden separaat zichtbaar gemaakt.

Tevens wordt een schatting gemaakt van de koelkosten voor een woning.

7. Uitgangspunten

7.1 Rekenmethodiek

Voor de bestaande woningbouw moeten warmtetechnische berekeningen worden uitgevoerd conform ISSO 82 Handleiding Energieprestatieadvies woningen.

Vanwege de nieuwe eisen voor een Bijna Energie Neutraal Gebouw (BENG) is een nieuwe voorlopige norm opgesteld, die per 1-1-2021 van kracht wordt:

NTA 8800-2020 Rekenmethode energieprestatie gebouwen.

De rekenmethodiek volgens NTA 8800 is veel gedetailleerder dan bij ISSO 82. Daarmee zijn ook nieuwe vormen van duurzame warmteopwekking door te rekenen.

Voor dit onderzoek is een spreadsheet gebouwd, gebaseerd op de rekenmethodiek van ISSO 82. Voor het berekenen van het primaire energieverbruik en het aandeel duurzame warmte, is NTA 8800 gevolgd.

Het rendement van een warmtepomp wordt uitgedrukt in een Coëfficiënt van Performance COP. Dit is de verhouding tussen de afgegeven energie en de daarvoor benodigde elektrische energie. De COP daalt bij een groter te overbruggen temperatuurverschil tussen de aanvoertemperatuur en de brontemperatuur. Daarom wordt voor warmtepompen een seizoensgemiddelde van de COP toegepast, ofwel de SCOP. De SCOP-waarden worden bij slechts enkele maximale aanvoertemperaturen van het warmtedistributiesysteem gepubliceerd.

Bij het optimaliseren van de maximale aanvoertemperatuur van het warmtedistributiesysteem en de temperatuur waarbij de hulpverwarming wordt ingeschakeld moet de COP voor iedere combinatie van deze 2 temperaturen bepaald kunnen worden. Hiertoe is een lineaire regressieanalyse toegepast op meetwaarden van de SCOP, gemeten conform NEN 7120 en EN 14825, zie bijlage-2. Deze formules zijn geldig voor woningen met een warmtevraag voor ruimteverwarming tussen 1 300 en 17 000 kWh bij een maximale aanvoertemperatuur van het warmtedistributiesysteem variërend van 35 tot 70 °C. Voor een bodemwarmtepomp en een luchtwarmtepomp zijn daartoe verschillende formules afgeleid.

Voor de bepaling van de benodigde capaciteit voor verwarmen en koelen is gebruik gemaakt van richtlijnen op de website www.warmtepompweetjes.nl. Dat is voor een individueel advies niet toelaatbaar, maar wel bruikbaar om het meest kosteneffectieve systeem te kunnen selecteren.

7.2 Gegevens per woning

De gemiddelde warmtevraag en het elektraverbruik per woning is gegeven in tabel-1

Deze gegevens zijn gebaseerd op data volgens het rapport van Royal HaskoningDHV en Milieu Centraal op basis van gemiddeld 2,5 personen/woning. De warmtevraag voor ruimteverwarming is uit deze verbruiken berekend volgens ISSO-82. De warmtevraag voor tapwater is berekend volgens NTA 8800.

Defaultwaarde in model			
Koken		175	kWh-th
Tapwater		1 386	kWh-th
Ruimteverwarming		10 000	kWh-th
Gebouwgebonden elektraverbruik	1 200		kWh-e
Overig elektraverbruik	1 600		kWh-e
Totaal elektra referentie situatie		2 800	kWh-e

Tabel-1 Warmtevraag ex. koelen + elektraverbruik

Volgens NTA 8800 moet worden uitgegaan van het gebouw-gebonden energieverbruik. Dit is het verbruik voor ruimteverwarming, koeling, tapwater, verlichting, en hulpenergie voor pompen, ventilatoren etc. en de eigen opgewekte energie. Het energieverbruik voor bewoning, zoals koken, computers, wassen, koelen/vriezen etc. wordt voor de berekening van de gebruikte primaire energie niet meegeteld.

De berekeningen zijn gebaseerd op de volgende uitgangssituatie:

Individuele verwarming met HR107 combitap voor ruimteverwarming en tapwater, geplaatst binnen de schil.

Geïsoleerde leidingen in onverwarmde ruimtes.

Warmtedistributiesysteem met radiatoren met thermostaatkranen en een maximale aanvoertemperatuur van 70 °C.

Geen stooklijngeregelde keteltemperatuur

Tapwaterklasse CW 4.

Temperatuur tapwater 60 °C

Geen koeling aanwezig.

Geen PV-cellen aanwezig.

Aansluitcapaciteit elektra voor regulier verbruik elektra 7 kW

Voor de bestaande situatie is uitgegaan van koken op gas. Voor de duurzame alternatieven wordt uitgegaan van inductiekoken. De kosten voor koken zijn meegenomen, vanwege de benodigde investeringen bij de omschakeling naar duurzame energie en de daarvoor benodigde aansluitwaarde in de meterkast. Het energieverbruik voor koken is niet meegeteld in de berekening van de benodigde primaire energie.

7.3 Primaire Energie Factor en CO₂ emissie

De CO₂ emissie van een woning is direct bepaald door de hoeveelheid verbruikte primaire energie (= fossiele brandstof). Deze wordt uitgedrukt in kWh-p.

In NTA 8800, tabel 5.2 wordt per energiedrager de Primaire Energie Factor gegeven.

De Primaire Energie Factor geeft aan hoeveel primaire energie (kWh-p) nodig is per kWh energie van een gebruikte energiedrager.

In tabel-2 is deze voor de in dit rapport gebruikte energiedragers gegeven.

Duurzame elektriciteit, biogas en groen gas, in de vorm van aangeleverde energie, mogen uitsluitend worden gewaardeerd als een gebiedsmaatregel volgens NEN 7125. Dit houdt in dat de producent van de energiedrager hiervoor een verklaring moet aanvragen.

Voor dit rapport wordt uitgegaan van biogas en/of groene waterstof en mag voor de bewoners de waarde PEF=0 worden aangehouden. Voor de berekening van de voor de productie van groene waterstof benodigde duurzame elektriciteit wordt uitgegaan van een totaal rendement van 50% voor de opwekking, opslag en distributie. In hoofdstuk 8.1.1 wordt dit nader toegelicht.

Primaire energiefactor vlg NTA-8800 (kWh-p / kWh)	
Energiedrager	Aangeleverd
Aardgas	1
Elektra	1.45
Biogas en groen gas, volgens NEN 7125, variabel; default waarde	0
Restwarmte	0.1
Warmtelevering voor tapwater	0.9

Tabel-2 Primaire Energie Factor energiedragers

7.4 Klimaat en stookseizoen

In ISSO 82 wordt de warmtevraag berekend op basis van een stookseizoen van 1 okt - 1 mei. Daarbij wordt gerekend dat er gestookt wordt als de gemiddelde temperatuur van een dag onder de 18 °C komt. De gemiddelde buitentemperatuur tijdens het stookseizoen bedraagt 5.64 °C. Voor de prestaties van warmtepompen worden de klimaatdata van NTA 8800 gebruikt.

8. Financiële kentallen

De gebruikte financiële kentallen voor een woning met een gemiddelde grootte zijn gegeven in bijlage-1

De volgende subsidieregelingen zijn toegepast:
ISDE Subsidie Duurzame Energie voor particulieren
Teruggaaf BTW op zonnepanelen voor particulieren.

Als zonnepanelen worden bijgeplaatst om aan de eisen voor een (bijna) energie neutrale woning te voldoen, zal teruglevering aan het elektriciteitsnet optreden, met een afwijkende financiële opbrengst. Om deze opbrengst zo nauwkeurig mogelijk te bepalen is het gemiddelde totale elektraverbruik in de exploitatiekosten meegenomen.

Toekomstige stijgingen van de Opslag Duurzame Energie op de energiebelasting, zijn in dit rapport niet specifiek meegenomen. Dit effect is verwerkt in de consumentenprijs, die als variabel in het onderzoek wordt meegenomen.

9. Installatietechniek

9.1 Ruimteverwarming

9.1.1 De HR ketel

In de HR ketel wordt aardgas (hoofdzakelijk methaan) verbrand tot CO₂ en waterdamp. Als alle waterdamp condenseert wordt het maximale warmteopwekkings-rendement gehaald. Dit bedraagt dan 98% Dit gebeurt bij een retourtemperatuur op de ketel van ongeveer 35 °C. Bij retourtemperaturen boven 55 °C treedt geen condensatie meer op en daalt het rendement naar 90%.

Door boeren en de voedingsindustrie wordt biogas gemaakt. Dat is ook methaan en wordt op beperkte schaal aan het aardgasnet geleverd. Het biogas is bereid uit planten of plantaardige producten. De planten hebben bij hun groei eerst CO₂ aan de atmosfeer onttrokken. Door verbranding wordt per saldo geen extra CO₂ aan de atmosfeer afgegeven.

Er is onvoldoende biomassa beschikbaar om gebruik van alle fossiele grondstoffen uit te bannen. Zolang waterstof nog niet beschikbaar is, zal biogas op beperkte schaal worden ingezet als een duurzaam alternatief voor aardgas.

Waterstof is een synthetische gas. Groene waterstof wordt gemaakt door water te ontleden in waterstof en zuurstof. Dat elektrolyse proces heeft een rendement van 70-80 %. Voor opslag en distributie gaat ook nog ruim 20 % verloren, zodat het totale rendement op ca 50% uitkomt. De daarvoor benodigde elektra moet worden gemaakt uit zon en wind.

Zou men waterstof maken uit elektra, opgewekt met aardgas of steenkool, dan schiet het milieu er nog niets mee op. Dan wordt de CO₂ uitstoot zelfs nog groter dan bij gebruik van aardgas.

HR ketels die waterstof kunnen verbranden staan in proefopstellingen in speciale projecten om ervaring mee op te doen. Gebruik van waterstof is niet nieuw. Tot 1960 werd lokaal kookgas geproduceerd door steenkool te vergassen. Hierbij ontstond een mengsel van koolmonoxide (CO) en waterstof. Dat synthetische gas was erg duur en werd vrijwel alleen voor koken en tapwater gebruikt. Het huidige gasnet is in principe geschikt voor het transport van waterstof, maar moet nog wel worden aangepast.

De overheid heeft de ambitie om met waterstof een sterke marktpositie op te bouwen. Verwacht wordt dat waterstof na 2030 beschikbaar komt om in de gebouwde omgeving de piekvraag naar energie in de winter op te vangen. Of dit ook werkelijk gebeurt is op dit moment nog onzeker. De productie van waterstof uit zon en wind loopt niet synchroon met de warmtevraag. Er zijn immense buffers nodig om dat in evenwicht te houden. Om deze redenen is de productieprijis van waterstof aanzienlijk hoger dan van aardgas.

Via belastingen en subsidies wordt de consumentenprijs van zowel aardgas sterk gestuurd door de landelijke overheid. Dat zal met waterstof niet veel anders zijn.

De consumentenprijs van H₂, inclusief bufferkosten, transport en belastingen is derhalve erg onzeker en wordt daarom als een variabele op 3 niveaus in dit onderzoek meegenomen:

1 De **huidige consumentenprijs voor aardgas en /of biogas**: € 0.782 /m³, ofwel **€ 0.08 / kWh**.

Dit komt overeen met = € 3.151 /kg H₂,

2 **Goedkope waterstof**: **€ 0.18 / kWh** = € 7.090 /kg H₂

3 **Dure waterstof**: **€ 0.28 / kWh** = € 11.03 /kg H₂

Een tarief hoger dan € 0.28 / kWh is niet meer relevant omdat dit veel hoger is dan het tarief voor elektra (€ 0.23 / kWh)

De warmteopwekkingsrendementen voor biogas zijn hetzelfde als voor aardgas.

Voor waterstof zijn de als warmteopwekkingsrendementen volgt vastgesteld:

Bij een HR107 ketel is het rendement, bij niet condenserend bedrijf, bepaald door het verschil in bovenwaarde en onderwaarde van de gebruikte brandstof.

Met laag calorisch aardgas : $31.7 / 35.17 = 0.90$

Met waterstof : $121 / 141.8 = 0.85$

De gemiddelde rendementen op jaarbasis voor beide soorten ketels zijn gegeven in tabel-3

Opwekkingsrendement HR107 ketel				
Toepassing	Energiedrager	T-aanvoer (°C)		
		< 60 °C	> 60 °C	
Hoofdverwarming	aardgas	0.975	0.95	NTA 8800, tabel 9.25
Bijverwarming bij warmtepomp		0.95	0.90	NTA 8800, tabel 9.25
Hoofdverwarming	H2 -gas	0.98	0.92	Analoog aan NTA 8800 berekend uit ow / bw
Bijverwarming bij warmtepomp		0.92	0.85	Analoog aan NTA 8800 berekend uit ow / bw

Opwekkingsrendement tapwater klasse 4 en 1500 kWh	Correctiefactor Cw	Totaal rendement	
HR-ketel aardgas	0.74	0.50	NTA 8800 tabel 13.25 en 13.26, 1386 kWh
HR ketel H2-gas		0.47	Analoog aan NTA 8800 berekend

Tabel-3 Opwekkingsrendement HR 107 ketel volgens NTA 8800

9.1.2 De pellet-kachel

Voor het gebruik van vaste biomassa is een pellet-kachel nodig. Het gebruik is omstreden. Het veroorzaakt een uitstoot van fijn stof en de daarvoor benodigde houtkap vermindert de CO₂ binding in de bossen (naarmate een boom groter is neemt hij jaarlijks meer CO₂ op), waardoor er per saldo meer CO₂ in de atmosfeer terecht komt. Dit alternatief is daarom niet verder onderzocht.

9.1.3 De warmtepomp.

9.1.3.1 Werking

Warmte is een vorm van energie. Zoals water stroomt van hoog naar laag, zo stroomt warmte van een hoge temperatuur naar een lage temperatuur. Met een warmtepomp gebeurt het omgekeerde. Zoals een pomp een hoger gelegen vat kan vullen met vloeistof, zo kan een warmtepomp warmte verplaatsen naar een stof met een hogere temperatuur. Hierbij wordt de warmtebron afgekoeld. In bijlage-2 wordt de werking meer in detail beschreven.

De koelkast in de woning is een voorbeeld van een gebruikersvriendelijke warmtepomp.

9.1.3.2 Type warmtepompsysteem

Er bestaan meerdere warmtepompstystemen:

Bodemwarmtepomp

Bij een bodemwarmtepomp wordt de warmte uit de bodem gehaald. De bodem heeft het hele jaar een redelijk constante temperatuur. Hiervoor wordt een speciale vloeistof door buizen in de bodem gepompt. De warmte wordt door de warmtepomp afgegeven aan het water van het CV systeem. De bodembron is voor een particuliere woning veelal een verticale buis met een lengte van ca 100 m. De boorkosten zijn erg hoog. Als de woning goed geïsoleerd is kan worden volstaan met een kleinere bron en zijn de boorkosten lager. In de bestaande woningbouw is het boren van een bodembron een extra kostbare investering, omdat de woning niet optimaal geïsoleerd is en dus een grotere bron nodig heeft en vaak ook nog aanzienlijke kosten voor tuinherstel nodig zijn. De bodemwarmtepomp heeft het voordeel dat de prestaties niet afhangen van de temperatuur van de buitenlucht.

Lucht-water warmtepomp

Bij een lucht/water warmtepomp wordt de buitenlucht als warmtebron gebruikt. De warmte wordt afgegeven aan het water van het CV systeem. Bij strenge vorst neemt de capaciteit sterk af. Bij zeer

strengere vorst kan de pomp geen warmte meer leveren. Deze warmtepomp heeft dus altijd een hulpverwarming van voldoende capaciteit nodig om bij strenge vorst aan de warmtevraag te kunnen voldoen.

Dat kan een HR ketel zijn. Dan spreekt men van een **hybride warmtepomp**. Een hybride warmtepomp heeft voordeel dat bij een strenge winter, als de belasting van het elektriciteitsnet sterk oploopt, de energielevering geheel door het gasnet kan worden overgenomen. Dit heeft op het elektriciteitsnet een stabiliserende invloed.

De berekening van het energieverbruik voor de hybride warmtepomp wordt in dit rapport op deze regelstrategie gebaseerd.

Er kan bij een lucht/water warmtepomp ook gebruik worden gemaakt van een elektrische spiraal. Dan is er sprake van een **elektrische lucht/water warmtepomp**. Het vermogen van de elektrische spiraal moet even groot zijn als het benodigde vermogen van de warmtepomp. De belasting van het net is daardoor hoger dan bij andere typen warmtepompen.

Het nadeel van een lucht/water warmtepomp is dat de benodigde buitenunit nog veel geluid produceert. Op 1-4-2021 worden nieuwe eisen aan de geluidsbelasting van kracht. Op de kavelgrens is dan nog maar 40 dB toegestaan en hinderlijke tonen mogen nog maar 35 dB zijn. Dat is een aanzienlijke verbetering ten opzichte van de huidige generatiewarmtepompen.

Het is ook mogelijk een suskast om de warmtepomp te plaatsen. Hiermee is een verdere geluidsreductie realiseerbaar. Daarbij moet men wel zorg dragen dat de werking van de buitenunit niet vermindert.

Men kan de buitenunit ook als een passieve warmtewisselaar uitvoeren. Daarmee wordt de geluidsproductie van deze unit tot vrijwel nul gereduceerd. Als men de passieve warmtewisselaar combineert met PV panelen (op het dak van de woning), spreekt men van PVT panelen.

De meerkosten voor deze opties zijn in dit onderzoek niet meegenomen.

Lucht-lucht warmtepomp

Bij een lucht/lucht warmtepomp kan men in combinatie met balansventilatie en warmte-terugwinning op de ventilatielucht een zeer hoog rendement realiseren. In de bestaande woningbouw komt luchtverwarming echter maar heel weinig voor en de aanleg van luchtverwarming achteraf is vaak helemaal niet mogelijk of niet mogelijk voor aanvaardbare prijzen. Daarom is dit systeem niet in dit onderzoek meegenomen.

9.1.4 Warmtedistributie

Warmtepompen presteren beter naarmate de benodigde aanvoertemperatuur lager is.

De benodigde maximale aanvoertemperatuur wordt bepaald door het warmtedistributiesysteem.

De volgende systemen zijn toepasbaar:

Aanvoertemperatuur 35 °C: Vloer of luchtverwarming

Aanvoertemperatuur 45 °C: Lage Temperatuur radiatoren/convectoren

Aanvoertemperatuur 55 °C: Radiatoren met een booster (ventilator)

Aanvoertemperatuur ≥ 70 °C: Gewone radiatoren (veelal de bestaande situatie)

Naarmate de aanvoertemperatuur lager is worden de aanschafkosten hoger.

Bij warmtedistributie door de woning gaat warmte verloren.

Het rendement van het warmtedistributiesysteem in de woning is afhankelijk van vele factoren. In tabel-5 zijn deze conform ISSO-82 berekende rendementen weergegeven als functie van de aanvoertemperatuur.

Veel warmtepompen kunnen geen warmte hoger dan 60 °C leveren, maar bij lage buitentemperaturen wordt bij lucht/water warmtepompen de hulpverwarming (de gasketel of een elektrische spiraal) ingeschakeld. Zo levert dat bij lucht/water warmtepompen geen probleem op. Voor bodemwarmtepompen is een Lage Temperatuur Verwarming systeem belangrijker.

Rendement warmtedistributiesysteem voor individuele installatie, geen optimale regeling en geïsoleerde leidingen in onverwarmde ruimte	
Aanvoertemperatuur oC	Rendement
35	0.961
45	0.957
55	0.952
70	0.943

Tabel-5 Systeemrendementen volgens ISSO 82

9.2 Koeling

9.2.1 Koelvraag

Door het beter isoleren van de woningen en steeds hogere maximum temperaturen in de zomer neemt de behoefte aan koeling van de woningen toe. In NTA 8800 is daarom bepaald dat de koelbehoefte moet worden meegenomen in de berekening van de energievraag voor BENG-1.

De berekening van de koelvraag is erg complex. Dit is een dynamische berekening waarin alle woningeigenschappen een rol spelen. Het is niet eenvoudig om daarvoor een representatieve woning aan te wijzen. De berekening van de koelbehoefte van een gemiddelde woning volgens NTA 8800 zou derhalve zeer kostbaar worden.

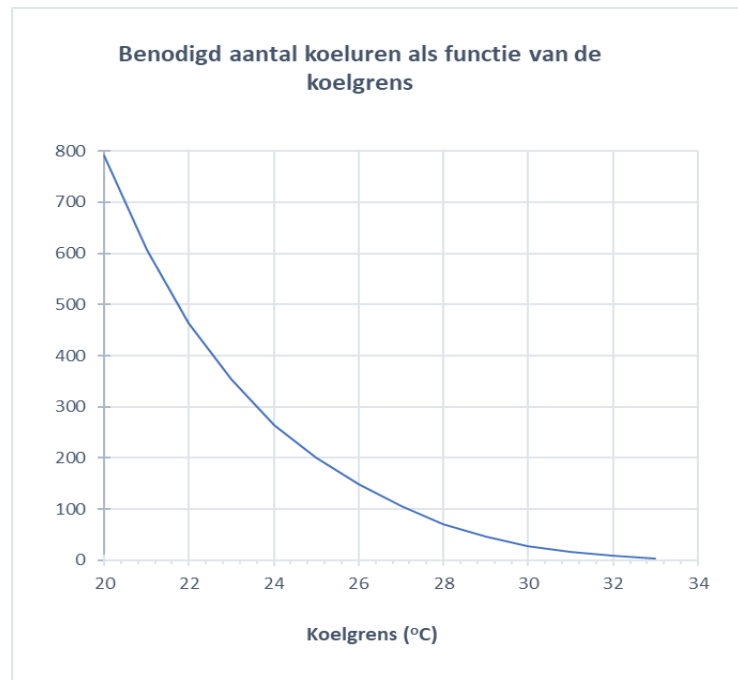
Bestaande woningen hebben anderzijds geen grote koelvraag. Daarom is een sterk vereenvoudigde rekenmethode volgens www.warmtepomp-weetjes.nl toegepast.

In tabel 6 en fig-5 is het aantal koeluren als functie van de koelgrens weergegeven.

Op de X-as van de grafiek staat de **temperatuur van de buitenlucht waarbij een koelvraag in de woning kan ontstaan**. Deze temperatuur wordt de koelgrens genoemd. De gewenste koelgrens is per woning en per bewoner verschillend. Op de Y-as kan men zien hoeveel uren per jaar er een koelvraag is bij een bepaalde koelgrens. Dit aantal koel-uren is aanzienlijk lager dan het aantal uren dat de buitenlucht temperatuur hoger is dan de koelgrens, volgens NTA 8800 tabel 10.6 , omdat een hogere buitenluchttemperatuur pas na enige tijd een koelvraag oproept.

Indicatietabel koel-uren volgens warmtepomp-weetjes.nl	
Buitemtemp oC	Koeluren
20	792
21	607
22	463
23	353
24	265
25	201
26	149
27	105
28	71
29	47
30	28
31	16
32	8
33	3

Tabel-6 koel-uren

Fig-5 Grafiek koel-uren volgens www.warmtepomp-weetjes.nl

9.2.2 Koude-opwekking en distributie

Met vloerverwarming is een goede koeling te realiseren. De vloer heeft daartoe voldoende koude-afgifte capaciteit. Deze methode heeft wel het nadeel dat de koude van nature onderin de kamer blijft hangen. Voor een goed comfort is nog wel menging van warme en koude lucht met een ventilator nodig.

De aanlegkosten van vloerverwarming zijn ongeveer 2 zo hoog als die voor het plaatsen van Lage Temperatuur radiatoren en bedraagt ca € 10.000,-

Waar vloerverwarming al aanwezig is zijn de meerkosten voor de aanschaf van koeling via de vloerverwarming beperkt: Dit vergt alleen een wat duurder regelunit voor de pomp en de ruimtetemperatuur en een paar ventilatoren. De meerkosten hiervoor zijn ca € 300,-

Bij klassieke radiatoren is de koude-afgiftecapaciteit te klein. Men kan de temperatuur van de radiator niet verder verlagen dan het dauwpunt, omdat anders vochtcondensatie op de leidingen en radiatoren ontstaat. Dit geeft vochtklachten en verlaagt ook het rendement, vanwege de vrijkomende condensatiewarmte. Om een redelijke koude-distributie te realiseren moet men een ventilator (booster) onder de radiatoren te plaatsen.

Bij een warmtedistributiesysteem van 45 °C met Lage Temperatuur radiatoren moet men bij de aanschaf voorzien dat bij koeling een ventilator (booster) kan worden toegepast. Deze meerprijs, inclusief regelaars, bedraagt ca € 1200,-

Bij het warmtedistributiesysteem van 55 °C met een booster (ventilator) onder de bestaande radiatoren is alleen een regelunit nodig. De meerprijs hiervoor is ca 200,-

Bij radiatoren met een maximale aanvoertemperatuur van 70 °C is geen ventilator aanwezig. Hier moet worden gekoeld met een airco met een split unit.

Zou men een ventilator onder de radiatoren plaatsen, dan wordt de warmteafgifte zoveel verbeterd, dat de maximaal benodigde aanvoertemperatuur voor ruimteverwarming daalt naar 55 °C.

NB De goedkope koelapparaten in bouwmarkten en warenhuizen zijn energieslurpers, omdat geen recirculatie wordt toegepast en de COP erg laag is.

9.2.3 Energieverbruik voor koelen

In dit rapport wordt de invloed van de koelgrens op de jaarlijkse kosten berekend. Daarvoor wordt uitgegaan van de volgende gegevens:

Passieve koeling met een bodemwarmtepomp:

Vermogen bodemcirculatiepomp 150 W

Actieve koeling met luchtwarmtepomp:

Koelvermogen : Vloerverwarming: 4 kW,

: Radiatoren met booster of convector: 2 kW.

Rendement : 300% , (NTA 8800, tabel 10.29)

Toelichting: Bij gebruik van radiatoren met een booster is de koude-afgifte lager dan met vloerverwarming. Het afgegeven vermogen van de warmtepomp zal evenredig lager zijn. Anderzijds nemen de draaiuren toe. Per saldo is dit vertaald in een geschatte correctiefactor op het benodigd vermogen van 50%.

9.3 Tapwater

Voor tapwater is in een gemiddelde gezin van 2.5 personen nodig 284 m³ aardgas/ jaar.

De aanbevolen methode voor de bereiding van duurzaam warmte voor tapwater is afhankelijk van de gebruikte warmtepomp. Bij een hybride warmtepomp wordt hiervoor een combitap gebruikt die door de HR ketel wordt opgewarmd. In de andere gevallen wordt een elektrische boiler gebruikt, die door de warmtepomp wordt opgewarmd.

9.4 Koken

Het gemiddeld verbruik van kookgas is 37 m³ aardgas per jaar.

Het koken op gas wordt vervangen door inductiekoken. Dit is een comfortabele en veilige kookmethode. Hiervoor is een netbelasting van 8 KW meegenomen. Naast een nieuw kooktoestel is meestal ook een nieuwe pannenset nodig. Voor kooktoestel en pannen is een bedrag van € 800,- meegenomen.

9.5 Netwerkkosten

Voor het aansluiten van een inductiekookplaat en een warmtepomp is in veel gevallen een verzwaring van de bestaande elektra aansluiting nodig. Bij overgang op een elektrische luchtwarmtepomp of een bodemwarmtepomp moet ook de gasaansluiting worden verwijderd. De eenmalige aanleg- of verwijder-kosten worden in 25 jaar afgeschreven.

Een veel groter effect op de jaarlijkse kosten is dat bij het verzwaren van de netaansluiting naar 3*35A, de jaarlijkse netwerkkosten voor elektra stijgen van € 220,- naar € 773,-

Vanwege de energietransitie zullen de tarieven van de netwerkkosten voor elektra sterk toenemen. Ook kunnen de kosten om het gasnetwerk geschikt te maken voor waterstof leiden tot tariefstijgingen.

10. Opzet van het onderzoek

Voor het onderzoek zijn 13 varianten voor de opwekking van warmte voor ruimteverwarming, tapwater en koken opgesteld.

Als referentie is de HR ketel op aardgas als de meest gangbare bestaande situatie meegenomen.

Variant 0 is een HR ketel op waterstof.

Variant 1-4 is een hybride luchtwarmtepomp met waterstof

Variant 5-8 is een luchtwarmtepomp met elektra als hulpverwarming

Variant 9-12 is een bodemwarmtepomp zonder hulpverwarming.

Deze varianten zijn weergegeven in tabel-7. Daarin is ook aangegeven welke methode voor het bereiden van tapwater en koken is toegepast.

NB Variant 9 is enigszins theoretisch omdat er maar weinig bodemwarmtepompen zijn die 70 °C kunnen leveren, maar is wel meegenomen om een goed inzicht in de kosten te verkrijgen.

Variant	Referentie	0
Kenmerk	HR Ketel	HR Ketel
Aanvoertemperatuur oC	70	70
Hoofdtoestel ruimteverwarming	HR ketel	HR ketel
Stook/Bijstook	aardgas	Waterstof,
Tapwaterbereiding	HR combitap	HR combitap
Koken	Gas	Inductiekoken
Toepasbare koeling	Geen	Airco

Variant	1	2	3	4
Kenmerk	Gasnet voor tapwater en piekbelasting in de winter			
Aanvoertemperatuur oC	70	55	45	35
Hoofdtoestel ruimteverwarming	Hybride WP			
Stook/Bijstook	HR-ketel			
Tapwaterbereiding	HR combitap			
Koken	Inductiekoken			
Toepasbare koeling	Airco	Warmtepomp		

Variant	5	6	7	8
Kenmerk	All electric			
Aanvoertemperatuur oC	70	55	45	35
Hoofdtoestel ruimteverwarming	Lucht WP			
Stook/Bijstook	Elektra			
Tapwaterbereiding	WP+ elektr.boiler			
Koken	Inductiekoken			
Toepasbare koeling	Airco	Warmtepomp		

Variant	9	10	11	12
Kenmerk	All electric			
Aanvoertemperatuur oC	70	55	45	35
Hoofdtoestel ruimteverwarming	Bodem WP			
Stook/Bijstook	-			
Tapwaterbereiding	WP+ elektr.boiler			
Koken	Inductiekoken			
Toepasbare koeling	Airco	Bodemwarmtewisselaar		

Tabel-7 De varianten

Voor biogas zijn geen extra varianten aangemaakt:

1 Bij vervanging van aardgas door biogas kan voor de kostencomputatie de referentiesituatie met een HR ketel op aardgas worden genomen.

Voor de duurzaamheidsaspecten is variant 0 met een HR ketel op waterstof van toepassing.

2 Voor de varianten met een hybride warmtepomp zijn de jaarkosten met biogas vrijwel hetzelfde als met waterstof. Met biogas is het bijstookrendement van de HR ketel weliswaar ca 5 % hoger, maar het gasverbruik is zo laag dat de jaarkosten maar een fractie verschil zullen tonen.

Voor de duurzaamheidsaspecten zijn de varianten met biogas identiek aan dezelfde variant met groene waterstof.

Per variant is onderzocht is welke investeringen en jaarkosten voor een gemiddelde woning nodig zijn voor het opwekken van duurzame warmte, het bereiken van een Bijna Energie Neutrale woning en een Energie Neutrale woning.

Vervolgens is onderzocht hoe deze jaarkosten en benodigde investeringen afhangen van de warmtevraag, de maximale aanvoertemperatuur van het warmtedistributiesysteem, het gastarief en de temperatuur waarbij de hulpverwarming bij lucht-water warmtepompen wordt ingeschakeld.

Per warmtevraag wordt vervolgens uit de getoonde grafieken per warmteopwekkingsmethode de qua jaarkosten optimale aanvoertemperatuur van het warmtedistributiesysteem, en bij luchtwarmtepompen tevens de optimale temperatuur voor het inschakelen van de hulpverwarming, bepaald.

Dit resulteert in een diagram waarin men per combinatie van warmtevraag en gastarief kan aflezen welk warmteopwekkingsysteem het voordeligst is.

Vervolgens wordt bekeken wat de impact van deze keuzes is op het gebruik van het net, de hoeveelheid benodigde duurzame elektriciteit, de kosten van koeling etc. Ook worden de gevolgen van het vervallen van de salderingsregeling berekend.

Tenslotte is onderzocht of de aanschaf van een hybride warmtepomp op aardgas op dit moment financieel aantrekkelijk is.

11. Resultaten

Tenzij anders vermeld gelden de gepresenteerde resultaten voor een woning met een gemiddelde grootte en een warmtevraag voor ruimteverwarming van 10 000 kWh, ofwel 1398 m³ aardgas.

Geen saldering en geen koeling.

Inschakelen hulpverwarming bij luchtwarmtepompen bij buitentemperatuur van -10 °C.

11.1 Investerings

Fig.6 toont de benodigde investeringen voor een gemiddelde woninggrootte bij de 13 varianten voor de volgende situaties:

Duurzaam : Het alleen opwekken van duurzame warmte

BENG-3 : Inclusief de investeringen in PV panelen om aan BENG-3 te voldoen

Energie Neutraal: Inclusief de investeringen in PV panelen om op jaarbasis geen gebouw-gebonden energie meer te verbruiken.

De verschillen tussen de varianten zijn opvallend hoog.

Slechts € 2 800,- voor de H₂ ketel en € 39 300,- voor de bodemwarmtepomp met vloerverwarming.

Voor Energie Neutraal loopt dit op naar € 4 500,- resp. € 44 400,-

Verder valt op dat men alleen voor variant 0 met de HR ketel op waterstof of biogas voor BENG-3 moet investeren. De varianten met een warmtepomp wekken voor BENG-3 al voldoende duurzame warmte op. Voor Energie Neutraal is in alle gevallen een extra investering in zonnepanelen nodig.

In tabel-8 worden de investeringen nader gespecificeerd.

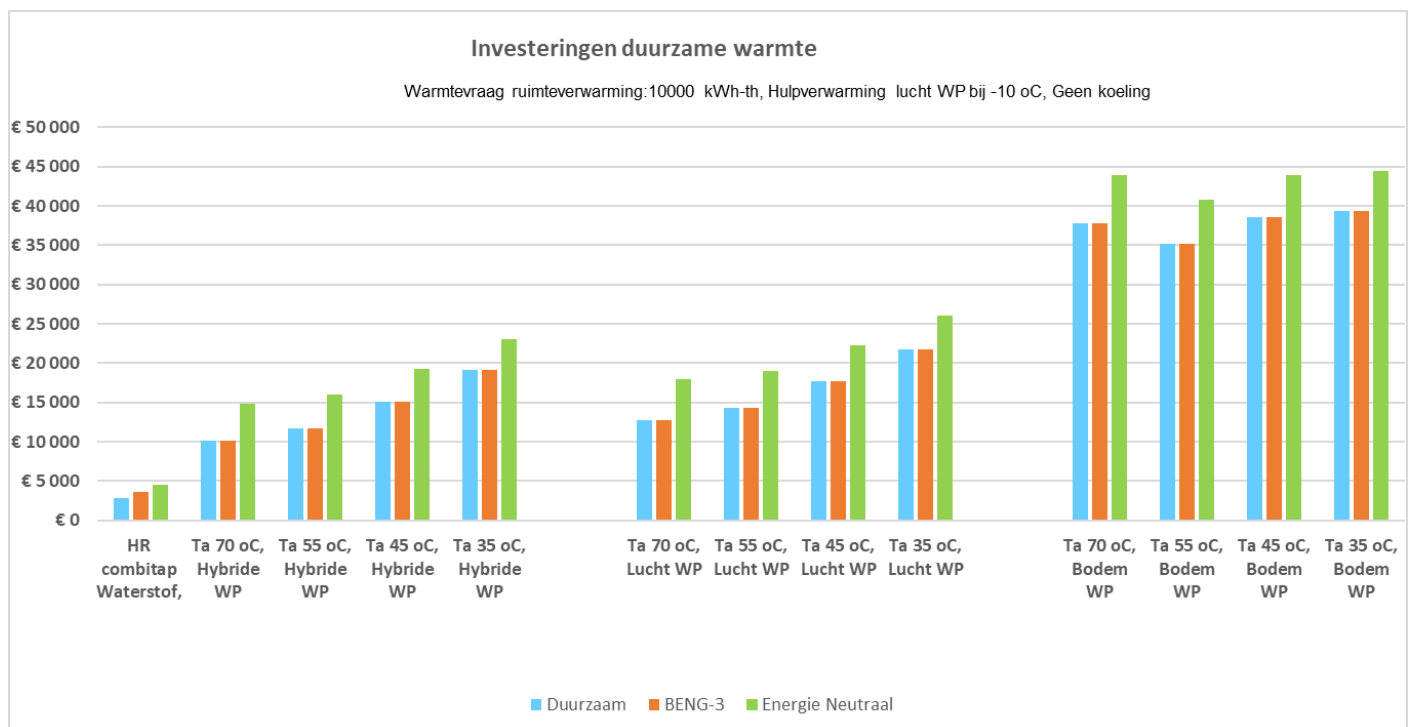


Fig.6 Investerings voor 13 varianten

Variant	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Kenmerk	HR Ketel	Gasnet voor tapwater en piekbelasting in de				All electric				All electric			
Aanvoertemperatuur oC	70	70	55	45	35	70	55	45	35	70	55	45	35
Hoofdtoestel ruimteverwarming	HR ketel	Hybride WP				Lucht WP				Bodem WP			
Stook/bijstook	Waterstof,	HR ketel				Elektra				-			
Tapwaterbereiding	HR combitap	HR combitap				WP+ elektr.boiler				WP+ elektr.boiler			
Netto investeringen													
HR- ketel	€ 2 000	€ 2 000	€ 2 000	€ 2 000	€ 2 000								
Warmtepomp		€ 5 500	€ 5 500	€ 5 500	€ 4 500	€ 9 000	€ 9 000	€ 9 000	€ 8 000	€ 34 200	€ 30 000	€ 30 000	€ 25 700
Inductiekoken	€ 800	€ 800	€ 800	€ 800	€ 800	€ 800	€ 800	€ 800	€ 800	€ 800	€ 800	€ 800	€ 800
Verzwaren aansluiting elektra en/of verwijderen gas		€ 1 829	€ 1 829	€ 1 829	€ 1 829	€ 2 937	€ 2 937	€ 2 937	€ 2 937	€ 2 810	€ 2 810	€ 2 810	€ 2 810
Radiator-boosters		€ 1 600				€ 1 600				€ 1 600			
LT radiatoren		€ 5 000				€ 5 000				€ 5 000			
Vloer-verwarming		€ 10 000				€ 10 000				€ 10 000			
Koeling	€ 0	€ 0	€ 0	€ 0	€ 0	€ 0	€ 0	€ 0	€ 0	€ 0	€ 0	€ 0	€ 0
Investerings duurzame warmte	€ 2 800	€ 10 129	€ 11 729	€ 15 129	€ 19 129	€ 12 737	€ 14 337	€ 17 737	€ 21 737	€ 37 810	€ 35 210	€ 38 610	€ 39 310
Extra zonnepanelen voor BENG-3 bij grondgebonden woning	€ 859	€ 0	€ 0	€ 0	€ 0	€ 0	€ 0	€ 0	€ 0	€ 0	€ 0	€ 0	€ 0
Investerings conform BENG-3	€ 3 659	€ 10 129	€ 11 729	€ 15 129	€ 19 129	€ 12 737	€ 14 337	€ 17 737	€ 21 737	€ 37 810	€ 35 210	€ 38 610	€ 39 310
Extra zonnepanelen voor EN	€ 1 719	€ 4 765	€ 4 324	€ 4 090	€ 3 893	€ 5 165	€ 4 723	€ 4 490	€ 4 292	€ 6 167	€ 5 597	€ 5 304	€ 5 061
Investerings conform EN	€ 4 519	€ 14 894	€ 16 053	€ 19 219	€ 23 021	€ 17 902	€ 19 060	€ 22 227	€ 26 029	€ 43 977	€ 40 807	€ 43 914	€ 44 372

Tabel-8 Specificatie investeringen

11.2 Jaarkosten met een HR ketel

In fig. 7 worden de totale jaarkosten getoond voor duurzame warmte voor ruimteverwarming, tapwater en koken en elektra bij gebruik van een HR ketel voor ruimteverwarming, met het gastarief als parameter.

Uit deze fig. blijkt dat de jaarkosten in hoge mate bepaald zijn door de warmtevraag en de gasprijs. Voor een HR ketel op waterstof of aardgas zijn de kosten vrijwel gelijk zijn indien de waterstof wordt geleverd voor dezelfde prijs per kWh als het aardgas.

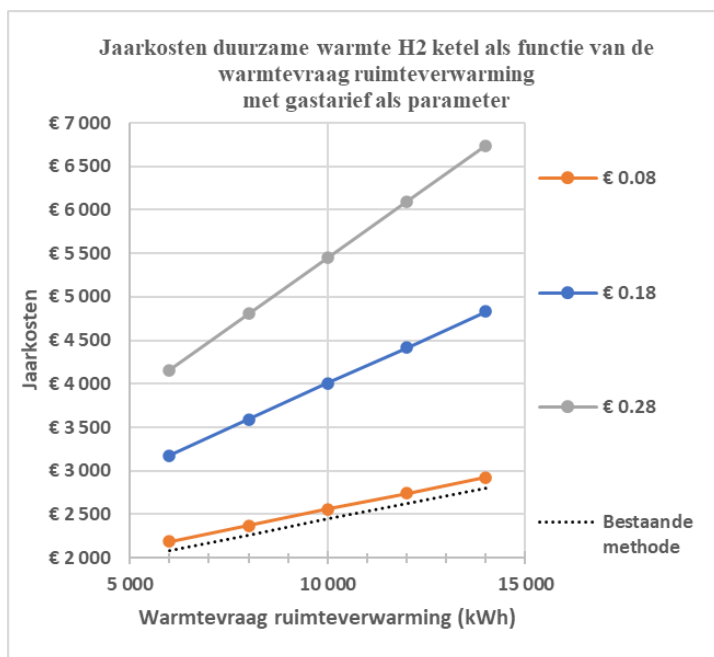


Fig. 7 Jaarkosten HR ketel

In fig-8 is de kostenverdeling voor een woning met een gemiddelde warmtevraag gegeven bij gebruik van een HR ketel en een gasprijs van € 0.08/ kWh. De jaarkosten zijn vooral bepaald zijn door het verbruik aan gas en elektra en de netwerkkosten. De kosten voor afschrijving, rente en onderhoud zijn betrekkelijk klein.

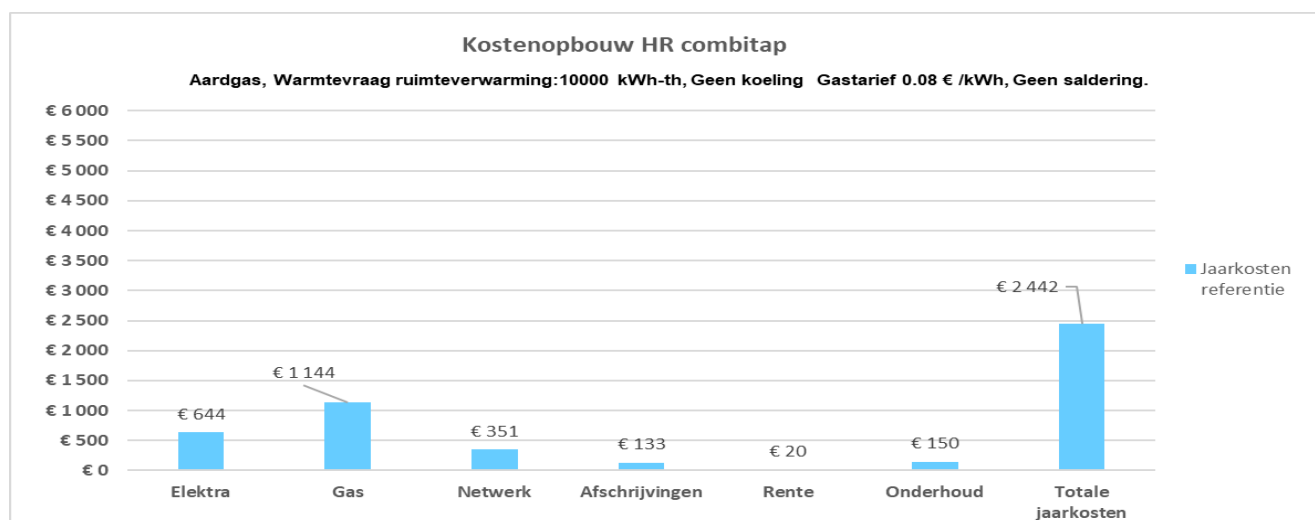


Fig-8 Kostenopbouw bestaande situatie

In fig. 9 is de kostenverdeling voor duurzame warmte gegeven bij een gasprijs voor waterstof van € 0.18 /kWh, inclusief de situaties waarbij de woning voldoet aan de eisen voor BENG-3 en Energie Neutraal. Als deze woning ook nog Energie Neutraal wordt gemaakt, blijven de jaarkosten vrijwel gelijk.

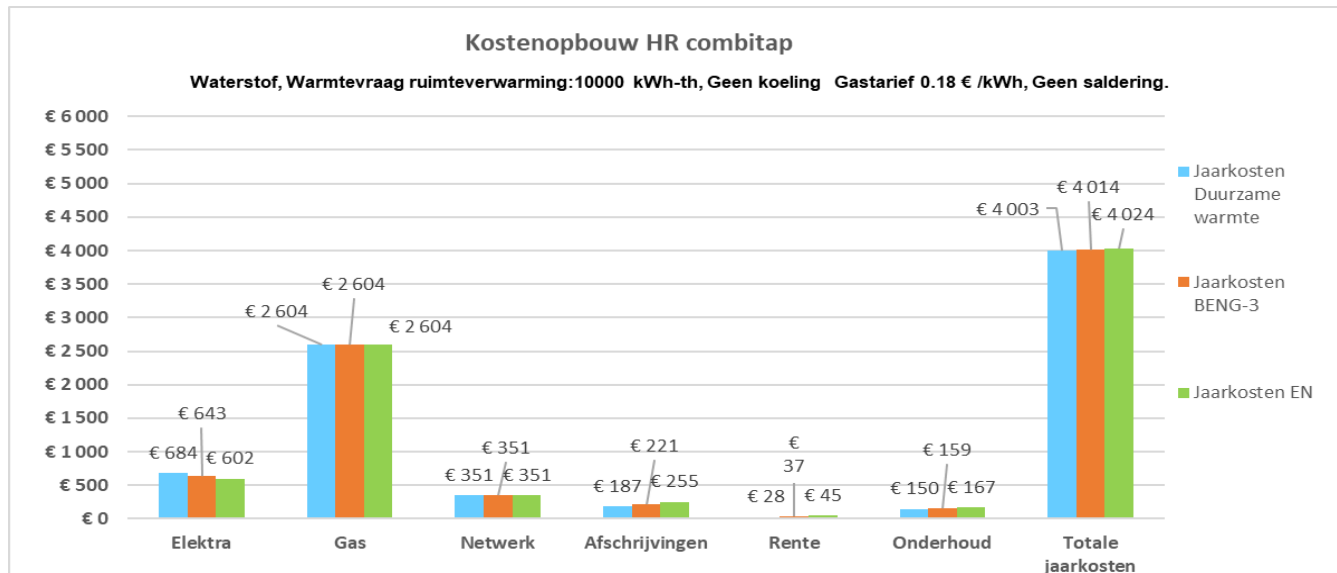


Fig-9 Kostenopbouw waterstof ketel met goedkope waterstof

11.3 Jaarkosten met een warmtepomp

In fig.10 worden de totale jaarkosten voor duurzame warmte voor alle varianten getoond voor een woning met een gemiddelde warmtevraag en een gasprijs variërend van € 0.08 - € 0.28 /kWh. Als referentie worden in deze grafiek ook de kosten getoond voor de huidige situatie met aardgas. (Bij de elektrische luchtwarmtepomp en de bodemwarmtepomp wordt geen gas verbruikt en wordt slechts 1 staaf in het diagram getoond.)

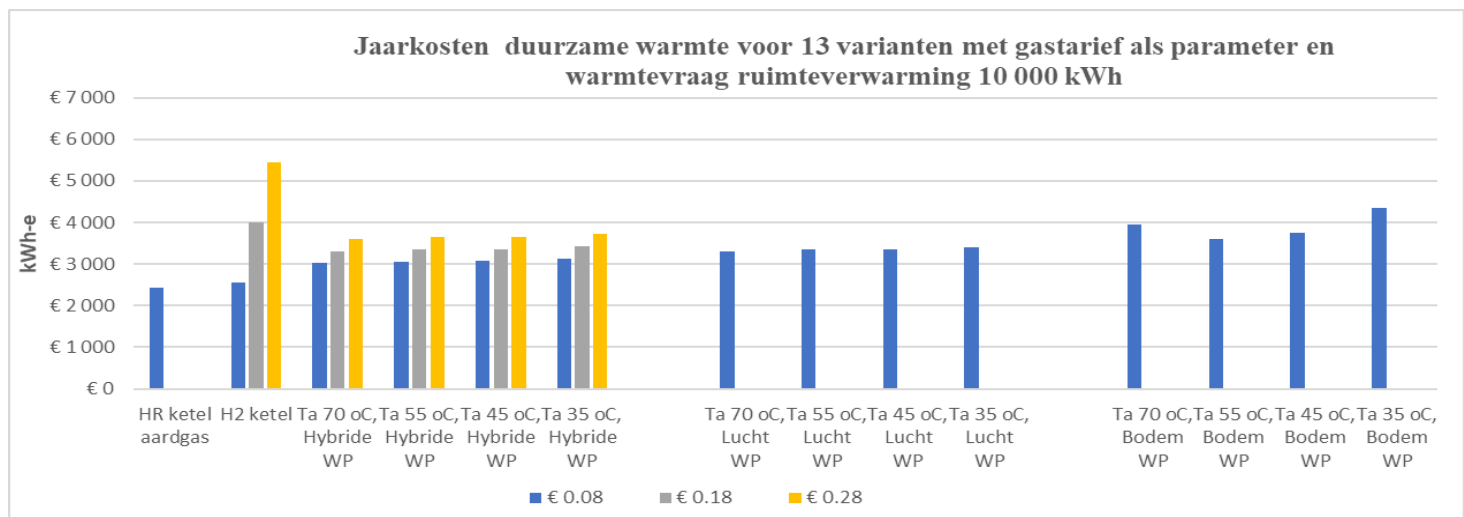


Fig. 10 Jaarkosten bij variërend gastarief

Uit deze fig. blijkt dat bij een gemiddelde warmtevraag de kostenverschillen tussen de varianten sterk afhankelijk zijn van de prijs van waterstof (of biogas). Als dat beschikbaar komt voor huidige prijs van aardgas (€ 0.08 / kWh), zullen de kosten met een warmtepomp beduidend hoger zijn dan met een HR ketel. Bij een hogere gasprijs wordt de warmtepomp voordeliger.

In fig. 11 worden deze jaarkosten bij de huidige gasprijs getoond voor de situaties Duurzaam, BENG-3 en Energie Neutraal. Hierbij is aangenomen dat er geen saldering voor opgewekte duurzame elektra plaats kan plaats vinden.

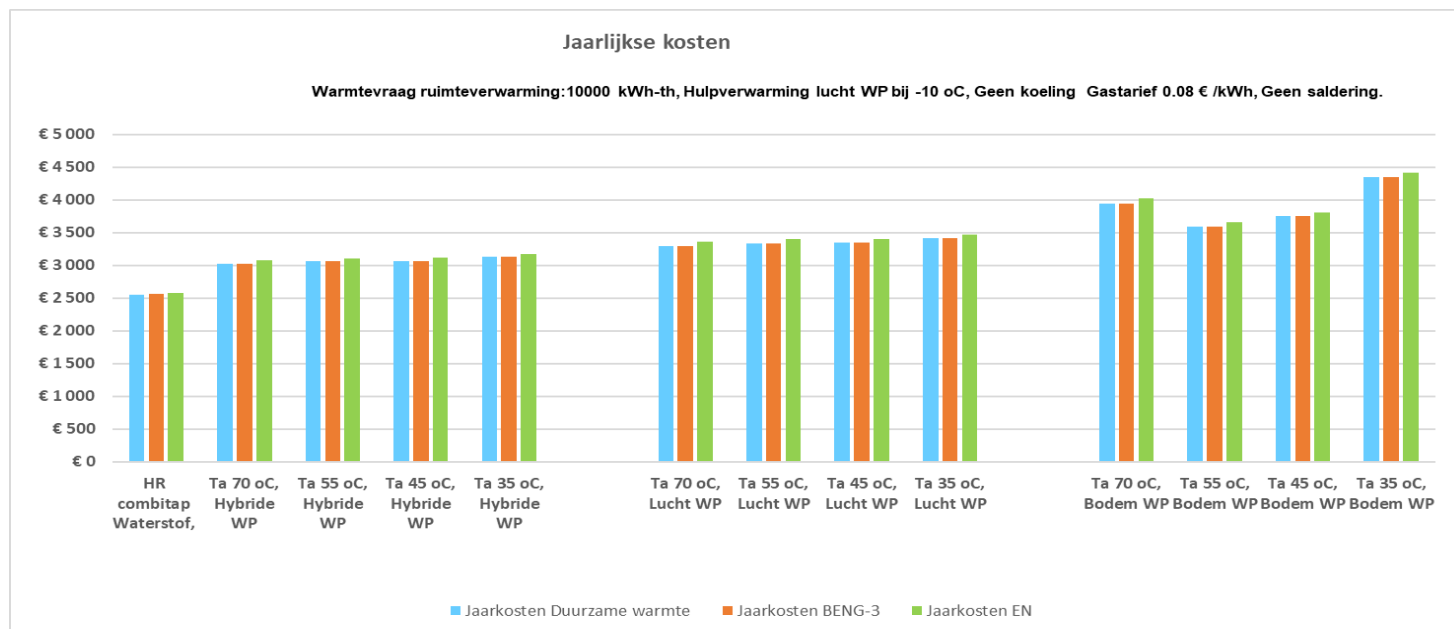


Fig.11 Jaarkosten voor Duurzaam, BENG-3 en Energie Neutraal

Volgens fig.6 zijn bij alle varianten voor een energie neutrale woning extra investeringen in PV panelen nodig, maar dat leidt volgens fig. 11 niet tot extra jaarkosten.

Om aan BENG-3 te voldoen moet men alleen voor de variant met de H₂ ketel nog extra investeren, maar die investering veroorzaakt volgens fig.11 ook vrijwel geen lastenstijging.

11.4 Kostenoptimalisatie warmtepompen

11.4.1 Hybride warmtepomp

Fig. 12-16 tonen de benodigde investeringen voor duurzame warmte als functie van de omschakeltemperatuur van de hulpverwarming bij een warmtevraag voor ruimteverwarming van 6 000 - 14 000 kWh/jaar.

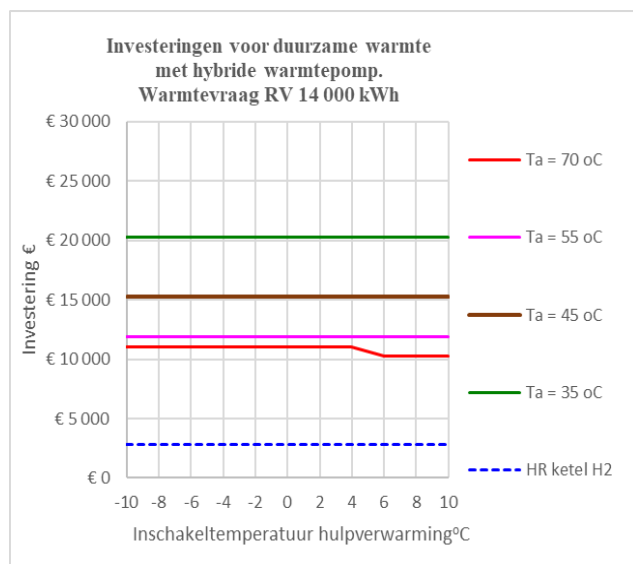


Fig. 12 Investering bij 14 000 KWh

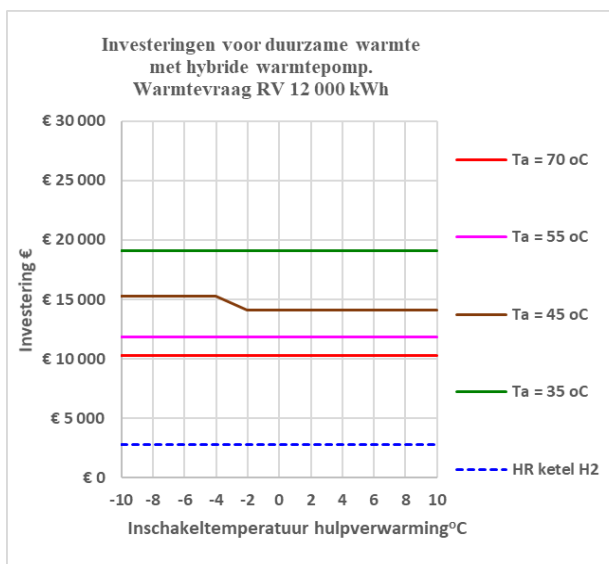


Fig. 13 Investering bij 12 000 KWh

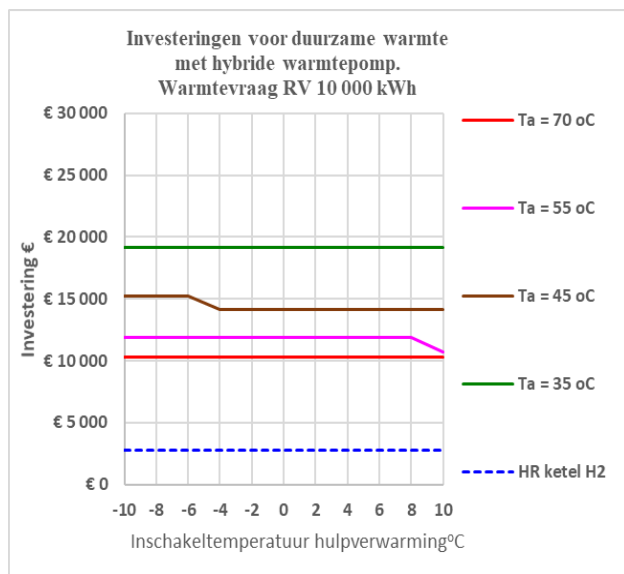


Fig. 14 Investering bij 14 000 KWh

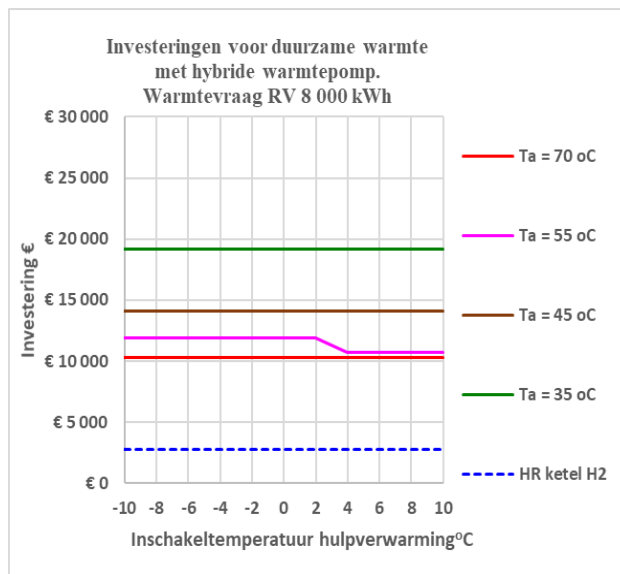


Fig. 15 Investering bij 8 000 KWh

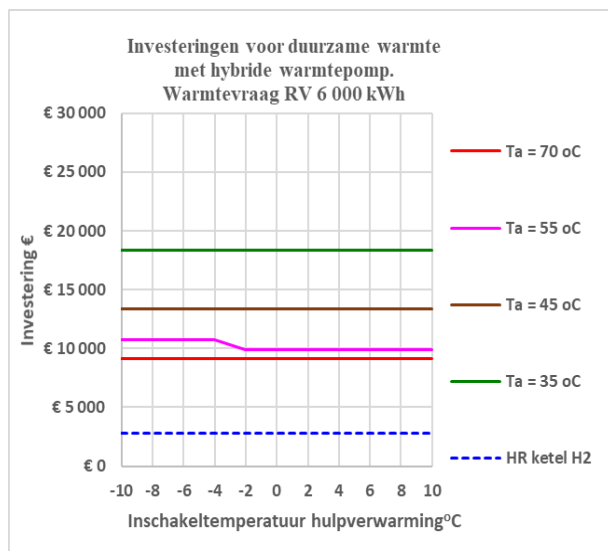


Fig. 16 Investering bij 6 000 KWh

De verschillen zijn vooral bepaald door de methode van warmteopwekking en warmte-distributie en in mindere mate door de warmtevraag.

De duurste variant 4 met vloerverwarming ($T_a=35\text{ }^{\circ}\text{C}$) vergt een investering van € 19 100,-. Bij handhaving van het bestaande warmtedistributiesysteem met $T_a = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ zijn de benodigde investeringen voor de hybride warmtepomp aanzienlijk minder, maar bedragen nog altijd € 10 300,-.

Door de temperatuur waarbij de hulpverwarming wordt ingeschakeld te verhogen kon in een aantal gevallen een lichtere warmtepomp worden geselecteerd. Dat leidt tot een lagere investering. Bij de jaarkosten wordt dit verder toegelicht.

Fig. 17-31 tonen de jaarlijkse kosten voor duurzame warmte bij een waterstofprijs van € 0.08 - € 0.28 per kWh en een warmtevraag van 6000 - 14 000 kWh.

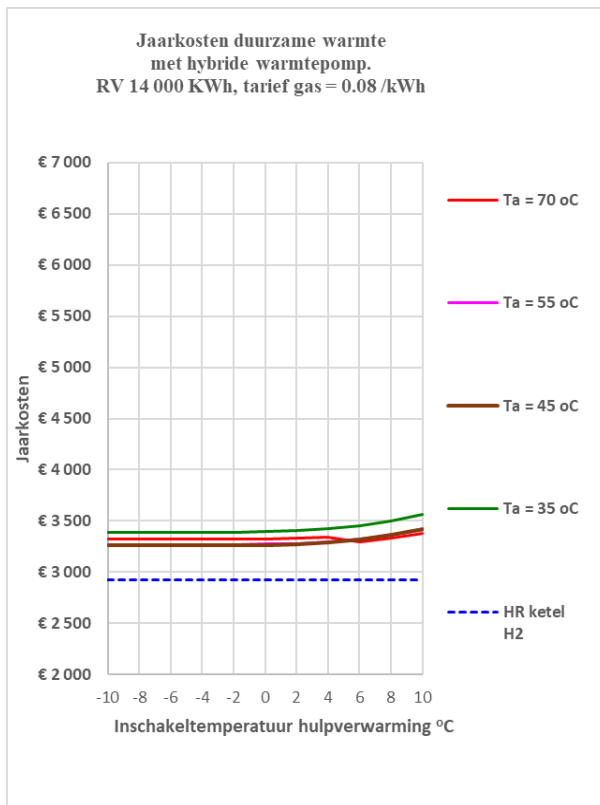
Jaarkosten bij warmtevraag voor ruimteverwarming = 14 000 kWh

Fig. 17

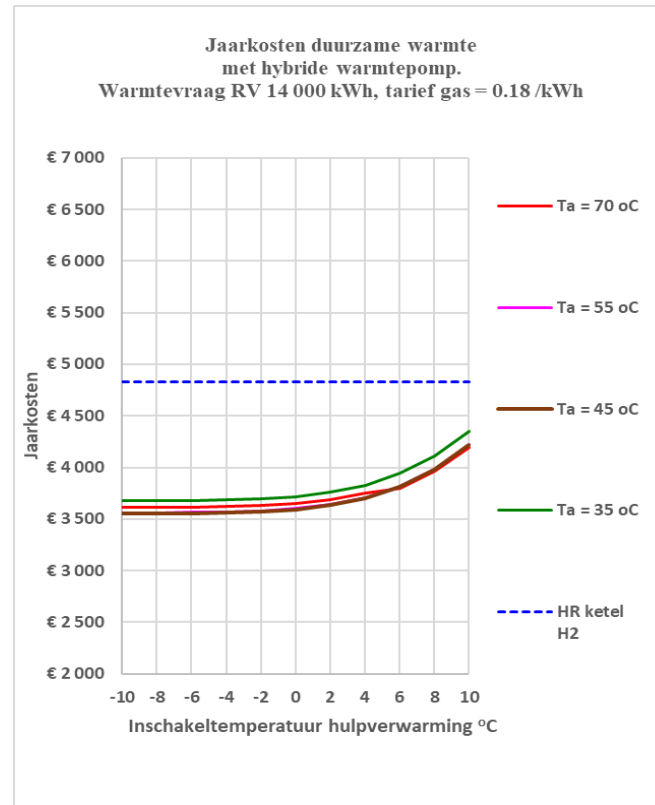


Fig. 18

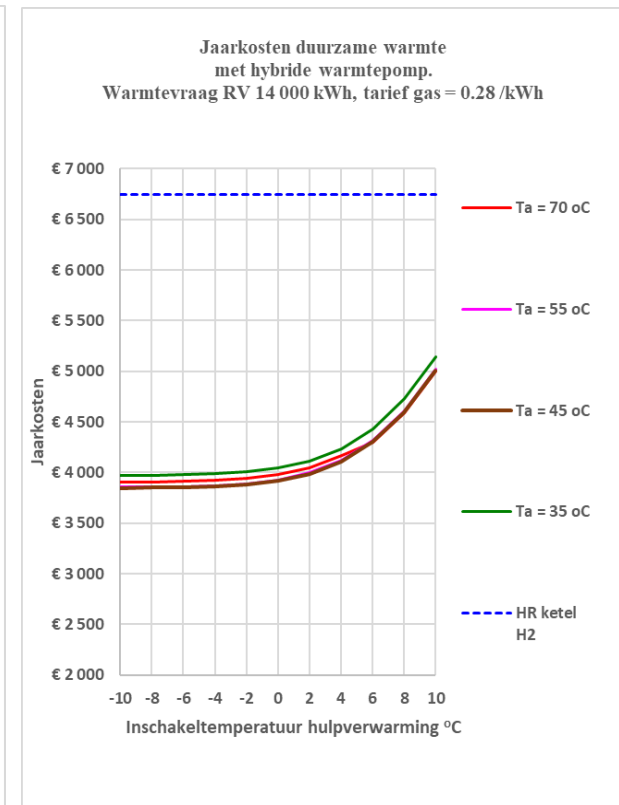


Fig. 19

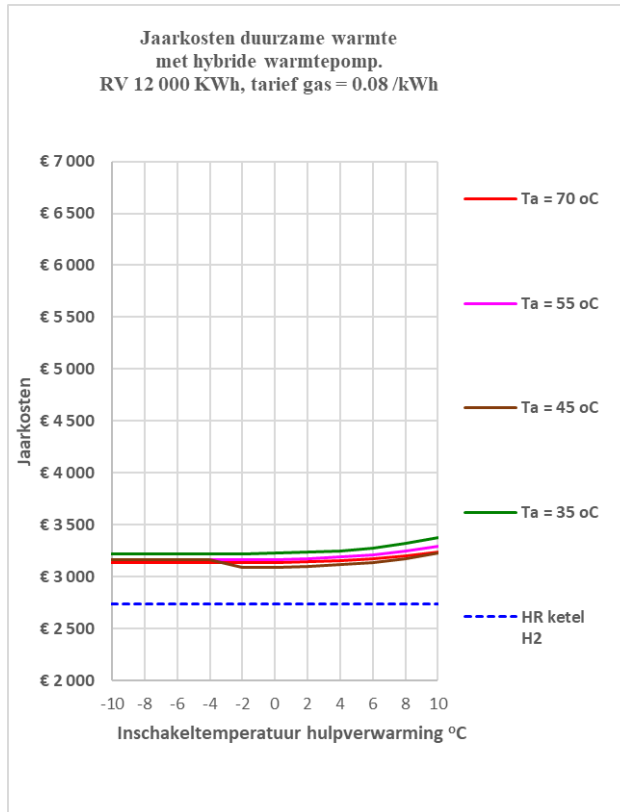
Jaarkosten bij warmtevraag voor ruimteverwarming = 12 000 kWh

Fig. 20

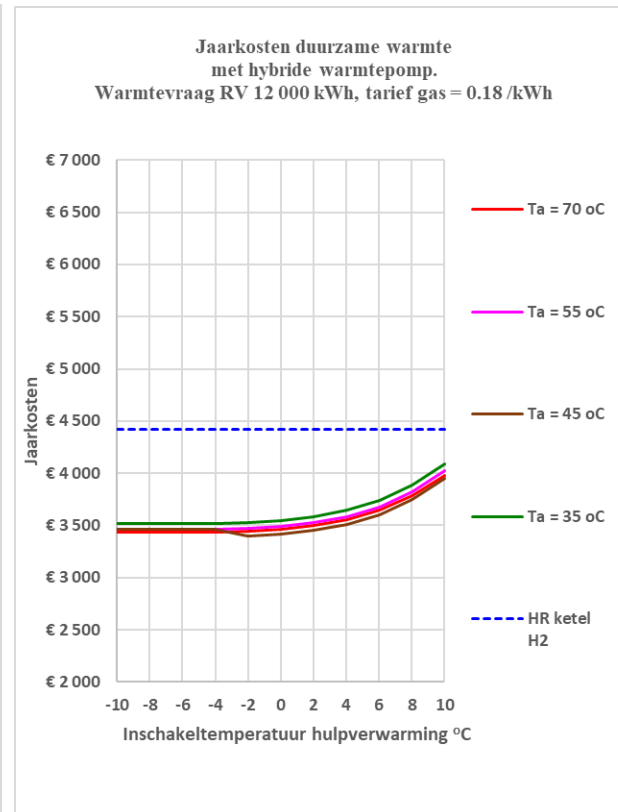


Fig. 21

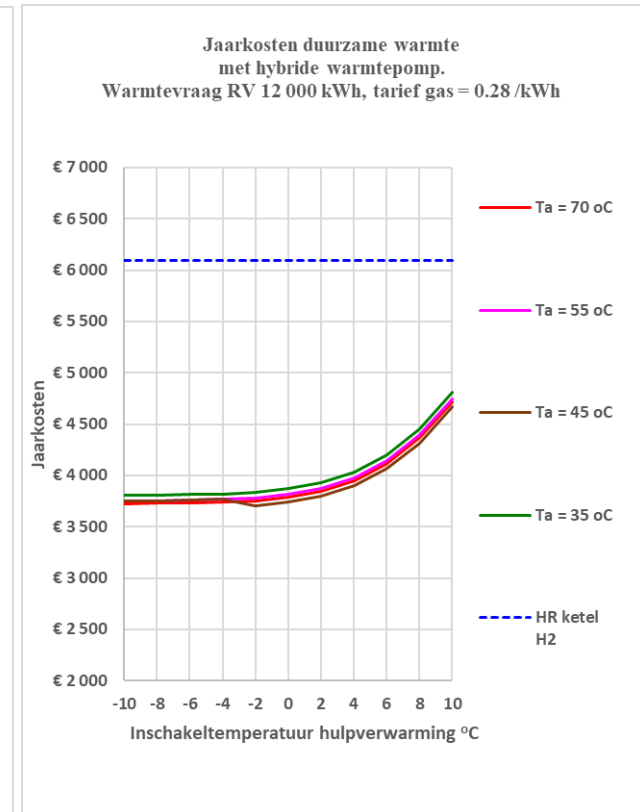


Fig. 22

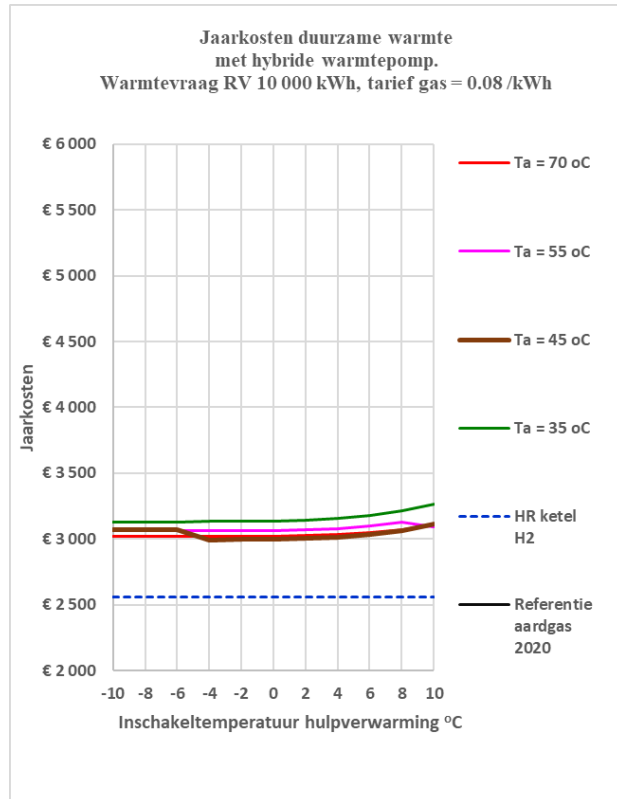
Jaarkosten bij warmtevraag voor ruimteverwarming = 10 000 kWh

Fig. 23

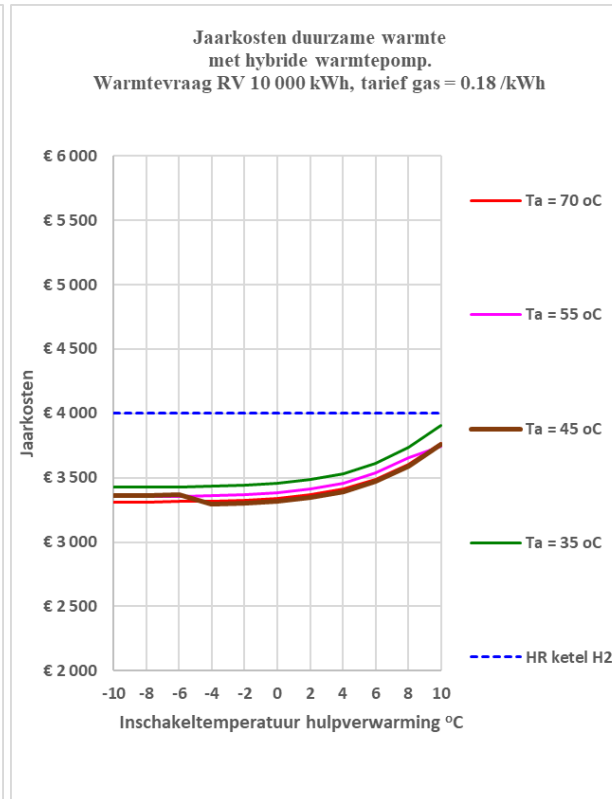


Fig. 24

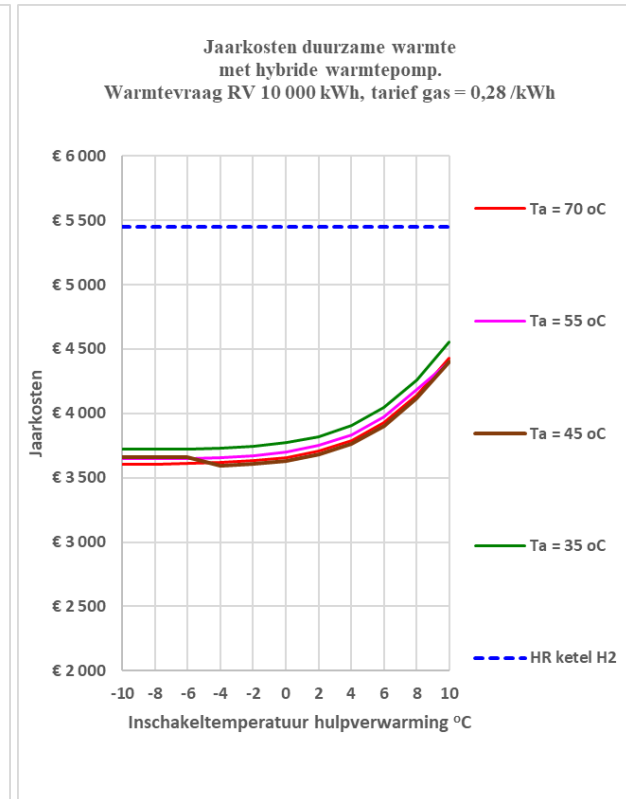


Fig. 25

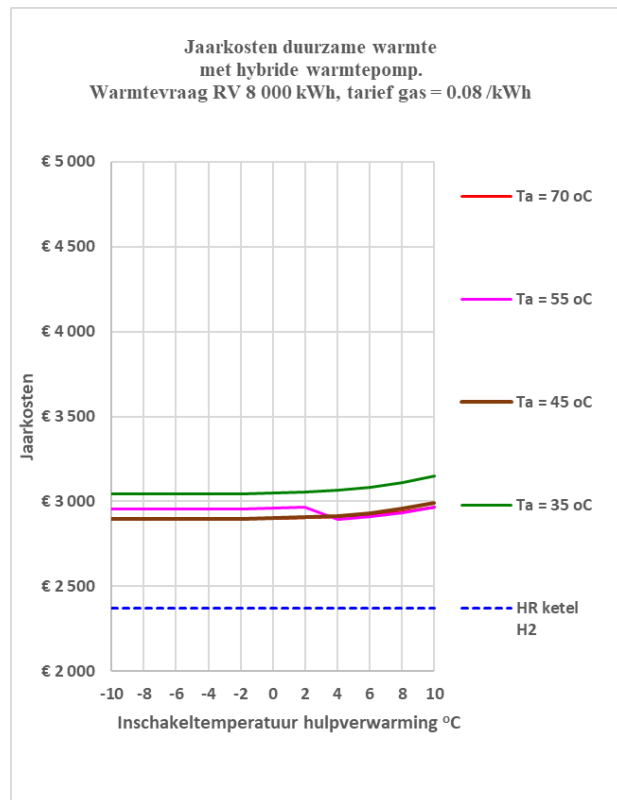
Jaarkosten bij warmtevraag voor ruimteverwarming = 8 000 kWh

Fig. 26

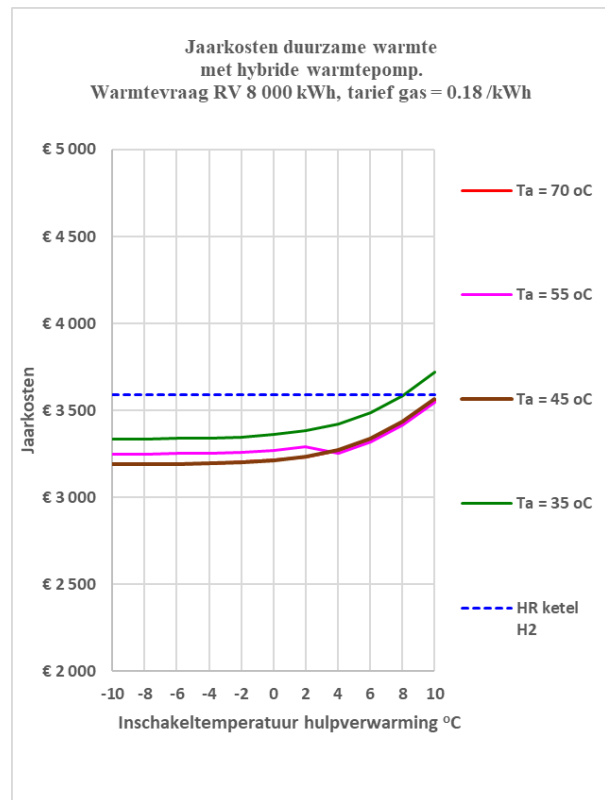


Fig. 27

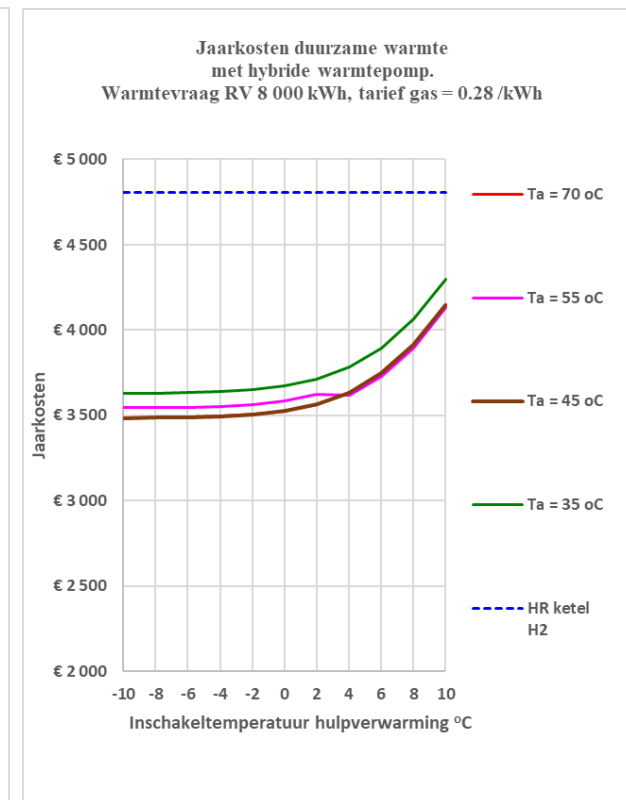


Fig. 28

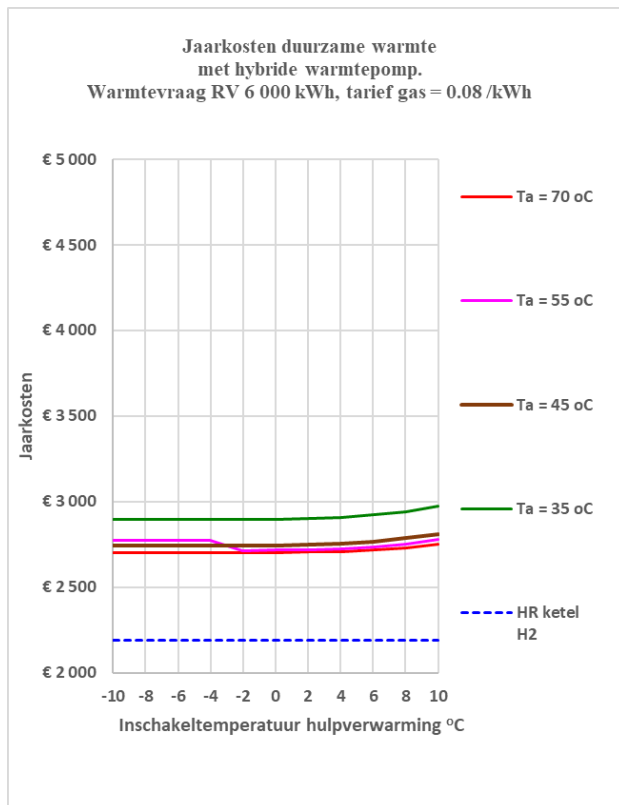
Jaarkosten bij warmtevraag voor ruimteverwarming = 6 000 KWh

Fig. 29

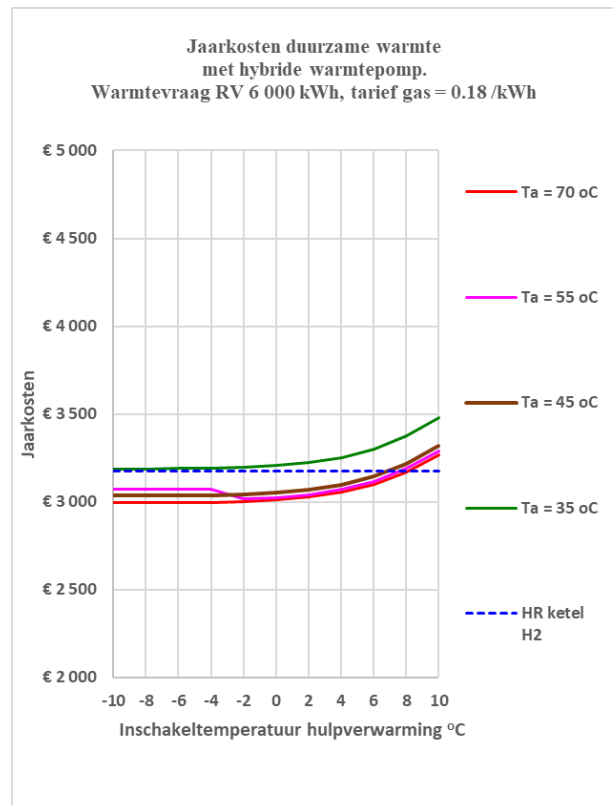


Fig. 30

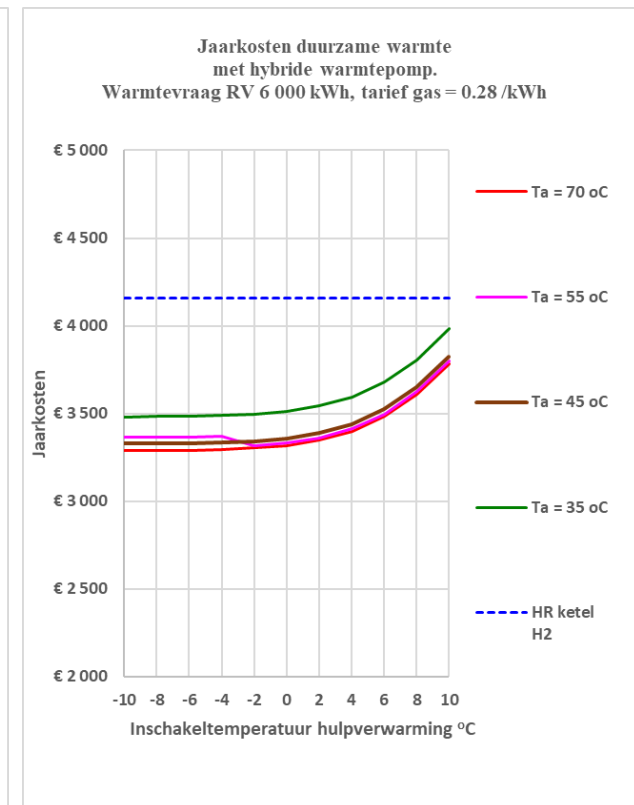


Fig. 31

In deze grafieken is te zien dat bij een inschakeltemp van de hulpverwarming hoger dan 0 °C de jaarkosten gaan stijgen: Er wordt dan substantieel meer gas verbruikt, zie fig.32

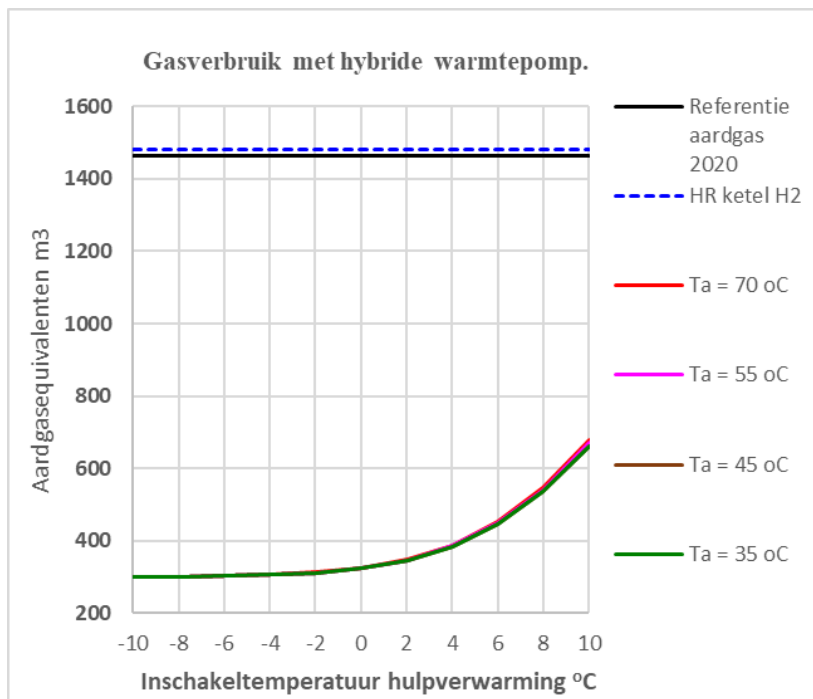


Fig. 32 Gasverbruik bij warmtevraag ruimteverwarming 10 000 kWh

Ook is te zien dat vloerverwarming in de bestaande woningbouw financieel niet aantrekkelijk is. Dit leidt in alle gevallen tot de hoogste jaarkosten.

Verder zijn de verschillen in jaarkosten tussen de warmtedistributiesystemen vrij klein. Bij een warmtevraag tot 8 000 kWh kan men het best de bestaande radiatoren (70 °C) blijven gebruiken, maar bij een hogere warmtevraag loont het om te investeren in een Lage Temperatuur verwarming: Boosters (55 °C) of Lage temperatuur Radiatoren (45 °C).

In een aantal situaties is een kleine stapsgewijze daling van de jaarkosten mogelijk als de warmtepomp zo wordt gedimensioneerd dat bij een hogere temperatuur dan -10 °C de hulpverwarming moet worden ingeschakeld. Dit omslagpunt is niet afhankelijk van de gasprijs. Bij een hogere warmtevraag verschuift dit omslagpunt naar een hogere inschakeltemperatuur. In de fig. 33 en 34 wordt de kostenopbouw voor deze situaties bij een warmtevraag van 10 000 kWh getoond. Deze kostendaling blijkt te worden veroorzaakt doordat een iets kleinere warmtepomp kon worden geselecteerd, zie fig.35, resulterend in een wat lagere investering, rente en afschrijving.

Fig. 36 toont de benodigde netaansluiting voor een energie neutrale woning. Deze ligt voor alle onderzochte situaties tussen de 16 en 18 kW.

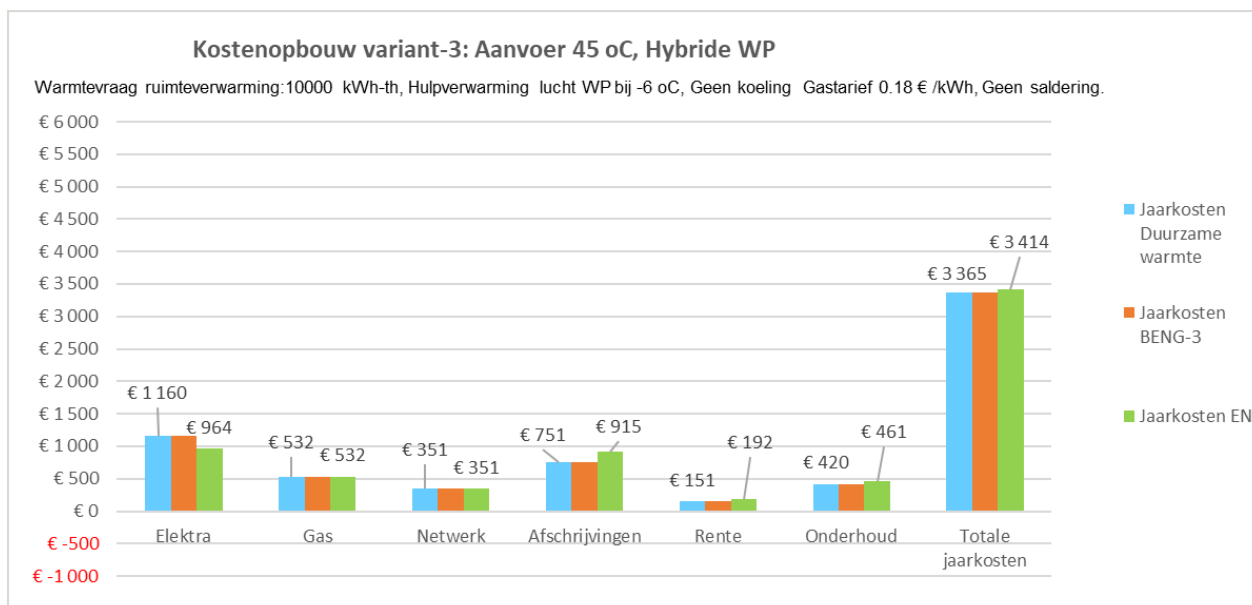


Fig. 33 Jaarkosten bij inschakeltemp -6 °C

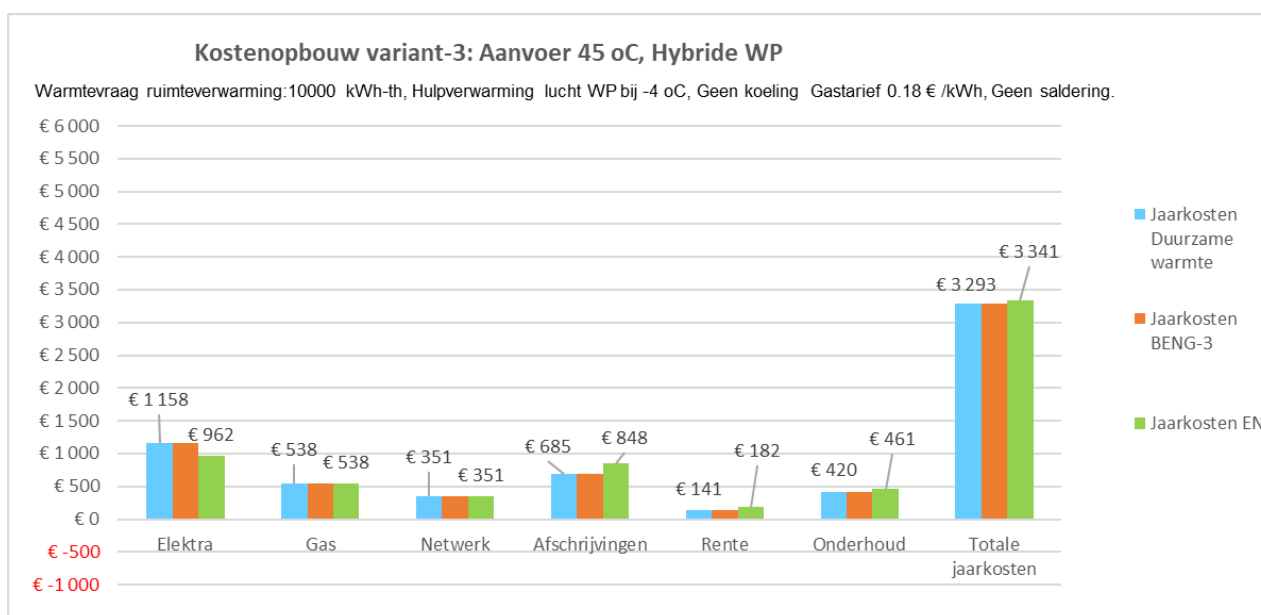


Fig. 34 Jaarkosten bij inschakeltemp -4 °C

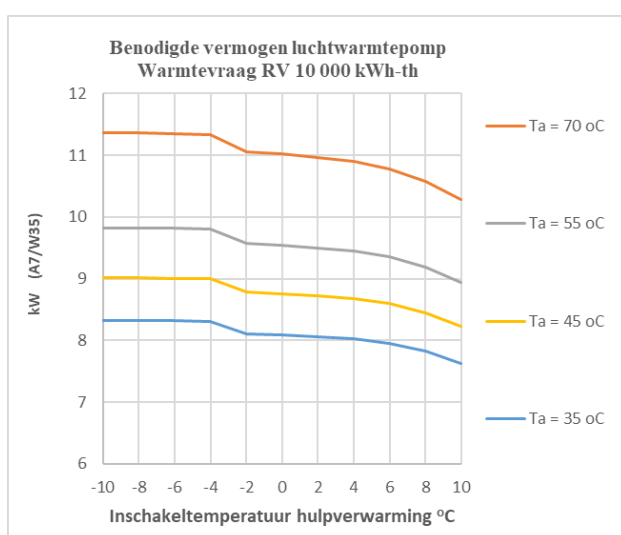


Fig. 35 Benodigd vermogen luchtwarmtepomp

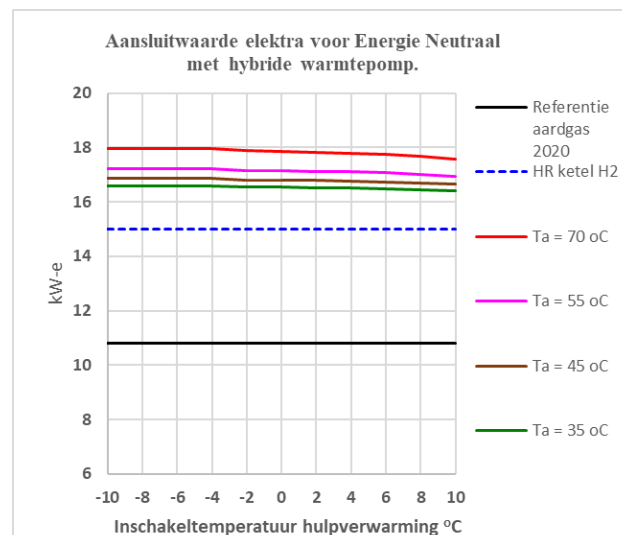


Fig. 36 Aansluitwaarde elektra met hybride warmtepomp

De investeringen en jaarkosten met de optimale instellingen staan vermeld in tabel-9 en fig. 37 en 38

Warmte-opwekking	Warmtevraag ruimteverwarming	T-aanvoer optimaal	T hulpverwarming	Variant	Investering	Jaarkosten bij gasprijs		
	kWh	°C	°C	nr	€	€ 0.08	€ 0.18	€ 0.28
Hybride warmtepomp	6 000	70	-10	1	€ 9 129	€ 2 702	€ 2 996	€ 3 289
	8 000	70	-10	1	€ 10 129	€ 2 899	€ 3 192	€ 3 486
	10 000	45	-4	3	€ 14 129	€ 2 994	€ 3 293	€ 3 591
	12 000	45	-2	3	€ 14 129	€ 3 091	€ 3 398	€ 3 705
	14 000	55	-10	2	€ 11 729	€ 3 268	€ 3 562	€ 3 856

Tabel 9

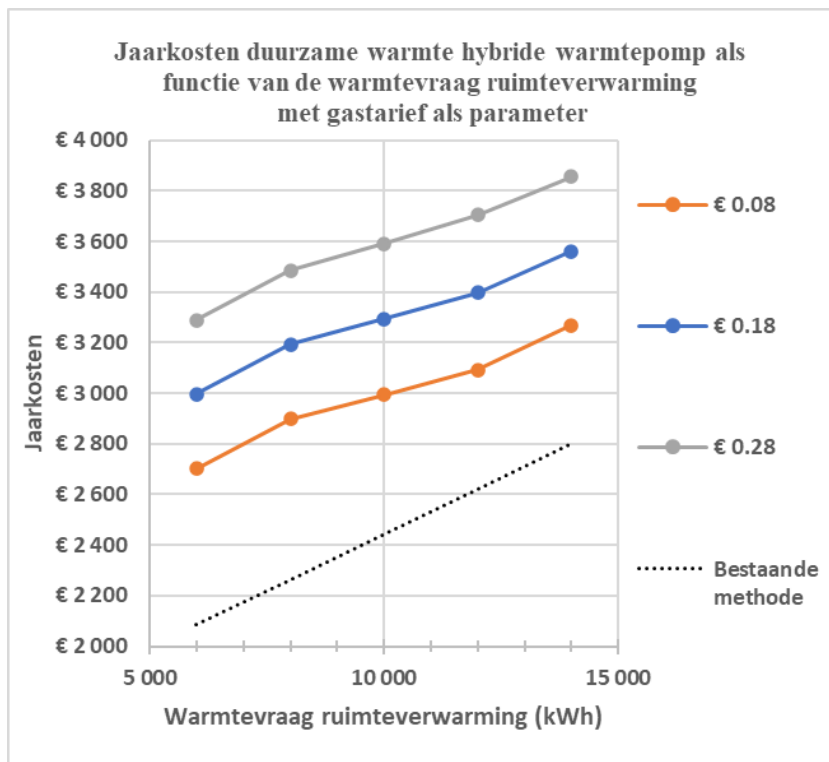


Fig. 37 Jaarkosten bij optimale instellingen hybride warmtepomp

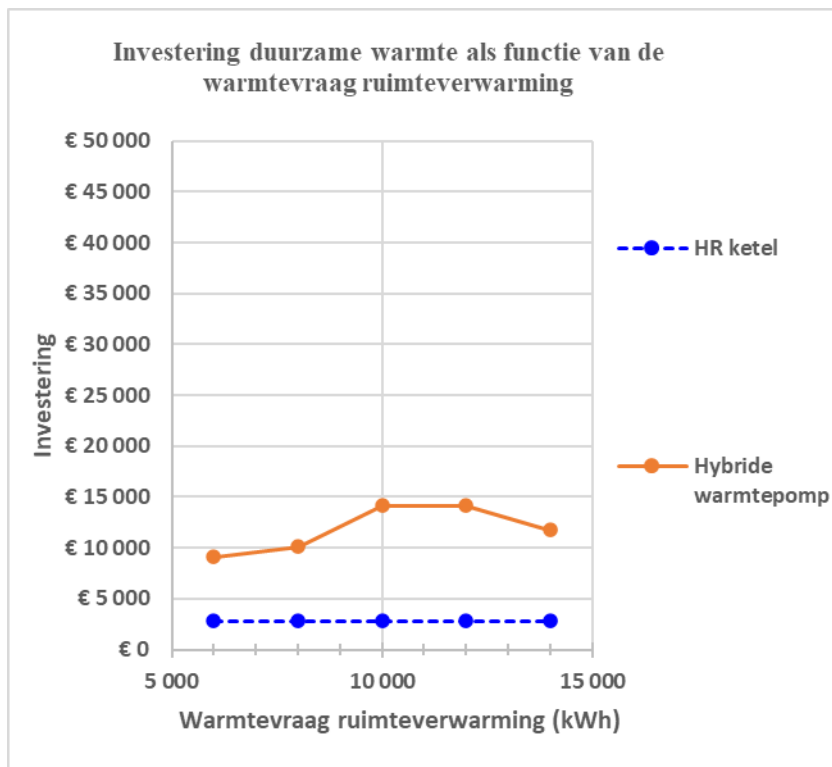


Fig. 38 Investering duurzame warmte met hybride warmtepomp

Opmerkelijk is dat bij een warmtevraag voor ruimteverwarming van 14 000 kWh de benodigde investering afneemt. De oorzaak hiervan is dat bij 14 000 kWh een zwaardere pomp nodig was. Hierdoor waren geen Lage Temperatuur radiatoren meer nodig, maar kon worden volstaan met het plaatsen van boosters.

11.4.1.1 Elektrische luchtwarmtepomp

De varianten met een elektrische luchtwarmtepompen verbruiken geen gas. De prijs van waterstof speelt dus geen rol. In fig. 39-48 worden de jaarkosten en de benodigde investeringen als functie van de inschakeltemperatuur van de hulverwarming getoond voor een warmtevraag van 6 000 - 14 000 kWh.

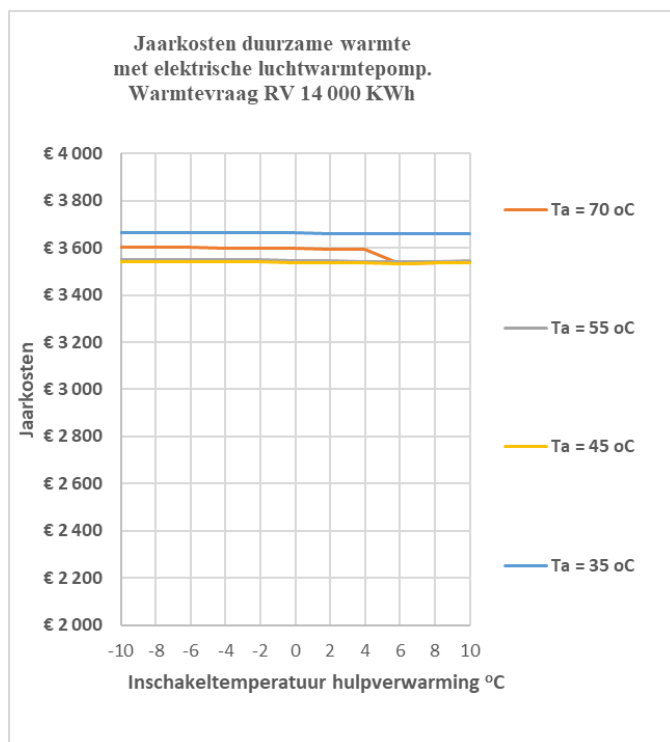


Fig. 39

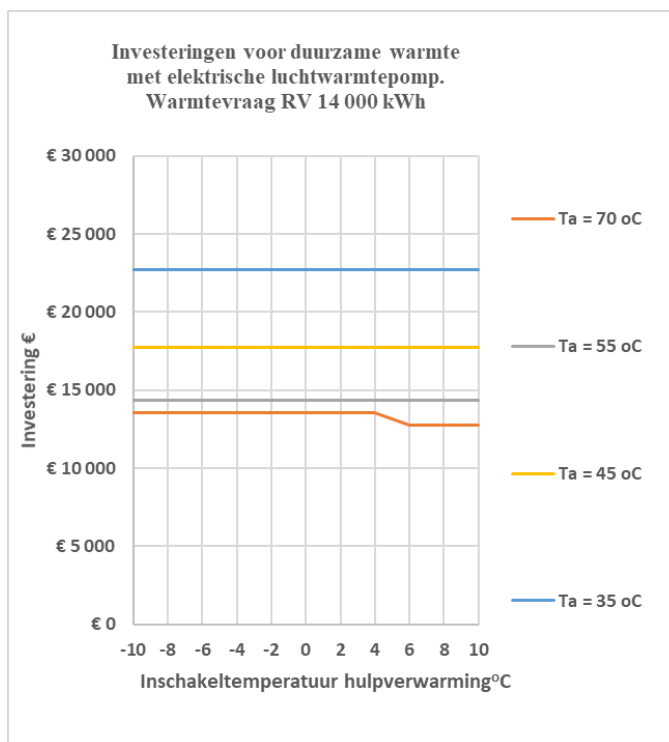


Fig. 40

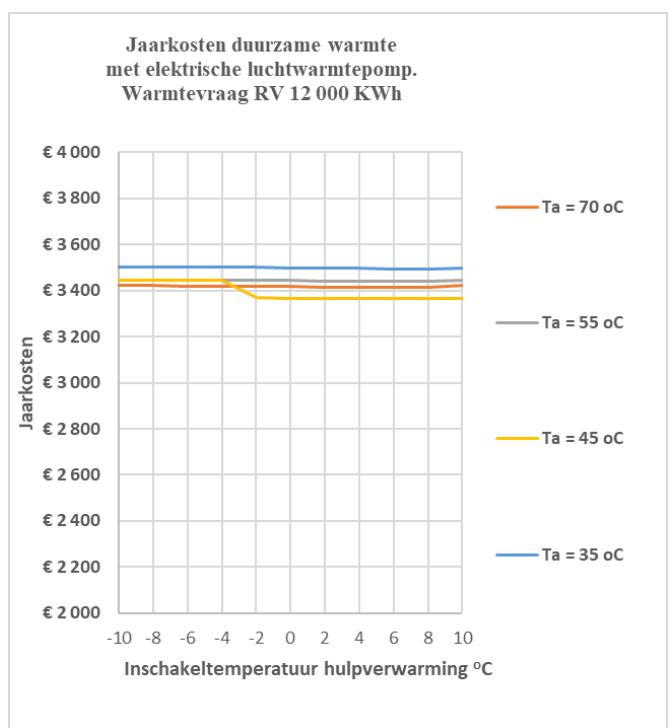


Fig. 41

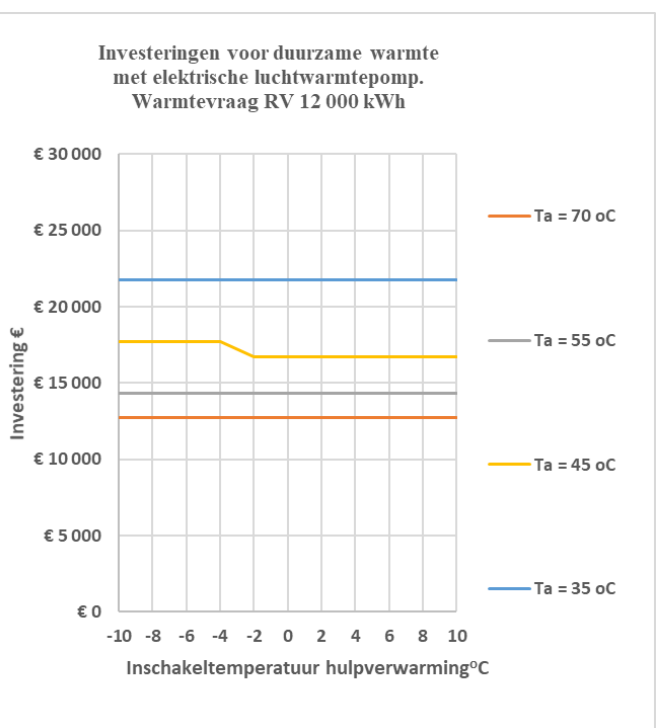


Fig. 42

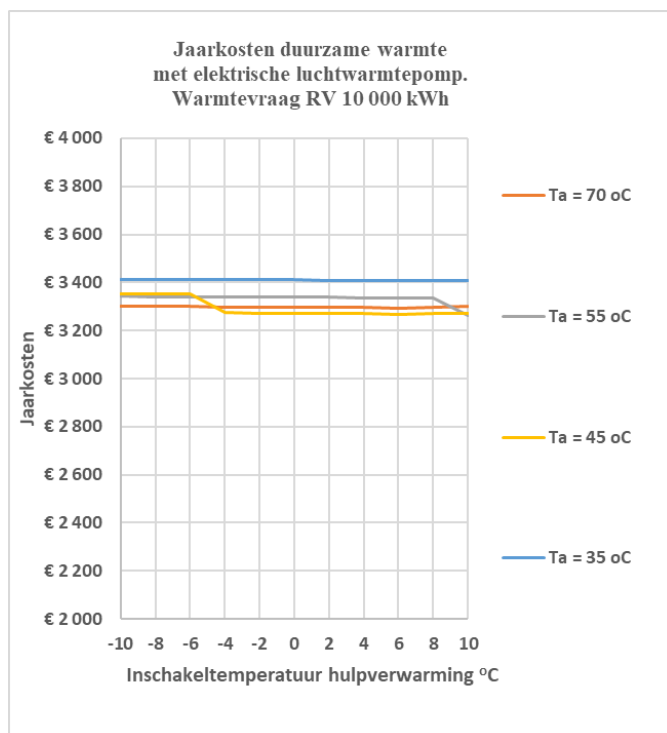


Fig. 43

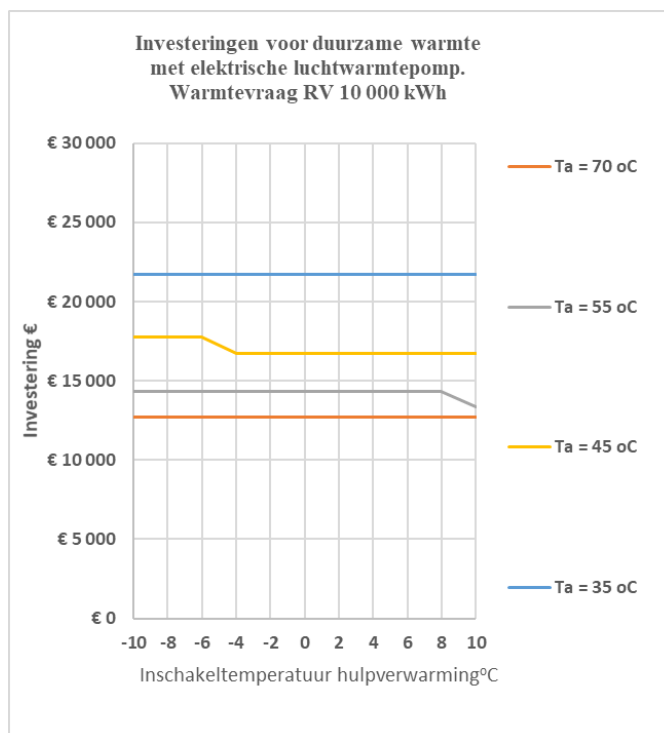


Fig. 44

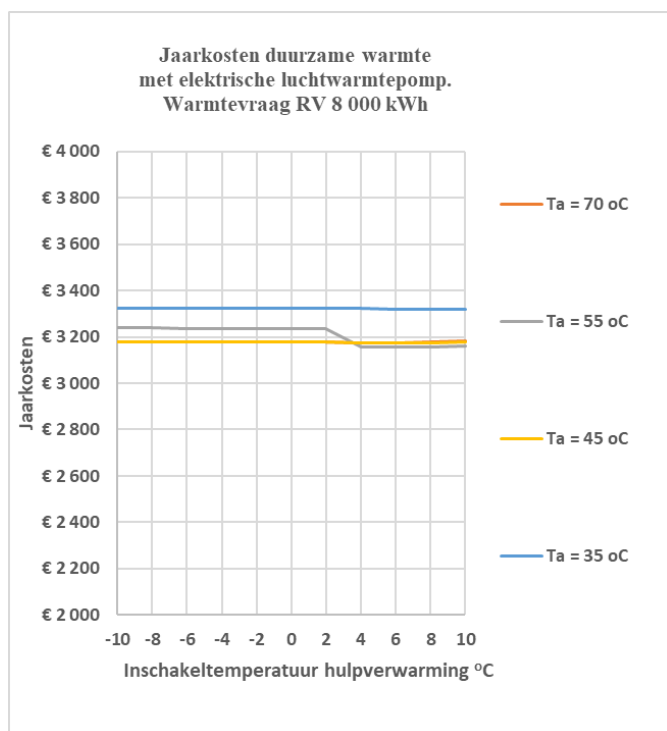


Fig. 45

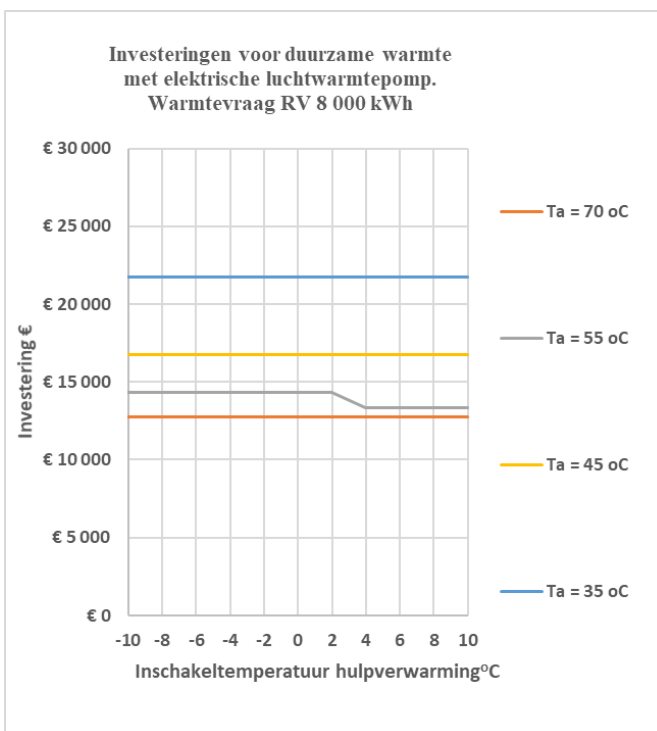


Fig. 46

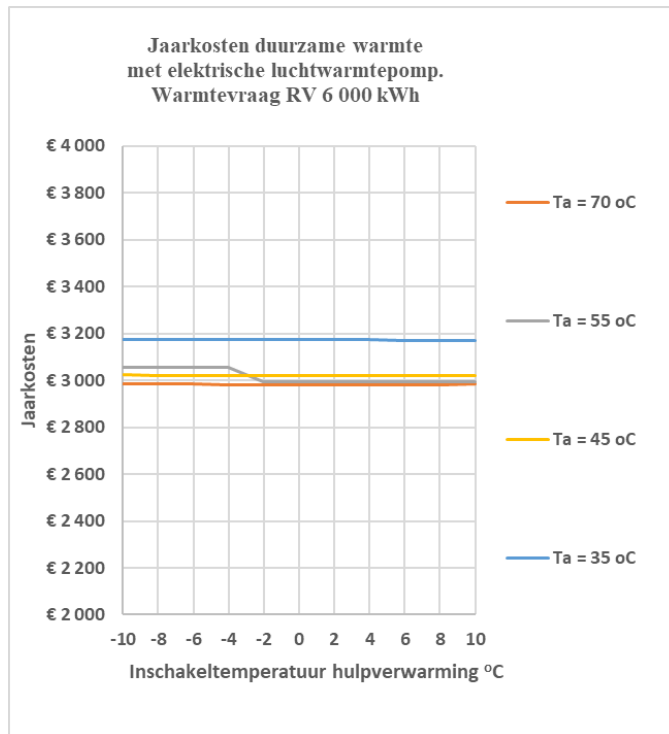


Fig. 47

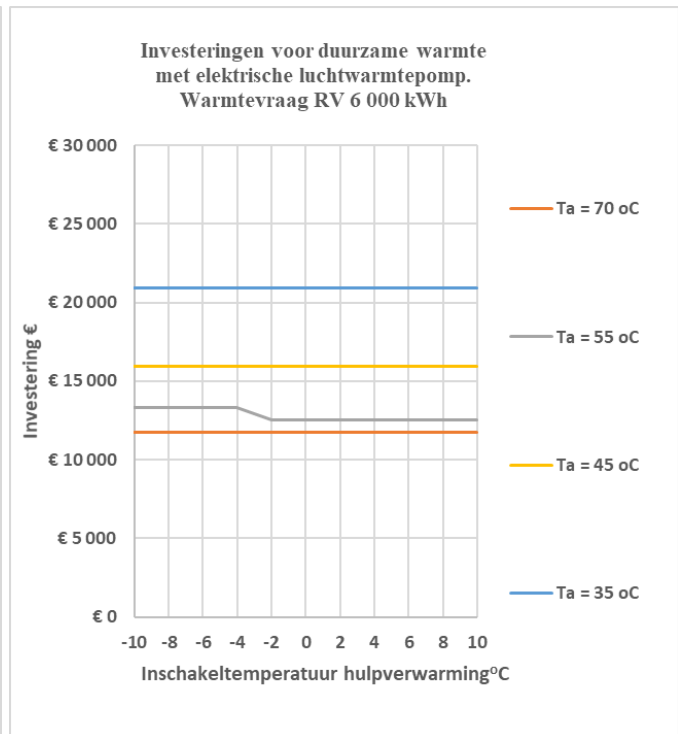


Fig. 48

De grafieken vertonen veel overeenkomst met de grafieken in fig. 17-31 voor de hybride warmtepomp. De sterke kostenstijging bij inschakeltemperaturen boven de 0 °C blijft achterwege omdat bij het inschakelen van de hulpverwarming bij de hybride warmtepomp de HR ketel alle warmtelevering overneemt en bij de elektrische luchtwarmtepomp de elektrische spiraal alleen als hulpverwarming wordt gebruikt om de tekorten van de warmtepomp op te vangen. Dit leidt tot een lager verbruik van hulpenergie. De optimale aanvoertemperaturen zijn bij de elektrische luchtwarmtepomp vrijwel hetzelfde als bij de hybride warmtepomp.

De investeringen en jaarkosten met de optimale instellingen staan vermeld in tabel-10 en fig. 49 en 50

Warmte-opwekking	Warmtevraag ruimteverwarming	T-aanvoer optimaal	T hulpverwarming	Variant	Investering	Jaarkosten bij gasprijs		
	kWh	°C	°C	nr	€	€ 0.08	€ 0.18	€ 0.28
Elektrische Lucht-warmtepomp	6 000	70	-10	5	€ 11 737	€ 2 983	€ 2 983	€ 2 983
	8 000	70	-10	5	€ 12 737	€ 3 180	€ 3 180	€ 3 180
	10 000	45	-4	7	€ 16 737	€ 3 274	€ 3 274	€ 3 274
	12 000	45	-2	7	€ 16 737	€ 3 368	€ 3 368	€ 3 368
	14 000	55	-10	6	€ 14 337	€ 3 550	€ 3 550	€ 3 550

Tabel 10

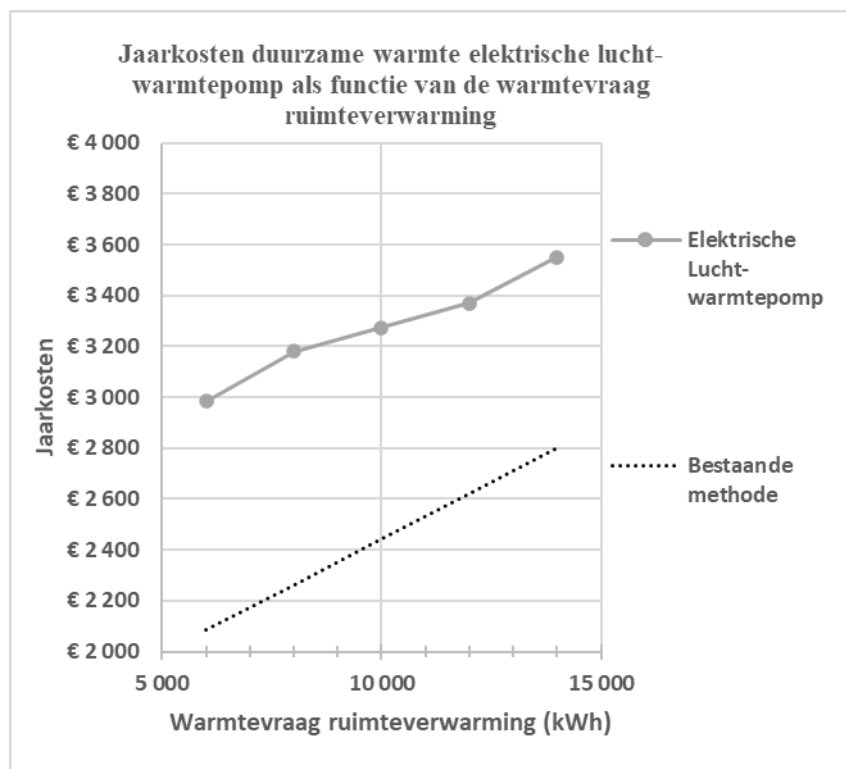


Fig. 49 Jaarkosten bij optimale instellingen elektrische luchtwarmtepomp

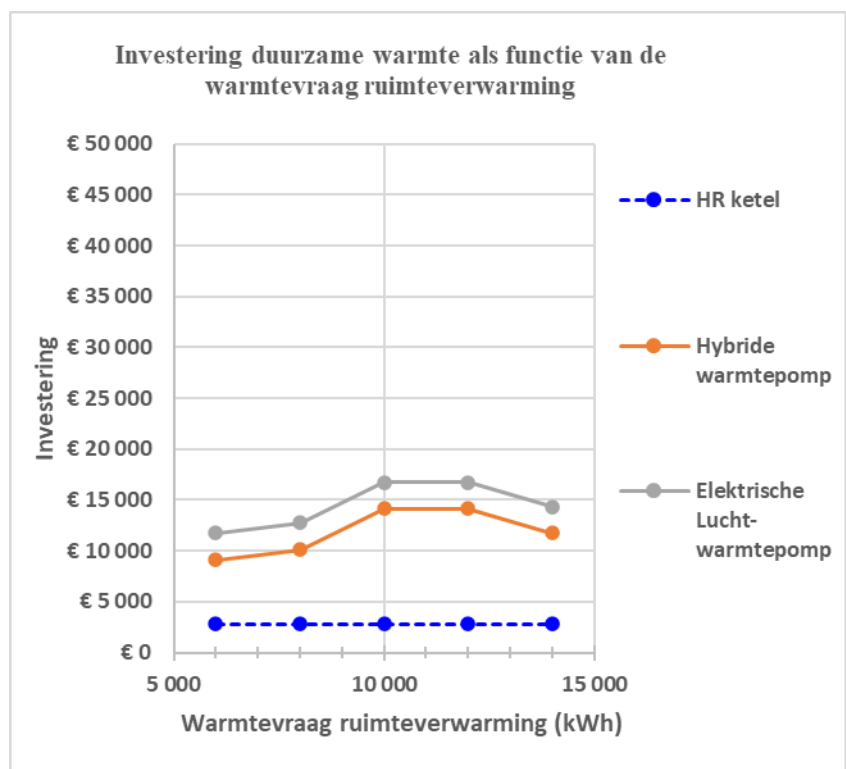


Fig. 50 Investerings elektrische luchtwarmtepomp

11.4.2 Bodemwarmtepomp

In fig. 51 worden de jaarkosten voor de varianten met de bodemwarmtepomp weergegeven bij een warmtevraag voor ruimteverwarming van 6 000 – 14 000 kWh/jaar. In de grafiek is af te lezen dat de optimale aanvoertemperatuur van het warmtedistributiesysteem 45 °C is.

De benodigde investeringen en jaarkosten als functie van de warmtevraag bij deze aanvoertemperatuur zijn afgebeeld in fig. 52 en 53

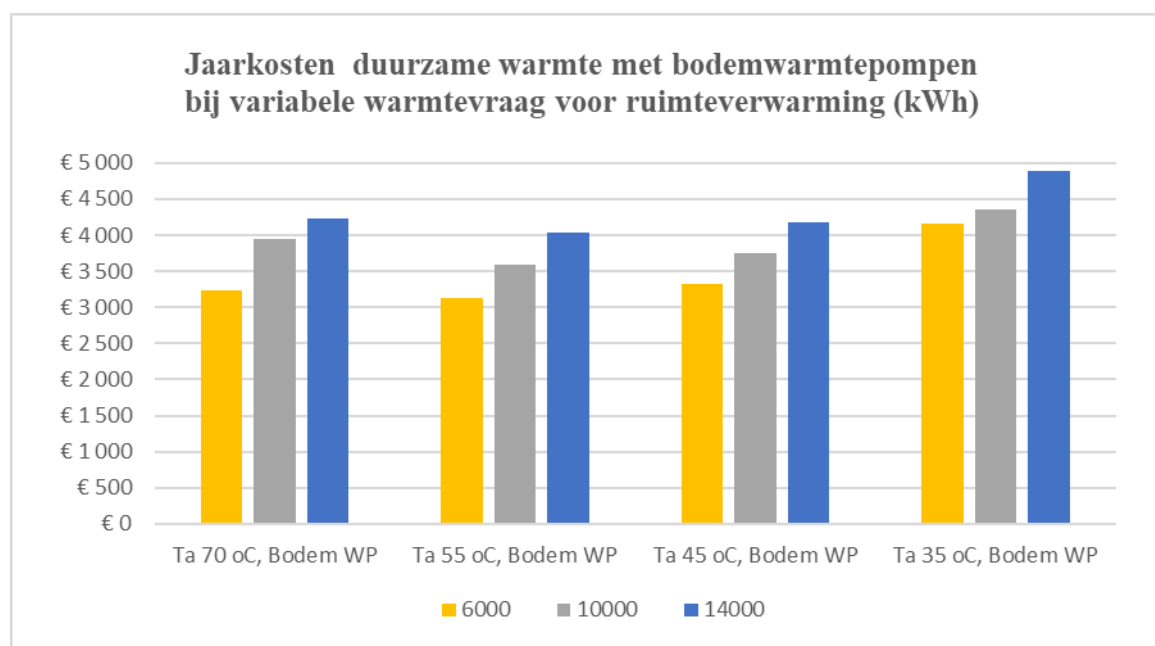


Fig. 51 Jaarkosten bodemwarmtepomp

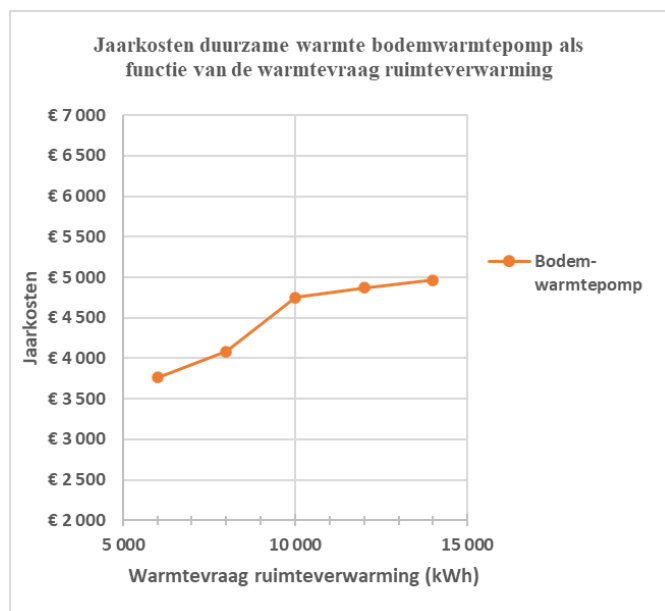


Fig. 52 Jaarkosten bij optimale instelling bodemwarmtepomp

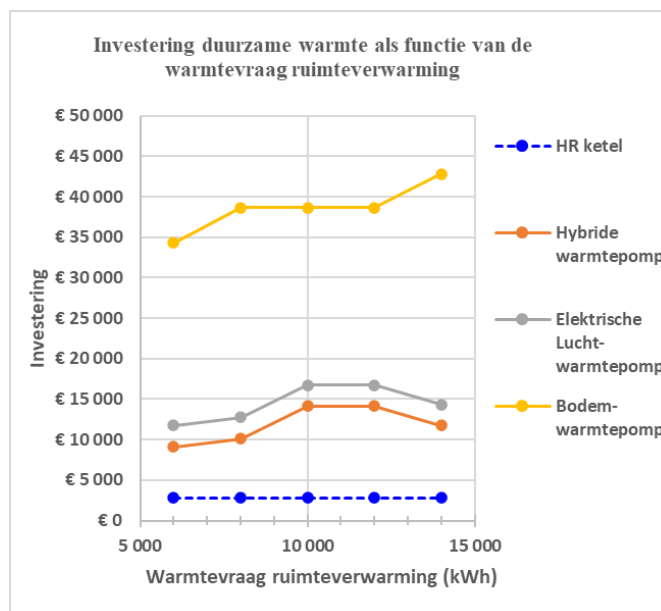


Fig. 53 Investerings bodemwarmtepomp

11.5 Netwerkkosten

De netwerkkosten als functie van de warmtevraag, bij een optimaal warmtedistributiesysteem en een optimale inschakeling van de hulpenergie bij luchtwarmtepompen, zijn weergegeven in fig.54. Op de rechter y-as zijn de kosten af te lezen als de tarieven 40% zouden stijgen.

De grafiek is gebaseerd op een benodigde aansluitcapaciteit voor eigen verbruik elektra + inductiekoken van 15 kW.

Bij de elektrische luchtwarmtepomp zijn de netwerkkosten het hoogst en is men het meest gevoelig voor een toekomstige stijging van de netwerktarieven.

De laagste netwerkkosten hebben de variant met een HR ketel en de variant met een hybride warmtepomp. Deze netwerkkosten zijn even hoog en op de grafiek niet te onderscheiden.

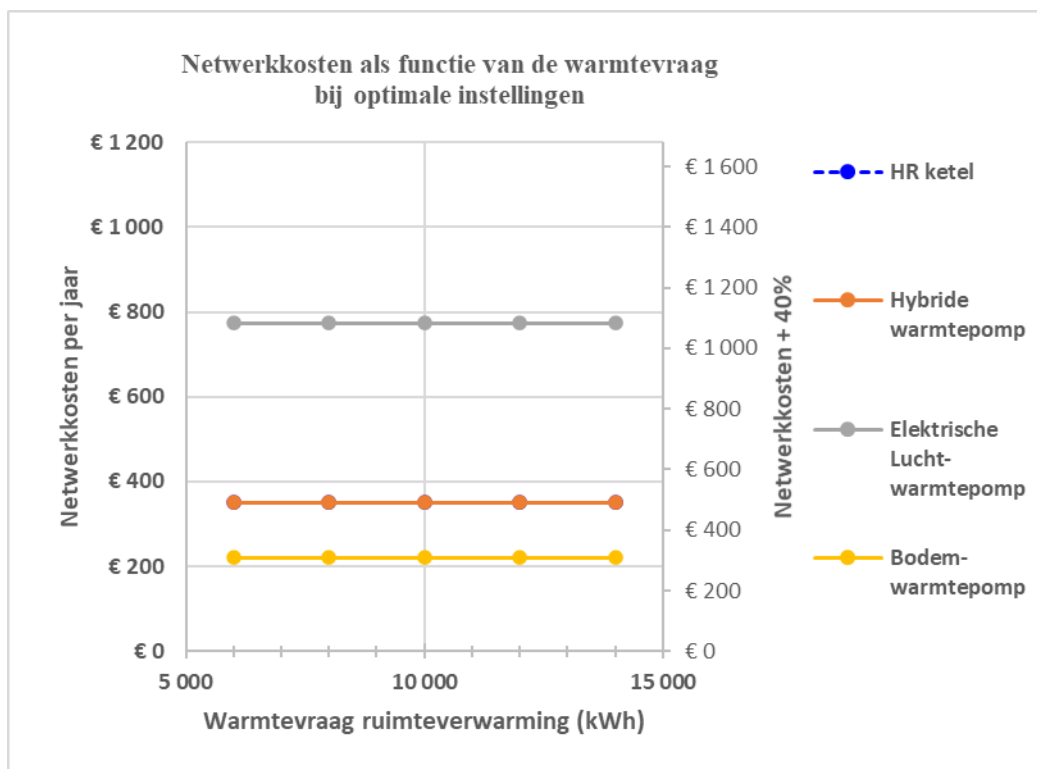


Fig. 54 Netwerkkosten

11.6 Saldering en Energie Neutraal

Bij de scenario's waarin alleen Duurzame Warmte wordt opgewekt heeft de salderingsregeling geen invloed op de jaarkosten, maar bij een Energie Neutrale woning is dat wel het geval.

Omdat deze regeling in 8 jaar wordt afgebouwd is dit tijdelijke voordeel bij een Energie Neutrale woning, tenzij anders vermeld, niet meegenomen. In dit hoofdstuk wordt berekend wat de invloed van de salderingsregeling op de berekende jaarkosten is.

Fig. 55 toont de kostenverdeling voor Duurzame warmte, BENG-3 en Energie Neutraal voor de geoptimaliseerde variant-3 zonder toepassing van de huidige salderingsregeling.

In fig. 56 worden deze kosten getoond zonder toepassing van deze salderingsregeling.

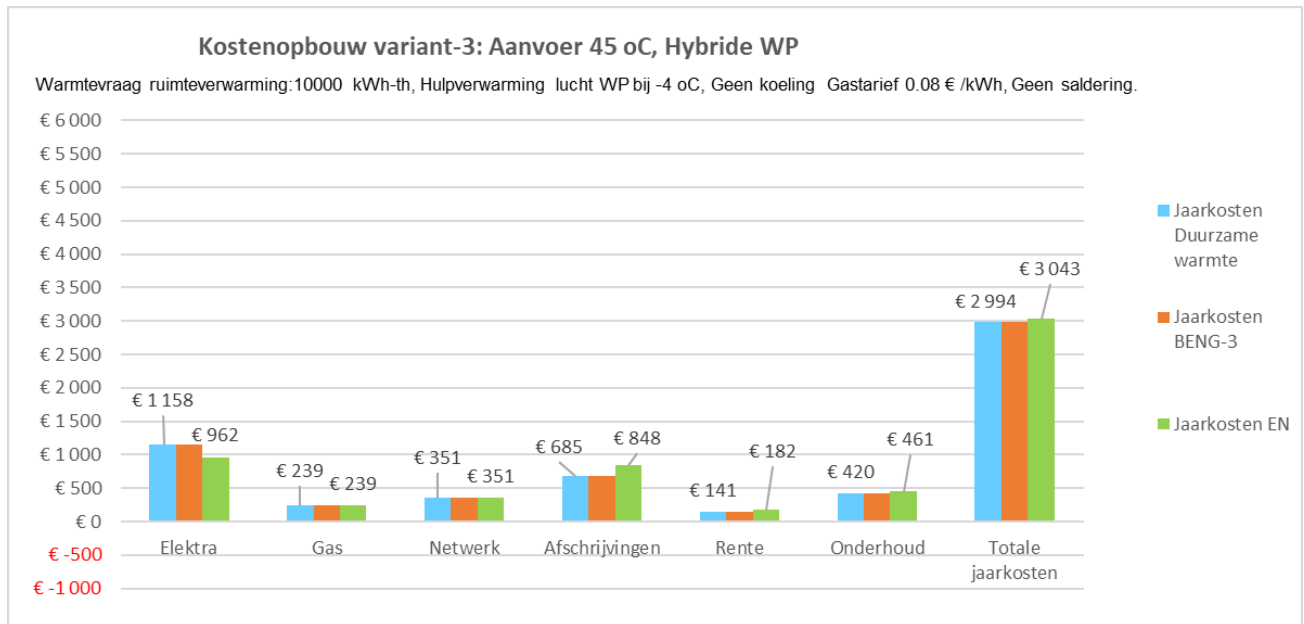


Fig. 55 Kostenopbouw bij Ta = 55 °C, Geen saldering

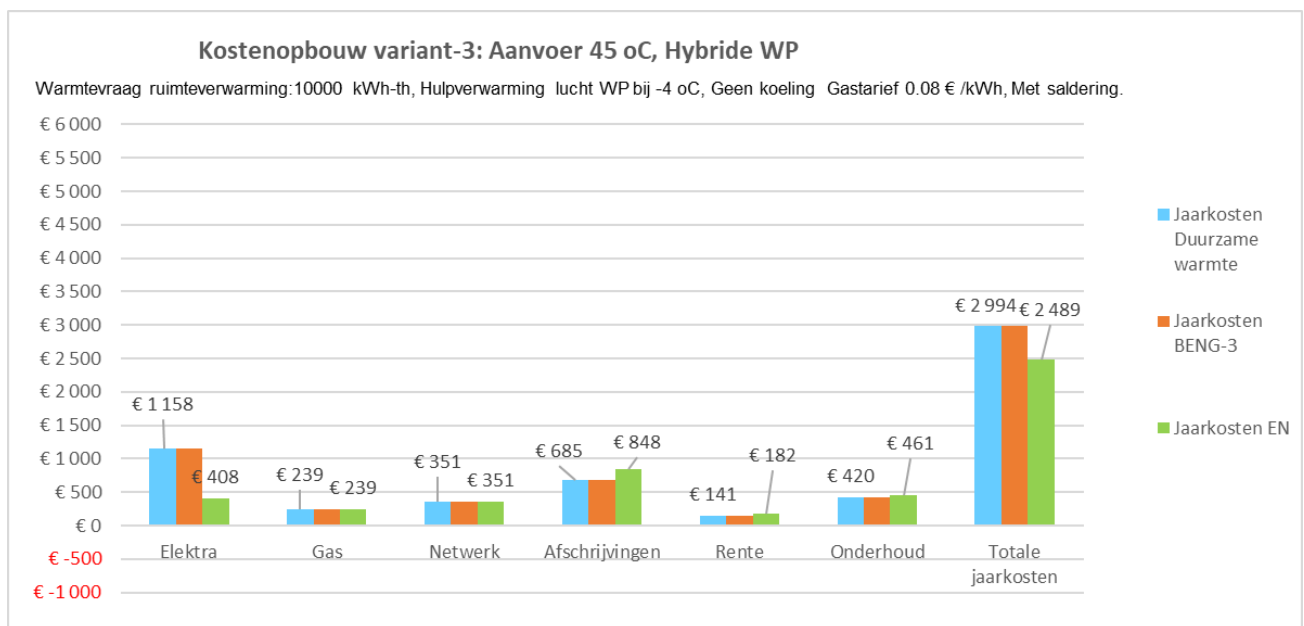


Fig. 56 Kostenopbouw bij Ta = 55 °C, Met saldering

Zonder salderingsregeling stijgen de jaarkosten van € 2994,- voor Duurzame Warmte naar € 3043,- voor een Energie Neutrale woning.

Bij toepassing van de salderingsregeling dalen deze voor een Energieneutrale woning naar € 2489,-. Bij deze berekeningen is aangenomen dat de opbrengst van het directe verbruik verwaarloosbaar klein is ten opzichte de totale jaarkosten. Er is daarom nog een kostencorrectie nodig voor de jaarkosten van de energie neutrale woning zonder saldering.

Deze is als volgt te bepalen:

Elektra-verbruik voor deze variant-3:

Gemiddelde reguliere verbruik	2800 kWh-e, waarvan 1200 kWh gebouw-gebonden
Warmtepomp	2058
Elektrisch koken	175
Totaal verbruik	5033 kWh-e

NB Voor verbruik groene waterstof hoeft geen eigen duurzame elektra te worden opgewekt

Benodigde opwekking voor energieneutraal:

Gebouw gebonden regulier verbruik: 1200 kWh-e

Warmtepomp 2058

Totaal op te wekken 3258 kWh-e

De meeste elektra wordt in de zomer opgewekt en in de winter verbruikt. In geval 30 % van de opgewekte energie direct verbruikt kan worden (een hoge schatting) is een prijscorrectie nodig voor ca 1000 kWh-e. Voor direct verbruik elektra wordt ca. € 170,- op de kosten voor elektra bespaard, vanwege het prijsverschil tussen leveren en terug-leveren.

Voor de jaarkosten van een Energie Neutrale woning volgens de geoptimaliseerde variant-3 geldt dus:

Jaarkosten zonder saldering:	€ 3043 - € 170 = € 2873,-
Jaarkosten met saldering :	<u>€ 2489,-</u>
Totale kosten afschaffing salderingsregeling :	€ 384,-

Dit is ruim 13% van alle kosten voor het leveren en opwekken van duurzame energie voor een energieneutrale woning.

11.7 Koelen

In Fig.57 zijn de meerkosten voor koelen voor weergegeven. Voor de varianten waarin met de luchtwarmtepomp gekoeld wordt, zijn deze gering en bedragen ca € 120,-/jaar.

Bij gebruik van een elektrische luchtwarmtepomp zijn deze meerkosten vrijwel gelijk.

Het gebruik van een airco is aanzienlijk duurder. Ca € 650,- / jaar. Deze hoge kosten zijn vooral veroorzaakt door de afschrijving (€ 271,-) en onderhoudskosten (€ 270,-) van de airco. Als men wil koelen kan men beter vloerverwarming aanleggen.

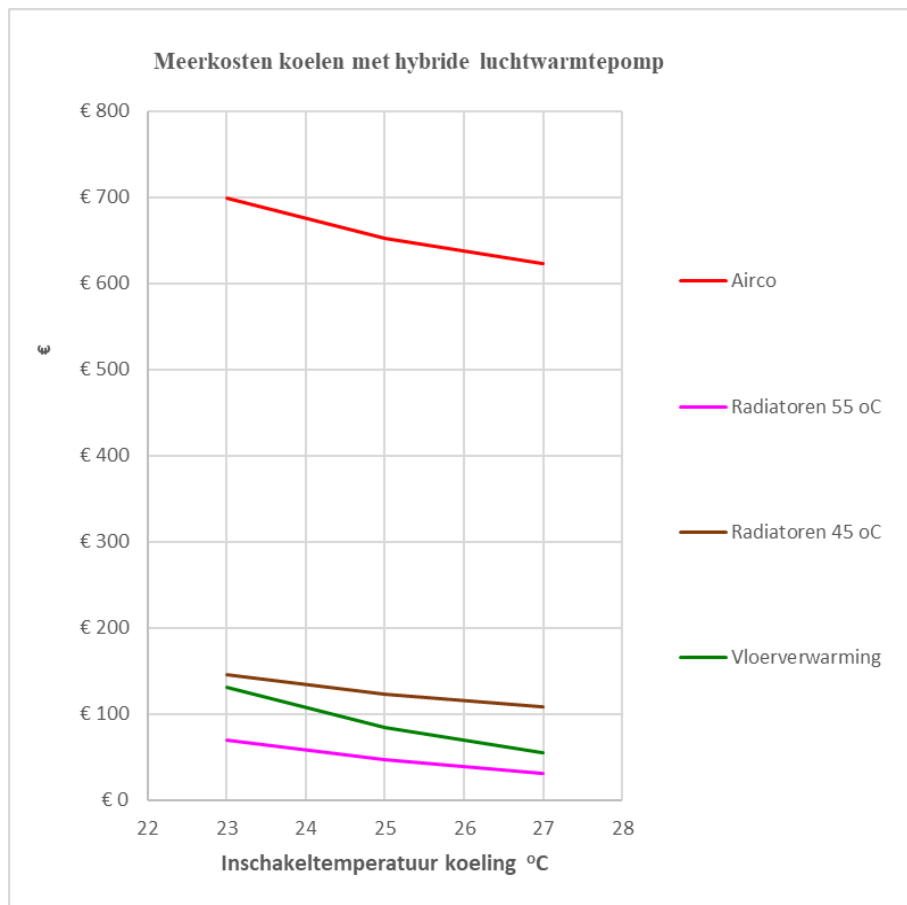


Fig. 57 Meerkosten koeling met hybride warmtepomp

11.8 Vergelijking geoptimaliseerde warmteopwekkings-systemen

In tabel 11 staan de eigenschappen van de geoptimaliseerde warmteopwekking-systemen vermeld voor een warmtevraag voor ruimteverwarming van 6 000 tot 14 000 kWh-th .

In de daarop volgende hoofdstukken word de tabel nader toegelicht.

Methode					Duurzame warmte (excl koelen, geen saldering)													Energie Neutraal				
Warmte-opwekking	Warmtevraag ruimteverwarming	T-aanvoer optimaal	T hulpverwarming	Variant	Investering	Jaarkosten bij gasprijs			Netwerk-kosten	SCOP	Pompvermogen A7/W35 resp B0/W35	Verbruik elektra	Verbruik H2 (aardgas bij referentie)	CO2 emissie (gebouw gebonden)	Verbruik Primaire Energie (gebouw gebonden)	Zelf opgewekte Duurzame warmte	Fractie hernieuwbare energie	Netaansluiting	Elektra opwekking door bewoner		Totaal benodigde duurzame elektra	
	kWh	°C	°C	nr	€	€ 0.08	€ 0.18	€ 0.28	€	-	kW	kWh-e	kWh-th	kg	Kwh-p	kWh-th	%	kW	kWh-e	m2 PV	kWh-e	
Bestaande methode	6 000	70	-	ref	-	€ 2 085	-	-	351	-	-	2800	9 834	2 208	11574	0	0	7	Geen PV in referentie situatie		7733	
	8 000	70	-	ref	-	€ 2 263	-	-	351	-	-	2800	12066	2616	13806	0	0	7			9272	
	10 000	70	-	ref	-	€ 2 442	-	-	351	-	-	2800	14299	3025	16039	0	0	7			10812	
	12 000	70	-	ref	-	€ 2 621	-	-	351	-	-	2800	16531	3433	18271	0	0	7			12352	
	14 000	70	-	ref	-	€ 2 799	-	-	351	-	-	2800	18764	3842	20504	0	0	7			13891	
HR ketel	6 000	70	-	0	€ 2 800	€ 2 188	€ 3 173	€ 4 159	351	-	-	2975	9854	468	1994	-	0	15	1375	7	21083	
	8 000	70	-	0	€ 2 800	€ 2 373	€ 3 588	€ 4 804	351	-	-	2975	12159	468	1994	-	0	15	1375	7	25694	
	10 000	70	-	0	€ 2 800	€ 2 557	€ 4 003	€ 5 450	351	-	-	2975	14465	468	1994	-	0	15	1375	7	30304	
	12 000	70	-	0	€ 2 800	€ 2 741	€ 4 418	€ 6 095	351	-	-	2975	16770	468	1994	-	0	15	1375	7	34915	
	14 000	70	-	0	€ 2 800	€ 2 926	€ 4 833	€ 6 741	351	-	-	2975	19075	468	1994	-	0	15	1375	7	39525	
Hybride warmtepomp	6 000	70	-10	1	€ 9 129	€ 2 702	€ 2 996	€ 3 289	351	3.8	8.2	4542	2938	1000	4013	5608	58%	17	2767	14	8643	
	8 000	70	-10	1	€ 10 129	€ 2 899	€ 3 192	€ 3 486	351	3.8	10.8	5065	2938	1178	4770	7204	60%	18	3290	16	9166	
	10 000	45	-4	3	€ 14 129	€ 2 994	€ 3 293	€ 3 591	351	4.8	9.0	5033	2989	1167	4724	8799	65%	17	3258	16	9236	
	12 000	45	-2	3	€ 14 129	€ 3 091	€ 3 398	€ 3 705	351	4.8	9.0	5429	3070	1302	5298	10395	66%	17	3654	18	9794	
	14 000	55	-10	2	€ 11 729	€ 3 268	€ 3 562	€ 3 856	351	4.4	11.7	6138	2938	1543	6326	11990	65%	18	4363	22	10239	
Elektrische Lucht-warmtepomp	6 000	70	-10	5	€ 11 737	€ 2 983	€ 2 983	€ 2 983	774	3.8	8.2	4862	-	1109	4476	5608	56%	23	3087	15	3087	
	8 000	70	-10	5	€ 12 737	€ 3 180	€ 3 180	€ 3 180	774	3.8	10.8	5384	-	1287	5234	7204	58%	26	3609	18	3609	
	10 000	45	-4	7	€ 16 737	€ 3 274	€ 3 274	€ 3 274	774	4.8	9.0	5363	-	1279	5202	8799	63%	24	3588	18	3588	
	12 000	45	-2	7	€ 16 737	€ 3 368	€ 3 368	€ 3 368	774	4.8	9.0	5774	-	1419	5799	10395	64%	24	3999	20	3999	
	14 000	55	-10	6	€ 14 337	€ 3 550	€ 3 550	€ 3 550	774	4.4	11.7	6457	-	1651	6789	11990	64%	27	4682	23	4682	
Bodem-warmtepomp	6 000	45	-	11	€ 34 310	€ 3 318	€ 3 318	€ 3 318	220	4.5	5.5	5069	-	1179	4776	5608	54%	16	3294	16	3294	
	8 000	45	-	11	€ 38 610	€ 3 639	€ 3 639	€ 3 639	220	4.5	7.2	5530	-	1336	5445	7204	57%	17	3755	19	3755	
	10 000	45	-	11	€ 38 610	€ 3 751	€ 3 751	€ 3 751	220	4.5	7.6	6018	-	1502	6153	8799	59%	17	4243	21	4243	
	12 000	45	-	11	€ 38 610	€ 3 864	€ 3 864	€ 3 864	220	4.5	7.7	6509	-	1669	6865	10395	60%	17	4734	24	4734	
	14 000	45	-	11	€ 42 810	€ 4 180	€ 4 180	€ 4 180	220	4.5	9.0	6969	-	1826	7531	11990	61%	17	5194	26	5194	

Tabel 11 Kenmerken geoptimaliseerde warmteopwekkingsmethoden in bestaande woningen.

11.8.1 Kosten

Fig. 58 toont de benodigde investeringen als functie van de warmtevraag voor ruimteverwarming bij optimale instellingen.

Bij een warmtevraag van 14 000 kWh is bij de elektrische - en de hybride- lucht/water warmtepompen een warmtedistributiesysteem met een maximale aanvoertemperatuur van 55 °C optimaal. Daardoor zijn de benodigde investeringen bij die warmtevraag wat lager.

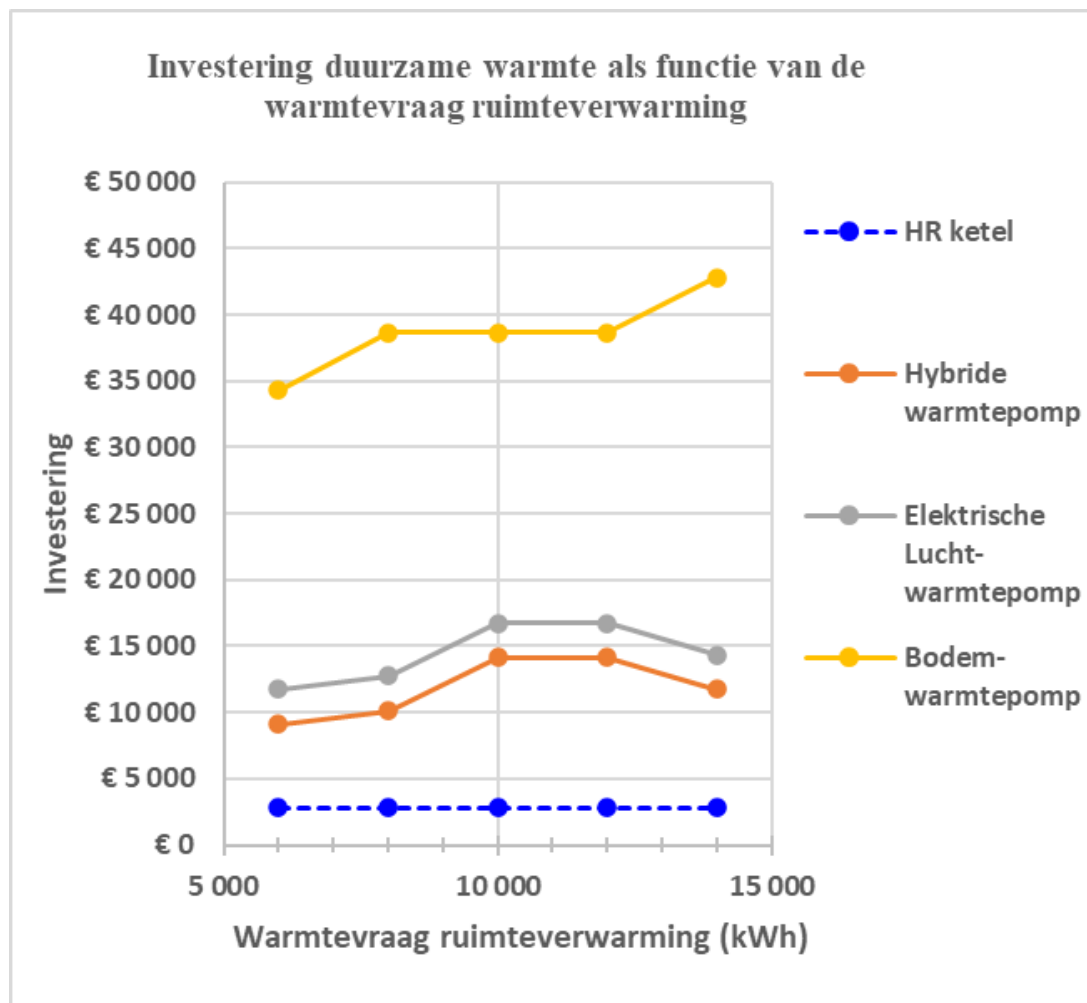


Fig. 58 Investerings bij optimale instellingen

Fig. 59-63 tonen de jaarkosten als functie van de gasprijs voor de diverse warmteopwekkingsmethoden bij optimale instellingen en een warmtevraag voor ruimteverwarming van 6000 - 14000 kWh.

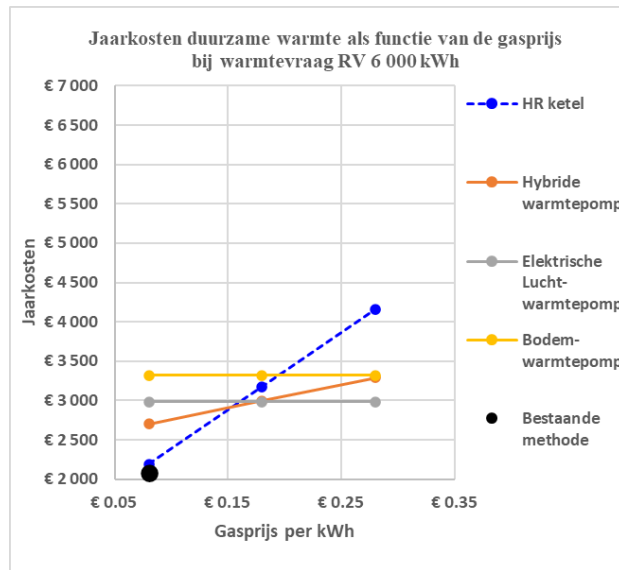


Fig. 59

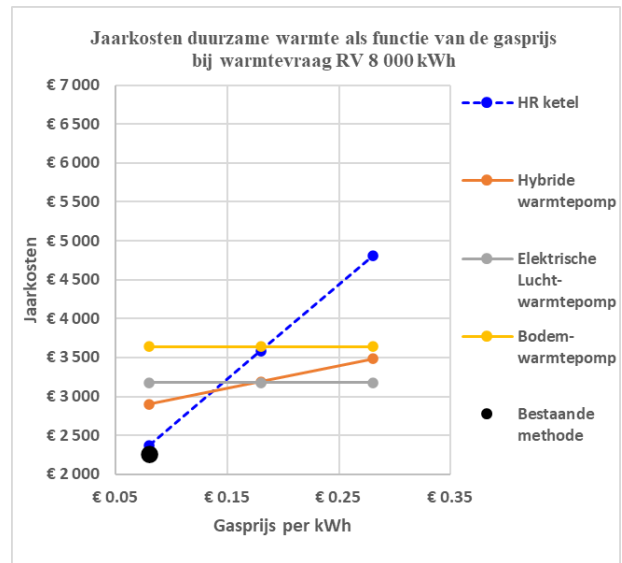


Fig. 60

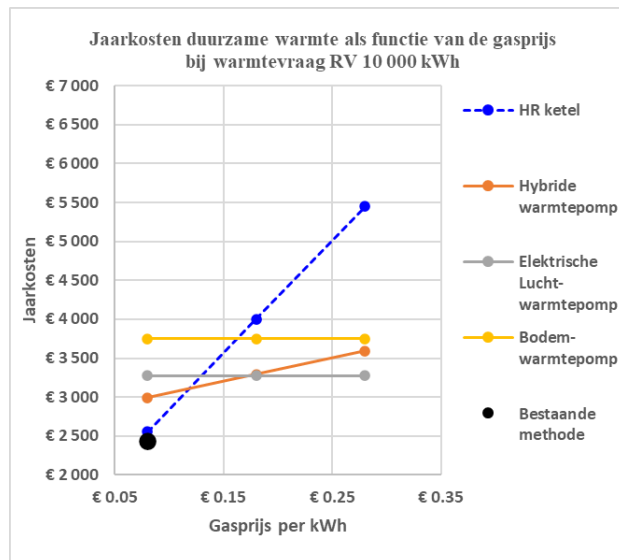


Fig. 61

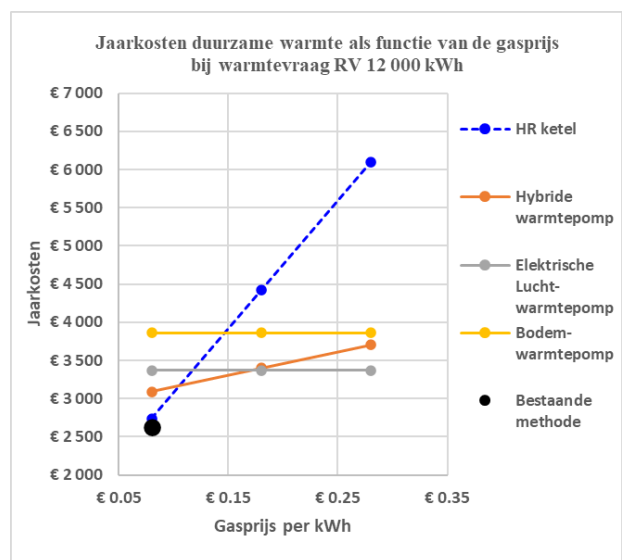


Fig. 62

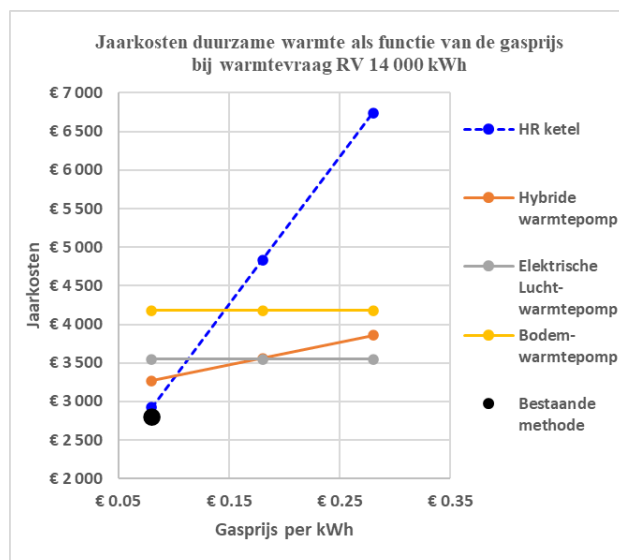


Fig.63

Fig. 64 - 67 tonen de jaarkosten als functie van de warmtevraag met de gasprijs als parameter voor de diverse warmteopwekkingsmethoden. Uit deze grafieken zijn de besparingen bij woningisolatie af te lezen

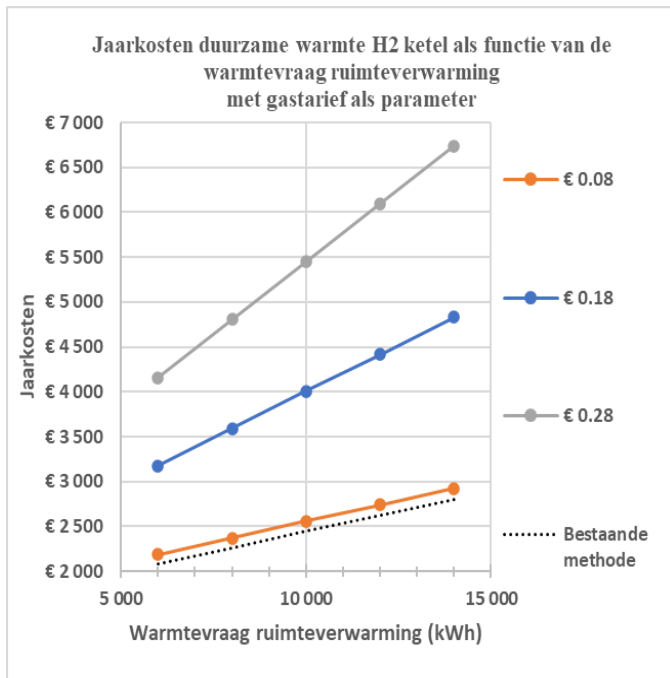


Fig. 64

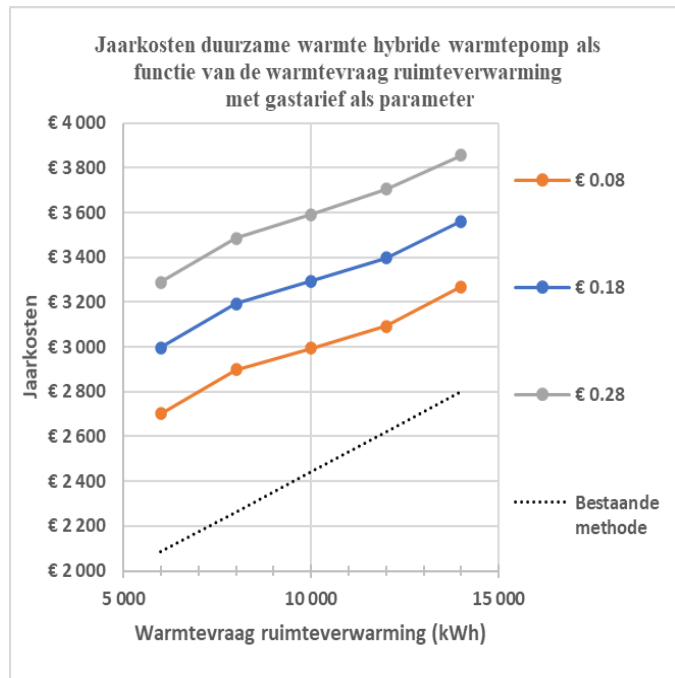


Fig. 65

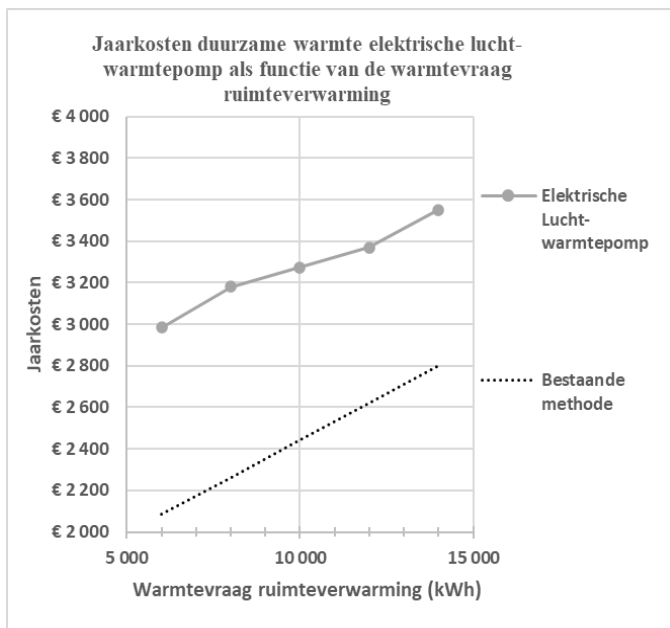


Fig. 66

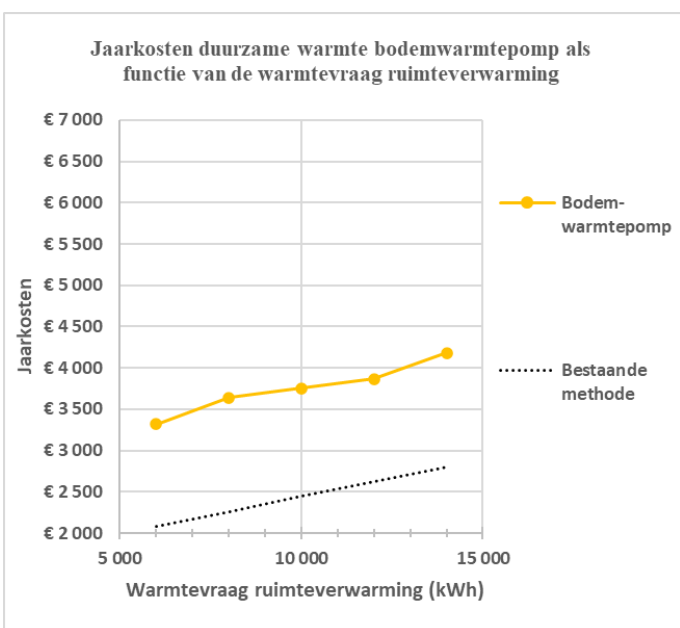


Fig. 67

Uit deze grafieken blijkt dat bij de huidige gasprijs van € 0.08 / kWh bij alle varianten de jaarkosten zullen toenemen bij omschakeling naar een duurzame warmteopwekking met een warmtepomp. De benodigde investeringen worden niet worden terugverdientijd binnen de technische levensduur van de installaties.

Bij een zeer goed geïsoleerde woning met een warmtevraag voor ruimteverwarming van nog maar 6 000 kWh is de HR ketel de goedkoopste oplossing tot een gasprijs van € 0.155 / kWh. Bij een gastarief boven de € 0.18 / kWh wordt de elektrische lucht-water warmtepomp de meest voordelige methode.

Bij een grote woning of een slecht geïsoleerde woning met een warmtevraag van 14 000 kWh wordt de variant met de hybride warmtepomp al voordeliger bij een gasprijs van € 0.10 /kWh.

De bodemwarmtepomp is in alle gevallen duurder dan een elektrische lucht-water warmtepomp.

Deze resultaten zijn samengevat in een diagram, zie fig.68.

Dit diagram moet als volgt gelezen worden:

Op de x-as en de y-as zijn de variabelen gasprijs en jaarlijkse gasverbruik uitgezet.

Elk punt in het x-y vlak is bepaald door een bepaalde warmtevraag en een bepaalde gasprijs.

De blauwe lijn HR/Hybride geeft de gasprijs weer waarbij de kosten voor warmteopwekking met een HR ketel even hoog zijn als met een hybride warmtepomp. Voor elk punt onder de blauwe lijn in dit diagram is de HR-kerel voordeliger. Daarboven is een luchtwarmtepomp voordeliger. In het gebied tussen de blauwe lijn en de groene lijn is de hybride luchtwarmtepomp het meest voordelig. Boven de groene lijn is de elektrische luchtwarmtepomp voordeliger.

Een gemiddelde woning in de woonwijk heeft een warmtevraag van 10 000 kWh en een gasprijs 0.08 / kWh. Deze is in het diagram weergegeven met een rode stip. Deze stip ligt onder de blauwe lijn, dus is het gebruik van een hybride warmtepomp op dit moment nog duurder dan een HR ketel

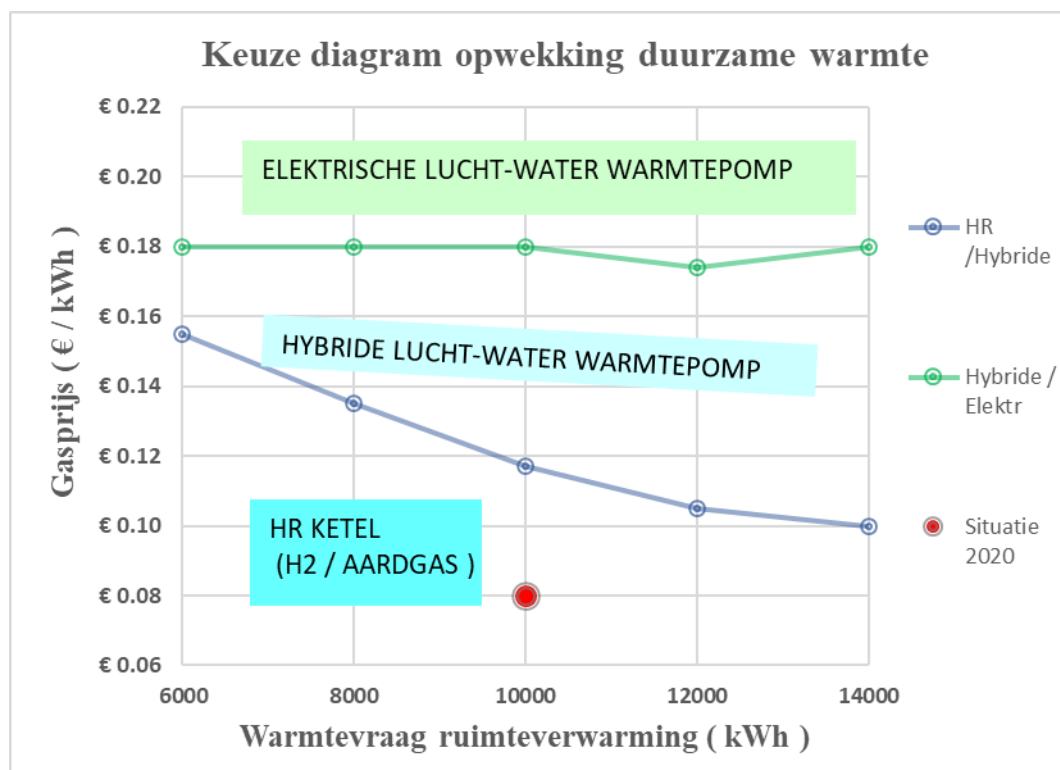


Fig. 68 Keuze diagram voor opwekken duurzame warmte

Uit dit diagram is af te lezen:

1 Zolang de gasprijs onder de € 0.10 / kWh blijft is de HR ketel (op aardgas, waterstof of biogas) het voordeligst. Bij een gasprijs tussen € 0.10 en € 0.18 /kWh is dit afhankelijk van de warmtevraag van de woning.

2 Bij een gasprijs boven € 0.18 / kWh wordt een elektrische luchtwarmtepomp voordeliger. Dat is vrijwel onafhankelijk van de warmtevraag.

In fig-69 is dit diagram weergegeven op basis van aardgasverbruik en aardgasprijs (voor een gezin van 2,5 personen).

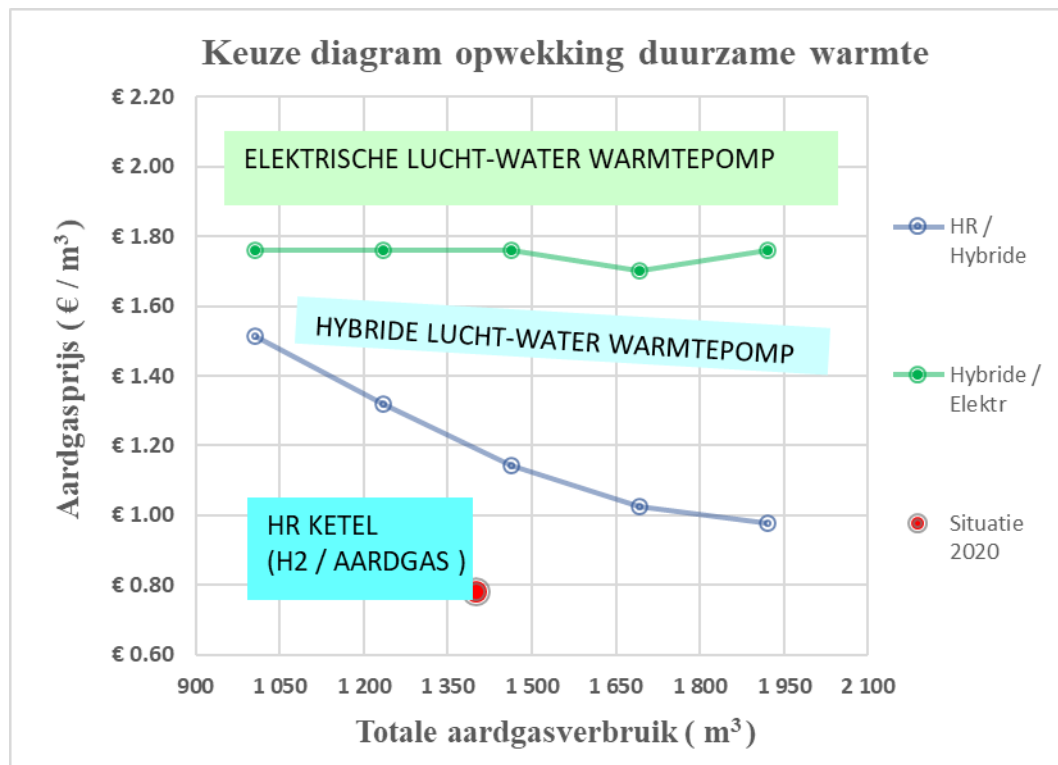


Fig.69 Keuze diagram voor opwekken duurzame warmte

Wil men het bestaande gasnet gebruiken om via levering van waterstof het elektriciteitsnet in de winter te ontlasten, dan geeft dit diagram de prijstechnische randvoorwaarden (voor biogas of waterstof) om de aanschaf van de benodigde hybride warmtepompen succesvol te stimuleren. Is er geen zekerheid dat biogas of waterstof langdurig onder de € 0.18 / kWh geleverd zal worden, dan wordt de aanschaf van een elektrische luchtwaterwarmtepomp aantrekkelijker en zal de gasprijs de uitrol van hybride warmtepompen belemmeren.

11.8.2 Netbelasting

Fig. 70 en 71 tonen verbruik aan gas en elektra in kWh .

Fig. 72 toont de belasting van het elektriciteitsnet.

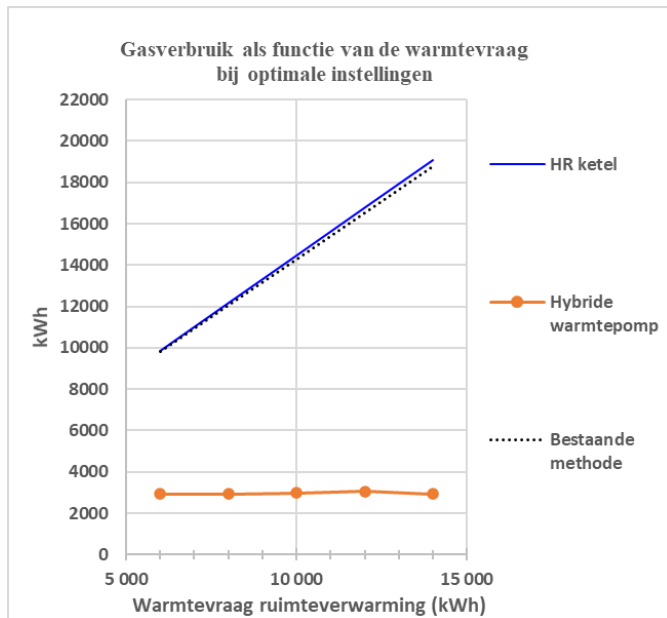


Fig. 70 Gasverbruik

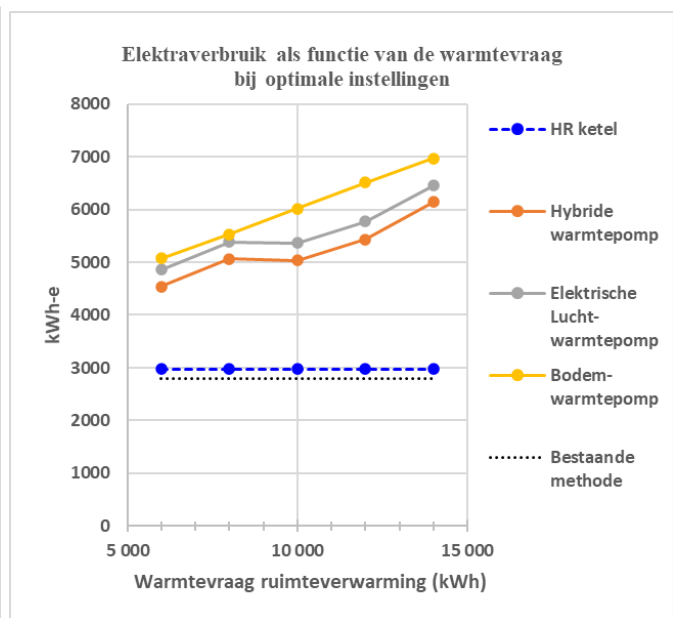


Fig. 71 Elektraverbruik

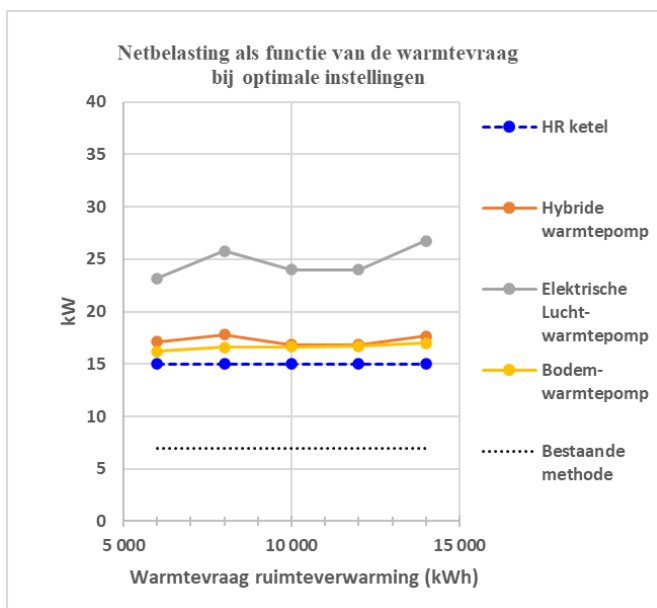


Fig. 72 Netbelasting

11.8.3 Duurzaamheid

Fig. 73 toont de CO₂ emissie en fig. 74 de fractie hernieuwbare energie. In deze grafieken is te zien dat de H₂ ketel de minste CO₂ uitstoot heeft, maar geen hernieuwbare energie produceert. Tevens zijn in deze fig. de 2 minimum-eisen voor nieuwbouw woningen (BENG-3) weergegeven. Met alle 3 warmtepompsystemen kunnen bestaande woningen ruimschoots aan de eis voor BENG-3 bij nieuwbouw woningen voldoen.

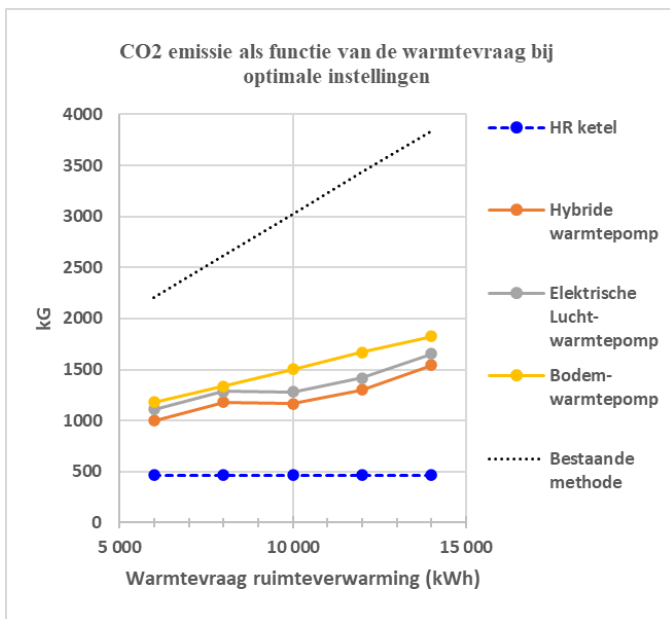
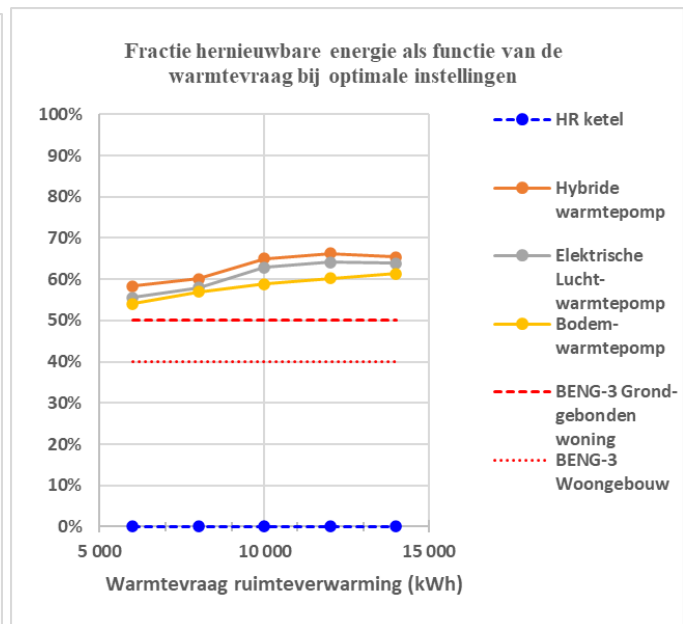
Fig. 73 CO₂-emissie

Fig. 74 Fractie hernieuwbare energie

Fig.75 toont het aantal m² PV cellen dat bewoners moeten plaatsen om een Energie Neutrale woning te realiseren.

Bij gebruik van groene waterstof wordt door de gasleverancier ook duurzame elektra opgewekt. Fig. 76 toont daarom het totaal benodigde aantal kWh duurzame elektra dat bewoners en de waterstofleverancier samen moeten opwekken.

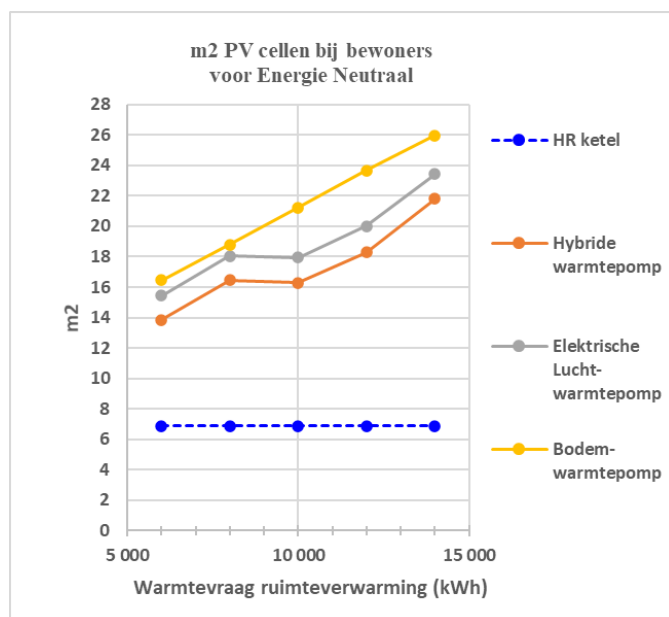


Fig. 75 PV cellen door bewoners voor EN

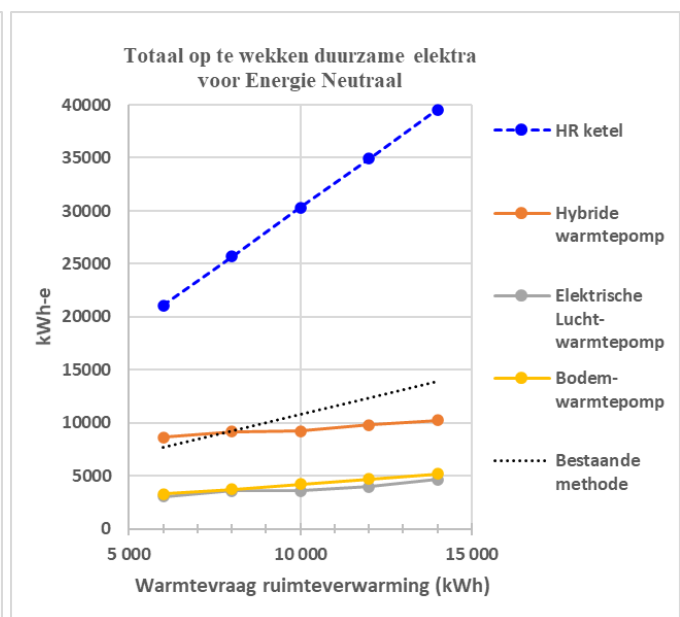


Fig. 76 Totale behoefte duurzame elektra voor EN

12. Keuzes voor de korte termijn

De keuzediagrammen in fig. 68 en 69 voor de optimale duurzame warmteopwekkingsmethode zijn opgesteld voor alle kosten voor ruimteverwarming, tapwater en koken. Hierbij werd het koken op aardgas vervangen door inductiekoken. Het inductiekoken is een erg onrendabele investering, die voor de energietransitie wel noodzakelijk is. Voor een vermindering van het gasverbruik met ca 37 m3 gas moet de meterkast worden verzwaaard en een inductiekookplaat plus pannenset worden aangeschaft. Dat vergt ca € 2600,- , ofwel een investering van € 70- per m3 gasbesparing. Omdat waterstof voorlopig nog niet beschikbaar komt en inductiekoken dus nog geen noodzaak is, rijst de vraag of het aantrekkelijk is, in geval aardgas wordt vervangen door biogas, nu al een hybride warmtepomp aan te schaffen. Als men geen inductiekooktoestel aanschaft, zijn de investeringen en de netwerkkosten minder hoog. Dit moet dus apart berekend worden.

In tabel 12 worden voor een hybride warmtepomp de benodigde meerkosten, de besparingen en de terugverdientijden gegeven bij een jaarlijks gasverbruik variërend van 1000 – 2000 m3 aardgas of biogas. Hierbij is uitgegaan van een verbruik van 321 m3 gas voor tapwater en koken.

De groene kolommen hebben betrekking op het geadviseerde warmtedistributiesysteem en de blauwe kolommen op de situatie dat de bestaande radiatoren worden gebruikt.

In bijlage-3 is een calculatievoorbeeld gegeven bij een gasverbruik van 1464 m3 gas.

In fig. 77 zijn de besparingen grafisch weergegeven. De terugverdientijden zijn in alle gevallen aanzienlijk langer dan de technisch levensduur van de warmtepomp.

Gasverbruik	Optimale instelling van warmteopwekkingssysteem				Warmtepomp met bestaande radiatoren		
	Optimale temperatuur warmte-distributie	Meerkosten warmtepomp met optimale instelling.	Besparing WP met optimale instellingen	Terugverdiens-tijd WP met optimale instellingen	Meerkosten warmtepomp met radiatoren	Besparing WP met radiatoren	Terugverdiens-tijd WP met radiatoren
m3	°C	jaar	€	jaar	jaar	€	jaar
1007	70	4500	€ -155		4500	€ -155	
1235	70	5500	€ -107		5500	€ -107	
1464	45	9500	€ 34	279.4	4500	€ -48	
1692	45	9500	€ 116	81.9	4500	€ 10	450.0
1921	55	7100	€ 165	43.0	5500	€ 68	80.9

Tabel 12 Kostenvergelijking HR ketel en hybride warmtepomp.

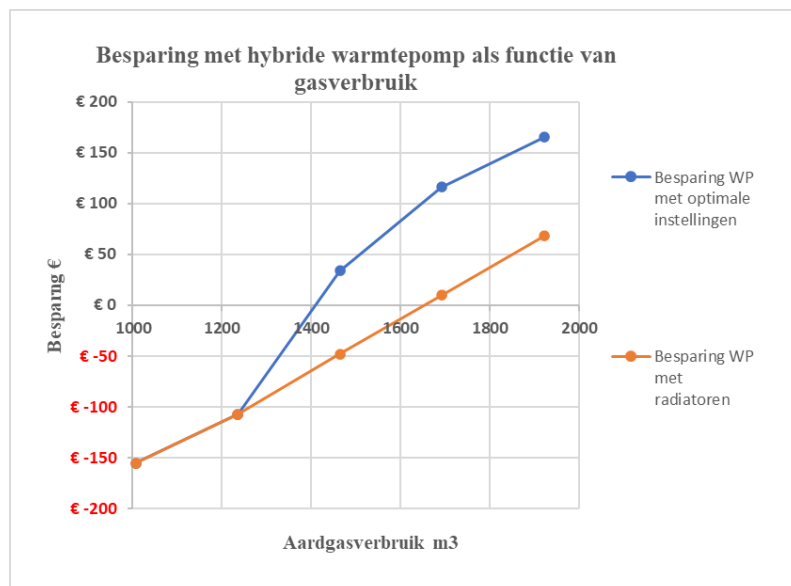


Fig.77 Besparing met hybride warmtepomp

13. Literatuur

- Richtlijn 2010-31-EU Energieprestatie van gebouwen.
- Bouwbesluit 2015: www.onlinebouwbesluit.nl/
- ISSO 82 Handleiding Energieprestatieadvies woningen.
- NTA 8800:2020 Rekenmethode energieprestatie gebouwen
- BENG Eindelijk, Hasselaar, Kuipers-van Galen, Huijbers, DGMR, VV+ jan 2020
- Royal HaskoningDHV Mogelijkheden Duurzame Warmte Steenwijk, 26-7-2019
- De prijs van energieconversie, Henk Tolsma, Technisch weekblad 9 sep 2005
- Maatschappelijk acceptabele kostenanalyse een eerste verkenning, Getallen achter de waterstofeconomie, W.D. Hazenberg -Stork, Presentatie op bijeenkomst Waterstofwijk Hoogeveen 6 februari 2020
- www.klimaatexpert.com/warmtepomp/technisch/cop-scop-en-rendement
- www.milieucentraal.nl
- www.warmtepompweetjes.nl
- www.Nefit.nl
- www.nibe.eu/nl-nl
- www.triplesolar.eu/
- kamerbrief-over-kabinetsvisie-waterstof 30-3-2020:
<https://www.rijksoverheid.nl/binaries/rijksoverheid/documenten/kamerstukken/2020/03/30/kamerbrief-over-kabinetsvisie-waterstof/kamerbrief-over-kabinetsvisie-waterstof.pdf>
- Voorontwerp Warmtenet Steenwijkerland, H.M.van der Vegt e.a.. 14-4-2020
- Gemeente Steenwijkerland, TEO potentie 3 wijken, Syntraal , 16-7-2020
- Aardgasvrije wijken in Steenwijk, DWA , 20-7-2020

14. Bijlagen

14.1 Bijlage-1 Financiële kentallen

Tenzij anders vermeld zijn de bedragen Basis 2020 en incl. BTW

NB De gasprijs is een variabele in het uitgevoerde onderzoek.

Rentetarief	2.0%
Energiebelasting + ODE elektra	€ 0.151
Levertarief elektra	€ 0.079
Teruglevertarief	€ 0.060
Tarief elektra voor eigen verbruik	€ 0.230

Netwerktarieven/jaar

	vanaf eenheid	Capaciteit	Transport	Vastrecht	Meterhuur	Totaal
Gas G6		€ 36.24	€ 46.14	€ 21.78	€ 26.63	€ 130.79
Elektra t/m 3*25 A	0 kW	€ 28.18	€ 133.68	€ 21.78	€ 36.42	€ 220.06
t/m 3*35 A	20 kW	€ 46.95	€ 668.40	€ 21.78	€ 36.42	€ 773.55
t/m 3*50 A	30 kW	€ 46.95	€ 1 002.61	€ 21.78	€ 36.42	€ 1 107.76
t/m 3*63 A	40 kW	€ 46.95	€ 1 336.81	€ 21.78	€ 36.42	€ 1 441.96
t/m 3*80 A	50 kW	€ 46.95	€ 1 671.01	€ 21.78	€ 36.42	€ 1 776.16

Aansluittarief

	Rendo	installateur	Totaal	
Gas G6	€ 981.30	€ 0	€ 981.30	Verwijdertarief gas bij 15 m lengte
Elektra t/m 3*25 A	€ 828.85	€ 1 000	€ 1 828.85	
t/m 3*35 A	€ 955.90	€ 1 000	€ 1 955.90	
t/m 3*50 A	€ 1 076.90	€ 2 000	€ 3 076.90	
t/m 3*63 A	€ 1 137.40	€ 2 000	€ 3 137.40	
t/m 3*80 A	€ 1 210.00	€ 2 000	€ 3 210.00	

Prijzen Warmtepompen

Vermogen (kW)	Hybride ex HR ketel				El. Lucht WP met boiler			
	Adviesprijs	Montage	Subsidie	Totaal	Adviesprijs	Montage	Subsidie	Totaal
3	€ 3 500	€ 1 500	€ 1 500	€ 3 500	€ 6 500	€ 2 000	€ 1 800	€ 6 700
5	€ 4 000	€ 1 500	€ 1 800	€ 3 700	€ 7 000	€ 2 000	€ 1 800	€ 7 200
7	€ 5 000	€ 1 500	€ 2 000	€ 4 500	€ 8 000	€ 2 000	€ 2 000	€ 8 000
9	€ 6 000	€ 1 500	€ 2 000	€ 5 500	€ 9 000	€ 2 000	€ 2 000	€ 9 000
13	€ 7 000	€ 1 500	€ 2 200	€ 6 300	€ 10 000	€ 2 000	€ 2 200	€ 9 800
17	€ 8 000	€ 1 500	€ 2 200	€ 7 300	€ 11 000	€ 2 000	€ 2 200	€ 10 800

Prijzen Warmtepompen

Vermogen (kW)	Bodem WP met boiler						Totaal
	Adviesprijs	Montage	Bron	Subsidie	Tuinherstel		
3	6500	2000	5000	€ 2 800	6000		22300
5	7000	2000	7900	€ 2 800	6000		25700
7	8000	2000	11000	€ 3 000	6000		30000
9	9000	2000	14200	€ 3 000	6000		34200
13	10000	2000	20500	€ 3 200	6000		41700
17	11000	2000	26800	€ 3 200	6000		49000

Bron: 1300,- /kW ex BTW

Overige Investerings

Apparatuur	Investering incl montage en subsidie	Netto- Investering	levensduur (jaar)	Afschrijving /jaar	Onderhouds- kosten
HR combitap		€ 2 000	15	€ 133	€ 150
Lucht warmtepomp	Zie tabel		15		€ 270
Bodemwarmtepomp + bron	Zie tabel excl		25		€ 330
Inductiekoken incl.pannenset 200.-	netverzwaring	€ 800	15	€ 53	
Verzwaren aansluiting elektra	Zie tabel		40		
Radiator-boosters		€ 1 600	15	€ 107	
LT radiatoren		€ 5 000	40	€ 125	
Vloer-verwarming		€ 10 000	40	€ 250	
Zonnepanelen per kWh/jaar		€ 1.25	25	€ 0.05	1%
Meerkosten koelen					
Regelunits 55 °C		€ 200	15	€ 13	
Regelunits en boosters 45 °C		€ 1 200	15	€ 80	
Regelunits en ventilatoren 35 °C		€ 300	15	€ 20	
Airco					
Split unit incl montage		3500	15	233	€ 270
Luchtkanalen		1500	40	38	
Airco totaal		5000		271	

14.2 Bijlage-2 Kenmerken warmtepomp

14.2.1 De werking van een warmtepomp.

In fig. 14-1 is het prinsipeschema van een warmtepomp aangegeven.

In een warmtepomp bevindt zich een koudemiddel dat door de compressor wordt samengeperst, waardoor dat condenseert. Voor het samenpersen moet de pomp energie leveren en stijgt de temperatuur. Door condensatie komt condensatiewarmte vrij en stijgt de temperatuur van het koudemiddel verder naar de waarde Th .

In de condensor wordt deze warmte afgegeven aan het medium (lucht of water) van het warmtedistributiesysteem met een aanvoertemperatuur Ta en een retourtemperatuur Tr . Bij het expansieventiel wordt de druk sterk verlaagd en verdampt het koudemiddel. Hierdoor daalt de temperatuur tot de waarde $Tlaag(Tl)$. In de verdamper wordt het koudemiddel vervolgens opgewarmd doordat warmte aan de bron (bodem, lucht) met temperatuur Tb onttrokken. Per saldo wordt de bron afgekoeld en het medium van het warmtedistributiesysteem opgewarmd.

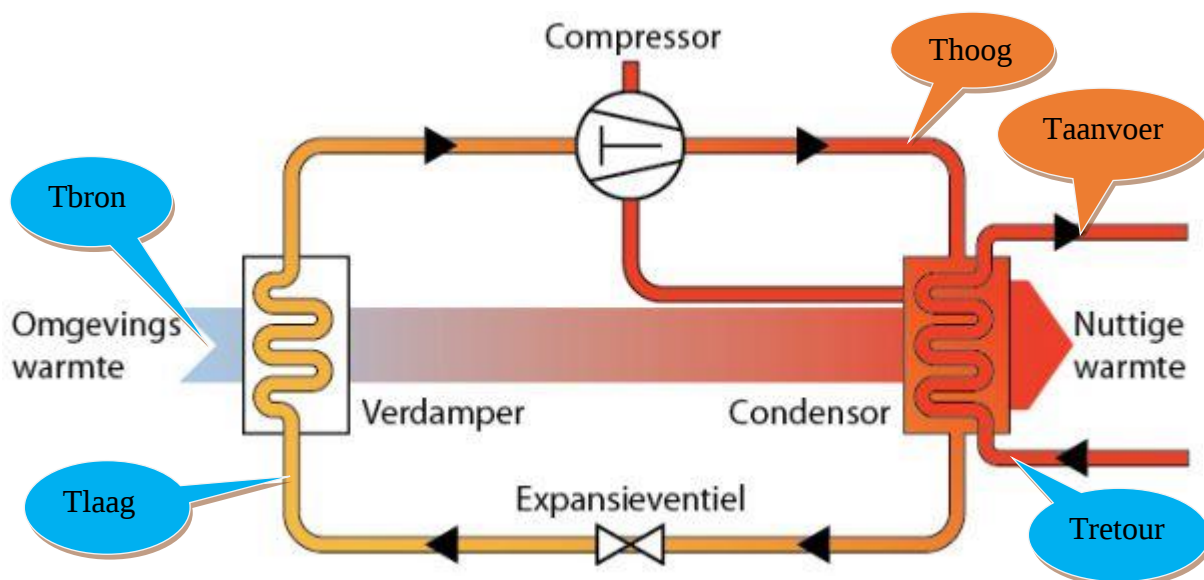


Fig 14-1 Prinsipeschema van een warmtepomp volgens www.klimaatexpert.com/warmtepomp

14.2.2 De thermodynamische formule voor de COP

Het rendement van een warmtepomp wordt uitgedrukt in een Coëfficiënt van Performance (COP). Dit is de verhouding tussen de afgegeven energie en de daarvoor benodigde elektrische energie. Bij gebruik van $^{\circ}C$ als temperatuurschaal is de COP volgens de thermodynamica te berekenen met de formule:

$$COP = (273 + Th) / (Th - Tl) \quad (1)$$

$$\text{Over de condensor staat een temperatuurverschil } \Delta T_c = Th - Ta \quad (2)$$

$$\text{Over de verdamper staat een temperatuurverschil } \Delta T_v = Tl - Tb \quad (3)$$

Uit (1), (2), en (3) volgt:

$$COP = (273 + Ta + \Delta T_c) / (Ta - Tb + \Delta T_c + \Delta T_v) \quad (4)$$

(4) is te herschrijven als

$$\text{COP} = \frac{(273+T_a) \cdot \{1 + \Delta T_c / (273+T_a)\}}{(T_a - T_b) \cdot \{1 + (\Delta T_c + \Delta T_v) / (T_a - T_b)\}} \quad (5)$$

$$\text{Nu is } \Delta T_c / (273+T_a) \ll (\Delta T_c + \Delta T_v) / (T_a - T_b), \quad (6)$$

Dus kan (5) vereenvoudigd worden tot

$$\text{COP} = \frac{(273+T_a)}{(T_a - T_b) \cdot \{1 + (\Delta T_c + \Delta T_v) / (T_a - T_b)\}} \quad (7)$$

$$\text{We definiëren } \Delta T_{\text{sys}} = \Delta T_c + \Delta T_v \quad (8)$$

ΔT_{sys} is de som van de temperatuurval over de 2 warmtewisselaars van de warmtepomp..

Uit (7) en (8) volgt dan:

$$\text{COP} = \frac{(273+T_a)}{(T_a - T_b) \cdot \{1 + \Delta T_{\text{sys}} / (T_a - T_b)\}} \quad (7)$$

Deze formule geldt voor een verliesvrije situatie.

Vanwege de verliezen in de compressor moet hieraan nog een verliesfactor f worden toegevoegd.

(7) gaat dan over in:

$$\text{COP} = \frac{f \cdot (273+T_a)}{(T_a - T_b) \cdot \{1 + \Delta T_{\text{sys}} / (T_a - T_b)\}} \quad (8)$$

(8) is te herschrijven als

$$\text{COP} = \frac{\alpha \cdot (273+T_a)}{(T_a - T_b)} \quad (9)$$

$$\text{Met } \alpha = f / \{1 + \Delta T_{\text{sys}} / (T_a - T_b)\} \quad (10)$$

α is bepaald door de pompconstructie en wordt de pompconstante genoemd.

14.2.3 Seizoengemiddelde SCOP

Als f en ΔT_{sys} bekend zijn, is met (9) en (10) voor elke T_a en T_b de COP van de warmtepomp te bepalen. Maar in de praktijk heeft dat weinig betekenis, omdat de warmtevraag in de woning niet constant is.

Bij een warmtedistributiesysteem dat ontworpen is voor een maximale afgiftetemperatuur $T_{a\text{-max}}$, zal T_a afhangen van de momentane warmtevraag.

De brontemperatuur T_b is tijdens het stookseizoen evenmin constant.

Verder zal de regelaar van de ruimtetemperatuur de compressor laten moduleren of doen afslaan.

Deze stops en starts van de compressor vergen ook extra energie.

Om deze reden wordt de SCOP, het seizoengemiddelde van de COP, via een aantal metingen bepaald. In NTA 8800 is voorgeschreven dat de SCOP voor woningbouw moet worden bepaald volgens EN 14511 (vollast). Voor modulerende warmtepompen kan EN 14825 worden gebruikt.

De SCOP moet hierbij worden bepaald voor warmtedistributiesystemen met maximale aanvoertemperaturen van 35 °C en 45 °C.

Bij luchtwarmtepompen geldt hiervoor een brontemperatuur van 7 °C.

Bij bodemwarmtepompen met een bodemwarmtewisselaar is deze 0 °C.

Vanwege deze verschillen hebben bodemwarmtepompen veelal een lagere SCOP dan luchtwarmtepompen.

Tot voor kort werd voor de bepaling van de SCOP de Nederlandse norm NEN 7120 gebruikt. Hierbij werd voor diverse warmtevragen van de woning de SCOP bepaald bij maximale aanvoertemperaturen van het warmtedistributiesystemen van 35, 45 en 60 °C . De daarmee berekende SCOP waarden kwamen volgens KOMO goed overeen met waarden die volgens EN 14825 worden vastgesteld.

14.2.4 Formule voor SCOP lucht/water warmtepomp

De toe te passen formule voor de SCOP is in dit rapport gebaseerd op de specificaties van de Nefit Monoblock 5.0. Voor woningen met een hoge specifieke warmtevraag (> 41 kWh/m²), zijn de volgens NEN7120 gemeten SCOP-waarden vermeld in tabel-14.1. In fig. 14-2 zijn deze grafisch weergegeven voor 3 waarden van de maximale aanvoertemperatuur van het warmtedistributiesysteem bij een warmtevraag van 11 111 kWh /jaar.

COP ruimteverwarming met Nefit monoblock 5 kW voor bestaande woningen (Q > 41 kWh/m ²)								
	Energiefractie ruimteverwarming							
Warmtevraag (MJ)	2 500	5 000	10 000	20 000 MJ = 5 556 kWh	40 000 MJ = 11 111 kWh	60 000 MJ = 16 667 kWh	80 000	100 000
Warmtevraag (kWh)	694	1 389	2 778	5 556	11 111	16 667	22 222	27 778
Taanvoer								
35	5.24	5.24	5.24	5.238	5.215	5.176	5.142	5.142
45	4.828	4.828	4.828	4.823	4.827	4.832	4.842	4.855
60	4.195	4.195	4.195	4.193	4.244	4.296	4.342	4.381

Tabel-14.1

Uit deze grafiek is af te lezen dat de SCOP vooral bepaald wordt door de aanvoertemperatuur van het warmtedistributiesysteem en in veel minder mate door de warmtevraag.

Formule (9) en (10) laten zien dat er een verband bestaat tussen de SCOP en het temperatuur - verschil van Ta en Tb. In fig. 14-3 is daarom de SCOP weergegeven als functie van dit temperatuurverschil voor deze woningen met een warmtevraag tussen ca 1300 en 17000 kWh. Op deze verzameling meetpunten is een lineaire regressieanalyse toegepast. Hieruit blijkt dat de SCOP voor lucht/water warmtepompen te berekenen is met de empirische formule

$$SCOP = 6.3412 - 0.0399 * (Ta - Tb) \quad (11)$$

De variantie van het dit rekenmodel $R^2 = 0.9955$. De verschillen in deze verzameling COP waarden zijn dus voor 99.5 % met deze eenvoudige empirische formule te verklaren.

Men kan terecht opmerken dat het afschakelen van de warmtepomp bij een hogere gemiddelde buitenluchttemperatuur in een hybride warmtepompsysteem tot relatief meer starts en stops zal leiden en daarmee de SCOP zal beïnvloeden. Maar bij een verlaagde warmtevraag van de woning treden ook meer stops en starts op. Dit leidt evenwel tot verwaarloosbare correcties op de SCOP, zie fig.14-2 en 14-3, zodat formule (11) voor deze woningen als algemeen geweldig kan worden beschouwd.

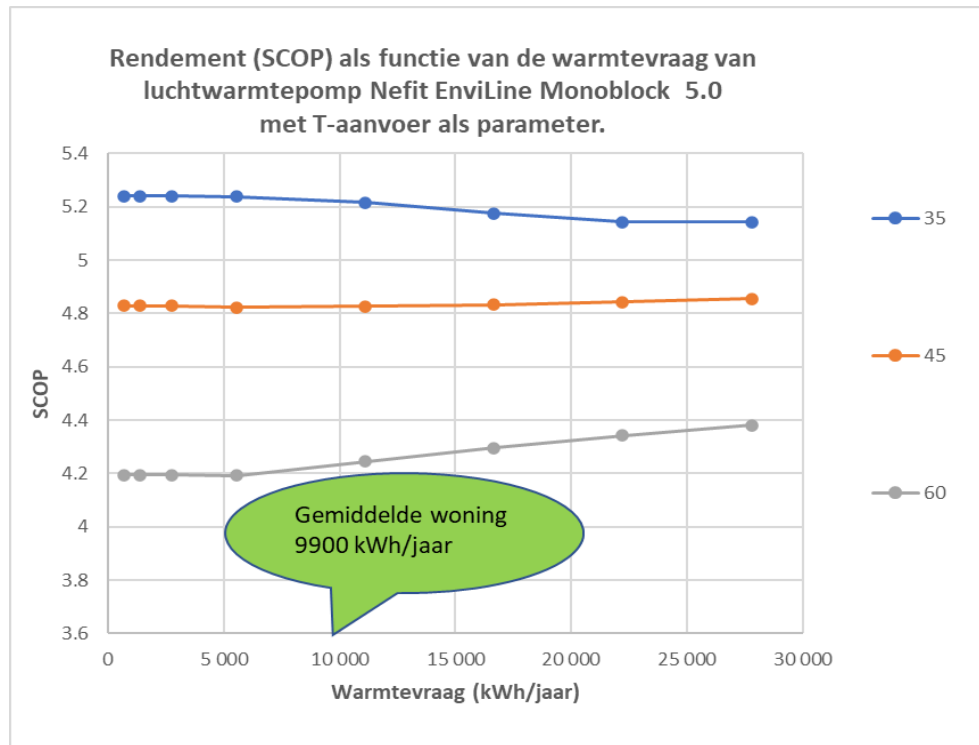


Fig. 14-2 Opwekkingsrendementen volgens NEN 7120

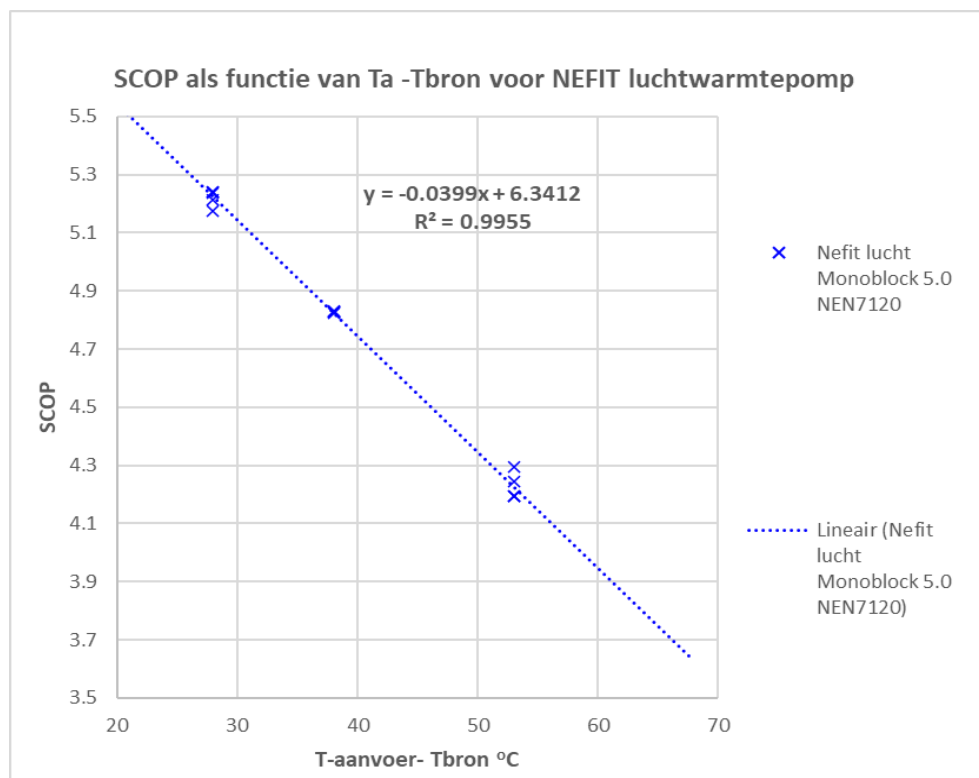


Fig. 14-3 SCOP bij een Nefit Monoblock luchtwarmtepomp

14.2.5 Formule voor SCOP bodemwarmtepomp

De toe te passen formule voor de SCOP is in dit rapport gebaseerd op de specificaties van een moderne modulerende bodemwarmtepomp: de NIBE bodemwarmtepomp S1255-06. De SCOP van deze warmtepomp is bepaald volgens EN14825. Omdat deze bij slechts 2 maximale aanvoertemperaturen van het warmtedistributiesysteem de COP is bepaald, kan niet worden onderzocht of er een lineair verband bestaat tussen de COP en de term $T_a - T_b$. Aangezien dit bij lucht/water warmtepompen wel het geval is, is het zeer onwaarschijnlijk dat dit hier niet het geval zou zijn. In fig. 14-4 is de SCOP als functie van $T_a - T_b$ weergegeven.

Voor deze bodemwarmtepomp is de SCOP te berekenen met de empirische formule

$$\text{SCOP} = 6.475 - 0.067 * (T_a - T_b) \quad (12)$$

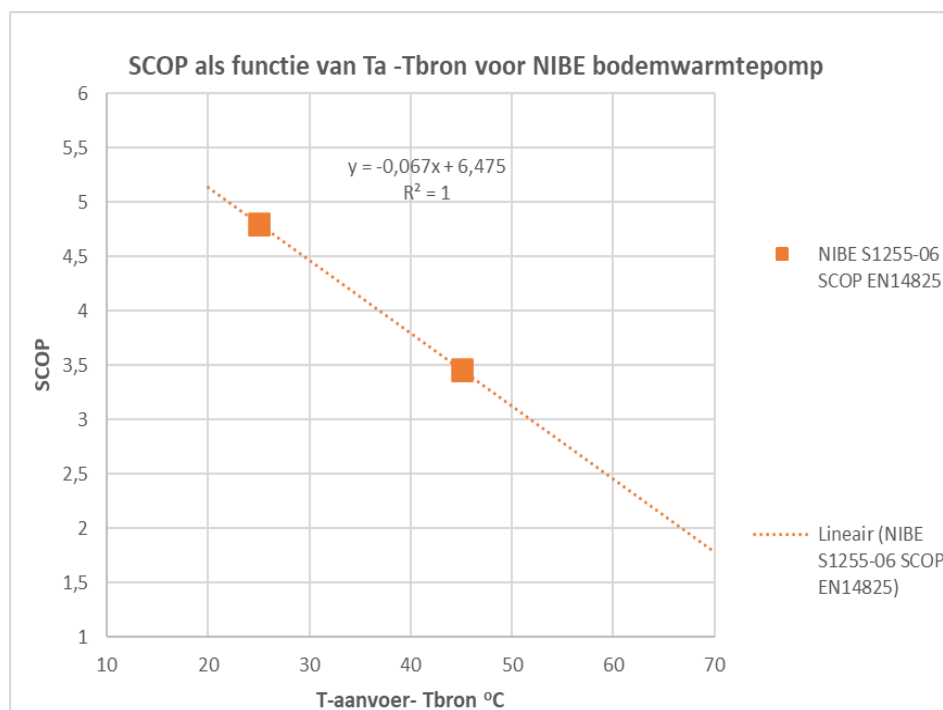


Fig. 14-4 SCOP bij een NIBE bodemwarmtepomp

14.2.6 Vermogen

Het vermogen voor warmtepompen moet volgens NTA 8800 worden bepaald volgens EN14511 (vollast) bij een aanvoertemperatuur van maximaal 35 en een aanvoertemperatuur van 45 $^\circ\text{C}$ (gemiddeld).

14.2.7 Optimalisatie bivalent warmtepompsysteem

14.2.7.1 Optimale inschakelpunt.

Bij het inschakelen van de hulpverwarming ingeschakeld worden 2 temperatuurtrajecten situaties te onderscheiden.

A Buitenluchttemperatuur boven het inschakelpunt van de bijverwarming.

In dit geval levert de warmtepomp alle benodigde warmte.

B Buitenluchttemperatuur beneden het inschakelpunt van de bijverwarming.

Bij een elektrische warmtepomp is er in dit temperatuurtraject sprake van een bivalent systeem. De hoeveelheid door de warmtepomp geproduceerde warmte is dan afhankelijk van de vermogensverhouding van de elektrische verwarming en de warmtepomp. Bij een warmtepomp van 5 kW en elektrische spiraal van 9 kW wordt door de warmtepomp dan nog ca 35 % van de gevraagde warmte produceert. Deze fractie is afhankelijk van de selectie van de warmtepomp en wordt in dit onderzoek als constant verondersteld.

Geen rekening is gehouden met het feit dat het vermogen van de warmtepomp ook een functie van de term $T_a - T_b$ is. De fractie warmte, geleverd door de warmtepomp is in werkelijkheid dus nog iets lager. Omdat dit slechts voor een zeer kleine fractie van de jaarlijkse warmtevraag een rol speelt, is de hiermee gemaakte rekenfout verwaarloosbaar klein.

Bij een hybride warmtepomp neemt de HR ketel de warmteproductie dan geheel over. Hiermee wordt met een hybride warmtepomp het elektriciteitsnet ontlast.

Qua investering en jaarkosten kan het aantrekkelijk zijn bij een wat hogere buitentemperatuur de hulpverwarming in te schakelen. In dat geval stijgt de gemiddelde buitentemperatuur tijdens de bedrijfsuren. Voor beide temperatuurtrajecten moet zowel de warmtevraag per warmteopwekker als de opwekkingsrendement worden berekend. In NTA 8800, tabel Q17, is hiervoor een verdeling van de buitentemperatuur per uur gegeven. Hiermee is de fractie van de warmtevraag voor de bijverwarming als functie van het inschakelpunt van de bijverwarming berekend. Deze is weergegeven in fig.14-5. De y-as heeft een logaritmische schaal omwille van een goede afleesnauwkeurigheid.

Uit dezelfde tabel is voor beide situaties eveneens de gemiddelde buitentemperatuur tijdens de bedrijfsuren van de lucht/water warmtepomp als functie van het inschakelpunt van de bijverwarming berekend. Deze resultaten zijn weergegeven in fig. 14-6.

Met formule (11) is nu de SCOP als functie van deze inschakeltemperatuur te berekenen. Het resultaat is in fig. 14-7 is weergegeven.

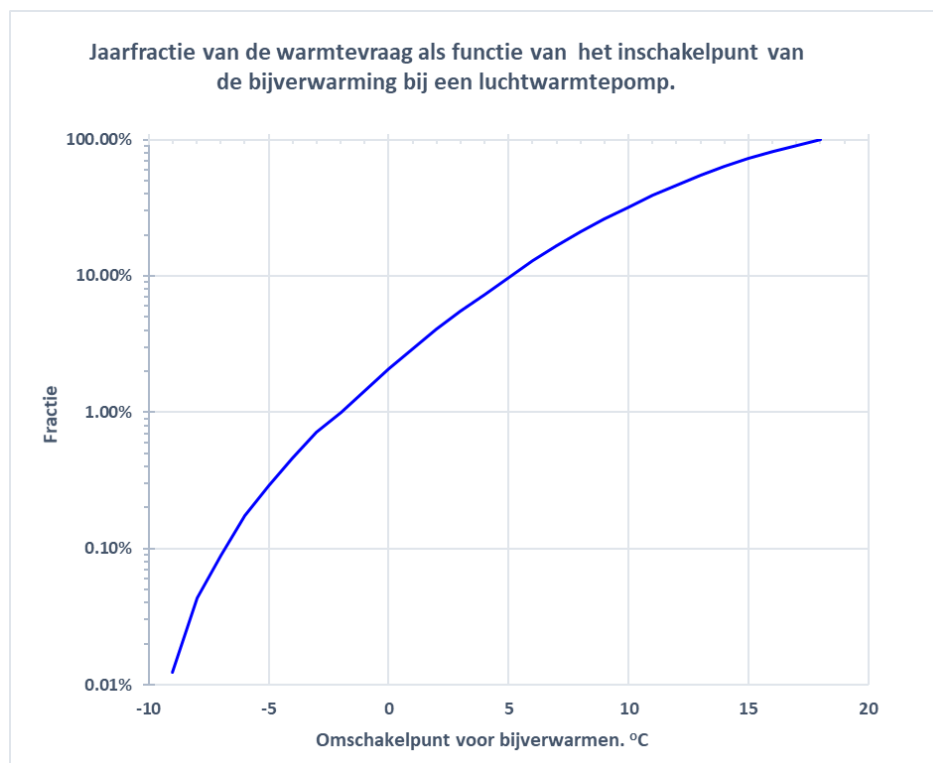


Fig. 14-5 Jaarfractie warmtevraag voor de bijverwarming bij een variabel omschakelpunt

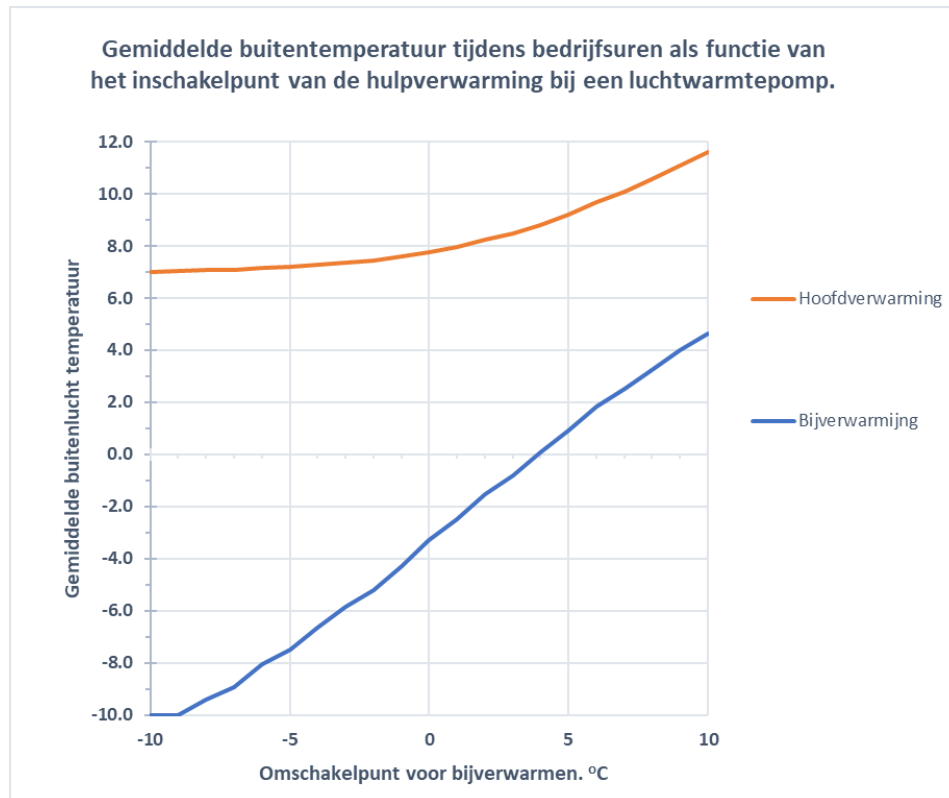


Fig.14-6 Gemiddelde buitentemperatuur tijdens bedrijfsuren als functie van de inschakeltemperatuur van de hulpverwarming bij een lucht/water warmtepomp.

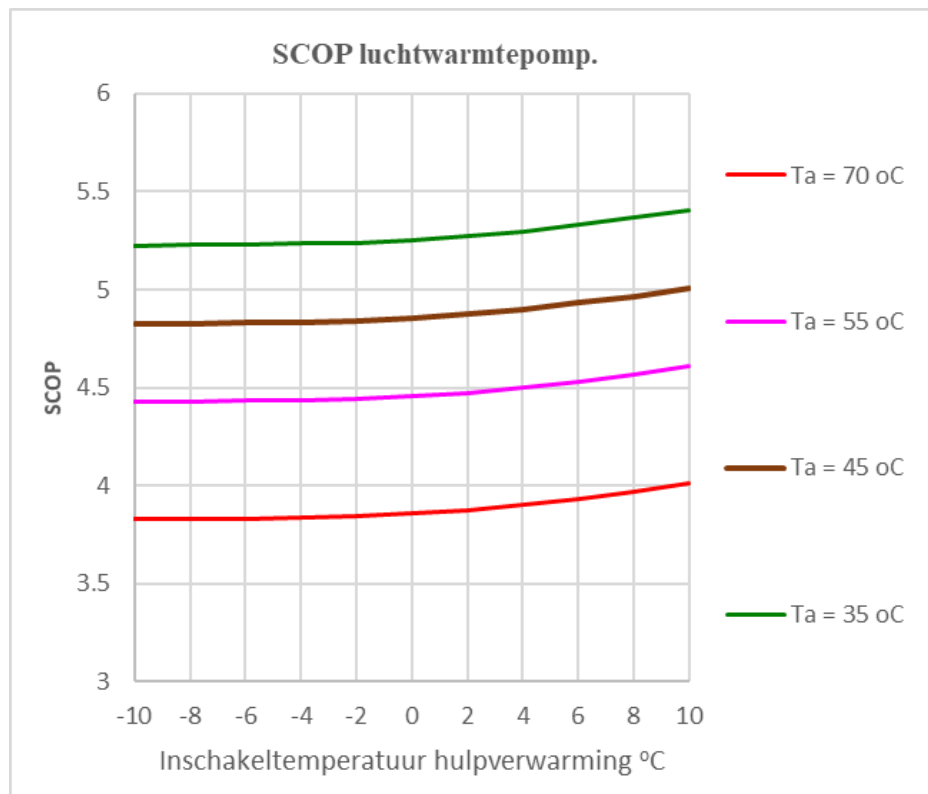


Fig. 14-7 SCOP van een lucht-water warmtepomp als functie van inschakeltemperatuur hulpverwarming

14.2.8 Kleinere pomp

Omdat bij een luchtwarmtepomp altijd een hulpverwarming beschikbaar is, kan een kleinere warmtepomp worden geselecteerd. De hierbij toe te passen vermogensreductiefactor (β) staat vermeld in tabel 14-2. Deze indicatieve tabel is ontleend aan warmtepomp-weetjes.nl. Deze geeft voor warmtepompen een minder snelle reductie, dan tabel 9.23 uit NTA-8800, zie fig. 14-8. Dat is voor warmtepompen een meer betrouwbare tabel omdat deze tabel rekening houdt met het gegeven dat bij een hoge dekkingsgraad van de warmtepomp de hulpverwarming bij een lage buitenluchttemperatuur wordt ingeschakeld, als de capaciteit van de luchtwarmtepomp al is afgenomen. Een reële vermogensreductie van ca 20% is mogelijk bij een dekkingsgraad van de warmtepomp van 97% of lager. Volgens fig. 14-5 is dat bij een inschakeltemperatuur van de hulpverwarming van +1 °C.

Warmtepompinzet	Warmtepomp-weetjes.nl
Beta factor (reductie vermogen)	Dekkingsgraad
0.5000	92.00%
0.5250	92.50%
0.5500	93.00%
0.5750	93.50%
0.6000	94.00%
0.6250	94.25%
0.6500	94.50%
0.6750	94.75%
0.7000	95.00%
0.7250	95.50%
0.7500	96.00%
0.7750	96.50%
0.8000	97.00%
0.8250	97.25%
0.8500	97.50%
0.8750	97.75%
0.9900	100.00%

Tabel 14-2 Vermogensreductiefactor

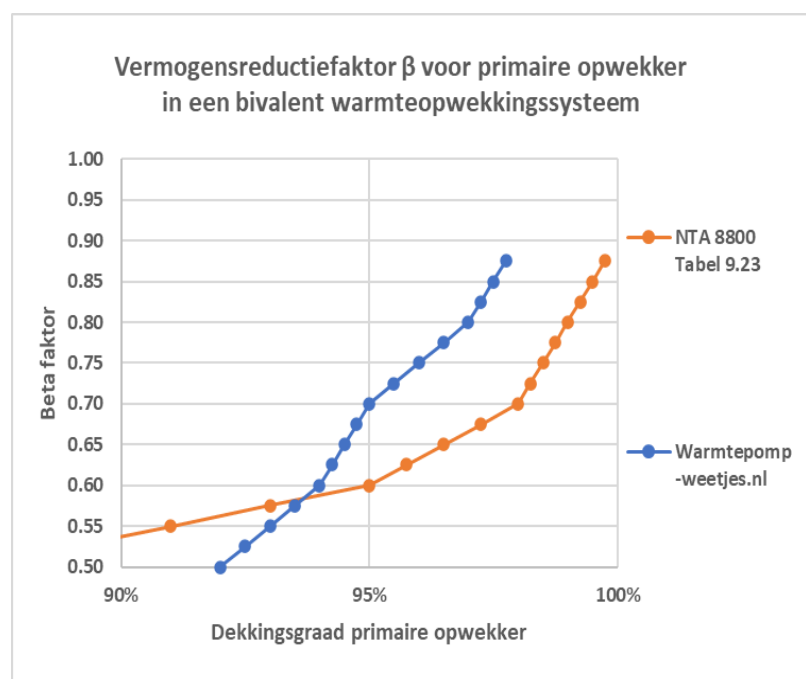


Fig. 14-8 Grafiek Vermogensreductiefactor

Draaiuren monovalente WP ruimteverwarming

Warmtevraag kWh	Vollasturen WP uur
2000	1000
5000	1000
6070	1012
8108	1201
10565	1409
17161	1634
22532	1878
27369	2147
32706	2423

Tabel 14-3 Vollasturen volgens www.warmtepomp-weetjes.nl

14.3 Bijlage -3 Kostencalculaties voor ruimteverwarming en tapwater

Kostencalculatie voor ruimteverwarming en tapwater met hybride warmtepomp of HR ketel

Uitgangspunten

Totale gasverbruik	m3	1464
Gasverbruik koken en tapwater	m3	321
Gasverbruik ruimteverwarming	m3	1143.0
Warmtevraag ruimteverwarming	kWh-th	10 004
Tarief aardgas	€ / m3	0.780
Tarief elektra	€ / kWh	€ 0.23
Rente	%	2.0%

Opmerking

Systeem instellingen

Methode:		HR Ketel	Hybride warmtepomp	WP met radiatoren
Maximale aanvoertemperatuur	°C	70	45	70
Omschakelpunt warmtepomp naar HR ketel	°C	-	-4.0	-10.0

Verbruik ruimteverwarming

COP (A7/W35):		-	4.60	4.60
Opwekkingsrendement (SCOP) hoofdtoestel		0.95	4.83	3.83
Opwekkingsrendement tijdens bijstook	-	-	0.92	0.92
Dekkingsgraad hoofdtoestel		100%	99.5%	100.0%
Rendement warmtedistributie in de woning	-	0.943	0.957	0.943
Elektra ruimte-verwarming	kWh-e	60	2184	2734
Gas ruimte-verwarming	m3	1143	5	0
Totale gasverbruik		1464	326	321

Berekend uit metingen volgens NEN 7120

Ketelpomp en distributiepomp elk 60 kWh

Vermogen warmtepomp

Vollasturen :	uur		1201	1201
Benodigde capaciteit	kW-th		8.3	8.3
Nominaal vermogen WP (A7/W35)	kW-th		7.9	10.0

Investerings

HR- ketel	€ 2 000	€ 2 000	€ 2 000
Warmtepomp, incl subsidie		€ 4 500	€ 5 500
Warmtedistributie: LT radiatoren		€ 5 000	-
Investerings	€ 2 000	€ 11 500	€ 7 500
Meerkosten		€ 9 500	€ 5 500

Direkte kosten Duurzame warmte

Elektra	€ 14	€ 502	€ 629
Gas	€ 1 142	€ 255	€ 250
Netwerkkosten gas en elektra	€ 351	€ 351	€ 351
Onderhoud	€ 150	€ 420	€ 420
Rente	€ 20	€ 115	€ 75
Totale kosten	€ 1 677	€ 1 643	€ 1 725
Besparing		€ 34	€ -48
Terugverdientijd		280.5	-113.6