

Energiebesparing en CO₂-emissiereductie in de utiliteitsbouw en collectieve woningbouw door gaswarmtepompen en mini-wkk

potentieel 2010-2030

Mei 2011



Business Development Holland



Opdrachtgever
Platform Nieuw Gas
p/a Postbus 8242
3503 RE Utrecht



Auteurs

Energy Matters B.V.	Driebergen
Paul Friedel (contactpersoon)	
Margot van Gastel	
Business Development Holland B.V.	Harderwijk
Peter Wagener	
Dennis Mosterd	
ECN	Petten
Jeffrey Sipma	
Huib Visser	

Copyright

Uit deze uitgave mag zonder toestemming worden geciteerd, mits met bronvermelding en onder verantwoordelijkheid van de auteur die citeert. Hetzelfde geldt voor grafieken en afbeeldingen. Gebruik van informatie of materiaal uit dit rapport zonder bronvermelding, in welke vorm of hoedanigheid dan ook, is een schending van het auteursrecht.

DISCLAIMER

Scope

Dit rapport beschrijft het *technisch potentieel* voor energiebesparing en vermindering van CO₂-uitstoot in de utiliteitsbouw door toepassing van warmtekrachtkoppeling (wkk) en gaswarmtepompen (gwp). De business cases, met aspecten zoals marketing en rentabiliteit (meerkosten, financieel eindplaatje voor eindgebruiker inclusief terugleververgoedingen, etc.), zijn niet specifiek beschouwd. Ook maatschappelijke, politieke en organisatorische ontwikkelingen en regelgeving zijn eveneens buiten beschouwing gelaten.

De utiliteitssector is voor deze studie ingedeeld in zes sectoren:

1. collectieve systemen in de woningbouw (excl. stadsverwarming);
2. hotel- en recreatiebranche;
3. kantoren;
4. onderwijsinstellingen (hoger onderwijs);
5. ziekenhuizen (cure);
6. zorginstellingen (care).

Waar in dit rapport sprake is van utiliteitsbouw, wordt steeds óók woningbouw met collectieve verwarmingssystemen bedoeld. Strikt genomen is dit niet correct, maar voor de eenvoud is besloten dit taalgebruik toch te hanteren.

Bij de berekening van het technisch potentieel is er vanuit gegaan dat alle gebouwen worden voorzien van wkk of gwp. In de praktijk zal dit niet gehaald worden, aangezien de bovengenoemde factoren een rol spelen, er concurrerende technieken op de markt zijn en er altijd een zekere tijd verstrijkt voordat efficiënte technieken hun maximale penetratiegraad bereiken.

Stel dat bijvoorbeeld dat wkk op basis van een brandstofcel vanaf 2030 in 30% van de gevallen wordt ingezet bij vervanging van een oude installatie. Dan zal in de loop van de jaren hierna (rond 2035) uiteindelijk 30% van het in deze studie berekende technische potentieel daadwerkelijk gerealiseerd worden.

Afbakening en uitgangspunten

- Koudevraag en koudetoepassingen worden in deze studie niet beschouwd. WKK en gaswarmtepompen zijn vooral interessant als de verwarmingsvraag *leidend* is. Indien naast een warmtevraag ook een koudevraag aanwezig is, kan deze door wkk i.c.m. absorptiekoeling of door een gaswarmtepomp efficiënt worden ingevuld. Bij de berekeningen in deze studie zijn de effecten hiervan echter niet bekeken.
- Uitgangspunt is de inzet van aardgas van Groningen-kwaliteit. Het effect van bijmengen van alternatieve, duurzame energiedragers zoals groen gas of waterstof is geen onderdeel van deze studie.
- Alle in dit rapport gehanteerde verbrandingswaarden zijn op *bovenwaarde*, tenzij anders aangegeven. Ter vergelijking is op enkele plaatsen tevens de bijbehorende grootheid op *onderwaarde* genoemd.
- Voor de toekomstige rendementen van wkk en gwp is gebruik gemaakt van prognoses gebaseerd op metingen en expertopinies.
- Als referentie voor warmteopwekking is gekozen voor de HR-ketel; als referentie voor elektriciteitsproductie is gekozen voor het gemiddeld park rende-

ment; de ontwikkeling van gebouwoppervlakte en energievraag is volgens het SAVE-S model van ECN.

SAMENVATTING

Waarom deze studie?

Gaswarmtepompen (gwp) en mini-wkk (wkk) zijn voor de gebouwde omgeving naast vraagreductie goede mogelijkheden om efficiënt en tegen relatief lage CO₂-uitstoot warmte op te wekken. Als alle rendabele maatregelen voor vraagreductie zijn genomen, kunnen beide technieken in de utiliteitssector (en collectieve woningbouw) een rol kunnen spelen bij energiebesparing en CO₂-emissiereductie. Wat technisch gezien de mogelijkheden zijn om bij te dragen aan de energiebesparings- en emissiereductiedoelstellingen van de overheid, en hoe die markt is opgebouwd is echter beperkt inzichtelijk.

De utiliteitsbouw in Nederland bestaat uit een zeer heterogene groep gebouwen, die in het verleden met wisselend succes door diverse instanties in kaart is gebracht. Het energiegebruik in diverse sectoren en de mogelijkheden tot energiebesparing zijn door de grote onderlinge verschillen lastig te bepalen.

Er zijn deelstudies gedaan naar het besparingspotentieel van mini-wkk en gaswarmtepompen in individuele gevallen. Ook is algemeen onderzoek gedaan naar de trends in het energiegebruik en naar de gebouwenvoorraad in de utiliteitsbouw, maar er is geen recente overkoepelende studie die de ontwikkelingen in de utiliteitsbouw direct relateert aan de technische mogelijkheden van mini-wkk en gaswarmtepompen.

Deze studie maakt gebruik van enkele nieuwe databronnen om te komen tot recente en betrouwbare schattingen van het daadwerkelijk energiegebruik in verschillende sectoren van de utiliteitsbouw.

Bij elkaar genomen biedt deze studie daarom nieuwe inzichten in de *technische* mogelijkheden voor energiebesparing en CO₂-emissiebeperking door mini-wkk en gaswarmtepompen. Voor de realisatie van energiebesparing en emissiebeperking is inzicht in deze mogelijkheden essentieel.

Uitgangspunten

In samenspraak met de opdrachtgever hebben de auteurs ervoor gekozen om zich binnen deze studie zich te richten op zes specifieke segmenten in de utiliteitsbouw, te weten:

1. collectieve systemen in de woningbouw¹ (exclusief stadsverwarming);
2. hotel- en recreatiebranche;
3. kantoren;
4. onderwijsinstellingen (hoger onderwijs);
5. ziekenhuizen (cure);
6. zorginstellingen (care).

Gebaseerd op de bestaande kennis van deze segmenten, hebben de auteurs de inschatting gemaakt dat deze genoemde zes de meest kansrijke en potentievolle segmenten zijn in de utiliteit voor energiebesparing en emissiereductie door middel van mini-wkk en gaswarmtepompen. Samen vormen de sectoren 2 tot 6 ca. 70%

¹ Waar in dit rapport sprake is van utiliteitsbouw, wordt steeds óók woningbouw met collectieve verwarmingssystemen bedoeld. Strikt genomen is dit niet correct, maar voor de eenvoud is besloten dit taalgebruik toch te hanteren.

van de warmtevraag in de utiliteitsbouw (excl. collectieve systemen in de woningbouw).

Deze studie beperkt zich tot de technische besparingsmogelijkheden. Vragen met betrekking tot onder meer rentabiliteit, regelgeving, politiek draagvlak, financiering etc. worden bewust niet beschouwd. Deze studie zou juist een aanleiding kunnen zijn om dergelijke randvoorwaarden voor de toepassing van gaswarmtepompen en mini-wkk nader te bekijken en wellicht te verbeteren.

Data

In deze studie is gebruik gemaakt van de volgende data:

1. Basisadministratie Adressen en Gebouwen (BAG), die recent is opgeleverd door het ministerie VROM, Wonen Wijken & Integratie (inmiddels onderdeel van het ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties);
2. Data van AgentschapNL uit de algemene databank en de database van energie labels voor de utiliteit;
3. Gebruiksdata van Liander;
4. Specifieke data per segment van ECN. Deze gegevens zijn afgeleid van gegevens die voor veelvuldige beleidsstudies voor de overheid worden gebruikt.

Data die op detailniveau onder een vertrouwelijkheidsverklaring ter beschikking is gesteld (Liander), is in deze studie bewerkt tot een hoger aggregatieniveau, op basis waarvan voor de zes segmenten de diverse analyses mogelijk zijn gemaakt. Voorafgaand aan deze analyses is door de auteurs in overleg met de opdrachtgever bepaald welke inzichten wij de lezer van de studie wilden bieden.

Resultaten

De uitkomsten van deze studie bieden beleidsmakers bij de overheid, adviesbureaus en beslissers over energiesystemen in de zes genoemde sectoren een cijfermatig onderbouwd inzicht in het technische potentieel voor energiebesparing en emissiereductie met mini-wkk en gaswarmtepompen in de Nederlandse utiliteit.

Zoals aangegeven beperkt deze studie zich tot de *technische* mogelijkheden. Het is niet zondermeer mogelijk de resultaten te verabsoluteren. Weltoont de studie aan dat mini-wkk en gaswarmtepompen op een effectieve manier het energiegebruik en de CO₂-emissie kunnen verminderen. Deze besparing kan gerealiseerd worden door inzet van aardgas, de brandstof die door de Nederlandse overheid is gekarakteriseerd als belangrijke speler in de energietransitie [EZ 2008].

Mini-wkk en gaswarmtepompen kunnen daarom tot de instrumenten behoren die worden ingezet voor het realiseren van de diverse doelstellingen in het kader van energietransitie en de verduurzaming van de energievoorziening.

Onderstaande twee tabellen geven een overzicht van het technisch besparingspotentieel per sector voor de verschillende technologische opties. De getallen geven de maximale besparing/vermindering weer die in 2030 gerealiseerd zou kunnen worden.

Sector	Besparing primaire energie			
	WKK gasmotor	WKK brandstofcel	GWP gasmotor	GWP absorptie
Woningbouw coll.	26%	87%	21%	21%
Hotel & Recreatie	17%	60%	15%	15%
Kantoor	12%	43%	12%	12%
Hoger onderwijs	25%	76%	19%	19%
Zorg (Cure)	27%	79%	22%	21%
Zorg (Care)	33%	102%	27%	26%

Sector	Vermindering CO ₂ -uitstoot			
	WKK gasmotor	WKK brandstofcel	GWP gasmotor	GWP absorptie
Woningbouw coll.	41%	134%	18%	18%
Hotel & Recreatie	26%	87%	12%	12%
Kantoor	17%	61%	10%	9%
Hoger onderwijs	40%	115%	16%	16%
Zorg (Cure)	41%	119%	19%	18%
Zorg (Care)	54%	161%	24%	23%

De besparing is bepaald door het primaire brandstofverbruik en de daarbij behorende CO₂-uitstoot te vergelijken met de referentiesituatie, bestaande uit warmteproductie met HR-ketel en elektriciteitsproductie door het 'gemiddeld centraal park'.

Afhankelijk van de technologie en de keuze voor een referentie loopt de besparing flink uiteen. De besparing op primaire energie en de vermindering van de CO₂-uitstoot is voor alle technologieën aanzienlijk, gezien de percentages in bovenstaande tabellen.

De wkk's zijn warmtevraagvolgende ingezet. Elektriciteitsproductie door wkk is in mindering gebracht op de elektriciteitsvraag in de sector. Hierdoor kan een forse besparing op primaire energie en CO₂-uitstoot worden behaald.

Voor brandstofcellen is de berekende besparing het grootst. Hier is een besparing van meer dan 100% zelfs mogelijk. In deze gevallen is de besparing die behaald wordt door de elektriciteitsproductie groter dan de energie- en/of CO₂-inhoud van het aardgas dat in de brandstofcel verbruikt wordt. Hierbij moet echter worden aangetekend dat de technologische ontwikkelingen voor brandstofcellen nog zeer onzeker zijn.

Bij het ontsluiten van het berekende potentieel doen zich bij beide technologieën knelpunten voor op het vlak van informatievoorziening, kennisoverdracht, financiering, wet- en regelgeving en in mindere mate op het gebied van techniek. Hoofdstuk 6 gaat hier verder op in.

INHOUDSOPGAVE

Disclaimer	iii
Samenvatting.....	v
Inhoudsopgave.....	viii
1. Achtergronden en opzet	11
1.1. Inleiding	11
1.2. Rapportage.....	12
1.3. Onderzoeksmethode en bronnen.....	12
1.4. Wat is mini-wkk?.....	14
1.5. Wat is een gaswarmtepomp?	17
1.5.1. De compressiewarmtepomp.....	18
1.5.2. Absorptiesystemen.....	20
2. Technische uitgangspunten en afbakening	25
2.1. Warmteproductie voor ruimteverwarming	25
2.1.1. Ruimteverwarming met mini-wkk.....	26
2.1.2. Ruimteverwarming met gaswarmtepompen	27
2.2. Warmteproductie voor tapwater	29
2.2.1. Tapwater met mini-wkk	29
2.2.2. Tapwater met de gaswarmtepomp	29
2.3. Technisch ontwikkelpotentieel	29
2.3.1. Mini-wkk.....	29
2.3.2. Gaswarmtepompen.....	30
3. Referentiekader	33
3.1. Referentiesituatie van warmte in de utiliteit.....	33
3.2. Referentiesituatie van elektriciteit in de utiliteit.....	34
3.3. Koeling in de utiliteit.....	35
4. Ontwikkelingen in de gebouwde omgeving	37
4.1. Keuze voor sectoren in de utiliteit	37
4.2. Werkwijze	40
4.3. Collectieve woningbouw	41
4.4. Hotel & Recreatie	44
4.5. Kantoren.....	46
4.6. Onderwijs	48
4.7. Zorgsector, Ziekenhuizen (Cure)	50
4.8. Zorgsector, bejaarden-, verzorging- en verpleegtehuizen (Care)	52
5. Potentieel voor mini-wkk en gaswarmtepompen.....	55
5.1. Methodiek.....	55
5.2. Collectieve systemen in de woningbouw.....	57
5.3. Hotel- en recreatiebranche	58
5.4. Kantoren.....	59
5.5. Onderwijsinstellingen.....	60
5.6. Ziekenhuizen (cure).....	61
5.7. Zorginstellingen (care)	62
5.8. Totale besparing en gevoeligheidsanalyse	63
5.9. Uitsplitsing resultaten per technologie	65
5.9.1. Gasmotor-wkk.....	65
5.9.2. Brandstofcel-wkk.....	65

5.9.3.	<i>Gasmotorwarmtepomp</i>	66
5.9.4.	<i>Absorptiewarmtepomp</i>	66
5.10.	Resultaten per sector	67
6.	De resultaten in perspectief	69
6.1.	Belang voor Nederland	69
6.2.	De uitdaging voor efficiënte gastoeppingen	70
6.2.1.	<i>Knelpunten voor mini-wkk</i>	70
6.2.2.	<i>Knelpunten voor gaswarmtepompen</i>	71
	Literatuur en achtergrondinformatie	72
	Lijst van afbeeldingen	74
A1.	Tabellen ontwikkelingen gebouwde omgeving	77
A2.	Tabellen uitgangspunten voor potentieelberekening	81
A3.	Tabellen resultaten potentieelberekening	85

1. ACHTERGRONDEN EN OPZET

1.1. Inleiding

Deze studie geeft een overzicht van het technisch energiebesparings- en CO₂-emissiereductiepotentieel van gaswarmtepompen (gwp) en mini-warmtekrachtkoppeling (wkk) in de utiliteitsbouw. Er is een aantal redenen om een dergelijke studie uit te voeren voor de Nederlandse situatie:

Het belang van aardgas als transitiebrandstof

Vrijwel de gehele Nederlandse gebouwde omgeving heeft laagdrempelig toegang tot een betaalbare en kwalitatief hoogstaande brandstof: aardgas. Deze brandstof is door de Nederlandse overheid aangewezen als transitiebrandstof. Aangezien aardgas van de fossiele brandstoffen een lage koolstofinhoud koppelt aan een – actueel voor Nederland – ruimte beschikbaarheid, is het logisch om de bestaande Nederlandse aardgasinfrastructuur optimaal in te zetten in de transitie naar een zo duurzaam mogelijke samenleving.

In de komende decennia zal de rol van aardgas van belang blijven voor de Nederlandse energievoorziening. Deze studie richt zich daarom op het technisch ontwikkelingspotentieel van twee bestaande op aardgas gebaseerde technieken voor energie- en CO₂-emissiereductie: gaswarmtepompen en mini-wkk.

Het belang van de utiliteitsbouw in Nederland

De utiliteitsbouw is een belangrijke doelgroep voor energiebesparing. Het aantal zelfstandige bedrijven in Nederland is ruim 850.000 [Statline]. Deze bedrijven beschikken vanzelfsprekend niet allemaal over een eigen gebouw, maar afhankelijk van de telwijze bedraagt het aantal gebouwen in de utiliteitssector meer dan honderdduizend². In tegenstelling tot de woningbouw is er voor de utiliteitsbouw een tekort aan nauwkeurige meetgegevens op gebied van energie en gebruiksfuncties [TNO 2010]. Dit maakt het moeilijk om energie- en CO₂-besparing effectief te stimuleren. In deze studie worden voor de utiliteitsbouw nieuw beschikbare gegevens gebruikt die een beter beeld geven van de daadwerkelijke energiebehoefte, en de bijbehorende besparingspotentiën. Dat is mogelijk doordat gebruiktgemaakt is van fysieke gebouwgegevens met betrekking tot oppervlak en energiegebruik.

Dit rapport beperkt zich tot een bepaling van het *technisch potentieel* (zie hoofdstuk 5.1) voor energie- en CO₂-besparing. Het daadwerkelijk te verwerkelijken potentieel is afhankelijk van de prijsstelling van installaties en van de energieprijzen, maar ook van overheidsbeleid en mogelijke ondersteunende maatregelen. Deze potentieelstudie kan dan ook behulpzaam zijn in een discussie over stimulering van energie- en CO₂-emissiereductie in het algemeen, en over stimulering van gastoeepassingen in de utiliteitsbouw en collectieve woningbouw in het bijzonder.

² Waaronder vele winkels en voorzieningen, zoals horeca en kleine dienstverlening.

1.2. Rapportage

De rapportage is als volgt opgebouwd:

In dit hoofdstuk worden de achtergronden en de opzet van deze studie weergegeven. De gebruikte bronnen en het werkingsprincipe van een mini-wkk en gaswarmtepomp worden hier uitgelegd.

In hoofdstuk 2 zijn de technische uitgangspunten en de nodige afbakeningen weergegeven. Het daaropvolgende hoofdstuk 3 geeft het referentiekader aan. Dat wil zeggen, het kader waartegen de mini-wkk en de gaswarmtepomp worden vergeleken om de energiebesparing en de CO₂-emissiereductie te kunnen vaststellen.

Hoofdstuk 4 brengt de gebouwde omgeving voor de utiliteit in kaart en schetst de ontwikkeling hiervan tot 2030. In hoofdstuk 5 wordt het besparingspotentieel bepaald. Het laatste hoofdstuk plaatst deze resultaten in het perspectief van het energiegebruik in Nederland en geeft de implementatie-uitdagingen voor beide technologieën aan.

Deze rapportage is zodanig opgezet dat de lezer de relevante informatie per sector en per technologie tot zich kan nemen. Er is met nadruk getracht geen uitvoerige verhandelingen over de technologieën zelf te publiceren. Hierover zijn door Gasterra recent gedetailleerde naslagwerken gepubliceerd, die voor de geïnteresseerde lezer op aanvraag beschikbaar zijn [GasTerra 2008, 2010]. Deze boeken kunnen als aanvulling op deze rapportage functioneren en andersom.

1.3. Onderzoeksmethode en bronnen

De volgende stappen zijn doorlopen om te komen tot het potentieel voor energiebesparing en CO₂-emissiereductie:

1. De indeling van de utiliteit in sectoren;
(paragraaf 4.1)
2. Het bepalen van het bruto vloeroppervlak (bvo) per sector;
(paragraaf 4.2)
3. Het bepalen van de totale warmtevraag per sector
(paragraaf 4.2)
4. Het vertalen van deze warmtevraag naar een primaire energievraag op basis van de referentietechnologie.
(hoofdstuk 5)
5. Het bepalen van het toepassingsgebied voor wkk en gwp;
(hoofdstuk 5)
6. Bepalen van het besparingspotentieel wkk en gwp in 2010;
(hoofdstuk 5)
7. De ontwikkeling van het bvo per sector tot 2030 bepalen;
(paragraaf 4.2)
8. Per sector de ontwikkeling van de warmtevraag per vierkante meter;
(paragraaf 4.2)
9. Het besparingspotentieel voor mini-wkk en gaswarmtepompen tot 2030;
(hoofdstuk 5)

De 'potentieelbepaling' voor 2010 is als startpunt genomen om de verandering in gebouwvoorraad, energievraag en besparingspotentieel tegen af te zetten.

Als belangrijkste bronnen voor deze studie zijn gebruikt:

- Basisadministratie Adressen en Gebouwen, afgekort als de BAG.
Dit is een adressen- en gebouwenbestand opgezet door VROM en ingevuld door gemeentes. In de BAG staan gegevens over gebouwen zoals gebruiksoppervlak (De vierkante meters zijn afkomstig vanuit de WOZ registratie van de gemeentes in Nederland, en worden voor dit onderzoek als voldoende valide beschouwd), gebruiksdoel, bouwjaar, geometrie en de status van het pand (in gebruik, gesloopt, enz.).
- Gebruiksdata van netwerkbeheerder Liander
Het netwerk van Liander bedient ongeveer 1/3 van Nederland en is ongeveer homogeen verdeeld (de helft van dit gebied is de Randstad en de andere helft omvat de landelijke omgeving). Dit houdt in dat hiermee een representatieve steekproef is genomen met betrekking tot het energieverbruik in de utiliteit in Nederland. Het gebruik van deze gegevensbron kan daarom in potentie een nauwkeuriger beeld van het energieverbruik in de utiliteit leveren dan nu reeds beschikbaar is via [AgentschapNL]

De verbruiksgegevens van Liander zijn gekoppeld met de BAG. Hierdoor is het mogelijk om het gas- en elektriciteitsverbruik per m² Bruto Vloer Oppervlak (BVO) per gebouw te bepalen.

Hiernaast zijn de volgende bronnen intensief geraadpleegd:

- Database en modellen van ECN
- Database energielabels van AgentschapNL
Deze database omvat alle gebouwen in Nederland die momenteel (Status maart 2011) gelabeld zijn. Naast het energielabel staan hierin gegevens vermeld als het verwarmingstype, energieverbruik per m², gebouwtype, enz.
- Statline online databank van het CBS
- Online databank van AgentschapNL

In samenspraak met de opdrachtgever hebben de auteurs ervoor gekozen om zich binnen deze studie te richten op zes segmenten in de utiliteitsbouw, te weten:

1. collectieve systemen in de woningbouw³ (exclusief stadsverwarming);
2. hotel- en recreatiebranche;
3. kantoren;
4. onderwijsinstellingen (hoger onderwijs);
5. ziekenhuizen (cure);
6. zorginstellingen (care).

Gebaseerd op de bestaande kennis van deze segmenten hebben de auteurs de inschatting gemaakt dat deze zes de meest kansrijke en potentievolle segmenten zijn in de utiliteitssector voor energiebesparing en emissiereductie door middel van mini-wkk en gaswarmtepompen.

Data die op detailniveau onder een vertrouwelijkheidsverklaring ter beschikking is gesteld, is in deze studie bewerkt tot een hoger aggregatieniveau, op basis waarvan voor de zes segmenten de diverse analyses mogelijk zijn gemaakt. Voorafgaand aan deze analyses is door de auteurs in overleg met de opdrachtgever bepaald welke inzichten de lezer uit de studie moet kunnen halen.

³ Waar in dit rapport sprake is van utiliteitsbouw, wordt steeds óók woningbouw met collectieve verwarmingssystemen bedoeld. Strikt genomen is dit niet correct, maar voor de eenvoud is besloten dit taalgebruik toch te hanteren.

Validatie van de analyses is gebeurd op basis van bestaande rapportages en databronnen die voorhanden zijn binnen de organisaties van de auteurs, aangevuld met de hiervoor genoemde bronnen. Om het ontwikkelpotentieel van de technologieën te inventariseren is nauw samen gewerkt met fabrikanten en importeurs van deze apparatuur.

1.4. Wat is mini-wkk?

Het wkk-principe

Bij de productie van elektriciteit met behulp van (fossiele) brandstoffen komt onvermijdelijk warmte vrij. Voor een gemiddelde elektriciteitscentrale in Nederland wordt tussen de 40% en 50% van de brandstofinput omgezet in elektriciteit. De rest van de energie komt vrij als warmte. Deze warmte wordt vaak afgevoerd via koeltorens en oppervlaktewater, maar zij kan ook nuttig worden ingezet. Indien warmte en elektriciteit (kracht) beide nuttig worden gebruikt is sprake van warmtekrachtkoppeling, ofwel wkk.

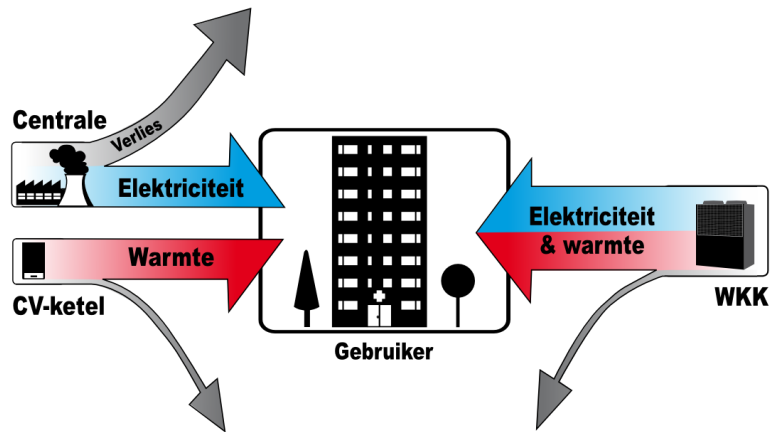
WKK is een algemeen principe dat kan worden toegepast in verschillende situaties, van grote elektriciteitscentrales tot individuele huishoudens [GasTerra 2008, Cogen Nederland 2010]. De technieken die worden toegepast variëren dan ook aanmerkelijk. Voor huishoudens zijn er wkk-concepten beschikbaar op basis van de stirling-motor en kleine gasmotoren. Grootschalige wkk's maken gebruik van stoom- en gasturbines (STEG) of kolencentrales gekoppeld aan een stadswarmtenet of een industriële warmtegebruiker. In de utiliteitsbouw wordt voornamelijk gebruikgemaakt van gasmotoren [GasTerra 2008].

Gasmotoren in de utiliteitsbouw

In de utiliteitsbouw wordt het wkk-principe voornamelijk toegepast in de vorm van gasmotoren. Wanneer in het gebouw behoefte is aan warmte (tapwater of ruimteverwarming), schakelt de motor in. De motor drijft een generator aan, die elektriciteit produceert. Het motorblok en de uitlaatgassen worden gekoeld en de warmte die hierbij vrijkomt wordt gebruikt om aan de warmtevraag te voldoen.

Op deze manier wordt een groot aandeel van de gebruikte brandstof nuttig ingezet. Voor de gelijktijdige productie van elektriciteit en warmte is meer aardgas nodig dan voor de productie van uitsluitend warmte via een HR-ketel. De winst van het wkk-principe zit in de elektriciteitsproductie. Indien elektriciteit via het net wordt ingekocht, zal deze betrokken worden van elektriciteitscentrales ergens in het land. Bij de meeste Nederlandse centrales wordt de warmte niet nuttig ingezet en is het totale rendement dus beperkt. Op basis van primaire energie-inzet en CO₂-uitstoot presteert wkk daarom beter dan gescheiden opwekking van elektriciteit en warmte.⁴

⁴ Dit geldt niet zondemeer. In bijzondere gevallen kan gescheiden opwekking een betere energieprestatie opleveren, bijvoorbeeld wanneer een lokale bron van duurzame warmte of elektriciteit beschikbaar is.



Figuur 1 — Het besparingsprincipe van wkk in de utiliteitsbouw

Schaalgrootte

De utiliteitsbouw is een divers speelveld met gebouwen variërend van kleine buurt-winkeltjes tot grote ziekenhuiscomplexen. De schaalgrootte van de toe te passen wkk-installatie is dan ook per geval verschillend. Gasmotoren met een elektrisch vermogen van enkele kW tot ongeveer 500 kW worden aangeduid als *mini-wkk*. Voor huishoudelijke toepassingen (hooguit enkele kW elektrisch vermogen) is sprake van *micro-wkk*. Er bestaan gasmotoren met een elektrisch vermogen tot tientallen MW. Motoren tot enkele MW worden veel ingezet in grotere ziekenhuizen.



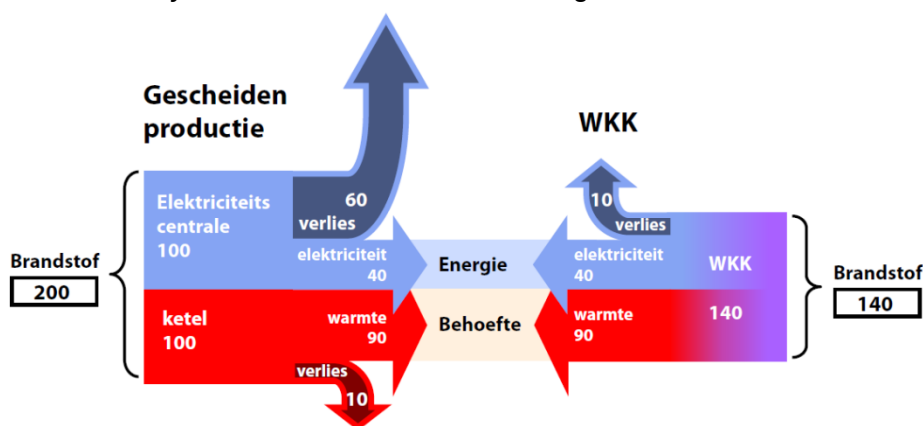
Figuur 2 — Voorbeeld van een mini-wkk

Er zijn vele fabrikanten van mini-wkk die samen een brede range aan producten aanbieden in alle denkbare vermogensklassen. Voor nagenoeg iedere toepassing is een installatie te vinden met het juiste vermogen.

Rendementen

Het rendement van een wkk-installatie is opgebouwd uit twee delen. Het elektrisch rendement geeft aan hoeveel energie wordt geleverd in de vorm van elektriciteit. Het thermisch rendement is de hoeveelheid bruikbare warmte die wordt geleverd door de installatie. Opgeteld vormen deze getallen het totale rendement. Het elek-

trisch rendement van een wordt enigszins beïnvloed door de schaalgrootte. Voor kleine gasmotoren bedraagt het elektrisch rendement circa 25% op bovenwaarde. Voor de grootste motoren is een rendement van meer dan 40% op bovenwaarde haalbaar. Het thermisch rendement van wkk is afhankelijk van de gevraagde verwarmingstemperatuur. Indien de retourtemperatuur van het verwarmingsnet hoog is (HT-systemen), kunnen de uitlaatgassen van de gasmotor niet compleet worden afgekoeld. Hierdoor is het thermisch rendement uiteindelijk beperkt. Indien lagetemperatuurverwarming (LT-systemen) wordt toegepast, is een hoger thermisch rendement haalbaar omdat de rookgassen kunnen condenseren. In de praktijk is een totaalrendement van bijna 80% op bovenwaarde haalbaar voor HT-systemen. Voor kleine motoren is het thermisch rendement dan circa $80\% - 25\% = 55\%$, voor grote motoren is dit $80\% - 40\% = 40\%$. Voor LT-systemen is een totaal rendement van bijna 90% op bovenwaarde haalbaar. Het thermisch rendement varieert van circa 65% voor kleine systemen tot circa 50% voor de grootste motoren.



Figuur 3 — Energiestromen in een wkk.

Nieuwe technieken

Naar verwachting zal in de nabije toekomst de brandstofcel beschikbaar komen voor gebruik in de woningbouw en utiliteitsbouw. In een brandstofcel wordt elektriciteit geproduceerd door middel van een chemische reactie. Er is dus geen sprake van een Carnotcyclus⁵ en hierdoor is een hoge efficiency mogelijk.

Het elektrisch rendement van een brandstofcel kan oplopen tot 54% op bovenwaarde (60% ow). Hierdoor is lokaal elektriciteitsproductie mogelijk met een hoger rendement dan de meeste elektriciteitscentrales hebben. Indien de afvalwarmte van de brandstofcel nuttig gebruikt wordt, ist een grote besparing mogelijk ten opzichte van conventionele systemen. In vergelijking met centrale elektriciteitsproductie en een lokale HR-ketel ist de nuttig gebruikte warmte immers 'gratis'. Vooralsnog ist onzeker wat de betekenis van brandstofcellen voor de utiliteitsbouw kan zijn. In deze studie worden wel berekeningen uitgevoerd voor brandstofcellen, maar de resultaten kunnen slechts met terughoudendheid worden gebruikt. Meer informatie over toekomstige ontwikkelingen ist te vinden in paragraaf 2.3.1.

⁵ Een Carnotcyclus beschrijft het verrichten van arbeid met behulp van het verwarmen en koelen van een medium, zoals lucht. De efficiency van een dergelijke cyclus ist fundamenteel gelimiteerd door de hoogte van de temperaturen die in het proces een rol spelen. Elektriciteitscentrales, motoren en warmtepompen kunnen allen beschreven worden aan de hand van een Carnot-cyclus.

1.5. Wat is een gaswarmtepomp?

Warmtepompen en rendementen

Bij de verbranding van aardgas komt warmte vrij. Wanneer deze warmte vrijkomt op hoge temperatuur (HT) kan ze voor een deel worden omgezet in arbeid (bijvoorbeeld het draaien van de as van een gasmotor) en voor een ander deel in laagtemperatuurwarmte (LT). Zowel HT- als LT-warmte kunnen voorkomen in een warmtepompcyclus. In een warmtepomp wordt warmte van een laag temperatuurniveau naar een hoog temperatuurniveau gebracht. Dit gebeurt bijvoorbeeld in een gebouw waar omgevingswarmte wordt opgewaardeerd naar ruimtetemperatuur, om zo de ruimte te verwarmen. Een ander praktijkvoorbeeld is een koelinstallatie waaraan op een lage temperatuur warmte wordt onttrokken om de inhoud van de koelcel koud te houden, waarna deze warmte wordt afgegeven aan de omgeving.

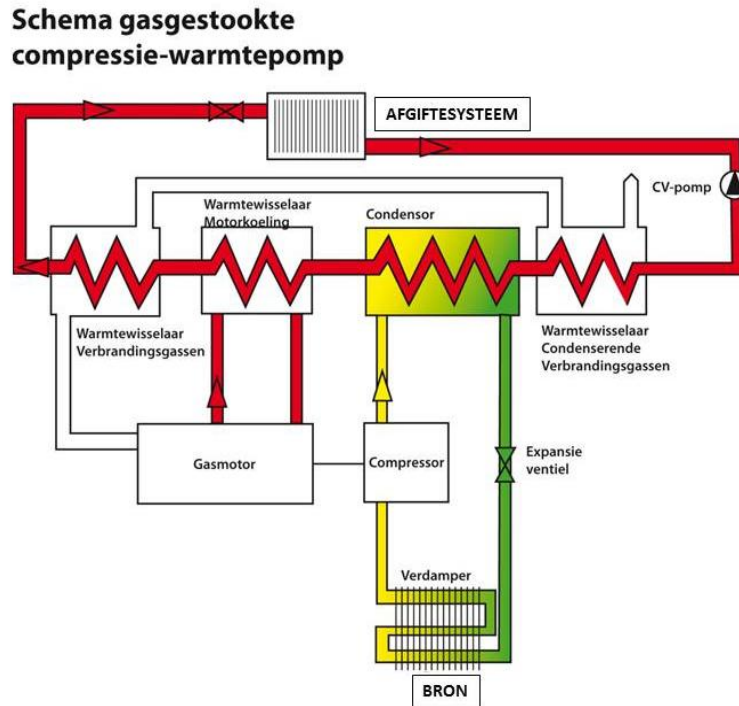
De verplaatsing van warmte is tegen de natuurlijke richting in. Dit is alleen mogelijk wanneer er energie in de vorm van arbeid of warmte aan wordt toegevoegd. De twee principes komen tot uitdrukking in de compressiewarmtepomp (arbeidgedreven) en de absorptiewarmtepomp (warmtegedreven). De werking van gaswarmtepompen en alle varianten die daarbij mogelijk zijn, is uitvoerig beschreven in het boek van Gasterra. De inhoud van dit boek is online te vinden op www.gaswarmtepompboek.nl.

Naast warmtepompen die als bron (buiten)lucht gebruiken als bron om warm cv-water te produceren, bestaan er ook zogenaamde grondgebonden warmtepompen. De gebruiken grondwater als warmtebron. Een grondgebonden warmtepomp wordt ook wel een water/waterwarmtepomp genoemd en een warmtepomp die buitenlucht gebruikt een lucht/waterwarmtepomp.

De water/waterwarmtepomp is in staat om een betere prestatie te leveren dan een lucht/waterwarmtepomp. De investeringskosten zijn echter hoger dan bij een lucht/luchtwarmtepomp omdat er geïnvesteerd moet worden in de aanleg van de bron. Als er te weinig grondwater beschikbaar is of als er bouwkundige beperkingen zijn, kan het zijn dat een grondbron geen optie is.

1.5.1. De compressiewarmtepomp

De compressiewarmtepomp bestaat in essentie uit vier onderdelen: de compressor, de condensor, het expansieorgaan en de verdamper. In de compressiewarmtepomp circuleert een koudemiddel dat bij lage druk in de verdamper verdampt en daar bij lagetemperatuurwarmte opneemt. De damp wordt met behulp van de compressor op hoge druk gebracht. De arbeid die hiervoor nodig is, is in dit geval afkomstig van de gasmotor. Bij hoge druk condenseert het koudemiddel; hierbij komen de opgenomen warmte én de aan de compressor toegevoerde arbeid vrij als warmte bij hoge temperatuur.



Figuur 4 — Schematisch overzicht van een gasmotorgedreven compressiewarmtepomp



Figuur 5 — Voorbeeld van een gasmotorwarmtepomp

Toepassingsgebied

Normaliter zal de gasmotor de warmte leveren bij temperaturen van maximaal circa 90°C. Een klein deel van de warmte (5% tot 10%) kan op hogere temperatuur (110°C tot 120°C) worden gewonnen door de hoge temperatuur van de rookgassen te benutten. Het toepassingsgebied van de warmtepomp wordt vooral bepaald door de temperatuur van de beschikbare bronwarmte in combinatie met de maximale temperatuurlift van 40 tot 50 K (Kelvin). Wordt bijvoorbeeld grondwater met een temperatuur van 10 °C als bronwarmte gebruikt, dan zal de temperatuur van de geleverde warmte maximaal 60 °C bedragen. Is de bronwarmte een industriële restwarmtestroom van 60 °C, dan wordt het mogelijk om lagedruk stoom van 110°C te leveren. Bij deze temperatuurniveaus moet overigens bijzondere aandacht worden besteed aan de selectie van het koudemiddel.

Het toepassingsgebied van de gasmotor gedreven compressiewarmtepomp is dan ook grotendeels beperkt tot ruimteverwarming en enkele industriële lagetemperatuurprocessen.

Schaalgrootte

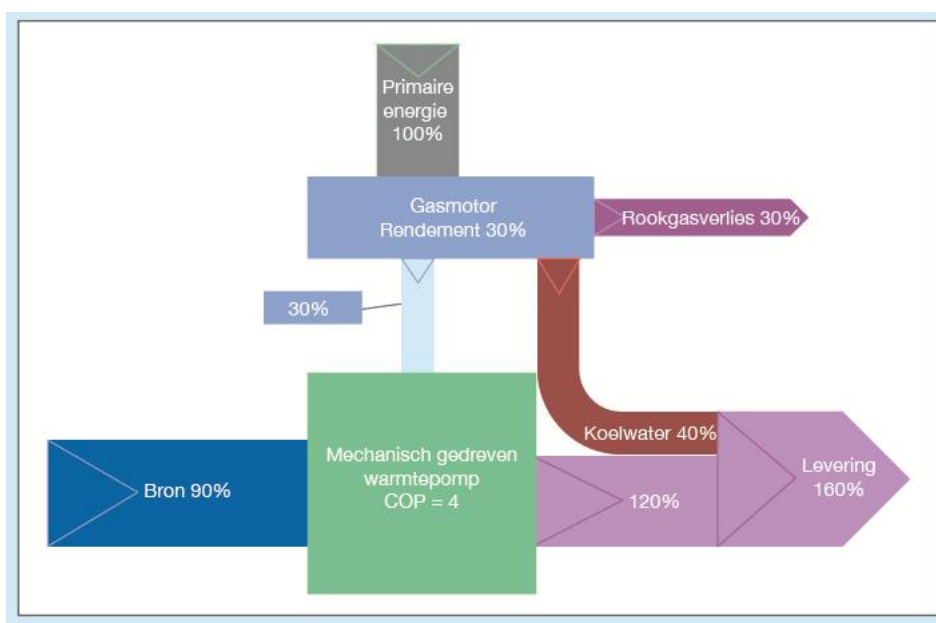
De gasmotoren die in gwp-systemen worden toegepast zijn qua capaciteit en type vergelijkbaar met de motoren voor mini-wkk. Inzet van gaswarmtepompen biedt veel flexibiliteit, omdat voor installaties met een grotere capaciteit meerdere gaswarmtepompen als modules gecombineerd kunnen worden.

Rendementen

Het rendement van de gasmotor wordt opgesplitst in het mechanische rendement en het thermische rendement. Het mechanisch rendement bedraagt 25% tot 40%.

Het thermische rendement, de verhouding tussen het thermische vermogen en de energiestroom van de toegevoerde brandstof, bedraagt 40% tot 65%. De *coefficient of performance* (COP) van de warmtepomp (de verhouding tussen warmte-output en brandstofinput) wordt vooral bepaald door de temperatuur van de bronwarmte en de temperatuur waarop de warmte moet worden geleverd. De maximale COP kan worden bepaald uit het Carnotrendement. Gedetailleerde informatie hierover is te vinden in het boek van GasTerra over gaswarmtepompen [GasTerra 2010].

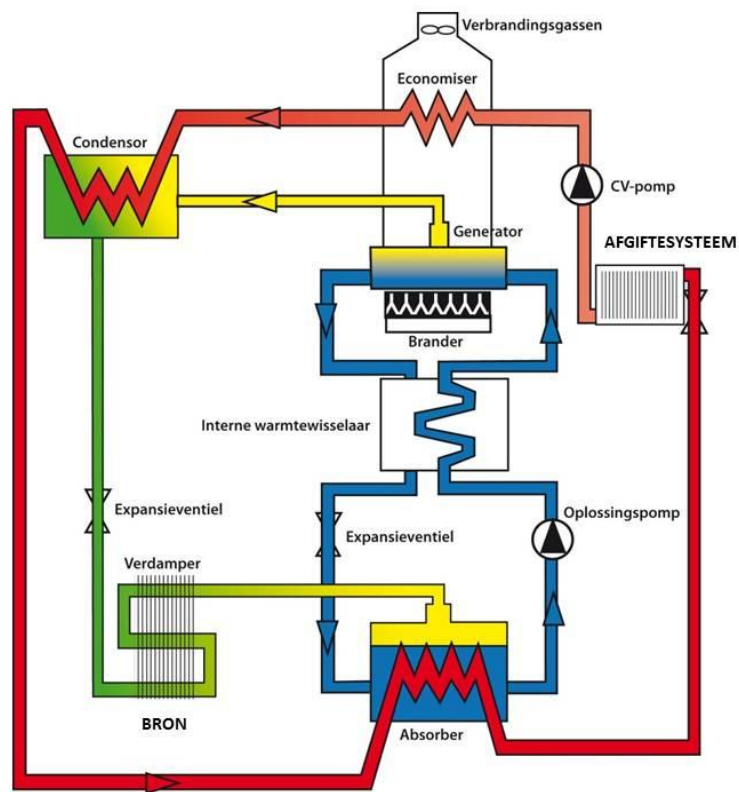
Afhankelijk van de configuratie kan de gasmotorwarmtepomp gelijktijdig koelen en verwarmen (met behulp van de zogeheten driepijpssystemen). Dit heeft een positieve invloed heeft op het jaarrendement van de installatie.



Figuur 6 — Energiestromen in een gasmotorwarmtepomp.

1.5.2. Absorptiesystemen

Vloeistofsorptiesystemen (absorptiewarmtepompen), onderscheiden zich van vaste stof-sorptiesystemen (adsorptiewarmtepompen) door het gebruik van een vloeibaar sorbens. Het voordeel hiervan is dat de vloeistof door het systeem kan worden verplaatst. Hierdoor hoeft alleen het sorbens tussen de beladingsfase en de ontladingsfase te worden opgewarmd of afgekoeld en niet de hele reactor. Ook kan het systeem voorzien worden van tegenstroom vloeistof-vloeistofwarmtewisselaars, waardoor een groot deel van de warmte van het sorbens eenvoudig kan worden teruggewonnen. Ammoniak-water en lithiumbromide-water zijn de meest gebruikte sorbentia voor vloeistofsorptie.



Figuur 7 — Schematische werking van een gasabsorptiewarmtepomp



Figuur 8 — Voorbeeld van een gasabsorptiewarmtepomp

Ammoniak-watersystemen

In het ammoniak-waterabsorptieproces vormt ammoniak het sorbaat (of koudemiddel) en water het sorbens. Ammoniak (NH_3) wordt gemakkelijk opgenomen (geabsorbeerd) in water. Hierbij komt oploswarmte vrij, bij een temperatuur die hoog genoeg is om de warmte aan het verwarmingssysteem over te dragen. Door de ammoniak-wateroplossing te verhitten (met bijvoorbeeld gas) gaat de ammoniak over

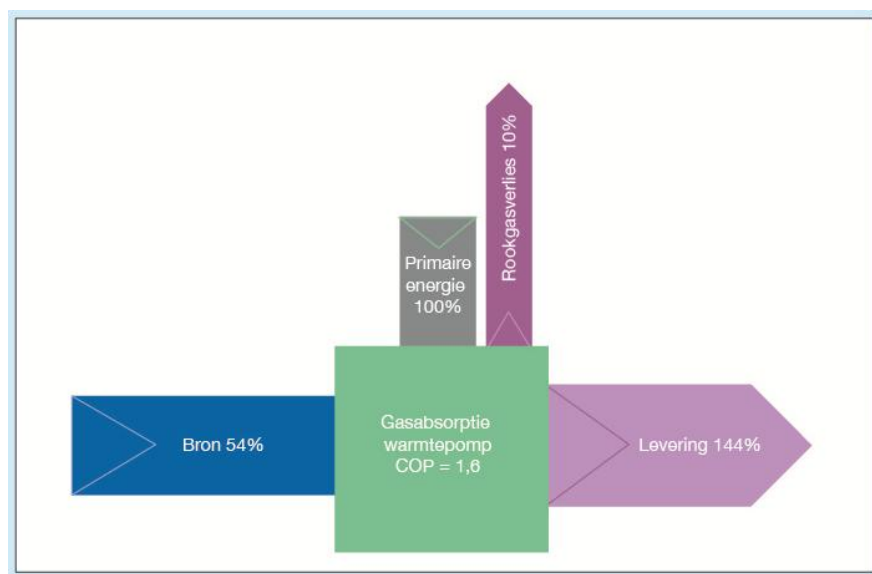
in de gasfase bij hoge druk en kan dan condenseren waarbij de condensatiewarmte aan een verwarmingssysteem wordt overgedragen. De gecondenseerde ammoniak gaat via een drukverlaging naar een verdamper. Het verdampen van ammoniak bij lage temperatuur en druk vraagt warmte. Deze warmte wordt aan de omgeving (lucht, bodem) onttrokken.

Toepassingsgebied

De dampdruk van zuivere ammoniak bedraagt bij kamertemperatuur ongeveer 8 bar en bij -30°C altijd nog 1 bar. Dit maakt ammoniak-watersystemen geschikt voor verwarmingstoepassingen en voor koeltoepassingen tot zeer lage temperatuur. In industriële koelinstallaties worden ze al meer dan honderd jaar gebruikt. De ammoniak-watersystemen, die oorspronkelijk zijn ontwikkeld voor koeling in de gebouwde omgeving, zijn nu doorontwikkeld voor gecombineerde levering van koude en warmte. Ammoniak-watersystemen kunnen bij lage brontemperaturen (tot -20°C) nog functioneren. De warmteafgifte van de warmtepompen ligt tussen 30 en 70°C . Met warmteafgifte op 60 - 70°C ligt ook het aanmaken van warm tapwater nog binnen bereik.

Rendementen

De COP van een gasabsorptiewarmtepomp in verwarmingsbedrijf ligt tussen 1,2 en 1,6. Bij standaard bedrijfscondities (brontemperatuur 7°C en warmtelevering bij 50°C) bedraagt de COP 1,4. In de koelmodus haalt de gasgestookte warmtepomp een COP van 0,67. Voor de DAWP wordt een gemeten jaargemiddelde COP van 1,3 gemeld. Afhankelijk van de configuratie kan de gasabsorptiewarmtepomp gelijktijdig koelen en verwarmen. Dit heeft een positief effect op het jaarrendement van de installatie.



Figuur 9 — Energiestromen in een gasabsorptiewarmtepomp.

Primary Energy Ratio

Een methode om de prestaties van verschillende opwekkingssystemen te kunnen vergelijken is de rendementen terug te rekenen naar het primaire energiegebruik. Dit wordt uitgedrukt in de Primary Energy Ratio (PER). Voor een elektrische arbeid gedreven warmtepomp moet de COP worden vermenigvuldigd met het opwekkingsrendement van elektriciteit. Voor het berekenen van het primaire energiegebruik van een gasmotorgedreven warmtepomp moet de COP worden vermenigvuldigd met

het omzettingsrendement van de gasmotor (circa 30 tot 45%). De bepaling van het primaire energiegebruik van een warmtegedreven warmtepomp is gecompliceerder. In dit geval wordt de COP (en daarmee de PER) doorgaans betrokken op het parasitair elektriciteitsverbruik van pompen, ventilatoren en kleppen. Wanneer echter de warmte uit een gasgestookte wkk-eenheid wordt gebruikt voor bijvoorbeeld absorptiekoeling, dan is er voor de productie van koude wel sprake van primair energiegebruik, in de vorm van een hoeveelheid verbruikt gas. Dit verbruik wordt dan vermindert met de primaire energie die in het Nederlandse elektriciteitsnet nodig geweest zou zijn om de elektriciteit te maken die nu door de wkk is geproduceerd. Alleen op deze manier kunnen de energieprestaties van arbeidgedreven en warmtegedreven warmtepompen onderling worden vergeleken.

2. TECHNISCHE UITGANGSPUNTEN EN AFBAKENING

Dit hoofdstuk beschrijft de uitgangspunten die gehanteerd worden voor het berekenen van het technisch besparingspotentieel door toepassing van mini-wkk en gaswarmtepompen voor ruimteverwarming en tapwaterproductie. Paragraaf 2.3 geeft een indruk van de mogelijke toekomstige ontwikkelingen. In appendix A2 wordt een gedetailleerd getalsmatig overzicht gegeven van alle aannames die in de berekening gebruikt zijn.

In de gebruikte data zijn panden met een aardgasverbruik van minder dan 5000 m³ per jaar en een vloeroppervlak (BVO) van minder dan 200 m² buiten beschouwing gelaten. Hiermee is een ondergrens bepaald voor toepassing van mini-wkk of gaswarmtepompen. Technisch gezien is het mogelijk om kleinere panden met mini-wkk of gaswarmtepompen te verwarmen, maar het energieprofiel en het oppervlakte lijken dergelijke locaties lijkt echter dermate op individuele woningbouw, dat ze voor deze studie niet zijn meegenomen.

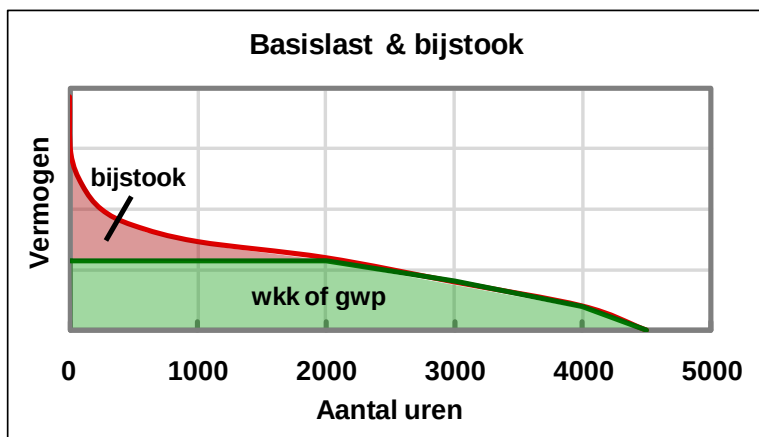
In dit hoofdstuk worden voor beide technologieën achtereenvolgens de warmteproductie voor ruimteverwarming, voor warm tapwater en het ontwikkelpotentieel voor de mini-wkk en de gaswarmtepomp gegeven.

2.1. Warmteproductie voor ruimteverwarming

Bivalent systeem

WKK's of warmtepompen in bestaande installaties worden nagenoeg altijd bivalent uitgevoerd. Dit betekent dat er naast de wkk of warmtepomp (de primaire opwekker) nog een andere warmte- of koudeopwekker is geïnstalleerd. Dit secundaire toestel (meestal een HR-ketel) is energetisch gezien vaak inferieur aan de wkk of warmtepomp, maar kent vaak wel lagere investeringskosten per kilowatt thermisch vermogen. De basislast (veel draaiuren) wordt dan geleverd door de wkk of warmtepomp: dit is het preferente toestel. Pieken in de warmtevraag worden dan bediend door het tweede (niet-preferente) toestel. Dat de energetische prestaties in dat geval lager zijn dan die van de wkk of warmtepomp speelt geen grote rol omdat de inzet (in draaiuren) relatief gering is. Zo ontstaat een systeem dat energetisch en kosten-technisch geoptimaliseerd kan worden.

Een andere reden voor het toepassen van bivalente systemen is dat de bedrijfscondities voor de warmtepomp in extreme situaties buiten het normale toepassingsgebied kunnen treden. Dit kan optreden als de brontemperatuur onder een bepaalde waarde daalt of als de afgiftetemperatuur te hoog wordt. Voor wkk kan een lage lokale elektriciteitsvraag een reden zijn om de wkk tijdelijk uit te zetten. In al deze gevallen kan het niet-preferente toestel bijspringen.



Figuur 10 — Een groot deel van de tijd kan volstaand worden met een beperkt thermisch vermogen. De primaire opwekker vult daarmee circa 80% van de energiebehoefte in. Piekvermogen wordt geleverd door een HR-ketel.

De regeling van de inzet van primaire opwekker (wkk of warmtepomp) en bijstook (HR-ketel) is van groot belang voor de energetische prestaties en het functioneren van het totale systeem. Afhankelijk van het verschil in efficiëntie kan door een niet goed functionerende regeling de prestatie van het totale systeem drastisch worden beperkt. Het is dus van groot belang dat tijdens het ontwerp van het systeem goed wordt nagedacht over de schakelwijze en dat hierbij de inbedrijfstelling voldoende aandacht voor is. De regeling moet bij alle bedrijfscondities functioneren zoals beoogd.

Dekkingsgraad

Voor de berekeningen in deze studie is uitgegaan van een typische verdeling tussen primair systeem en bijstook. Aangenomen wordt dat het vermogen van de wkk of warmtepomp wordt vastgelegd op 30% van de maximale piekbehoefte in een jaar. Veruit het grootste deel van de tijd is dit vermogen toereikend om de warmtevraag te dekken. Alleen bij zeer lage buitentemperaturen is de inzet van het complete piekvermogen (primair + bijstook) nodig. Volgens de binnenkort vast te stellen Energieprestatienorm [NEN 7120] komt een primair vermogen van 30% van de piekvraag overeen met een dekkingsgraad van 79%. Dit houdt in dat in de berekeningen de behoefte aan warmte in een gebouw voor 79% gedekt wordt door een wkk of warmtepomp en dat de resterende 21% worden gedekt door een HR-ketel als bijstook.

2.1.1. Ruimteverwarming met mini-wkk

Hogetemperatuur- en lagetemperatuurafgiftesystemen

Mini-wkk kan in principe in iedere situatie worden ingezet voor ruimteverwarming, mits een toereikende ketelruimte beschikbaar is. Aangezien de koeling van het motorblok warmte levert op een hoog temperatuurniveau, kan hiermee bijna altijd warmte geleverd worden voor het verwarmingssysteem. In bestaande gebouwen is dit een voordeel, want het ombouwen van een afgiftesysteem van hoog temperatuur naar laag temperatuur is niet altijd mogelijk.

Als in het gebouw een lagetemperatuurafgiftesysteem aanwezig is, kunnen de rookgassen van de wkk ver uitgeoeld worden, waardoor meer warmte beschikbaar komt voor ruimteverwarming. Zelfs condensatie van het water in de rookgassen is mogelijk, zodat een HR-wkk ontstaat. Het is daarom gunstig, maar niet noodzakelijk, om in combinatie met wkk te werken met lagetemperatuurverwarming.

Inzet wkk gedurende het jaar

Gasmotoren functioneren optimaal als zij in continubedrijf worden ingezet op een hoge belasting. Veelvuldig aan- en uitschakelen of het draaien in deellast zijn ongunstig voor het rendement. De hierboven genoemde stelregel waarbij wkk circa 80% van de ruimteverwarmingsvraag dekt houdt hiermee rekening. Een goed gedimensioneerde wkk (vermogen 30% van het maximaal benodigde piekvermogen) kan relatief veel continue draaiuren (vollasturen) maken.

Indien de verwarmingsvraag sterk varieert, kan gekozen worden voor het opstellen van meerdere gasmotoren. Deze motoren worden één voor één bij- of afgeschakeld. Hierdoor wordt het aantal schakelmomenten van de individuele motoren beperkt en kunnen de motoren zo veel mogelijk in vollast draaien. Op die manier is het in de meeste situaties mogelijk om het maximale rendement uit de gasmotoren te halen.

2.1.2. Ruimteverwarming met gaswarmtepompen

Bronnen

De warmtebron is een van de belangrijkste onderdelen van een warmtepompsysteem. De warmtebron levert 'gratis' omgevingswarmte, die de energie uit de warmtepomp een duurzaam karakter geeft. Onbruikbare omgevingswarmte (lage temperatuur) wordt met toevoeging van relatief weinig hoogwaardige energie opgewaardeerd tot een temperatuur waarbij die warmte wel bruikbaar is. De prestaties en de kosten van het totale systeem worden dan ook in hoge mate bepaald door de warmtebron.

Voor grondgebonden warmtepompen geldt dat gasabsorptiewarmtepompen een kleinere broncapaciteit vragen dan compressiewarmtepompen met hetzelfde verwarmingsvermogen. Dit is het geval omdat in een gasabsorptiewarmtepomp de volledige inputwarmte (de energie uit het aardgas) op een lager temperatuurniveau ook als outputwarmte terugkomt, naast de bodemwarmte zelf natuurlijk. Voor een compressiewarmtepomp is de hoeveelheid warmte die 'uit het apparaat' aan de bodemwarmte wordt toegevoegd kleiner.

Algemeen kan gesteld worden dat bij een goed presterende warmte pomp (een hoge PER) veel warmte geleverd wordt door het bronsysteem en relatief weinig door de ingevoede hoeveelheid elektriciteit of aardgas. Gezien de benodigde bronvermogens voor de commercieel verkrijgbare gasgedreven warmtepompen zijn grondwater en buitenlucht de meest voor de hand liggende warmtebronnen.

Grondwater als warmtebron

Wat betreft beschikbaarheid en temperatuurniveau is grondwater een goed bruikbare warmtebron voor warmtepompen. Daar komt bij dat de grond zich uitstekend leent voor het opslaan van grote hoeveelheden koude en warmte in aquifers (watervoerende bodemlagen). Water dat in de winterperiode is afgekoeld, kan, opgeslagen in een aquifer, in de zomer uitstekend worden gebruikt voor het efficiënt koelen van een gebouw.

Het grondwater is een energiebron met een relatief constante temperatuur. Doorgaans is de temperatuur van het grondwater ongeveer gelijk aan de jaargemiddelde buitenlucht temperatuur. Dit houdt in dat in de winter de bron warmer is dan de buitenlucht en in de zomer koeler.

Het benutten van de bodem als bron wordt ook wel warmte/koude-opslag genoemd, vaak afgekort als WKO. In de zomer wordt de bron opgewarmd doordat het gebouw met water uit de bron gekoeld wordt (warmteopslag) en in de winter wordt de bron afgekoeld doordat het gebouw er mee verwarmd wordt (koudeopslag). Een belangrijke eis bij deze vorm van energieopslag is dat er een thermische balans is over een heel jaar. Dat wil zeggen: er wordt net zoveel warmte aan de bron onttrokken als er in teruggevoerd wordt. Dit houdt dus ook in dat de warmtevraag gelijk moet zijn aan de koudevraag van een gebouw. In de praktijk is dit echter lang niet altijd het geval. Soms is er geen vraag naar koeling omdat er geen koelinstallatie aanwezig is in het gebouw. In andere gevallen is de koudevraag in de zomer groter dan de warmtevraag in de winter. Bij een thermische onbalans moeten maatregelen (lees investeringen) getroffen worden om de thermische balans te herstellen. Hiermee zijn investeringen gemoeid.

Buitenlucht als warmtebron

Bij het toepassen van gaswarmtepompen komt buitenlucht meer en meer in beeld als warmtebron. Dat is onder meer het gevolg van de hoge kosten en de soms te genvallende mediumtemperaturen van bodemwarmtewisselaars. Voor het installatieontwerp vormt buitenlucht als warmtebron nauwelijks een complicatie. Wel vraagt het geluidsniveau van de noodzakelijke ventilatoren aandacht tijdens het ontwerp-proces.

Bodem als warmtebron: verticale bodemwarmtewisselaars

In Nederland worden de laatste tijd veel verticale bodem warmtewisselaars toegepast, al dan niet geïntegreerd in de bouwkundige constructie (bijvoorbeeld de heipalen) van een gebouw. Voor een maximale warmteonttrekking geldt als vuistregel: 15 tot 40 Watt per meter diepte. In ISSO-publicatie 73 'Ontwerp en uitvoering van verticale bodemwarmtewisselaars' worden aanwijzingen gegeven voor het dimensioneren en realiseren van dit type warmtewisselaars.

Afgiftesystemen

Gaswarmtepompen geven hun warmte in pandig af aan de lucht via speciale warmtewisselaars die ook bij VRF-systemen⁶ worden gebruikt. Bij gasmotorwarmtepompen is dit de standaardoplossing. Een systeem met directe-expansie binnenunits heeft als voordeel dat het als een driepijpssysteem kan worden uitgevoerd, waardoor voor iedere unit gelijktijdig gekozen kan worden tussen koelen en verwarmen. De warmte die uit de ene ruimte afgevoerd wordt, kan dan direct in een andere ruimte worden gebruikt. In situaties waarbij er per vertrek grote verschillen zijn in de warmte- en koudevraag, kan dit gunstig zijn. Het aansluiten en inregelen van deze systemen is wel afhankelijk van het type en het fabricaat. Gasmotorwarmtepompen en gasabsorptiewarmtepompen worden echter het meeste toegepast in combinatie met watervoerende afgiftesystemen zoals vloerverwarming en convectoren.

Gaswarmtepompen dragen de door de warmtepomp geproduceerde warmte over aan water en kunnen worden toegepast met vloerverwarming, betonkernactivering, lagetemperatuurradiatoren of convector units. Deze systemen lijken dus meer op de conventionele verwarmingssystemen. Voor een hoog rendement moet de ontwerp-temperatuur van het afgiftesysteem zo laag mogelijk zijn. Daarom wordt in combinatie met warmtepompen vaak vloerverwarming of betonkernactivering toegepast.

⁶ VRF staat voor 'Variable Refrigerant Flow', een techniek die van oorsprong voor lucht/lucht-warmtepompen is ontwikkeld.

2.2. Warmteproductie voor tapwater

Warm tapwater is in sommige utiliteitsgebouwen een belangrijke component van de totale energievraag. Met name in de collectieve systemen in de woningbouw, in de hotel- en recreatiesector en in de zorg is effectieve en efficiënte productie van tapwater van groot belang. Zowel mini-wkk als gaswarmtepompen kunnen worden ingezet voor de bereiding van warm tapwater. De mogelijkheden per technologie zijn hieronder geïnventariseerd.

2.2.1. *Tapwater met mini-wkk*

Omdat wkk warmte op een hoog temperatuurniveau kan leveren, is de bereiding van tapwater zonder problemen mogelijk. Over het algemeen wordt gewerkt met buffervaten voor warm water, zodat een relatief klein toestel veel draaiuren kan maken. Omdat het aantal starts en stops hierdoor beperkt blijft, kan het opwekkendement voor tapwater net zo hoog zijn als het rendement voor ruimteverwarming. Wel moet rekening gehouden worden met stilstandsverliezen. Aangezien de tapwater-vraag gedurende het hele jaar stabiel is, kan een goed gedimensioneerde wkk bijdragen aan een economisch sterke business case.

Deze studie gaat uit van het gebruik van buffervaten, zodat mini-wkk en gaswarmtepompen optimaal ingezet kunnen worden en de volledige tapwatervraag afdekken.

2.2.2. *Tapwater met de gaswarmtepomp*

Gaswarmtepompen zijn in principe toepasbaar voor productie van warm tapwater. De gewenste minimale temperatuur van 65 °C, die nodig is om legionellabesmetting tegen te gaan, is voor een gaswarmtepomp echter aan de hoge kant. Gasabsorptiewarmtepompen houden bij de productie van warm tapwater op 65 °C beter hun rendement vast dan gasmotorwarmtepompen. In de toekomst zal het steeds beter mogelijk worden om hoge tapwatertemperaturen te realiseren met behoud van een acceptabel rendement. Actuele gegevens over de prestaties bij diverse watertemperaturen zijn verkrijgbaar bij de verschillende fabrikanten en importeurs.

In de toekomst wordt het mogelijk om hoge tapwatertemperaturen te realiseren met behoud van een acceptabel rendement van de gaswarmtepomp als gebruik wordt gemaakt van de restwarmte van de motor. Dezelfde mogelijkheden als genoemd bij de tapwatervoorziening voor de mini-wkk in paragraaf 2.2.1 komen dan in beeld [SCF].

2.3. Technisch ontwikkelpotentieel

2.3.1. *Mini-wkk*

Gasmotoren

De ontwikkeling van gasmotoren heeft de afgelopen decennia een enorme vlucht genomen. Het benutten van nagenoeg de gehele energie-inhoud van de brandstof is voor standaardssystemen inmiddels geen probleem meer. Wel kan nog een kleine extra marge worden gewonnen door de rookgassen compleet te laten uitcondenseren: een HR-wkk. De motoren kunnen inmiddels door inzet van katalysatoren voldoen aan strenge emissie-eisen. Ze hebben een lange levensduur en een hoge beschikbaarheid. Er is echter nog voortgang te boeken door het elektrisch rendement te verhogen en zodoende bij een gelijke warmtevraag meer elektriciteit op te wekken.

Motoren in het grotere segment (circa 1 MW en groter) zijn inmiddels door vergaande optimalisering en real-time monitoring van het motorsysteem (regeling, turbo's, ontsteking enzovoort) nagenoeg uitontwikkeld. Het elektrisch rendement ligt inmiddels rond de 40% op bovenwaarde en naar verwachting zal dit niet sterk meer stijgen.

Voor kleinere systemen is dit verzadigingspunt echter nog niet bereikt. Technisch gezien is te verwachten dat de elektrische prestaties in het kleine segment die van grotere motoren in de komende decennia zullen benaderen.

Brandstofcellen

Een nieuwe ontwikkeling op het gebied van mini-wkk is de brandstofcel. Hoewel brandstofcellen al geruime tijd beschikbaar zijn op laboratoriumschaal, zijn de eerste commerciële modellen nog maar kort op de markt. In potentie kunnen brandstofcellen een zeer hoog elektrisch rendement behalen tot circa 54% op bovenwaarde.

Dit rendement is hoger dan dat van de beste gasgestookte elektriciteitscentrales. Daarbij komt nog het voordeel dat lokaal opwekken van elektriciteit transportverliezen voorkomt. Door ook nog de warmte van de brandstofcel nuttig in te zetten, ontstaat een systeem met een zeer hoog rendement in vergelijking tot andere fossiele opties.

In deze studie is het potentieel voor brandstofcellen expliciet meegenomen. Gezien de prille marktontwikkeling is echter nog niet met zekerheid vast te stellen in hoeverre de voorspelde technische en commerciële vooruitgang daadwerkelijk gerealiseerd zal worden. De resultaten die in deze studie betrekking hebben op brandstofcellen moeten dan ook met enige terughoudendheid geïnterpreteerd worden.

2.3.2. Gaswarmtepompen

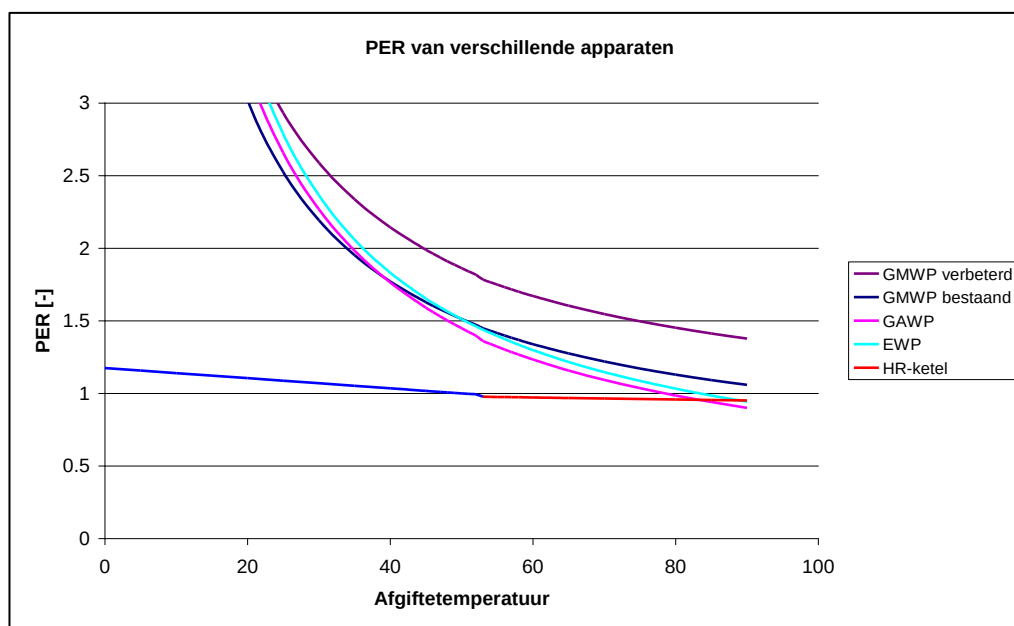
Gasmotorwarmtepompen

Zoals uiteengezet in paragraaf 1.5 is een gasmotorwarmtepomp op te delen in twee hoofdcomponenten; de gasmotor en de daaraan gekoppelde warmtepomp.

Ontwikkelpotentieel voor gasmotorwarmtepompen ligt vooral bij het warmtepompdeel. De technologie van gasmotoren voor stationaire toepassing is volwassen, maar verbeteringen zijn nog mogelijk zoals hierboven beschreven. Bij compressiewarmtepompen is ook sprake van volwassen technologie. Voor de grotere capaciteiten (vanaf circa 100 kW) zullen de warmtepompen specifiek voor een bepaalde situatie worden ontworpen. Warmtepompen voor hogere temperaturen (boven 60 °C) zijn zeldzaam. Specifieke engineering is hier nodig [GasTerra 2010].

Het optimaal gebruiken van de diverse warmtestromen die voorkomen bij een gasmotorwarmtepomp, biedt nog een aanzienlijk ontwikkelpotentieel. Diverse aanbieders van apparatuur ontwikkelen technologie om dit potentieel verder te benutten.

Naast de ontwikkelingen op het gebied van de warmtepomp zelf zal de ontwikkelingen van verbeterde afgiftesystemen het potentieel van de gaswarmtepompen verder ontsluiten. Hoe lager de ontwerp temperatuur van het afgiftesysteem, des te hoger het rendement van de warmtepomp.



Figuur 11 — PER van verschillende verwarmingssystemen.

Gasabsorptiewarmtepompen

Naast het hierboven geschetste voordeel van LT-afgiftesystemen, dat ook geldt voor gasabsorptiewarmtepompen, zal de ontwikkeling van deze installaties met name gericht zijn op optimalisatie van de modulegrootte, verbetering van de regeling en verdere benutting van warmtestromen binnen de warmtepomp zelf.

Recente ontwikkelingen

Oorspronkelijk zijn gasmotorwarmtepompen ontwikkeld als alternatief voor elektrische airconditionersystemen, met name voor de koeling van kantoorgebouwen op locaties waar niet voldoende elektrisch vermogen beschikbaar is. Een gasgedreven warmtepomp heeft immers geen elektriciteit nodig als primaire energiebron. Dit type gasgedreven warmtepompen is bedoeld voor koeling en is daarom niet geoptimaliseerd voor warmtelevering. De meeste gasmotorwarmtepompen die momenteel in Nederland verkrijgbaar zijn, zijn afgeleid van dit oorspronkelijke type.

De laatste ontwikkelingen op dit gebied zijn onder meer de ontwikkeling van gasmotorwarmtepompen die geoptimaliseerd zijn voor de Nederlandse situatie. Dat wil zeggen: een warmtepomp die ook gebruikmaakt van de restwarmte van de motor. Hierdoor is het mogelijk om op een hogere temperatuur warmte te produceren (ca. 70 °C), warm tapwater te produceren en gelijktijdig te verwarmen en te koelen. Gelijktijdig verwarmen en koelen komt bij grote utiliteitsgebouwen in Nederland vaak voor tijdens de overgangsperiodes (lente en herfst).

Als WKO wordt gecombineerd met een geoptimaliseerde gasmotorwarmtepomp ontstaat er een combinatie die:

- een zeer hoge PER kan halen van meer dan 2;
- hogetemperatuurwarmte voor ruimteverwarming kan produceren;
- warm tapwater kan leveren.

De investeringen voor zo'n systeem zijn echter nog hoog en het is niet altijd mogelijk een WKO toe te passen. Daar komt bij dat de meeste commercieel verkrijgbare gasmotorwarmtepompen nog niet geoptimaliseerd zijn voor hogetemperatuur warm-

televering. In deze studie is daarom uitgegaan van meer conservatieve prestaties van gasmotorwarmtepompen (details in appendix A2). In de praktijk kan de potentiële besparing voor een specifiek gebouw waar WKO is toegepast in combinatie met een geoptimaliseerde gasmotorwarmtepomp groter uitvallen dan deze studie laat zien.

3. REFERENTIEKADER

Voor het bepalen van besparingspotentieel is het essentieel vast te stellen wat het meest waarschijnlijke referentiescenario is, gesteld dat mini-wkk en gaswarmtepompen geen rol zouden gaan spelen in de gebouwde omgeving. In onderstaande secties is aangegeven wat de verwachte ontwikkelingen zijn op het gebied van warmtevoorziening, elektriciteitsproductie en opwekking van koude. Ook wordt besproken welke keuzes zijn gemaakt voor deze potentieelstudie en is aangegeven welke gevoeligheidsanalyse gehanteerd wordt.

3.1. Referentiesituatie van warmte in de utiliteit

Ruimteverwarming

De huidige verwarmingsmarkt wordt gedomineerd door het gebruik van ketels. In de woningbouw is de penetratie van de HR-ketel inmiddels nagenoeg volledig. In de utiliteitsbouw zijn nog relatief veel VR- en zelfs CR-ketels in gebruik. Voor nieuwbouw en vervanging is de HR-ketel inmiddels de standaardoptie geworden.

In lijn met eerdere studies [Ecofys 2008, Ecofys 2009, ECN 2010b] is voor deze potentieelberekening uitgegaan van een referentie waarbij ruimteverwarming en tapwatervoorziening in principe worden verzorgd door HR-ketels.

Voor de gevoeligheidsanalyse is uitgegaan van een hoger opwekrendement voor ruimteverwarming, aangezien efficiënte gastoepassingen (voornamelijk in nieuwbouwsituaties) te maken kunnen krijgen met concurrentie van elektrische warmtepompen in combinatie met WKO.⁷ Het aandeel WKO bedraagt momenteel circa 2,5% en in de studie wordt aangenomen dat dit voor systemen boven 30 kW groeit naar 5% in 2015-2020 en naar 10% in 2020-2030. Voor kleine systemen is een aandeel van 1% in 2015-2020 en 3% in 2020-2030 aangenomen.

Periode Vermogen	Referentie ruimteverwarming (bovenwaarde)					
	2010 - 2015		2015 - 2020		2020 - 2030	
	< 30 kWth	>= 30 kWth	< 30 kWth	>= 30 kWth	< 30 kWth	>= 30 kWth
Ruimteverwarming basisreferentie	95,0%	90,0%	95,0%	90,0%	95,0%	90,0%
Ruimteverw. gevoeligheidsanalyse	95,0%	91,8%	95,9%	93,6%	98,2%	97,3%

Figuur 12 — Aannames voor referentierendement ruimteverwarming.

Afgifte

Het afgifte- en distributierendement wordt in deze studie buiten beschouwing gelaten. Impliciete aanname hierbij is dat het afgifte- en distributierendement gelijk is in de referentiesituatie en bij toepassing van mini-wkk of gaswarmtepomp. Wel wordt rekening gehouden met de invloed van LT- of HT-afgifte op het opwekrendement.

Voor het rendement van een mini-wkk of gaswarmtepomp is de temperatuur van het afgiftesysteem (voor mini-wkk in het bijzonder de retourtemperatuur, voor gaswarmtepompen de aanvoertemperatuur) van belang om het rendement te bepalen, van-

⁷ Als gevoeligheidsanalyse wordt uitgegaan van een realistisch ingeschatte groei van de toepassing van elektrische warmtepompen. Voor gwp en wkk wordt in deze studie een maximaal technisch potentieel bepaald. De hier aangenomen groei in elektrische warmtepompen kan daarom niet worden vergeleken met de resultaten voor de groei van gwp en wkk uit dit rapport.

daar dat de ontwikkeling van de penetratiegraad van LT-systemen voor deze studie van belang is. Op basis van schattingen van ECN op gebied van nieuwbouw en renovatie is de volgende trend bepaald voor toepassing van LT-verwarming, waarbij is aangenomen dat altijd een LT-systeem wordt geïnstalleerd bij nieuwbouw of renovatie.

Periode	Aanname penetratiegraad LT-verwarming						
	Sector woningb. coll.	kantoren	horeca	recreatie	scholen	care	cure
2010 - 2015	10%	11%	8%	11%	9%	5%	15%
2015 - 2020	26%	30%	20%	30%	24%	15%	39%
2020 - 2030	48%	51%	35%	54%	40%	47%	62%

Figuur 13 — Aannames ontwikkeling penetratiegraad lagetemperatuuraftgitesystemen voor ruimteverwarming per sector.

Tapwater

Voor het tapwaterrendement is uitgegaan van de huidige beste technologie. Een aanmerkelijk beter rendement is in het algemeen mogelijk indien gebruik gemaakt wordt van boilers. In de gevoeligheidsanalyse is het gebruik van boilervaten voor tapwaterbereiding aangenomen, waarmee het tapwaterrendement in principe gelijk wordt aan het opwekrendement voor ruimteverwarming.

Wel dienen nog stilstandsverliezen in rekening gebracht te worden. Hiervoor is 5% aangenomen. Voor wkk en gwp wordt in deze studie altijd het gebruik van boilervaten verondersteld, waarmee het tapwaterrendement 95% van het ruimteverwarmingsrendement bedraagt.

Voor de gevoeligheidsanalyse is voor tapwater uitgegaan van een referentiesituatie waarin altijd gebruik gemaakt wordt van boilers. Hiermee wordt het tapwaterrendement in de referentiesituatie van de gevoeligheidsanalyse gelijk aan 95% van het ruimteverwarmingsrendement (onderste regel Figuur 12).

Periode Vermogen	Referentie tapwater (bovenwaarde)					
	2010 - 2015		2015 - 2020		2020 - 2030	
	< 30 kWth	>= 30 kWth	< 30 kWth	>= 30 kWth	< 30 kWth	>= 30 kWth
Tapwater	75,0%	75,0%	80,0%	80,0%	80,0%	80,0%
Tapwater gevoeligheidsanalyse	90,3%	87,2%	91,1%	88,9%	93,2%	92,4%

Figuur 14 — Aannames voor referentierendement tapwater.

3.2. Referentiesituatie van elektriciteit in de utiliteit

In de huidige situatie wordt elektriciteit over het algemeen betrokken uit centrale productie in elektriciteitscentrales. Mini-wkk biedt de mogelijkheid om elektriciteit (deels) in eigen beheer op te wekken. Om het besparingspotentieel te bepalen moet worden gekozen met welke opwektechnologie de elektriciteitsproductie wordt vergeleken.

In eerdere studies, die zich vooral op de kleinverbruikersmarkt hebben gericht [Ecofys 2008, Ecofys 2009, ECN 2010b] zijn verscheidene aannamen gedaan voor de referentietechnologie voor elektriciteitsproductie. In deze studie wordt uitgegaan van het *gemiddeld parkrendement* voor elektriciteitsopwekking. Dit biedt een eenduidige

referentie voor gebruik van elektriciteit, maar ook voor veranderingen in gebruik door toekomstige ontwikkelingen in vraagpatroon en wkk-inzet.

Uit de ECN referentieramingen komt het volgende beeld naar voren voor de ontwikkeling van het centraal gemiddeld parkrendement:⁸

Periode	Referentie elektriciteit (bovenwaarde)		
	2010 - 2015	2015 - 2020	2020 - 2030
Elektrisch rendement bij gebruiker	39,9%	42,4%	43,8%
CO2-emissie bij gebruiker (g / kWh)	608	618	590
E rendement gevoeligheidsanalyse	45,5%	45,5%	45,5%
CO2 gevoeligheidsanalyse (g / kWh)	385	385	385

Figuur 15 — Referentiesituatie elektriciteitsproductie.

Als gevoeligheidsanalyse wordt in deze studie een berekening gemaakt op basis van een vergelijking met STEG-centrales. Deze centrales hebben een rendement tijdens bijregelen van 45,5% op bovenwaarde, inclusief netverliezen.⁹

3.3. Koeling in de utiliteit

Koeling wordt in deze studie niet beschouwd. Enkele opmerkingen over koeling zijn desalniettemin op zijn plaats.

De standaardreferentie voor koeling is op dit moment toepassing van compressiekoelmachines met buitenlucht als bron. Door gebruik te maken van slimme combinaties van technologieën is een hoogst efficiënte dekking van de koelvraag mogelijk. Voorbeelden van dit soort combinaties zijn wkk + absorptiekoelmachine + WKO, gaswarmtepomp + WKO, koudebuffering enzovoort. Kenmerkend voor efficiënte combinaties is de integrale benadering, waarin de warmtevraag en de koelvraag in een totaal energieconcept worden bekeken.

In de huidige marktsituatie is nog niet inzichtelijk welke combinaties van concepten de belangrijkste bijdrage zullen leveren aan de dekking van de koudebehoefte in de utiliteits- en woningbouw.

Bovenstaande overwegingen zijn de achtergrond voor het besluit om koeling niet mee te nemen in deze studie. Koeling is evenwel een belangrijke factor in de energievoorziening in de gebouwde omgeving. De in deze studie berekende besparing zou dan ook anders kunnen vallen als koeling wel in beschouwing wordt genomen. Verder onderzoek naar de invulling van koeling in de utiliteitsbouw door middel van gwp of wkk is een interessante optie.

⁸ Deze gegevens zijn omgerekend naar bovenwaarde door de elektriciteitsmix (gas, olie, kolen) te gebruiken en voor iedere energiedrager de bovenwaarde/onderwaarde factor te gebruiken.

⁹ Een nieuwe STEG-centrale kan een maximaal rendement van 58% tot 59% op onderwaarde behalen. Omgerekend naar bovenwaarde en met medeneming van 5% netverlies, geeft dit een rendement van ca. 50%.

4. ONTWIKKELINGEN IN DE GEBOUWDE OMGEVING

In dit hoofdstuk worden de sectoren van de utiliteitsbouw beschreven waarop deze potentieelstudie zich richt. In paragraaf 4.1 wordt kort gemotiveerd welke sectoren gekozen zijn. In paragraaf 4.2 wordt de werkwijze bij het verzamelen en berekenen van de data kort toegelicht. De daarop volgende paragrafen brengen per sector de gegevens over gebouwenvoorraad, installaties en energiegebruik in kaart. Daarnaast is de ontwikkeling van de gebouwvoorraad en de energievraag tot 2030 beschreven. Gegevens over de huidige gebouwvoorraad zijn ontleend aan de Basisadministratie Adressen en Gebouwen [BAG].

Gegevens over de energievraag zijn bepaald door de BAG te combineren met gegevens over het gas- en elektraverbruik, aangeleverd door Liander, gegevens over functionele verdeling van het energiegebruik (ECN en AgentschapNL) en gegevens over energielabels (aangeleverd door AgentschapNL). De voorspellingen die gedaan worden over de ontwikkeling van de gebouwvoorraad en het energiegebruik zijn gemaakt met behulp van modellen van ECN (SAVE-S). Zie verder paragraaf 5.1.

Het gegevensoverzicht in dit hoofdstuk combineert informatie uit bestaande bronnen met nieuwe gegevens. Hierdoor ontstaat een breed overzicht van de eigenschappen van de hier beschouwde sectoren. Niet alle gegevens uit dit hoofdstuk worden gebruikt bij de berekeningen in hoofdstuk 5. De hier gepresenteerde gegevens leveren echter wel een bijdrage aan een volledig beeld van de sectoren en is nuttig om de achtergronden per sector te begrijpen.

4.1. Keuze voor sectoren in de utiliteit

Voor deze studie is een bewuste keuze gemaakt voor de volgende zes sectoren:

1. *Collectieve systemen in de woningbouw (excl. stadsverwarming):*
Het betreft woningcomplexen voorzien van een collectief systeem voor ruimteverwarming. Hier ligt zeker potentieel voor toepassing van gwp of mini-wkk, dat tot nu toe zeer beperkt werd beschouwd.
2. *Hotel- en recreatiebranche:*
Een categorie met een aanzienlijke warmtevraag, het betreft de subcategorieën hotels, pensions, fitnesscentra, zwembaden, conferentieoorden en musea.
3. *Kantoren:*
Een enorm areaal aan m², dat o.a. door de leegstandsproblematiek een duidelijk aandachtsgebied is voor de komende jaren.
4. *Onderwijsinstellingen (hoger onderwijs):*
Het hoger onderwijs bestaat uit veelal grote gebouwen en in goed georganiseerd in een beperkt aantal universiteiten en hogescholen. Lager en middelbaar onderwijs worden niet beschouwd in deze studie.
5. *Ziekenhuizen (cure):*
Sector waar gezien de vergrijzing de nodige groei in BVO verwacht mag worden. En waar een continue hoog comfortniveau in ruimteverwarming en een groot elektriciteitsaanbod vereist is.
6. *Zorginstellingen (care):*
Idem, zie 5.

Samen vormen deze sectoren ruim de helft van de warmtevraag in de utiliteitsbouw.

Een van de grootste sectoren die niet is meegenomen (gemeten naar aantal ondernemers) wordt gevormd door winkels. Deze sector is echter zeer heterogeen: het aantal panden is zeer groot, veel van deze panden zijn relatief klein en het gebruik is divers (wel/geen koeling, grote showroom of toonbank, food en non-food). Daarom is het lastig om goede algemeen geldige indicatoren te vinden voor deze sector. Winkels zijn om deze reden niet meegenomen in deze studie.

Toepassing van wkk en gwp in verschillende sectoren

Deze studie bepaalt het *technisch potentieel* voor inzet van mini-wkk en gaswarmtepompen. In technisch opzicht kunnen beide technologieën in het grootste deel van de gebouwen worden ingezet. De technieken gebruiken aardgas als brandstof en kunnen zowel in bestaande bouw als in nieuwbouw worden toegepast. In vergelijking tot conventionele technologie (HR-ketel) zijn de systemen groter, maar de benodigde opstellingsruimte blijft beperkt.

Er zijn wel verschillen in de mate waarin mini-wkk of gaswarmtepompen aansluiten bij de energievraag in bepaalde sectoren. Sectoren met een zeer hoge tapwater-vraag kunnen goed met mini-wkk worden verwarmd, als tapwater minder belangrijk is, komt een gaswarmtepomp beter tot zijn recht.

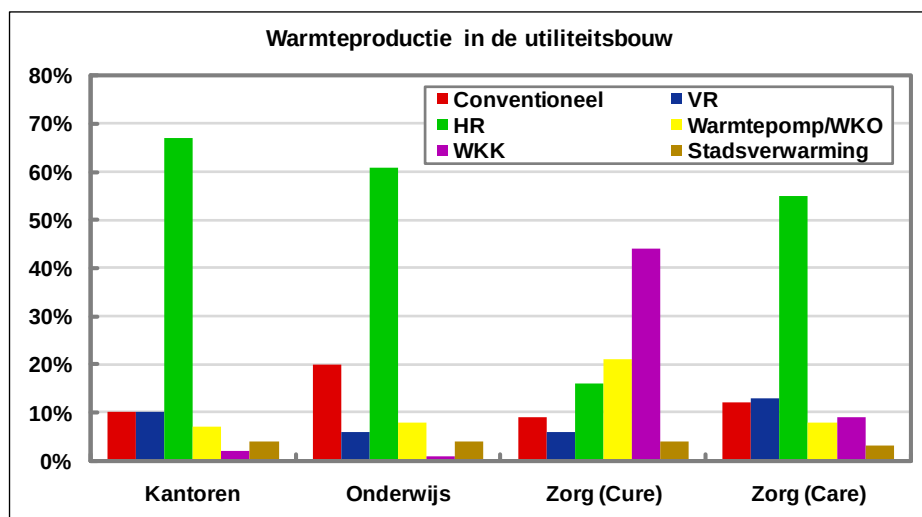
Onderstaande tabel geeft een overzicht van de toepasbaarheid van wkk en gwp in verschillende sectoren, gebaseerd op marktervaringen van leveranciers.¹⁰

Sector	Typering energievraag	Geschiktheid voor wkk	Geschiktheid voor gwp
Coll. woningb.	lang stookseizoen, tapwater belangrijk	+	+
Hotel/recreatie	lang stookseizoen, tapwater belangrijk	++	++
Kantoor	kort stookseizoen, nauwelijks tapwater, koeling van belang	o	++
Onderwijs	kort stookseizoen, nauwelijks tapwater, beperkte koeling	o	+
Cure	zeer lang stookseizoen, tapwater en koeling belangrijk	++	o
Care	zeer lang stookseizoen, tapwater en koeling belangrijk	++	++

Figuur 16 — GWP en mini-wkk zijn technisch gezien in alle sectoren in te passen. Wel zijn er verschillen in de mate waarin het productieprofiel aansluit op de energievraag.

In de praktijk worden gaswarmtepomp en mini-wkk nog relatief weinig toegepast. Alleen in de cure-sector worden warmtepompen en wkk relatief vaak toegepast. In deze sector is een (beperkt) deel van het besparingspotentieel dus al gerealiseerd.

¹⁰ Dit overzicht dient om een indruk te krijgen van de sectoren waar wkk en gwp bijzonder goed ingezet kunnen worden. Bij de potentieelberekening in dit document is steeds aangenomen dat wkk en gwp in alle sectoren een penetratiegraad van 100% hebben.



Figuur 17 — Penetratie van verschillende warmtetechnologieën in de utiliteitsbouw, uit [Agentschap 2008].

Bovenstaande figuur maakt inzichtelijk dat conventionele ketels nog een significant deel van de opgestelde verwarmingsinstallaties vormen. HR-ketels komen verreweg het meest voor. Er lijkt dus nog ruimte te zijn voor een forse verbeterslag.

4.2. Werkwijze

- **BVO per sector**

Uit de gegevens van Liander en BAG ontstaat een beeld van de verdeling van de gebouwen naar oppervlakte en energiegebruik. Iedere sector is daarbij verdeeld in enkele grootte-clusters. Deze gegevens zijn vervolgens opgeschaald om uit te komen op het totaal BVO in Nederland in deze sector. Dit totale BVO is bepaald als gemiddelde uit de bronnen [CBS, Agentschap 2008, SAVE-S & TNO]

Aangezien de database van Liander niet compleet is, komen de gegevens niet exact overeen met andere beschikbare bronnen. Met name de allergrootste gebouwen, waarvan er per sector niet veel zijn, blijken in sommige gevallen niet in de Liander-gegevens voor te komen. Dit leidt tot een kleine foutmarge in de grafieken in dit hoofdstuk. Voor de bepaling van de totale energievraag (en hieruit volgend het besparingspotentieel) is het effect echter beperkt.

- **Warmtevraag per sector**

Voor alle gebouwen in de database van Liander is de gasvraag bekend, vaak ook op maandelijkse basis. Aan de hand van de maandgegevens, gegevens van [Agentschap NL] en expertinschattingen van [BDH & Energy Matters] is bepaald hoe groot de tapwatervraag en ruimteverwarmingsvraag per gebouw was.

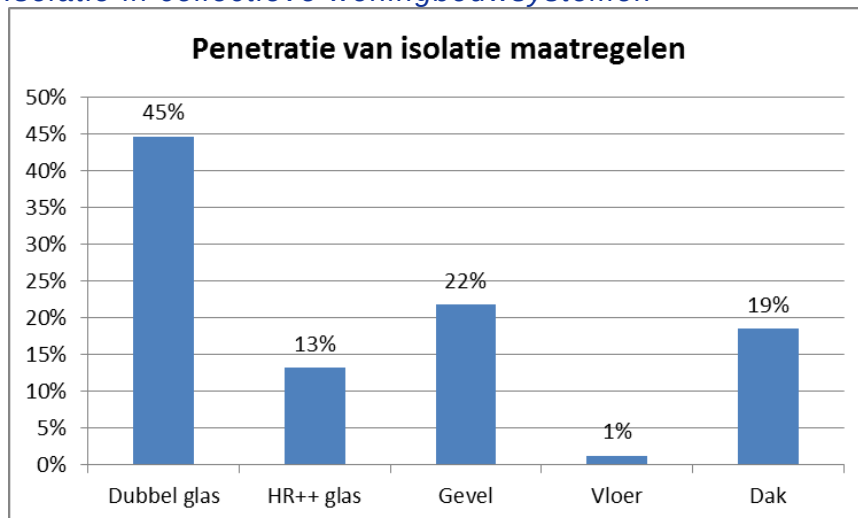
Deze primaire vraag is vervolgens omgerekend naar een finale vraag d.m.v. een standaardrendement van 75% (bw) voor ruimteverwarming en 65% (bw) voor tapwater. Voor iedere cluster van gebouw grootte levert dit de totale vraag naar tapwater en ruimteverwarming.

- **Ontwikkeling gebouwvoorraad en energievraag**

De ontwikkeling in de gebouwvoorraad en energievraag zijn bepaald uit de gegevens voor 2010 door te extrapoleren volgens de waarden uit [SAVE-S]

4.3. Collectieve woningbouw

Isolatie in collectieve woningbouwsystemen



Figuur 18 — De penetratie van isolatiemaatregelen in meergezinswoningen [Agentschap 2011]

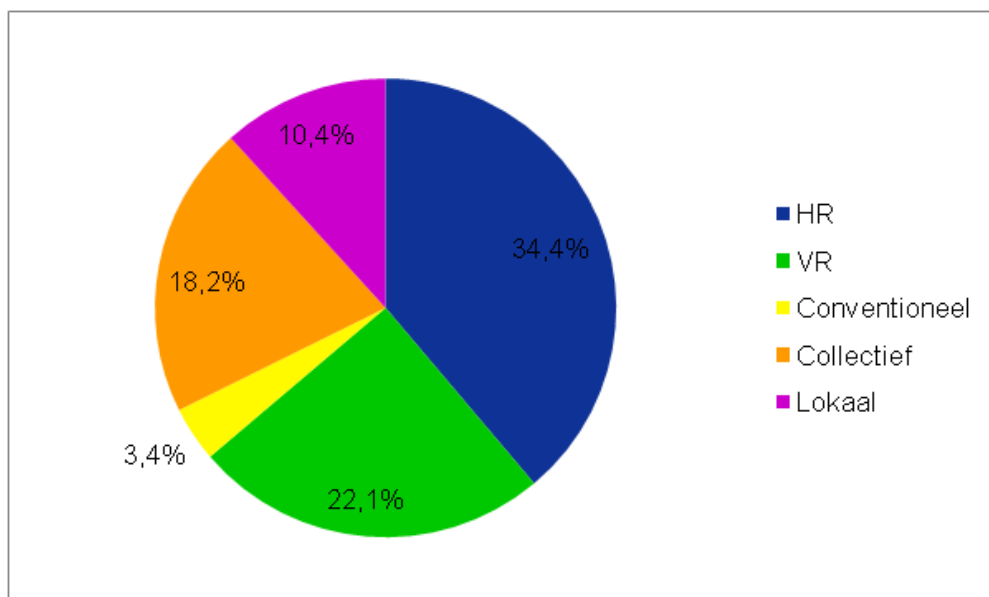
Bovenstaande grafiek maakt duidelijk dat er in de meergezinswoningen nog een aanzienlijk potentieel ligt voor vraagreductie. Idealiter zou deze vraagreductie vooraf moeten gaan aan optimalisatie van de opwekking in een complex, omdat hiermee de efficiency van zowel wkk als de gaswarmtepompen hiermee wordt gediend.

Verwarmingssystemen in de meergezinswoning

In de woningbouw vinden we collectieve systemen in de vorm van collectieve (blok-) verwarming en warmtelevering vanuit een extern warmtenet. Voor deze studie is aangenomen dat vrijstaande woningen, 2/1 kap en rijtjeswoningen in geval van een collectief systeem aangesloten zijn op een dergelijk warmtenet.

In de gestapelde bouw of in meergezinswoningen vinden we naast warmtevoorziening door middel van warmtenetten ongeveer 410.000 woningen [AgentschapNL 2011] dat verwarmd wordt met blokverwarming: een centrale stookruimte die een groep woningen voorziet van ruimteverwarming en meestal ook warm tapwater. In afnemende mate komt de combinatie voor van blokverwarming met daarbij elektrische boilers, gasgasboilers of geisers voor warm tapwater.

Deze groep van ca. 410.000 woningen in Nederland is aangesloten op een collectief systeem. Uitgaande van een gemiddeld aantal van veertig wooneenheden per systeem [BAG, Liander] gaat het daarbij dus om ongeveer 10.000 systemen. In het verleden was dit aantal veel groter. Door opsplitsing en individuele verkoop van meergezinswoningen (en door andere invloeden) zijn veel complexen in de afgelopen decennia voorzien van individuele verwarmingsinstallaties.



Figuur 19 — Types verwarmingsinstallatie in meergezinswoningen [Agentschap 2011]

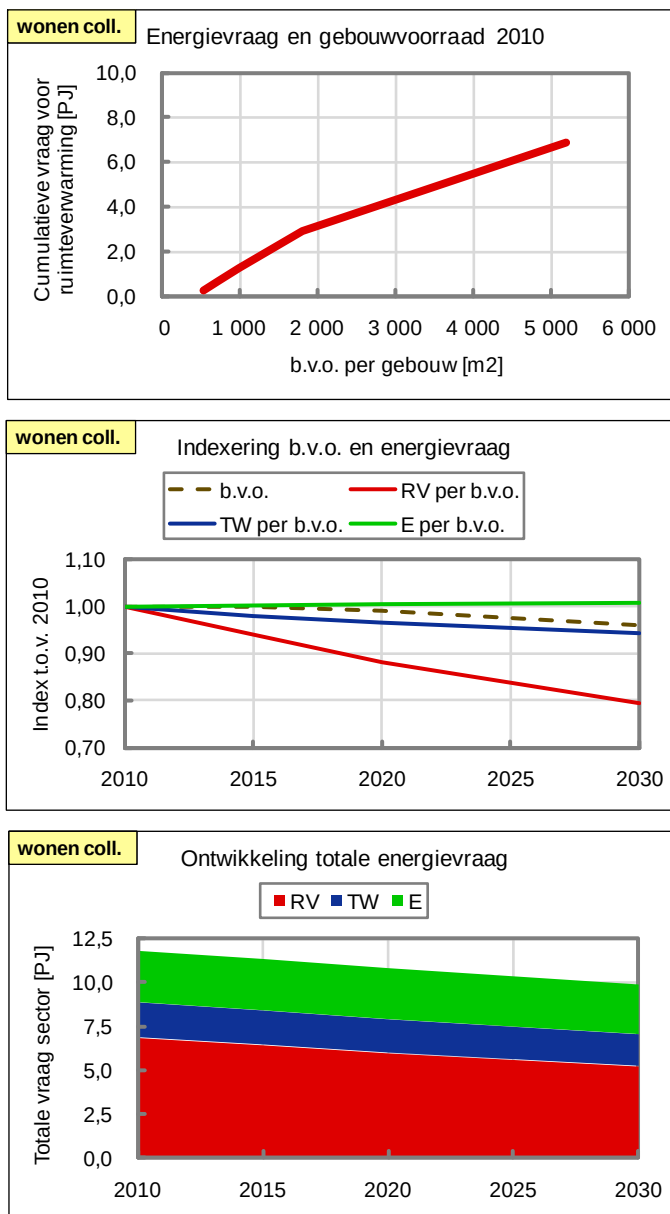
Deze zogeheten ‘verketeling’ leverde de huurder of eigenaar van de woning vaak lagere energielasten op ten opzichte van het collectieve systeem, omdat men van een conventionele ketel of een VR-ketel overstapte naar HR 100/107-techniek. Het gevolg van de individuele verketeling is echter wel dat verduurzaming van dergelijke installaties nu ook individueel aangepakt moet worden.

De ongeveer 10.000 collectieve systemen in de gestapelde woningbouw bieden mogelijkheden voor energiebesparing en CO₂-emissiereductie door de opwekking van het systeem centraal aan te passen door toepassing van bijvoorbeeld wkk of gaswarmtepompen.

Bij selectie van de juiste technische invulling moet specifieke aandacht worden besteed aan de capaciteit en de afgiftetemperatuur van het systeem, aan de tapwatervoorziening en de juiste regeling en bemetering van de gehele installatie.

Naar verwachting zal de totale energievraag per vierkante meter bvo in de toekomst licht stijgen. De absolute energievraag per huishouden voor ruimteverwarming en tapwaterbereiding zal door steeds meer efficiënte apparatuur afnemen, waarbij met name de energievraag voor ruimteverwarming sterk zal profiteren van deze efficiëntieverbetering.

De vraagreductie door de efficiëntieverbetering op tapwaterproductie wordt naar verwachting deels tenietgedaan door de aanhoudende opwaartse trend in het verbruik van warm tapwater, als gevolg van toenemende comforteisen.



Figuur 20 — Ontwikkeling in gebouwvoorraad en energievraag in de collectieve woningbouwsector.

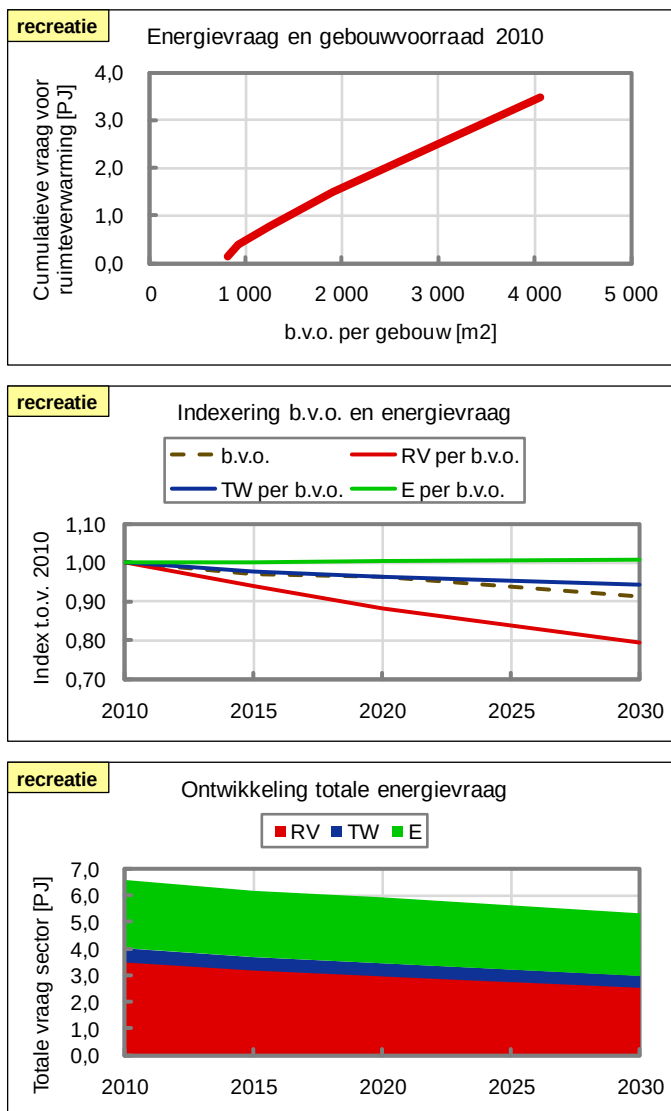
4.4. Hotel & Recreatie

Veel hotels en recreatiegebouwen hebben een relatief grote warmtevraag, onder andere veroorzaakt door de grote vraag naar warm tapwater. Deze sector kenmerkt zich dus door een dominante warmtevraag die vaak ligt in de range van commercieel verkrijgbare gaswarmtepompen. Gelijktijdig verwarmen en koelen kan in deze sector ook regelmatig voorkomen. Met gaswarmtepompen is dit technisch goed mogelijk.

Bij de renovatie van hotels en recreatiegebouwen is het vaak lastig om efficiëntere installaties in te zetten. Vaak zijn ook de mogelijkheden voor WKO beperkt. Gezien de gelijktijdige warmte- en koudevraag, de grote vraag naar warm tapwater en het elektriciteitsgebruik kan zowel een wkk als een gwp een interessante optie zijn. Ook in deze situatie geldt dat de elektrische infrastructuur een knelpunt is voor het toepassen van elektrische warmtepompen. Bij het toepassen van wkk's en gwp speelt dit niet.

Omdat het voor deze sector zeer moeilijk is in te schatten hoe het energiegebruik en het bvo zich in de toekomst zullen ontwikkelen, is voor de tweede figuur dezelfde indexering aangehouden als bij collectieve woningbouw. Dit is gedaan omdat het energiegebruik van met name hotels lijkt op dat van de collectieve woningbouw. Bovendien is geen betere informatie beschikbaar over deze sector.

De energievraag voor tapwaterbereiding zal in de periode tot 2020 nauwelijks dalen als gevolg van de levensduur van de bestaande apparatuur en de relatief kleine efficiëntcyverbetering die op korte termijn te verwachten is. Naar verwachting zal bij vervanging wel worden gekozen voor steeds efficiëntere apparatuur, wat op langere termijn (na 2020) een meer neerwaartse trend te zien geeft in de energievraag voor tapwaterproductie.



Figuur 21 — Ontwikkeling in gebouwvoorraad en energievraag in de hotel- en recreatiesector.

Voor ruimteverwarming geldt dat nog sterker. De huidige standaard van HR-, VR- en CR-ketels zal bij vervanging en in nieuwbouwsituaties plaatsmaken voor significant efficiëntere apparatuur. Daarnaast zal ook vraagreductie d.m.v. isolatie hier aan de neerwaartse lijn bijdragen.

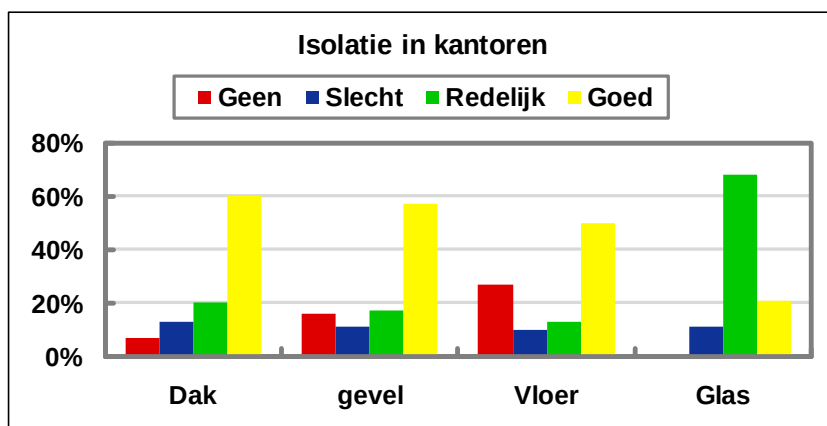
Het elektriciteitsverbruik zal naar verwachting in de hotel- en recreatiebranche sterk dalen als resultaat van de steeds bredere toepassing van efficiënte verlichting (onder meer met LED-technologie). De eventuele toename van energiegebruik voor verwarming, dat de niet-ontstane warmte van verlichting moet compenseren, is in de berekeningen niet meegenomen.

Al met al zal efficiëntere apparatuur, toenemende isolatie en nieuwe verlichtingstechniek de totale energievraag in deze sector naar verwachting doen dalen.

4.5. Kantoren

De kantorenmarkt bestaat uit kleinere én hele grote kantoorgebouwen. Grote kantoorgebouwen (denk aan de hoofdkantoren van banken en verzekeraars) zijn vaak lastig te klimatiseren en het is niet ongebruikelijk dat de koelvraag in deze gebouwen dominant is. Warmte- en koudeopslag (WKO) is in deze situaties vaak een uitstekende optie.

Bij renovatie van kleinere en middelgrote kantoorgebouwen, zeker indien deze gekoppeld zijn aan opslag- of productiehallen, is de warmtevraag vaak dominant. Daarom komen wkk en gwp hier goed tot hun recht. Commercieel verkrijgbare producten luiten vaak goed aan bij de vermogens die in deze gebouwen worden gevraagd. Bij dit type gebouwen ontstaat ook vaak een gelijktijdige koel- en verwarmingsvraag. Investeringsen om een WKO-installatie aan te leggen zijn echter lastig. Hierdoor kunnen gasgedreven oplossingen in dit segment goed tot hun recht komen.



Figuur 22 — Penetratie van isolatiemaatregelen in kantoorsector.

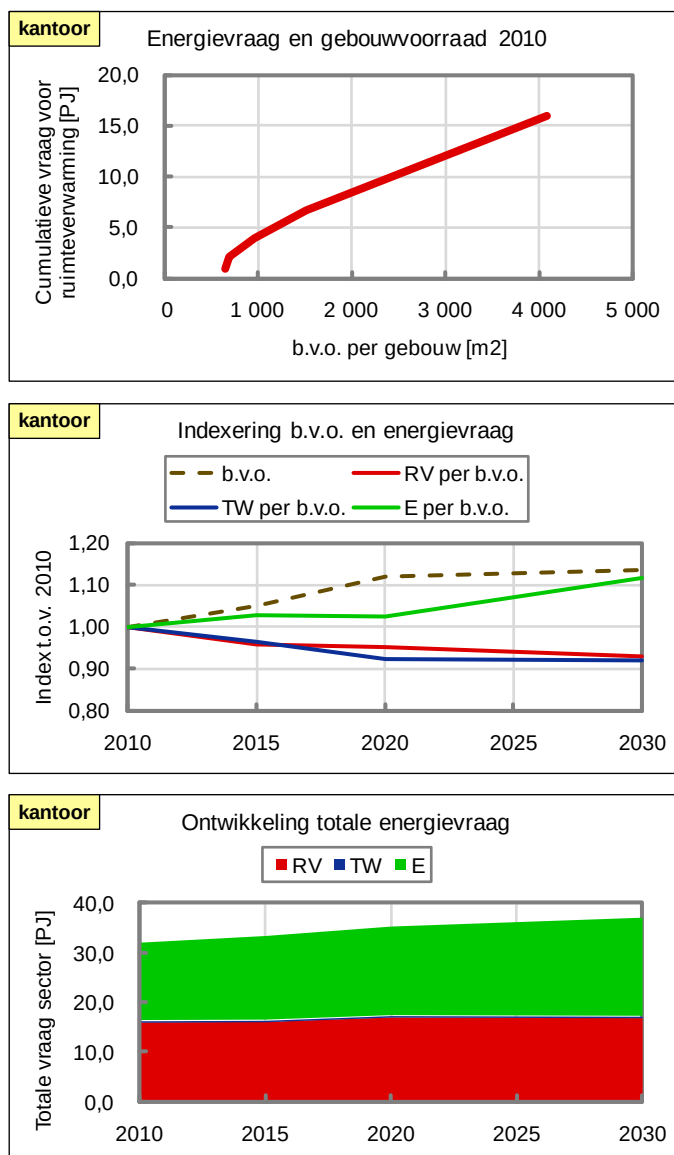
Gelet op de penetratie van isolatiemaatregelen in de kantorensector, is hier nog veel ruimte voor verdere vraagreductie. Met name glas- en gevelisolatie bieden nog mogelijkheden.

Introductie van meer efficiënte verlichting en kantoorapparatuur zal de gemiddelde interne warmtelast laten dalen. Ook zal het elektriciteitsverbruik stabiliseren.

Echter, nadat in de periode tot 2020 de winst door deze efficiëncyslag is genomen, zal naar verwachting vanaf 2020 het elektriciteitsverbruik weer toenemen als gevolg van de toenemende penetratie van (meestal elektrisch gevoede) comfortkoeling. Deze toename is een reactie op de toenemende interne warmtelast door verbeterde isolatie en mogelijk ook op de gemiddeld hogere buitentemperatuur als gevolg van klimaatverandering.

De ontwikkeling van het bvo voor kantoren zal ondanks de vergrijzing, de trend van meer thuiswerkers en de leegstand van kantoren toch toenemen. Dit komt omdat de werkgelegenheid in Nederland sterk gerelateerd is aan de kantoorvoorraad en deze werkgelegenheid zal nog groeien tot 2020.

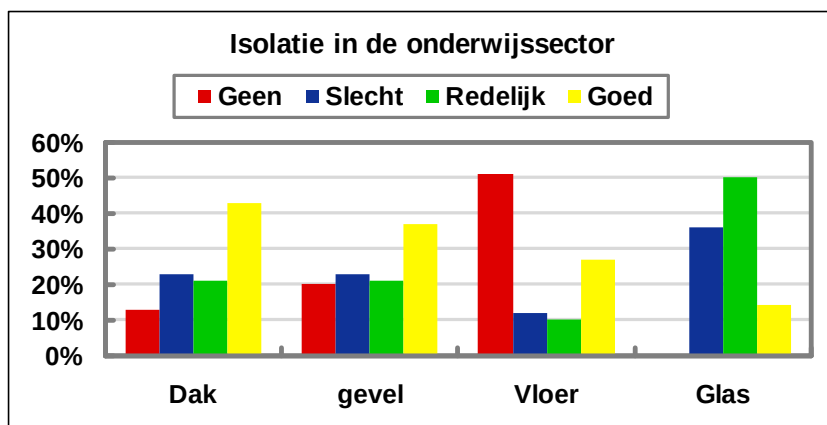
Naar verwachting zal de energievraag per vierkante meter licht afnemen als gevolg van efficiëntere apparatuur. De tapwatervraag is in kantoren traditioneel zeer beperkt en dat zal in de toekomst waarschijnlijk niet veranderen. De elektriciteitsvraag neemt naar verwachting licht toe door stijgende inzet van apparatuur.



Figuur 23 — Ontwikkeling in gebouwvoorraad en energievraag in de kantoorsector.

4.6. Onderwijs

Voor wat betreft de gebouwde omgeving in het onderwijs hebben de auteurs zich voor deze studie beperkt tot het hoger en universitair onderwijs. Het gebruiksprofiel van de gebouwen in deze sector benadert volgens de auteurs dat van de kantorensector in acceptabele mate, waarmee dit voor de potentieelbepaling een relevante sector is.



Figuur 24 — Penetratie van isolatiemaatregelen in onderwijssector.

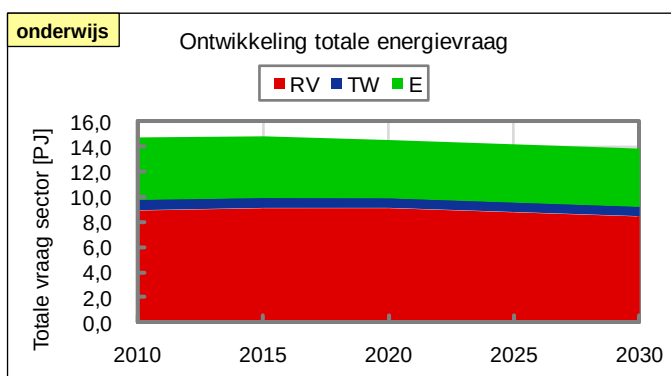
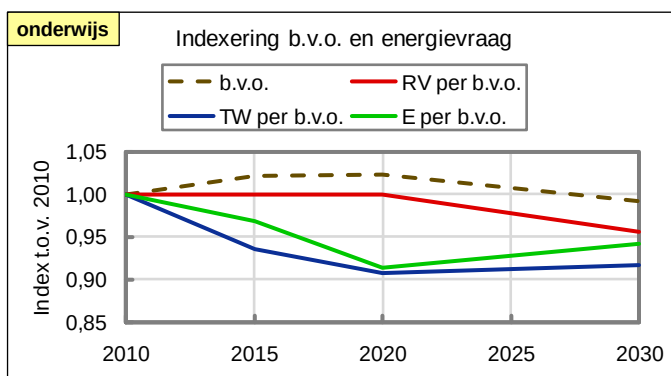
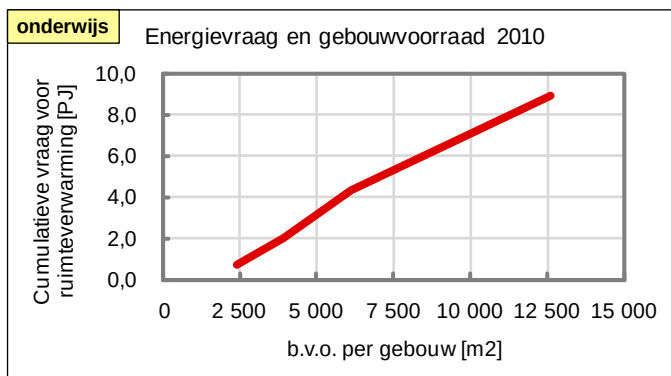
De penetratie van isolatiemaatregelen laat zien dat het scala aan gebouwen nog potentieel biedt voor verdere vraagreductie. HBO-instellingen en universiteiten zijn vaak gehuisvest in verschillende gebouwen van sterk uiteenlopende uitvoering en bouwkwiteit. En met name de universiteiten zijn vanuit de historie deels nog vaak gehuisvest in oude gebouwen in de centra van de universiteitssteden.

De komende jaren zal het gebouwoppervlak voor onderwijs nog licht groeien. Vanaf 2020 zet een (eveneens lichte) daling in.

De energievraag daalt licht. Met name het verbruik van elektriciteit zal dalen door efficiëntere apparatuur en betere verlichting.

Door toenemende penetratie van bouwkundige maatregelen zal naar verwachting de warmtevraag iets afnemen.

Tapwater speelt bij onderwijs een iets grotere rol dan in de kantorensector, maar niet zoals in de zorgsector. De energievraag voor tapwaterbereiding zal door efficiëntere apparatuur een dalende trend laten zien, die na 2020 stabiliseert.



Figuur 25 — Ontwikkeling in gebouwvoorraad en energievraag in de onderwijssector.

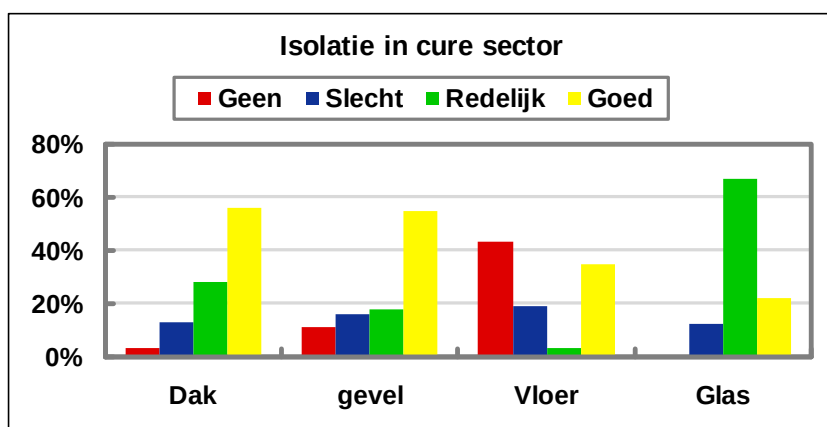
4.7. Zorgsector, Ziekenhuizen (Cure)

Binnen de zorgsector wordt vaak onderscheid gemaakt tussen cure en care. Onder de cure vallen voornamelijk ziekenhuizen en andere instellingen waar mensen kort verblijven om te genezen. Onder de care vallen vooral de bejaarden-, verpleeg- en verzorgingshuizen.

De cure-sector kan worden onderverdeeld in de hot floor (operatiekamers en intensive care), verpleegafdelingen, grootkeuken en sterilisatie. Ziekenhuizen zijn vaak gehuisvest in samengestelde complexen van gebouwen met laag- en hoogbouw. Vaak zijn de gebouwen ook weer voorzien van verschillende vleugels waar verschillende functies in zijn ondergebracht.

De sector leent zich goed voor het toepassen van gaswarmtepompen omdat er een dominante warmtevraag is. Ook zijn er situaties waarin koeling en verwarming gelijktijdig optreden. Daarnaast is er zelden alleen een koelvraag en is de vereiste mate van bedrijfszekerheid hoog. Veel instellingen zijn voorzien van een noodstroom-aggregaat, waardoor ook beschikbaarheid van elektrische systemen geborgd is.

Zorgcomplexen bestaan vaak uit gebouwen, bouwdelen en vleugels die in opeenvolgende bouwperiodes zijn gerealiseerd. Bij renovatie of uitbereiding van delen van een complex kan een mini-wkk of gwp een passende optie zijn. Regelmatig blijkt de elektrische infrastructuur een knelpunt te zijn, waardoor het toepassen van elektrische warmtepompen niet tot de mogelijkheden behoort, tenzij verzwaring van het elektriciteitsnet wordt overwogen. Bij gasgedreven toepassingen speelt dit niet. Bij upgrading van de opwekinstallatie kan een gasgedreven warmtepomp dan uitkomst bieden.



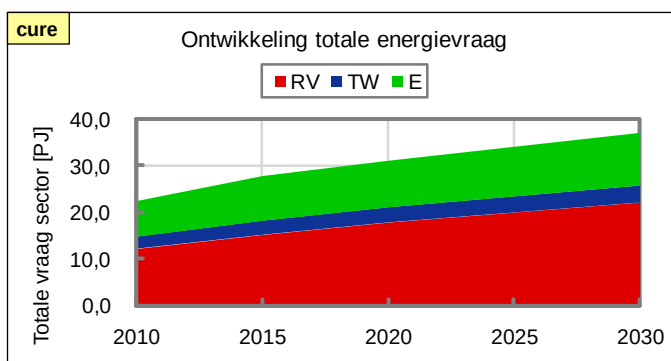
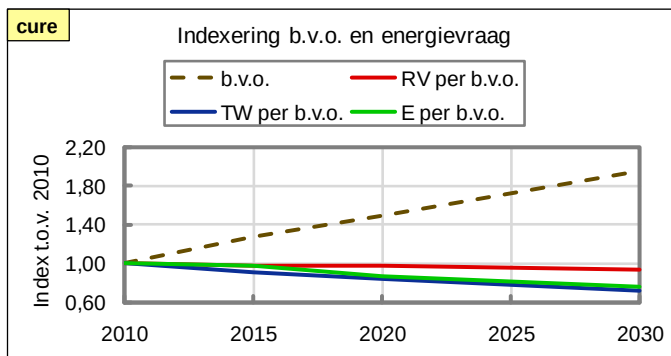
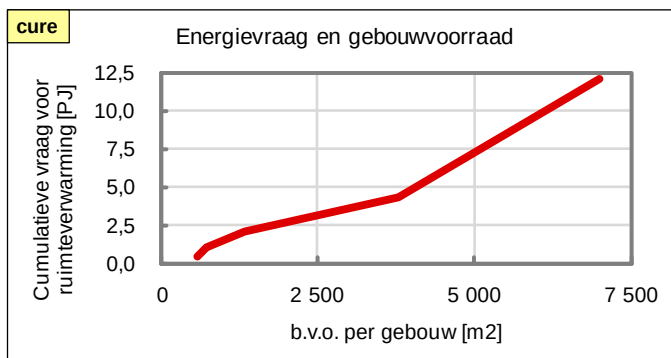
Figuur 26 — Penetratie van isolatiemaatregelen in cure sector.

De penetratie van isolatiemaatregelen in de cure-sector is beduidend hoger dan in de voorgaande sectoren. Hoewel dit niet expliciet is aangetoond, zou het vereiste hoge comfortniveau hier een rol kunnen spelen.

De vergrijzing van de bevolking zal in de komende decennia leiden tot groei van het bvo in de cure-sector. Hoewel opnames korter van duur worden, zal het stijgende aantal opnames van een groeiende groep ouderen de totale hoeveelheid beddagen verder laten groeien.

De energievraag voor ruimteverwarming per bvo zal naar verwachting niet toenemen. Dit komt doordat steeds meer gebruik wordt gemaakt van efficiënte technieken. De totale energievraag in de sector neemt wel toe.

In de cure zal net als in andere sectoren van de gebouwde omgeving de directe elektriciteitsvraag dalen als gevolg van efficiëntere verlichting en apparatuur. De indirecte elektriciteitsvraag voor koeling die de interne warmtelast moet wegkoelen, zal naar verwachting afvlakken.



Figuur 27 — Ontwikkeling in gebouwvoorraad en energievraag in de cure sector.

De energievraag per bvo voor tapwaterproductie blijft waarschijnlijk min of meer gelijk. Echter, echter de toename van het bvo zal de totale energievraag voor tapwater doen stijgen.

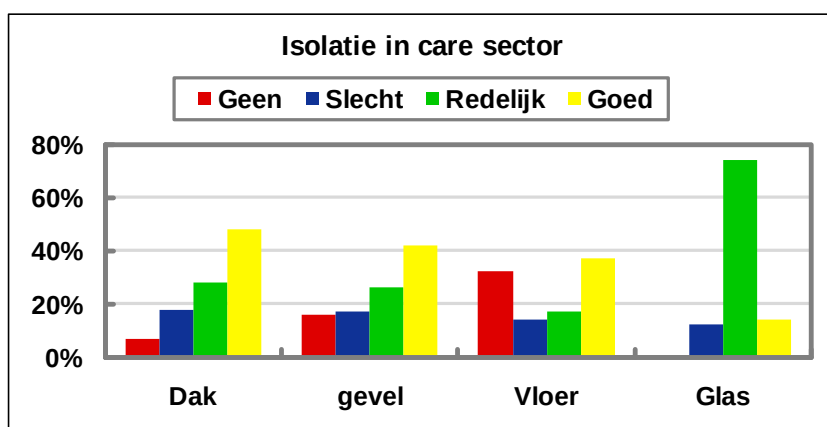
De totale energievraag in de cure zal ondanks efficiëntere apparatuur en meer isolatie isolatie tot 2020 bijna met de helft toenemen. Tot 2030 wordt ruwweg een verdubbeling verwacht. Een intensiever beroep op de sector door een vergrijzende, steeds langer levende populatie zorgt hier voor een aanzienlijke toename van het verwachte energieverbruik.

4.8. Zorgsector, bejaarden-, verzorging- en verpleegtehuizen (Care)

Onder de care vallen bejaarden-, verpleeg- en verzorgingstehuizen. Het verschil tussen cure en care zit in de verblijfsduur en in het behandelproces. In bejaardentehuizen ligt het accent op de woonfunctie. Hierdoor vertonen deze complexen op het gebied van ruimteverwarming veel overeenkomsten met flatwoningen, met dien verstande dat de energievraag voor ruimteverwarming per woonunit lager is. Het is niet voor niets dat de woningbouwcorporaties in toenemende mate facilitair management van gebouwen en installaties in deze sector aanbieden.

Binnen de verzorgings- en verpleegtehuizen is sprake van een lange verblijfsduur, in combinatie met medische zorg tot op een bepaald niveau. Dit maakt deze twee sub-sectoren vergelijkbaar met ziekenhuiscomplexen zonder hot floor. Er is behoefte aan een stabiele, relatief hoge ruimtetemperatuur en dit vertaalt zich in een substantiële energievraag.

In de care-sector mag de warmtevraag als dominant worden gezien, wat een goed uitgangspunt is voor inzet van wkk of gwp. Koeling en verwarming kunnen afhankelijk van het type complex en de ligging gelijktijdig voorkomen, wat met gas-warmtepompen technisch goed realiseerbaar is.

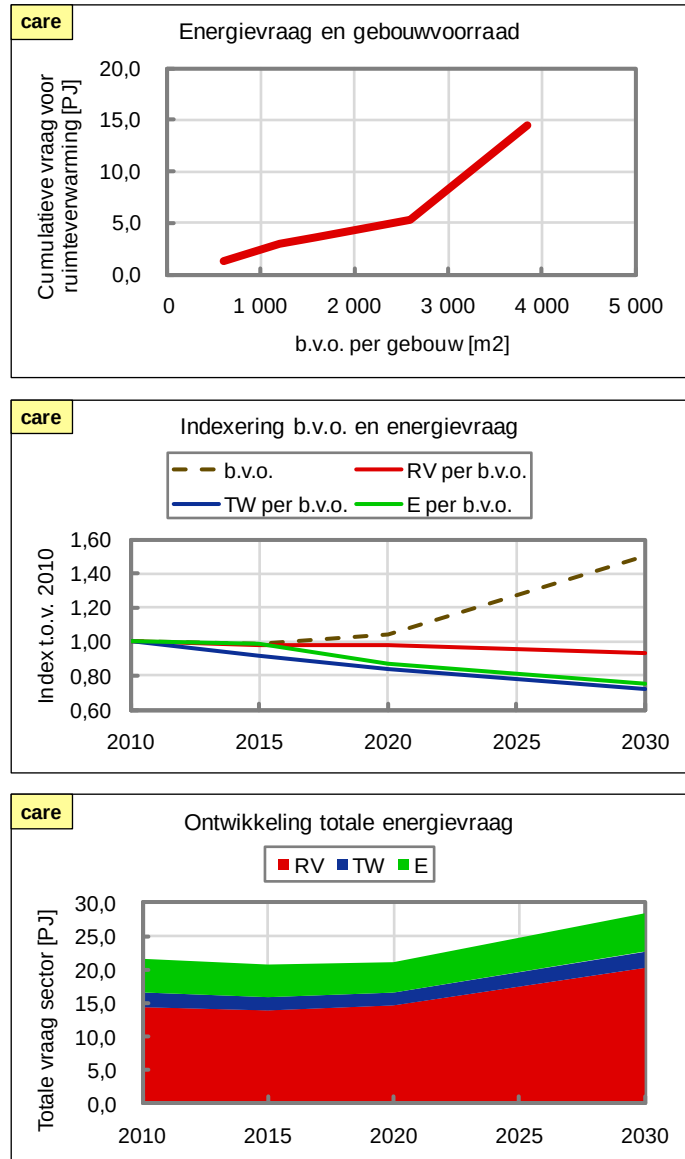


Figuur 28 — Penetratie van isolatiemaatregelen in care sector.

Voor de care wordt op termijn (na 2020) een aanzienlijke groei voorzien van het bvo. Uitgaande van de heersende trend om ouderen zo lang mogelijk zelfstandig te laten wonen, wordt verwacht dat de groei zich met name bij de verpleeg- en verzorgingstehuizen zal voordoen.

Meer efficiënte apparatuur en energiezuinige nieuwbouw (de groei in bvo zal door nieuwbouw moeten worden gerealiseerd) zullen het elektriciteitsverbruik en de energievraag voor ruimteverwarming en tapwater per bvo licht doen dalen.

Door de groei in bvo zal de totale energievraag vanaf 2020 tot 2030 aanzienlijk stijgen. De ontwikkeling van de energievraag zal vergelijkbaar verlopen als in de cure-sector.



Figuur 29 — Ontwikkeling in gebouwvoorraad en energievraag in de care sector.

5. POTENTIEEL VOOR MINI-WKK EN GASWARMTEPOMPEN

5.1. Methodiek

Uitgangssituatie

Voor de berekening van het potentieel is uitgegaan van de gegevens die in het vorige hoofdstuk besproken zijn. Voor iedere sector is bepaald wat de verdeling van het energiegebruik is over de gebouwvoorraad. Als basis is hiervoor de dataset van Liander gebruikt, die vervolgens is opgeschaald in overeenstemming met gegevens uit de BAG, de referentieraming gebouwde omgeving [ECN 2010 a] en het SAVE-S rekenmodel [ECN SAVE-S]. Hierbij is tevens rekening gehouden met de penetratiegraad van LT-verwarmingssystemen.

Berekening voor afzonderlijke techniek-opties

Per sector is vervolgens de opgeschaalde gebouwvoorraad verdeeld in grootteklassen. Voor iedere klasse is vervolgens de invulling van de energievraag berekend voor vijf situaties:

1. referentie: ketel + inkoop van elektriciteit
2. wkk gasmotor + deels inkoop van elektriciteit
3. wkk brandstofcel + deels inkoop van elektriciteit
4. gwp gasmotor + inkoop van elektriciteit
5. gwp absorptie + inkoop van elektriciteit

Voor alle berekeningen is uitgangspunt dat de volledige energievraag in de sectoren wordt ingevuld door één van de bovenstaande opties. Er wordt dus een penetratiegraad van 100% aangenomen voor de technieken, alsof alle bestaande verwarmingssystemen vervangen zouden worden door wkk of gwp.¹¹

De referentiesituatie voor warmteproductie (HR-ketel) en elektriciteitsproductie in de centrale is beschreven in hoofdstuk 3. Voor optie 2 t/m 5 is gerekend met een dekingsgraad van 79% door de mini-wkk of gaswarmtepomp. De piekvraag wordt in alle gevallen ingevuld door een HR-ketel. Bij mini-wkk zal de hoeveelheid elektriciteit uit centrale productie duidelijk afnemen ten gevolge van de lokale productie.¹²

Zoals aangegeven in hoofdstuk 2 worden de kleinste panden uitgesloten van de berekening. Vanaf circa 10 kWth vermogen zijn mini-wkk en vanaf 22 kWth zijn gaswarmtepompen beschikbaar om de warmtevraag in te vullen. De rendementen van de technieken zijn gegeven in appendix A2. De rendementen verschillen voor LT en HT afgifte. In hoofdstuk 3 is de curve gegeven voor het aandeel LT en HT verwarmingssystemen.

Uit de berekende primaire brandstofinzet voor de vijf situaties is vervolgens de hiermee corresponderende CO₂-uitstoot bepaald. Hierbij zijn de vermeden brandstofinzet en CO₂-uitstoot van elektriciteit geproduceerd door mini-wkk meegenomen als aftrekpost. Voor brandstofcellen kan dit er in bepaalde gevallen leiden dat de 'absolute' CO₂-uitstoot negatief is. De uitgespaarde CO₂-emissie voor de elektriciteit

¹¹ Hierdoor ontstaat een kleine fout in de potentieelbepaling, aangezien in enkele gevallen het niet mogelijk zal zijn om wkk of gwp te plaatsen. Dit kan bijvoorbeeld het geval zijn als de ketelruimte zeer klein is, of als geen gasinfrastructuur aanwezig is.

¹² Er wordt aangenomen dat het elektriciteitsnet voldoende buffercapaciteit biedt, zodat de wkk's in voorkomende gevallen hun elektriciteitsproductie aan het net kunnen afleveren.

overtreft in dat geval de CO₂-uitstoot van het verbruikte aardgas voor de brandstofcel.

Tenslotte zijn deze berekeningen herhaald voor de tijdvakken 2010 (huidig), 2010-2015, 2015-2020 en 2020-2030, waarbij gebruikgemaakt is van het ontwikkelpotentieel van mini-wkk en gaswarmtepomp.

In appendix A2 zijn de getalsmatige uitgangspunten voor de berekeningen in alle tijdsvakken in detail weergegeven.

De berekening van het besparingspotentieel (case 2 t/m 5 t.o.v. de referentiecasi 1) is voor iedere techniek *afzonderlijk* uitgevoerd. Er is dus expliciet *geen rekening* gehouden met het marktaandeel dat de technieken onderling verdelen. Het is daarom ook niet zinvol om het besparingspotentieel van de verschillende technieken te sommeren.

Gevoeligheidsanalyse

In hoofdstuk 3 wordt uitgelegd voor welke referenties gekozen is op het gebied van lokale warmteproductie en centrale elektriciteitsproductie. Tevens is aangegeven welke ontwikkelingen theoretisch nog mogelijk zouden zijn op het gebied van efficiency in de referentiecasi. Er is een gevoeligheidsanalyse gemaakt die deze effecten in kaart brengt.

De gevoeligheidsanalyse gaat uit van een referentiesituatie met hogere efficiency: een hoger centraal elektrisch opwekrendement en een warmte-referentie waarin ook elektrische warmtepompen zijn meegenomen.¹³ Dit geeft een beeld van de besparing indien een andere gangbare keuze voor het referentiesysteem wordt genomen.

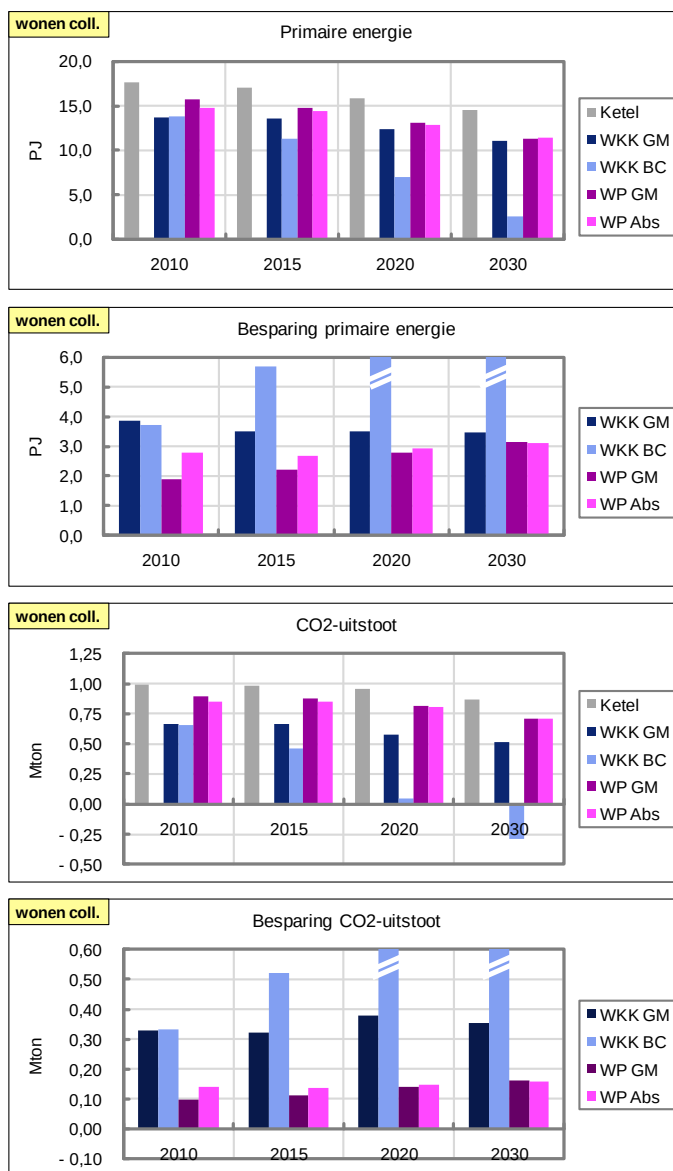
¹³ Als gevoeligheidsanalyse wordt uitgegaan van een realistisch ingeschatte groei van de toepassing van elektrische warmtepompen. Voor gwp en wkk wordt in deze studie een maximaal technisch potentieel bepaald. De hier aangenomen groei in elektrische warmtepompen kan daarom niet worden vergeleken met de resultaten voor de groei van gwp en wkk uit dit rapport.

5.2. Collectieve systemen in de woningbouw

De figuur rechts geeft een overzicht van de resultaten voor collectieve systemen in de woningbouw. In het bovenste paneel is de primaire energievraag berekend voor de referentiecasse en de wkk- en warmtepompcases.

Door stijgende efficiency van apparaten en betere bouwfysische kwaliteit daalt de finale energievraag en daarmee ook de primaire energiebehoefte in de referentiesituatie. Ook voor de vier techniekopties is een gestaag dalende trend zichtbaar.

De absolute besparing ten opzichte van het referentiescenario zijn in het tweede paneel aangegeven. Zoals in eerdere hoofdstukken aangegeven, is de potentiële besparing van de brandstofcel-wkk (BC) zeer hoog (in 2020 en 2030 besparing groter dan bereik y-as, zie appendix A3 voor getalswaarden). Gezien de onzekere ontwikkeling op het gebied van brandstofcellen is voorzichtigheid geboden bij de interpretatie van de BC-case.



Figuur 30 — Primaire energie en CO₂-uitstoot voor collectieve systemen in de woningbouw.

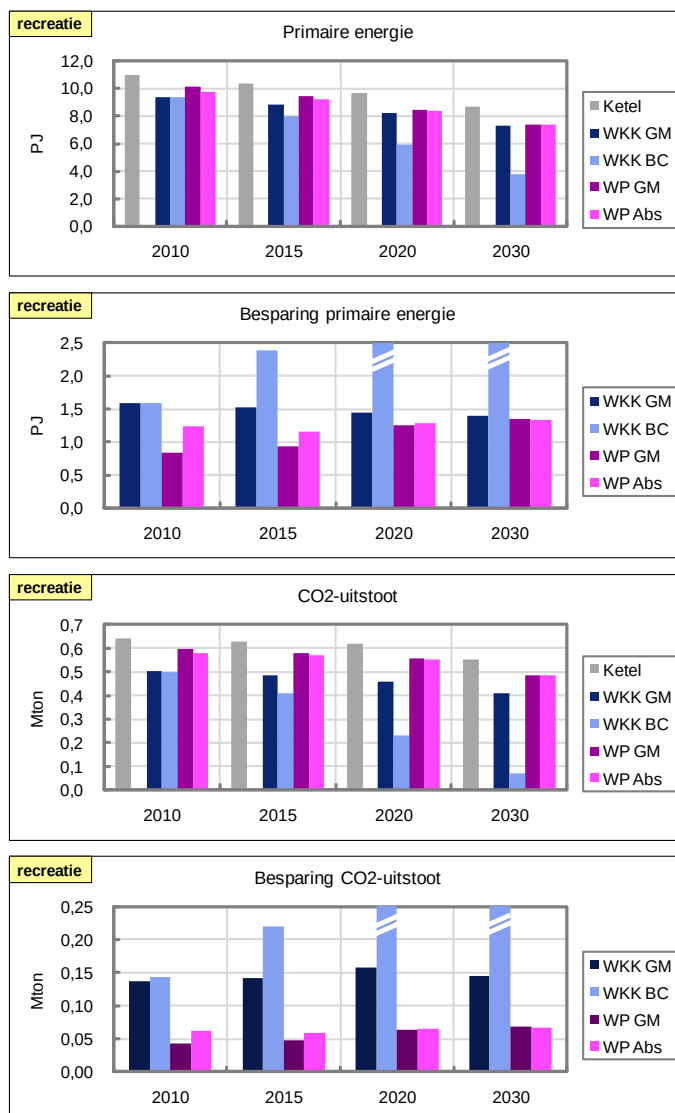
De onderste panelen geven de absolute CO₂-uitstoot voor de gehele sector en de besparing voor de vier techniekopties t.o.v. de referentie. Aangezien de CO₂-uitstoot van het centrale park mede bepaald wordt door kolengestookte centrales, is de mogelijke emissiebesparing met gasgestookte mini-wkk relatief groot. Voor een brandstofcel is de absolute CO₂-uitstoot zelfs negatief. De bespaarde emissie van centrale elektriciteitsproductie is in dit geval groter dan de uitstoot van het aardgas dat de brandstofcel verbruikt.

5.3. Hotel- en recreatiebranche

De hotel- en recreatiebranche is qua energieverbruik vergelijkbaar met de woningbouw met collectieve lokale verwarmingssystemen. Afhankelijk van de gekozen technische optie bedraagt de primaire energievraag tot circa 7 PJ per jaar in 2030.

De besparing die behaald kan worden t.o.v. het referentiescenario bedraagt rond de 1,5 PJ. Bij inzet van brandstofcellen kan een aanmerkelijk grotere besparing worden gerealiseerd, zie appendix A3 voor getalswaarden.

Voor de CO₂-uitstoot gelden vergelijkbare trends als voor de energiebehoefte, waarbij ook hier wkk goed scoort door de relatief inefficiënte centrale elektriciteitsproductie.



Figuur 31 — Primaire energie en CO₂-uitstoot voor hotel- en recreatiebranche.

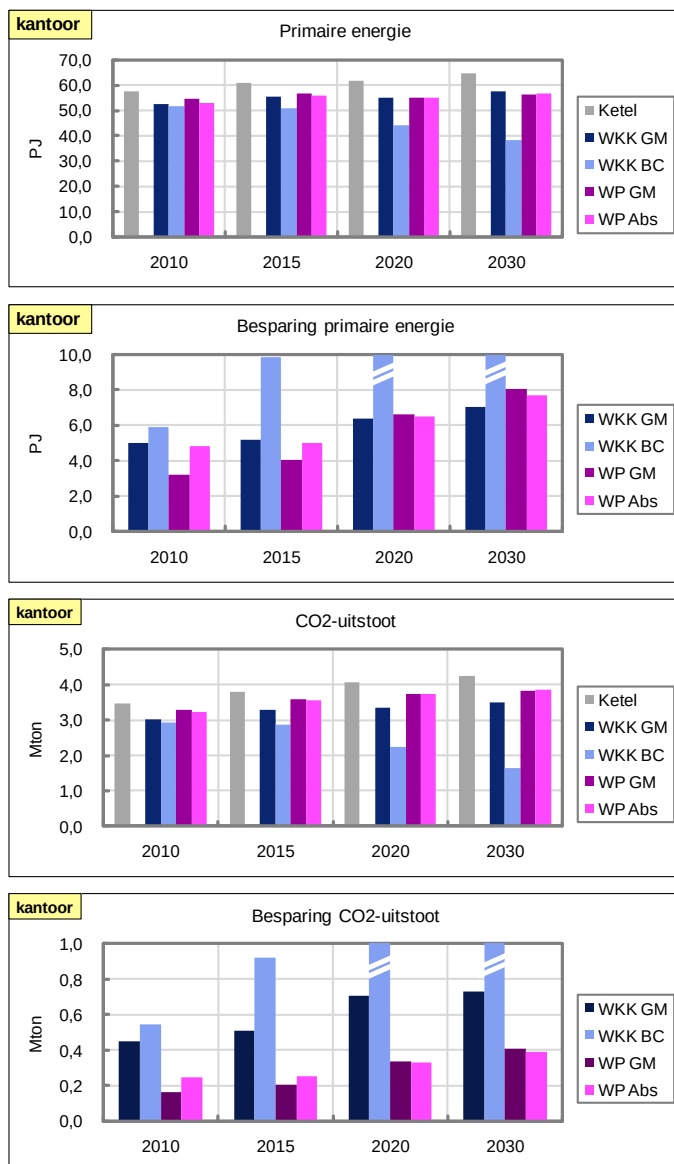
5.4. Kantoren

Naar verwachting neemt het gebruikte bvo in de kantoren-sector in de komende decennia toe. Hoewel de warmtevraag door bouwkundige ontwikkelingen zal afnemen, is er een stijgende elektriciteitsvraag te verwachten. Netto leiden deze effecten tot een lichte stijging van de finale energiebehoefte, die ook in de primaire energievraag terugkomt.

Door inzet van mini-wkk en gaswarmtepompen kan rond 15% (in 2030) worden bespaard t.o.v. de referentiesituatie, maar desalniettemin zal de totale brandstofbehoefte toenemen, zie appendix A3 voor getalswaarden.

Ook voor de CO₂-uitstoot is een flinke relatieve besparing mogelijk, maar zal de absolute uitstoot ook met inzet van gasmotor-wkk of gaswarmtepompen toenemen.

Indien brandstofcellen op grote schaal worden ingezet, zullen de absolute primaire energievraag en CO₂-uitstoot wel afnemen.



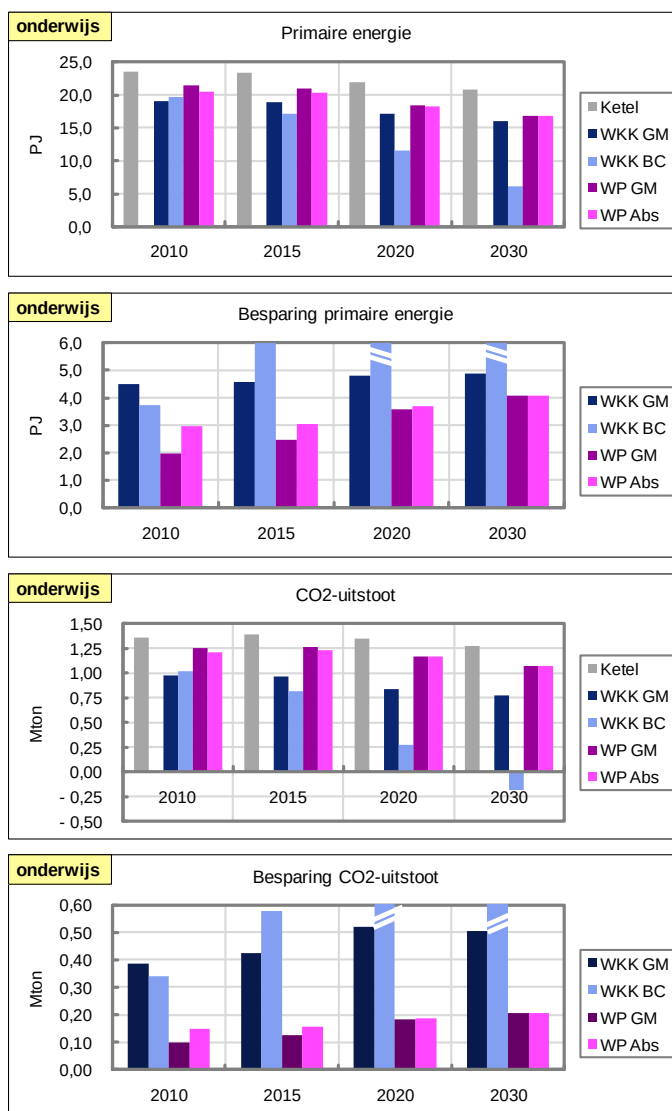
Figuur 32 — Primaire energie en CO₂-uitstoot voor kantoren.

5.5. Onderwijsinstellingen

In de onderwijssector wordt een lichte daling van de energievraag voorzien. De primaire energiebehoefte zal overeenkomstig dalen, waarbij wkk en warmtepompen een besparing van circa 20% kunnen realiseren t.o.v. het basisniveau.

Op CO₂-uitstoot is een besparing te realiseren van tussen de 15 en 40% (in 2030) voor warmtepompen en gasmotor-wkk. De totale sectorale uitstoot van CO₂ komt uit rond de 1 Mton per jaar, zie appendix A3 voor getalswaarden.

Met brandstofcellen kan in principe een besparing tot 75% (2030) op primaire energie behaald worden. De CO₂-uitstoot wordt hierbij negatief, wat betekent dat de CO₂-besparing t.o.v. centrale elektriciteitsproductie groter is dan de CO₂-uitstoot van de aardgasinput aan de brandstofcellen.



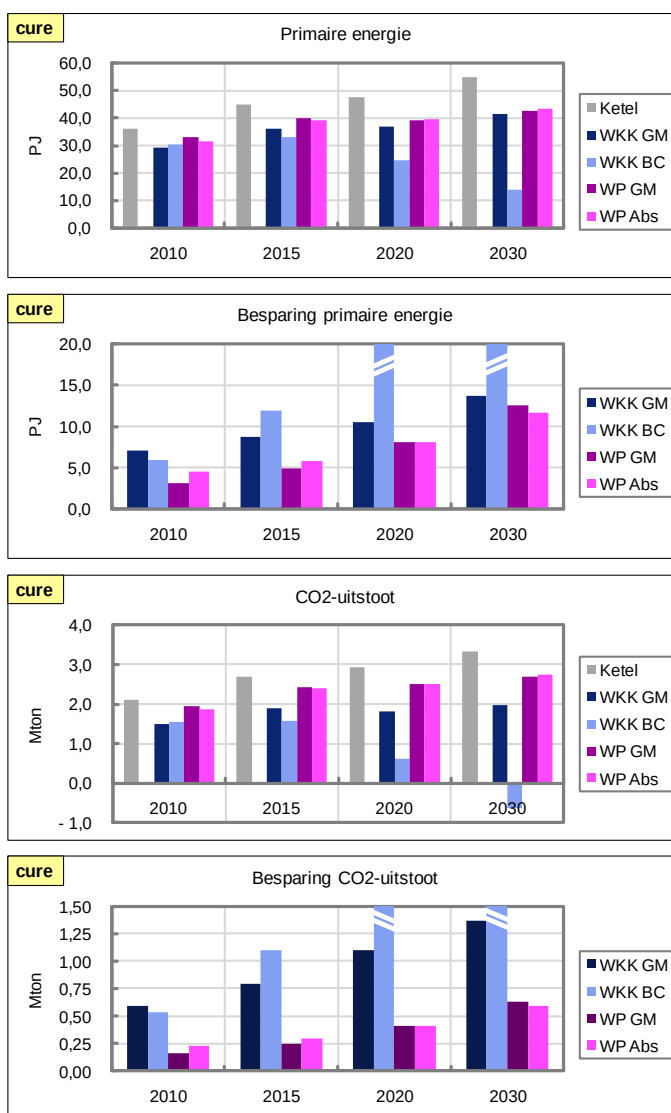
Figuur 33 — Primaire energie en CO₂-uitstoot voor instellingen voor hoger onderwijs.

5.6. Ziekenhuizen (cure)

De voornaamste trend in de cure-sector is een sterke toename in het bvo, zoals beschreven in paragraaf 4.7. Ondanks een verbetering in bouwkwaliteit, efficiency en betere apparatuur zal de finale energievraag naar verwachting fors groeien.

De besparingsmogelijkheden voor efficiënte gastoeepassingen worden dan ook navenant groter in de komende decennia. In 2030 is een besparingspotentieel van zeker 12-15 PJ per jaar te verwachten. Door gebruik te maken van brandstofcellen kan tot 80% bespaard worden en zal ook de absolute primaire energievraag dalen. Zie appendix A3 voor getalswaarden.

De CO₂-uitstoot zal, afhankelijk van de techniemix, met circa 1 Mton per jaar dalen.



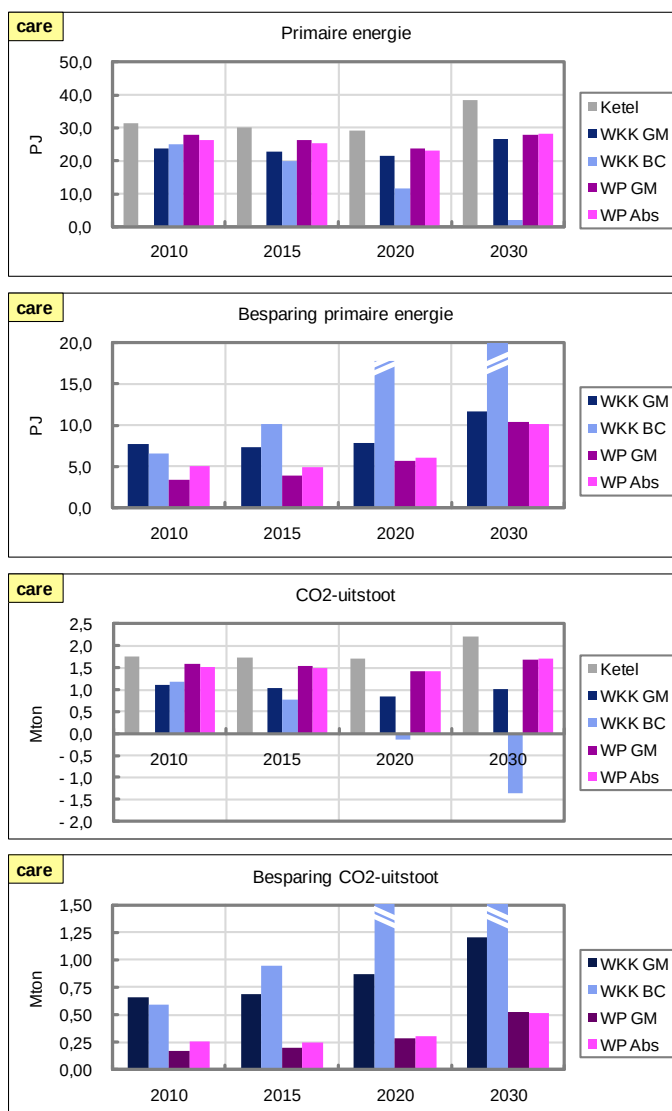
Figuur 34 — Primaire energie en CO₂-uitstoot voor ziekenhuizen.

5.7. Zorginstellingen (care)

Evenals in de cure-sector (ziekenhuizen) zal in de care-sector (onder meer bejaarden- en verzorgingstehuizen) het bvo flink uitbreiden. De ontwikkeling is echter minder sterk in de care-sector (zie ook paragraaf 4.8), zodat de stijging in finale energievraag een kleinere omvang heeft.

Een forse besparing tot 40% (in 2030) t.o.v. het basisscenario is mogelijk door gebruik te maken van gaswarmtepompen of gasmotor-wkk. Met brandstofcellen is brandstofneutraliteit mogelijk door de hoge efficiency t.o.v. centrale elektriciteitsproductie. Zie appendix A3 voor getalswaarden.

Op CO₂-gebied valt de besparing iets hoger uit dan voor primaire energie. Met brandstofcellen wordt warmtevolgend zoveel elektriciteit geproduceerd, dat er een netto negatieve CO₂-bijdrage is.



Figuur 35 — Primaire energie en CO₂-uitstoot voor zorgsector.

5.8. Totale besparing en gevoeligheidsanalyse

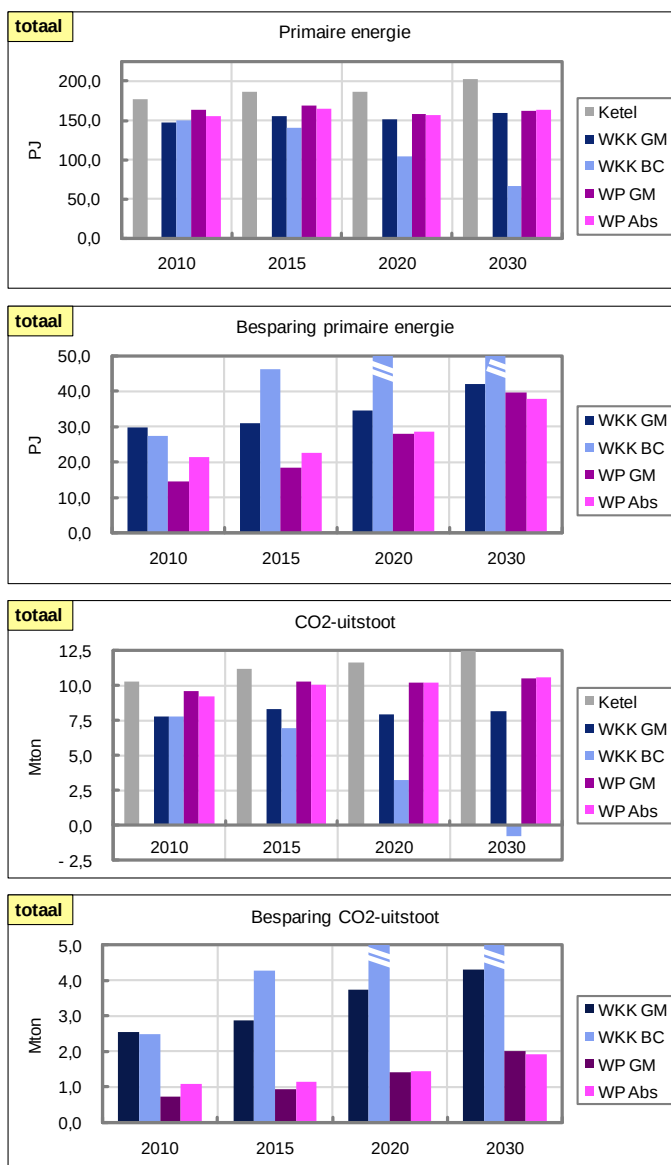
Totaal standaardreferentie

De totale finale energievraag van alle beschouwde sectoren bij elkaar neemt licht toe in de periode 2010-2030. Hieruit volgt een stijgend referentiegebruik, tot een uiteindelijk primaire vraag van ruim 200 PJ per jaar.

Door in te zetten op groot-schalige toepassing van gaswarmtepompen en wkk kan een besparing bereikt worden van circa 20% (2030) op het referentieverbruik. Deze besparing zal naar verwachting afdoende zijn om het huidige energieverbruik te stabiliseren.

Indien brandstofcellen op grote schaal doorbreken, is een zeer grote besparing te behalen. Ook in absolute zin zal het verbruik dan dalen van 180 PJ momenteel tot circa 60 PJ in 2030.

De CO₂-uitstoot zal in absolute termen gestabiliseerd kunnen worden door in te zetten op gaswarmtepompen. Met behulp van gasmotor-wkk is een absolute besparing van 4,5 Mton realiseerbaar. Voor brandstofcellen is CO₂-neutraliteit mogelijk.



Figuur 36 — Totale primaire energie en CO₂-uitstoot voor alle besproken sectoren.

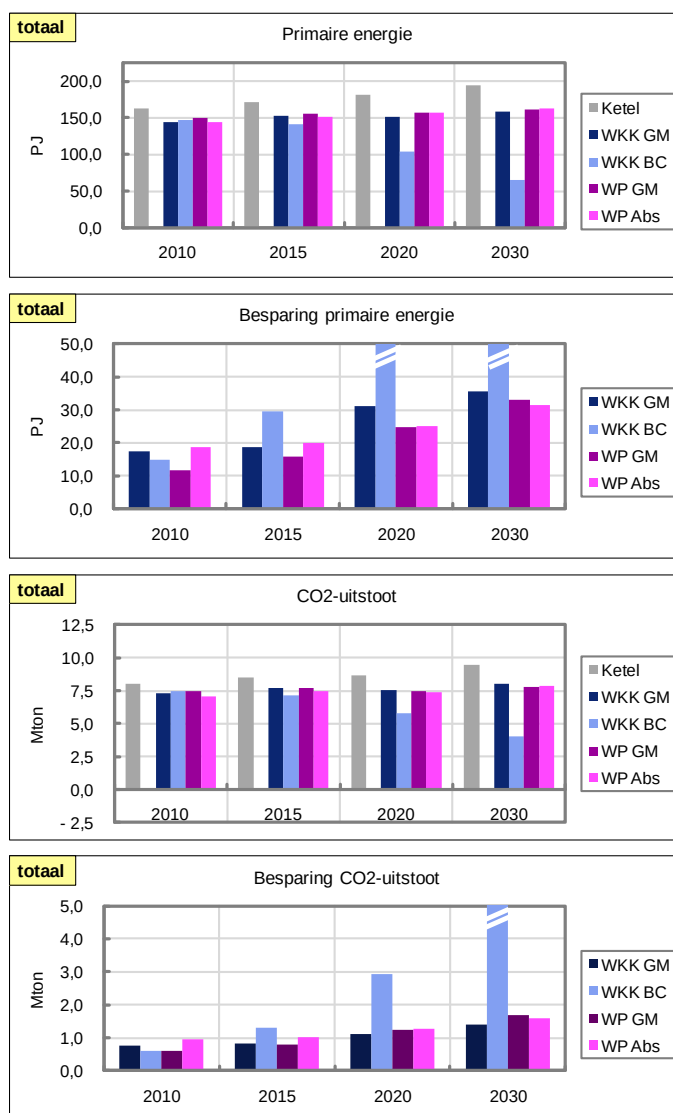
Gevoeligheidsanalyse

Bovenstaande analyse is gemaakt op basis van de basisreferentie zoals beschreven in hoofdstuk 3. Dit referentiescenario geeft de huidige beste inschatting van toekomstige referentierendementen.

Er kan echter worden gekozen voor een vergelijking met een STEG-centrale voor elektriciteitsproductie en een aandeel elektrische warmtepompen in de referentie voor warmteopwekking. Voor een bespreking van deze vergelijkingsopties, zie hoofdstuk 3.

De figuren op deze pagina geven de resultaten van de potentieelberekening op basis van de striktere aannames.

In de gevoeligheidsanalyse is duidelijk dat met efficiënte gastoepassingen een flinke besparing te behalen is. Ook t.o.v. een scherpere referentiesituatie.



Figuur 37 — Totale primaire energie en CO₂-uitstoot voor alle besproken sectoren – gevoeligheidsanalyse.

Door een hoog rendement voor centrale elektriciteitsproductie te kiezen, verdwijnt het onderscheid tussen gasmotor-wkk en gaswarmtepompen nagenoeg. In alle gevallen is een energiebesparing van 20% en een CO₂-vermindering van 15% realiseerbaar in 2030. Hiermee stabiliseert de huidige primaire brandstofvraag en de huidige CO₂-uitstoot.

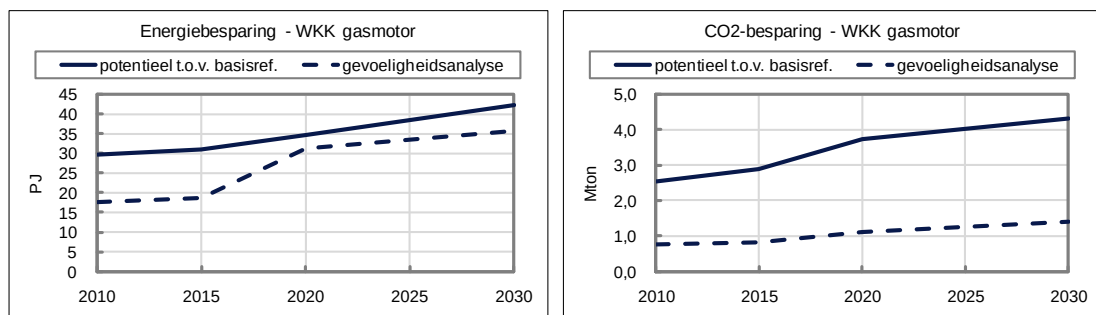
Met behulp van brandstofcellen is ook in absolute termen een significante reductie van brandstofvraag en CO₂-emissie mogelijk. Beide kunnen met circa 50% worden gereduceerd.

5.9. Uitsplitsing resultaten per technologie

In deze paragraaf worden de resultaten uit voorgaande paragrafen per technologie samengevat. Hier wordt nogmaals gewezen op het feit dat de potentieelbepaling voor alle vier de techniekopties afzonderlijk gedaan is. Sommeren van de potentiëlen is niet zinvol.

5.9.1. Gasmotor-wkk

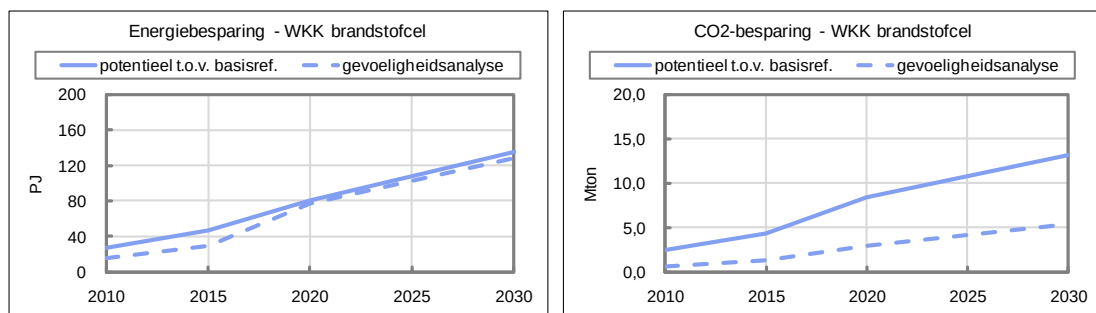
Onderstaande figuur geeft de resultaten voor gasmotor-wkk. Uit de berekeningen volgt een totaal besparingspotentieel van 50 PJ, overeenkomend met 4,5 Mton CO₂-uitstoot. Indien uitgegaan wordt van een striktere referentie is een besparing van 30 PJ en uitstootvermindering van 1,5 Mton mogelijk.



Figuur 38 — Besparingspotentieel – detailweergave voor gasmotor-wkk.

5.9.2. Brandstofcel-wkk

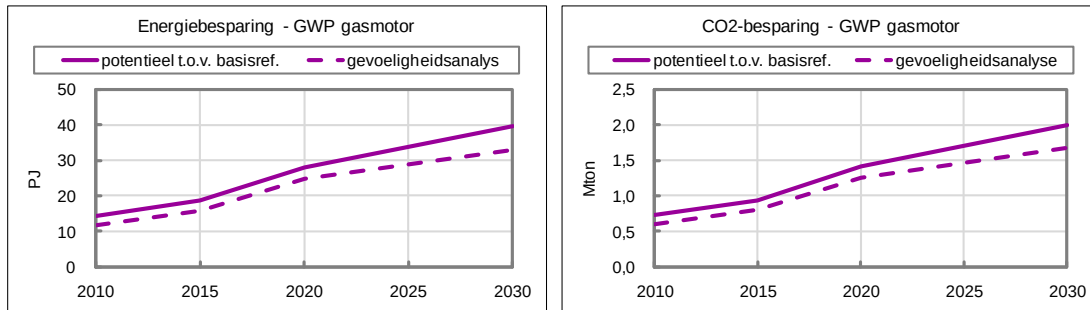
Onderstaande figuur geeft de resultaten voor brandstofcel-wkk. Het besparingspotentieel is 160 PJ, overeenkomend met 14 Mton CO₂-uitstoot. Indien uitgegaan wordt van een striktere referentie is een besparing van 120 PJ en uitstootvermindering van 5 Mton mogelijk.



Figuur 39 — Besparingspotentieel – detailweergave voor brandstofcel-wkk.

5.9.3. Gasmotorwarmtepomp

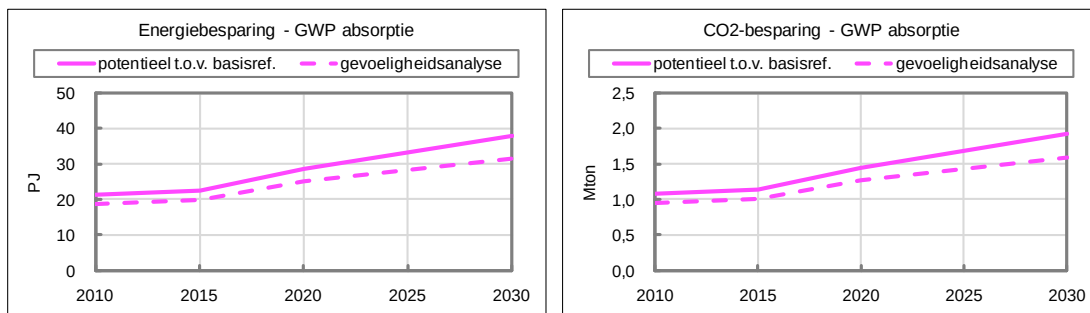
Onderstaande figuur geeft de resultaten voor gasmotorwarmtepomp. Een totaal besparingspotentieel van 40 PJ volgt uit de berekeningen, overeenkomend met 2 Mton CO₂-uitstoot. Indien uitgegaan wordt van een striktere referentie is een besparing van 33 PJ en uitstootvermindering van 1,7 Mton mogelijk.



Figuur 40 — Besparingspotentieel – detailweergave voor gasmotorwarmtepomp.

5.9.4. Absorptiewarmtepomp

Onderstaande figuur geeft de resultaten voor gasabsorptiewarmtepomp. Een totaal besparingspotentieel van 40 PJ volgt uit de berekeningen, overeenkomend met 2 Mton CO₂-uitstoot. Indien uitgegaan wordt van een striktere referentie is een besparing van 32 PJ en uitstootvermindering van 1,6 Mton mogelijk.



Figuur 41 — Besparingspotentieel – detailweergave voor gasabsorptiewarmtepomp.

5.10. Resultaten per sector

Onderstaande tabellen geven een overzicht van het technisch besparingspotentieel per sector voor de verschillende technologische opties. De getallen geven de maximale besparing/vermindering weer die per 2030 gerealiseerd zou kunnen worden.

Sector	Besparing primaire energie			
	WKK gasmotor	WKK brandstofcel	GWP gasmotor	GWP absorptie
Woningbouw coll.	24%	82%	22%	22%
Hotel & Recreatie	16%	56%	15%	15%
Kantoor	11%	41%	13%	12%
Hoger onderwijs	23%	71%	20%	19%
Zorg (Cure)	25%	74%	23%	21%
Zorg (Care)	31%	95%	27%	26%

Sector	Vermindering CO ₂ -uitstoot			
	WKK gasmotor	WKK brandstofcel	GWP gasmotor	GWP absorptie
Woningbouw coll.	41%	134%	18%	18%
Hotel & Recreatie	26%	87%	12%	12%
Kantoor	17%	61%	10%	9%
Hoger onderwijs	40%	115%	16%	16%
Zorg (Cure)	41%	119%	19%	18%
Zorg (Care)	54%	161%	24%	23%

Figuur 42 — Besparing op primaire energie en vermindering van de CO₂-uitstoot uitgesplitst per sector voor alle vier de technologie-opties. De tabellen geven de resultaten voor de maximale technische besparing te behalen in 2030.

Afhankelijk van de technologie en de keuze voor een referentie loopt de besparing flink uiteen. De besparing op primaire energie en de vermindering in CO₂-uitstoot is voor beide technologieën aanzienlijk, als we de percentages in bovenstaande tabellen in ogenschouw nemen. De energiebesparing en emissiereductie is het grootst voor de wkk-opties doordat het rendement van het elektriciteitspark in Nederland relatief laag is ten opzichte van het rendement van moderne en toekomstige wkk-installaties. Als hier nog de afwezigheid van netverliezen bij wordt opgeteld, kan een lokaal opgestelde wkk zeer efficiënt produceren.

Voor de brandstofcel zijn de resultaten interessant. Met een verwacht elektrisch rendement van 54% (bw) in 2030 presteren brandstofcellen beter dan moderne grote elektriciteitscentrales. Hierdoor zijn, met name in woningbouw en zorg, zeer grote besparingen op primaire energie en CO₂-uitstoot mogelijk. Door de lage warmtekrachtverhouding produceren brandstofcellen relatief veel elektriciteit bij een gegeven warmtevraag. Juist bij een dalende vraag naar ruimteverwarming kunnen brandstofcellen toch nog een significante bijdrage aan ruimteverwarming leveren.

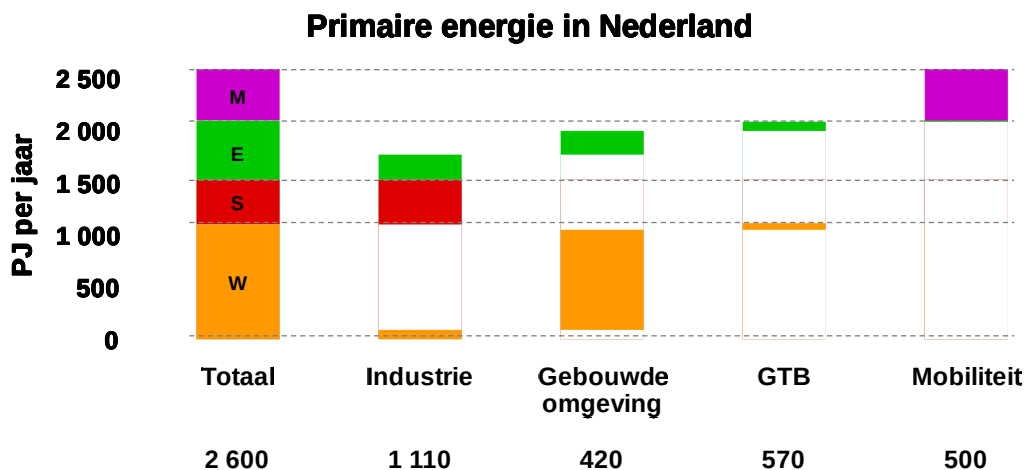
6. DE RESULTATEN IN PERSPECTIEF

6.1. Belang voor Nederland

De sectoren die in deze potentieelstudie zijn beschouwd hebben samen een energievraag van circa 150 PJ per jaar, toenemend tot 200 PJ. Dit is ruim de helft van de totale energievraag in de utiliteitsbouw en komt overeen met ongeveer 6% van de totale Nederlandse energievraag.

Andere sectoren die een grote impact op de Nederlandse energiehuishouding hebben zijn:

- Industrie. Goed voor bijna 30% van de Nederlandse energievraag, voornamelijk proceswarmte.
- Woningbouw. Grofweg 70% van het totale verbruik in de gebouwde omgeving (waarvan een klein deel onder de hier behandelde collectieve systemen valt). Door het grote aandeel laag-exergetische warmtevraag in deze sector erg geschikt voor verduurzaming
- Mobiliteit. Circa 25% van de totale primaire Nederlandse energievraag.
- Overig utiliteit. Het grootste deel hiervan bestaat uit winkels en handelsgebouwen. Een bijzonder heterogene groep, die daarom moeilijk benaderbaar is. Toepassing van mini-wkk en gaswarmtepompen is echter in veel gevallen probleemloos mogelijk.



Figuur 43 — Verdeling totale Nederlandse primaire energievraag over vier hoofdsectoren (W=warmte, S=stoom, E=elektriciteit, M=mobiliteit, GTB=glastuinbouw). Input van fossiele 'brandstof' als feedstock is niet meegenomen. Bron [Cogen Nederland].

Duidelijk is dat kleinschalige besparingsmogelijkheden voor toepassing in de woningbouw noodzakelijk zijn. Daarnaast zijn mobiliteit en procesindustrie belangrijke sectoren. Opvallend is het grote belang van ruimteverwarming in de gehele Nederlandse energiehuishouding.

Meer aandacht voor de slimme inzet van het kostbare Nederlandse aardgas is daarom een logische stap en kan helpen bij de transitie naar een duurzamere samenleving. Voor deze slimme inzet is de 'Trias Energetica' een goede leidraad voor de selectie van de te nemen maatregelen.

6.2. De uitdaging voor efficiënte gastoeepassingen

Op basis van de kennis van technologie en markt van gaswarmtepompen en mini-wkk bij de auteurs zijn onderstaande tabellen opgesteld.¹⁴ Deze tabellen geven aan op welke punten ingezet moet worden om het maximaal haalbare besparingspotentieel zoals bepaald in hoofdstuk 5 ook daadwerkelijk te realiseren.

6.2.1. Knelpunten voor mini-wkk

Knelpunt	Voorbeeld	Oplossing
Informatievoorziening	Rekentools (Energie-besp.verkenner, GreenKey)	WKK en gwp als volwaardige optie opnemen in tools
	Kennisniveau potentiële gebruikers laag	Aanbod op maat, cursussen, voorlichting → sectorgerichte aanpak
	Kennisniveau installateurs	Conservatisme aanpakken door voorlichting
Financiering / Economie	Prijs/kwaliteitverhouding kan nog beter	Technische doorontwikkeling wkk en gwo
	Investeren ook bij korte terugverdientijd drempel	ESCO's en financieringsconstructies actief ondersteunen
	Kleine wkk duur door EB	EB vrijstellen bij doorlevering elektriciteit, EIA verhogen,...
	Life Cycle Cost wordt niet altijd bekeken	Stimuleren dat LCC meegenomen wordt bij aanbesteding/inkoop, zoals bijvoorbeeld in zorgsector gebeurt
Regelgeving	Leveren elektriciteit aan derden gecompliceerd	Zelflevering mogelijk maken
	Maatregelen met korte terugverdientijd worden niet uitgevoerd	Wet Milieubeheer handhaven door gemeentes
	Lage efficiency heeft geen consequenties	Energielabel handhaven, efficiencyverplichting invoeren
Techniek	Kwaliteit installaties borgen	Installateurs opleiden en bijscholen
	Opbrengst verhogen	Dieper uitkoelen rookgassen, vooral bij tapwaterbereiding
Draairegime	Slechte inregeling / aansturing	Bestaande installaties (verplicht?) monitoren
	Opbrengst niet optimaal	Flexibele inzet op E-markt / congestiemanagement

¹⁴ Input ontvangen van o.m. Power2GO en SCF.

6.2.2. Knelpunten voor gaswarmtepompen

Knelpunt	Voorbeeld	Oplossing
Informatievoorziening	Rekentools acteren als diskwalificatie (Energie-besp.verkenner, Breeam, GreenKey)	WKK en gwp als volwaardige optie opnemen in tools
	Kennisniveau potentiële eindgebruikers laag	Voorlichting → sectorgerichte aanpak
	Kennisniveau adviesbureaus en installateurs	Vanuit conceptmatige benadering kennis verspreiden
Financiering / Economie	Markt moet wennen aan investeringsniveau per kW thermisch	
	Investering ook bij korte terugverdientijd drempel	ESCO's en financieringsconstructies actief ondersteunen
	Recente aanpassing EIA zeer nadelig voor gwp	Aanpassing EIA door ANL
	Life Cycle Cost wordt niet bekeken, enkel de investering	Stimuleren dat LCC meegenomen wordt bij aanbesteding/inkoop, zoals bijvoorbeeld in zorgsector gebeurt
	Maatregelen met korte TVT worden niet uitgevoerd	Wet Milieubeheer handhaven door gemeentes
	Lage efficiency heeft geen consequenties	Energielabel handhaven, efficiencyverplichting invoeren
Techniek	Kwaliteit installaties borgen	Installateurs opleiden / bijscholen
	Opbrengst verhogen	GWP door ontwikkelen
Gebruik	Oplevering en inregeling waarborgen	Bestaande installaties (verplicht?) monitoren

LITERATUUR EN ACHTERGRONDINFORMATIE

Organisaties

- [Agentschap NL] Overheidsorganisatie voor de uitvoering van beleid rond Duurzaamheid, Innovatie en Internationaal
- [BDH] Business Development Holland B.V.; Harderwijk
- [CBS] Centraal Bureau voor de Statistiek; Voorburg
- [Cogen Nederland] Cogen Nederland; brancheorganisatie voor warmtekrachtkoppeling
- [DHPA] Dutch Heat Pump Association; brancheorganisatie voor warmtepompen in de woningbouw
- [ECN] Energieonderzoekscentrum Nederland; Petten
- [Energy Matters] Energy Matters B.V.; voorheen Cogen Projects; Driebergen
- [Liander] Liander N.V.; Arnhem; netwerkbeheerder
- [Power2GO] Brancheorganisatie voor mini-wkk in de utiliteit
- [SCF] Smart Cooling Foundation; Brancheorganisatie voor gaswarmtepompen in de utiliteit
- [TNO] Technisch onderzoekcentrum

Rapporten

- [Agentschap EP] Databank energielabels utiliteitsbouw; AgentschapNL; online beschikbaar via <http://www.ep-online.nl/>
- [Agentschap 2008] Ubouw monitor; 2008
- [Agentschap 2011] Voorbeeldwoningen bestaande bouw; AgentschapNL; 2011
- [BAG] Basisadministratie Gebouwen; ministerie voor WWI; online beschikbaar via <http://bag.vrom.nl/>
- [Cogen Nederland 2010] Met dubbele energie naar een halvering van het energiegebruik: Cogeneration Roadmap Nederland; Cogen Nederland; december 2010
- [ECN 1999] Warmte- en koudevraagpatronen in de utiliteitsbouw; ECN; september 1999; ECN-C-99-067
- [ECN 2010a] Referentieraming energie en emissies 2010-2020 gebouwde omgeving – achtergrondrapportage; ECN; november 2010; ECN-E-10-108; zie ook <http://monitweb.energie.nl/>
- [ECN 2010b] Beleidsstudie naar WKK- en warmtepomptechnologiën; ECN, Agentschap NL; december 2010; ECN-E-10-096
- [ECN SAVE-S] SAVE-S; Rekenmodel voor voorspelling van energie- en gebouw-trends in de gebouwde omgeving; ECN
- [Ecofys 2007] Duurzame warmte en koude 2008-2020: Potentiëlen, barrières en beleid; Ecofys; juli 2007
- [Ecofys 2008] Energie- en CO₂-besparingspotentieel van micro-wkk in Nederland (2010-2030) – Update 2008; Ecofys, ECN, Cogen Projects, Gas-Unie, TNO, CE Delft; mei 2008
- [Ecofys 2009] Energiebesparing- en CO₂-reductiepotentieel hybride lucht/water warmtepomp in de bestaande bouw; Ecofys, TNO, ECN, BDH; januari 2009
- [EZ 2008] Innovatieagenda Energie; Ministerie van EZ; 2008; online beschikbaar via <http://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/duurzame-energie/documenten-en-publicaties/rapporten/2008/07/03/1-innovatieagenda-energie.html>

- [GasTerra 2008] Warmte & Kracht; GasTerra; 2008
- [GasTerra 2010] Efficiënt verwarmen en koelen met aardgas; GasTerra; 2010; online beschikbaar via <http://www.gaswarmtepompboek.nl/>
- [NEN 7120] Energieprestatie van gebouwen; NEN; 2011
- [Statline] Statistische databank van het CBS; online beschikbaar via <http://statline.cbs.nl/statweb/>
- [TNO 2010] Monitoring energiebesparing U-bouw: verkenning dataverzameling; TNO Bouw en Ondergrond; november 2010; TNO-034-DTM-2010-04110

LIJST VAN AFBEELDINGEN

Figuur 1 — Het besparingsprincipe van wkk in de utiliteitsbouw.....	15
Figuur 2 — Voorbeeld van een mini-wkk.....	15
Figuur 3 — Energiestromen in een wkk.....	16
Figuur 4 — Schematisch overzicht van een gasmotorgedreven compressiewarmtepomp	18
Figuur 5 — Voorbeeld van een gasmotorwarmtepomp.....	19
Figuur 6 — Energiestromen in een gasmotorwarmtepomp.....	20
Figuur 7 — Schematische werking van een gasabsorptiewarmtepomp	21
Figuur 8 — Voorbeeld van een gasabsorptiewarmtepomp	21
Figuur 9 — Energiestromen in een gasabsorptiewarmtepomp.	22
Figuur 10 — Een groot deel van de tijd kan volstaand worden met een beperkt thermisch vermogen. De primaire opwekker vult daarmee circa 80% van de energiebehoefte in. Piekvermogen wordt geleverd door een HR-ketel.	26
Figuur 11 — PER van verschillende verwarmingssystemen.....	31
Figuur 12 — Aannames voor referentierendement ruimteverwarming.	33
Figuur 13 — Aannames ontwikkeling penetratiegraad lagetemperatuurafgiftesystemen voor ruimteverwarming per sector.....	34
Figuur 14 — Aannames voor referentierendement tapwater.	34
Figuur 15 — Referentiesituatie elektriciteitsproductie.	35
Figuur 16 — GWP en mini-wkk zijn technisch gezien in alle sectoren in te passen. Wel zijn er verschillen in de mate waarin het productieprofiel aansluit op de energievraag.	38
Figuur 17 — Penetratie van verschillende warmtetechnologieën in de utiliteitsbouw, uit [Agentschap 2008].....	39
Figuur 18 — De penetratie van isolatiemaatregelen in meergezinswoningen [Agentschap 2011]	41
Figuur 19 — Types verwarmingsinstallatie in meergezinswoningen [Agentschap 2011]	42
Figuur 20 — Ontwikkeling in gebouwvoorraad en energievraag in de collectieve woningbouwsector.....	43
Figuur 21 — Ontwikkeling in gebouwvoorraad en energievraag in de hotel- en recreatiesector.	45
Figuur 22 — Penetratie van isolatiemaatregelen in kantoorsector.	46
Figuur 23 — Ontwikkeling in gebouwvoorraad en energievraag in de kantoorsector.	47
Figuur 24 — Penetratie van isolatiemaatregelen in onderwijssector.....	48
Figuur 25 — Ontwikkeling in gebouwvoorraad en energievraag in de onderwijssector.	49

Figuur 26 — Penetratie van isolatiemaatregelen in cure sector.	50
Figuur 27 — Ontwikkeling in gebouwvoorraad en energievraag in de cure sector. .	51
Figuur 28 — Penetratie van isolatiemaatregelen in care sector.	52
Figuur 29 — Ontwikkeling in gebouwvoorraad en energievraag in de care sector. .	53
Figuur 30 — Primaire energie en CO ₂ -uitstoot voor collectieve systemen in de woningbouw.....	57
Figuur 31 — Primaire energie en CO ₂ -uitstoot voor hotel- en recreatiebranche.	58
Figuur 32 — Primaire energie en CO ₂ -uitstoot voor kantoren.	59
Figuur 33 — Primaire energie en CO ₂ -uitstoot voor instellingen voor hoger onderwijs.	60
Figuur 34 — Primaire energie en CO ₂ -uitstoot voor ziekenhuizen.....	61
Figuur 35 — Primaire energie en CO ₂ -uitstoot voor zorgsector.....	62
Figuur 36 — Totale primaire energie en CO ₂ -uitstoot voor alle besproken sectoren.	63
Figuur 37 — Totale primaire energie en CO ₂ -uitstoot voor alle besproken sectoren – gevoeligheidsanalyse.	64
Figuur 38 — Besparingspotentieel – detailweergave voor gasmotor-wkk.	65
Figuur 39 — Besparingspotentieel – detailweergave voor brandstofcel-wkk.....	65
Figuur 40 — Besparingspotentieel – detailweergave voor gasmotorwarmtepomp. .	66
Figuur 41 — Besparingspotentieel – detailweergave voor gasabsorptiewarmtepomp.	66
Figuur 42 — Besparing op primaire energie en vermindering van de CO ₂ -uitstoot uitgesplitst per sector voor alle vier de technologie-opties. De tabellen geven de resultaten voor de maximale technische besparing te behalen in 2030.....	67
Figuur 43 — Verdeling totale Nederlandse primaire energievraag over vier hoofdsectoren (W=warmte, S=stoom, E=elektriciteit, M=mobiliteit, GTB=glastuinbouw). Input van fossiele 'brandstof' als feedstock is niet meegenomen. Bron [Cogen Nederland].....	69

A1. TABELLEN ONTWIKKELINGEN GEBOUWDE OMGEVING

	Warmteproductie					Stadsverw.
	Conv.	VR	HR	WP / WKO	WKK	
Kantoren	10%	10%	67%	7%	2%	4%
Onderwijs	20%	6%	61%	8%	1%	4%
Zorg (Cure)	9%	6%	16%	21%	44%	4%
Zorg (Care)	12%	13%	55%	8%	9%	3%

Figuur 17 — Penetratie van verschillende warmtetechnologieën in de utiliteitsbouw, uit [Agentschap 2008].

Gebouwen en energie - woningbouw

BVO per gebouw [m2]	Verw. cumul. [PJ]
500	0,3
700	0,7
1 000	1,3
1 800	2,9
5 200	6,9

Ontwikkeling gebouwen en energie - index				
	2010	2015	2020	2030
BVO	1,00	1,00	0,99	0,96
Q Verw.	1,00	0,94	0,88	0,79
Q Tapw.	1,00	0,98	0,97	0,94
Q Elektr.	1,00	1,00	1,01	1,01

Ontwikkeling energie - absoluut in PJ				
	2010	2015	2020	2030
RV	6,9	6,4	6,0	5,2
TW	2,0	1,9	1,9	1,8
E	2,9	2,9	2,9	2,8

Figuur 20 — Ontwikkeling in gebouwvoorraad en energievraag in de collectieve woningbouwsector.

Gebouwen en energie - hotel & recreatie

BVO per gebouw [m2]	Verw. cumul. [PJ]
800	0,1
900	0,4
1 200	0,8
1 900	1,5
4 100	3,5

Ontwikkeling gebouwen en energie - index				
	2010	2015	2020	2030
BVO	1,00	0,97	0,96	0,91
Q Verw.	1,00	0,94	0,88	0,79
Q Tapw.	1,00	0,98	0,97	0,94
Q Elektr.	1,00	1,00	1,01	1,01

Ontwikkeling energie - absoluut in PJ				
	2010	2015	2020	2030
RV	3,5	3,2	3,0	2,5
TW	0,5	0,5	0,5	0,5
E	2,5	2,5	2,4	2,3

Figuur 21 — Ontwikkeling in gebouwvoorraad en energievraag in de hotel- en recreatiesector.

Gebouwen en energie - kantoor

BVO per gebouw [m2]	Verw. cumul. [PJ]
600	0,9
700	2,2
1 000	3,9
1 500	6,7
4 100	16,0

Ontwikkeling gebouwen en energie - index				
	2010	2015	2020	2030
BVO	1,00	1,05	1,12	1,14
Q Verw.	1,00	0,96	0,95	0,93
Q Tapw.	1,00	0,96	0,92	0,92
Q Elektr.	1,00	1,03	1,02	1,12

Ontwikkeling energie - absoluut in PJ				
	2010	2015	2020	2030
RV	16,0	16,0	17,0	16,8
TW	0,3	0,3	0,3	0,3
E	15,7	17,0	18,0	19,9

Figuur 23 — Ontwikkeling in gebouwvoorraad en energievraag in de kantoorsector.

Gebouwen en energie - onderwijs

BVO per gebouw [m2]	Verw. cumul. [PJ]				
2 400	0,7				
3 900	2,0				
6 100	4,3				
12 600	8,9				

Ontwikkeling gebouwen en energie - index				
	2010	2015	2020	2030
BVO	1,00	1,02	1,02	0,99
Q Verw.	1,00	1,00	1,00	0,96
Q Tapw.	1,00	0,94	0,91	0,92
Q Elektr.	1,00	0,97	0,91	0,94

Ontwikkeling energie - absoluut in PJ				
	2010	2015	2020	2030
RV	8,9	9,1	9,1	8,4
TW	0,9	0,8	0,8	0,8
E	4,9	4,9	4,6	4,6

Figuur 25 — Ontwikkeling in gebouwvoorraad en energievraag in de onderwijssector.

Gebouwen en energie - cure

BVO per gebouw [m2]	Verw. cumul. [PJ]				
600	0,4				
700	1,1				
1 300	2,1				
3 800	4,3				
7 000	12,1				

Ontwikkeling gebouwen en energie - index				
	2010	2015	2020	2030
BVO	1,00	1,27	1,50	1,96
Q Verw.	1,00	0,98	0,98	0,93
Q Tapw.	1,00	0,92	0,84	0,72
Q Elektr.	1,00	0,98	0,87	0,75

Ontwikkeling energie - absoluut in PJ				
	2010	2015	2020	2030
RV	12,1	15,1	17,7	22,0
TW	2,6	3,0	3,3	3,7
E	7,7	9,6	10,0	11,3

Figuur 27 — Ontwikkeling in gebouwvoorraad en energievraag in de cure sector.

Gebouwen en energie - care

BVO per gebouw	Verw. cumul.
[m2]	[PJ]
600	1,3
1 200	3,1
1 600	3,6
2 600	5,3
3 800	14,4

Ontwikkeling gebouwen en energie - index				
	2010	2015	2020	2030
BVO	1,00	0,99	1,04	1,51
Q Verw.	1,00	0,98	0,98	0,93
Q Tapw.	1,00	0,92	0,84	0,72
Q Elektr.	1,00	0,98	0,87	0,75

Ontwikkeling energie - absoluut in PJ				
	2010	2015	2020	2030
RV	14,4	14,0	14,7	20,3
TW	2,2	2,0	1,9	2,4
E	5,0	4,8	4,5	5,6

Figuur 29 — Ontwikkeling in gebouwvoorraad en energievraag in de care sector.

A2. TABELLEN UITGANGSPUNTEN VOOR POTENTIEELBEREKENING

Onderstaande tabellen geven de opwekefficiëncies van de vier technieken die in deze studie behandeld worden.

Voor de wkk-opties is het elektrische, thermische en tapwaterrendement gegeven. Voor de gasmotor-wkk is ook de grootte van belang voor het rendement. Kleine motoren hebben een lager elektrisch en een hoger thermisch rendement dan grote motoren.

WKK gasmotor

Technische gegevens - WKK gasmotor						
	HT afgifte					
	Pth [kW]	Pel [kW]	$\eta_{th} (rv)$	$\eta_{th} (tw)$	η_{el}	η_{tot}
2010	40,0	18,0	54,0%	51,3%	24,3%	78,3%
	150,0	96,2	47,7%	45,3%	30,6%	78,3%
	450,0	333,0	45,0%	42,7%	33,3%	78,3%
2010 - 2015	40,0	18,0	54,0%	51,3%	24,3%	78,3%
	150,0	96,2	47,7%	45,3%	30,6%	78,3%
	450,0	333,0	45,0%	42,7%	33,3%	78,3%
2015 - 2020	40,0	23,3	49,5%	47,0%	28,8%	78,3%
	150,0	111,0	45,0%	42,7%	33,3%	78,3%
	450,0	383,0	42,3%	40,2%	36,0%	78,3%
2020 - 2030	40,0	26,9	46,8%	44,5%	31,5%	78,3%
	150,0	127,7	42,3%	40,2%	36,0%	78,3%
	450,0	383,0	42,3%	40,2%	36,0%	78,3%

Technische gegevens - WKK gasmotor						
	LT afgifte					
	Pth [kW]	Pel [kW]	$\eta_{th} (rv)$	$\eta_{th} (tw)$	η_{el}	η_{tot}
2010	46,7	18,0	63,0%	59,8%	24,3%	87,3%
	178,3	96,2	56,7%	53,9%	30,6%	87,3%
	540,0	333,0	54,0%	51,3%	33,3%	87,3%
2010 - 2015	46,7	18,0	63,0%	59,8%	24,3%	87,3%
	178,3	96,2	56,7%	53,9%	30,6%	87,3%
	540,0	333,0	54,0%	51,3%	33,3%	87,3%
2015 - 2020	47,3	23,3	58,5%	55,6%	28,8%	87,3%
	180,0	111,0	54,0%	51,3%	33,3%	87,3%
	545,7	383,0	51,3%	48,7%	36,0%	87,3%
2020 - 2030	47,7	26,9	55,8%	53,0%	31,5%	87,3%
	181,9	127,7	51,3%	48,7%	36,0%	87,3%
	545,7	383,0	51,3%	48,7%	36,0%	87,3%

WKK brandstofcel

Technische gegevens - WKK brandstofcel								
	HT afgifte				LT afgifte			
	$\eta_{th} (rv)$	$\eta_{th} (tw)$	η_{el}	η_{tot}	$\eta_{th} (rv)$	$\eta_{th} (tw)$	η_{el}	η_{tot}
2010	48,6%	46,2%	27,0%	75,6%	57,6%	54,7%	27,0%	84,6%
2010 - 2015	42,7%	40,6%	33,7%	76,5%	51,7%	49,2%	33,7%	85,5%
2015 - 2020	32,4%	30,8%	45,0%	77,4%	41,4%	39,3%	45,0%	86,4%
2020 - 2030	24,3%	23,1%	54,0%	78,3%	33,3%	31,6%	54,0%	87,3%

Gaswarmtepomp gasmotor

Technische gegevens - GWP gasmotor			
	η_{th}		
	HT afgifte	LT afgifte	Tapw.
2010	115,0%	160,0%	95,0%
2010 - 2015	120,0%	200,0%	99,8%
2015 - 2020	140,0%	240,0%	104,5%
2020 - 2030	150,0%	275,0%	118,8%

Gaswarmtepomp absorptie

Technische gegevens - GWP absorptie			
	η_{th}		
	HT afgifte	LT afgifte	Tapw.
2010	135,0%	165,0%	104,5%
2010 - 2015	135,0%	165,0%	104,5%
2015 - 2020	150,0%	180,0%	114,0%
2020 - 2030	170,0%	200,0%	123,5%

A3. TABELLEN RESULTATEN POTENTIEELBEREKENING

Woningbouw, collectieve systemen								
jaar	Primaire energie [PJ]				CO2-uitstoot [Mton]			
	2010	2015	2020	2030	2010	2015	2020	2030
Verbruik / uitstoot absoluut								
finale vraag	11,8	11,3	10,8	9,8	n.v.t.			
ketel	17,6	17,1	15,8	14,5	0,99	0,99	0,95	0,87
wkk gasmotor	13,7	13,6	12,3	11,0	0,66	0,66	0,58	0,51
wkk brandstofcel	13,9	11,3	7,0	2,6	0,66	0,46	0,05	- 0,29
gwp gasmotor	15,7	14,8	13,0	11,3	0,90	0,87	0,81	0,71
gwp absorptie	14,8	14,4	12,9	11,4	0,85	0,85	0,81	0,71
Besparing t.o.v. ketel								
wkk gasmotor	3,9	3,5	3,5	3,5	0,33	0,32	0,38	0,36
wkk brandstofcel	3,7	5,7	8,8	11,9	0,33	0,52	0,91	1,16
gwp gasmotor	1,9	2,2	2,8	3,2	0,10	0,11	0,14	0,16
gwp absorptie	2,8	2,7	2,9	3,1	0,14	0,14	0,15	0,16

Figuur 30 — Primaire energie en CO2-uitstoot voor collectieve systemen in de woningbouw.

Hotel- en recreatiebranche								
jaar	Primaire energie [PJ]				CO2-uitstoot [Mton]			
	2010	2015	2020	2030	2010	2015	2020	2030
Verbruik / uitstoot absoluut								
finale vraag	6,6	6,1	5,9	5,3	n.v.t.			
ketel	11,0	10,4	9,7	8,7	0,64	0,63	0,62	0,55
wkk gasmotor	9,4	8,9	8,2	7,3	0,50	0,49	0,46	0,41
wkk brandstofcel	9,4	8,0	6,0	3,8	0,50	0,41	0,23	0,07
gwp gasmotor	10,1	9,4	8,4	7,4	0,60	0,58	0,56	0,48
gwp absorptie	9,7	9,2	8,4	7,4	0,58	0,57	0,55	0,49
Besparing t.o.v. ketel								
wkk gasmotor	1,6	1,5	1,5	1,4	0,14	0,14	0,16	0,14
wkk brandstofcel	1,6	2,4	3,7	4,9	0,14	0,22	0,39	0,48
gwp gasmotor	0,8	0,9	1,2	1,3	0,04	0,05	0,06	0,07
gwp absorptie	1,2	1,2	1,3	1,3	0,06	0,06	0,07	0,07

Figuur 31 — Primaire energie en CO2-uitstoot voor hotel- en recreatiebranche.

Kantoren								
jaar	Primaire energie [PJ]				CO2-uitstoot [Mton]			
	2010	2015	2020	2030	2010	2015	2020	2030
Verbruik / uitstoot absoluut								
finale vraag	32,0	33,3	35,2	37,0	n.v.t.			
ketel	57,7	60,8	61,6	64,6	3,46	3,79	4,06	4,23
wkk gasmotor	52,7	55,6	55,3	57,6	3,01	3,29	3,36	3,50
wkk brandstofcel	51,8	50,9	44,0	38,2	2,92	2,87	2,24	1,64
gwp gasmotor	54,5	56,7	55,0	56,5	3,30	3,59	3,73	3,82
gwp absorptie	52,9	55,8	55,1	56,9	3,22	3,54	3,73	3,84
Besparing t.o.v. ketel								
wkk gasmotor	5,0	5,2	6,4	7,0	0,45	0,51	0,70	0,73
wkk brandstofcel	5,9	9,9	17,6	26,4	0,54	0,92	1,83	2,59
gwp gasmotor	3,2	4,1	6,6	8,1	0,16	0,21	0,33	0,41
gwp absorptie	4,8	5,0	6,5	7,7	0,24	0,25	0,33	0,39

Figuur 32 — Primaire energie en CO2-uitstoot voor kantoren.

Hoger Onderwijs								
jaar	Primaire energie [PJ]				CO2-uitstoot [Mton]			
	2010	2015	2020	2030	2010	2015	2020	2030
Verbruik / uitstoot absoluut								
finale vraag	14,7	14,8	14,5	13,8	n.v.t.			
ketel	23,5	23,4	22,0	20,9	1,36	1,39	1,35	1,28
wkk gasmotor	19,0	18,9	17,2	16,0	0,97	0,97	0,84	0,77
wkk brandstofcel	19,7	17,2	11,6	6,1	1,02	0,81	0,27	- 0,19
gwp gasmotor	21,5	20,9	18,4	16,8	1,26	1,27	1,17	1,07
gwp absorptie	20,5	20,4	18,3	16,8	1,21	1,24	1,17	1,07
Besparing t.o.v. ketel								
wkk gasmotor	4,5	4,6	4,8	4,9	0,38	0,42	0,52	0,51
wkk brandstofcel	3,7	6,2	10,4	14,8	0,34	0,58	1,08	1,46
gwp gasmotor	2,0	2,5	3,6	4,1	0,10	0,13	0,18	0,21
gwp absorptie	3,0	3,1	3,7	4,1	0,15	0,15	0,19	0,21

Figuur 33 — Primaire energie en CO2-uitstoot voor instellingen voor hoger onderwijs.

Cure								
jaar	Primaire energie [PJ]				CO2-uitstoot [Mton]			
	2010	2015	2020	2030	2010	2015	2020	2030
Verbruik / uitstoot absoluut								
finale vraag	22,4	27,8	31,0	37,0	n.v.t.			
ketel	36,2	45,0	47,5	55,0	2,10	2,68	2,93	3,33
wkk gasmotor	29,2	36,2	36,9	41,3	1,50	1,89	1,83	1,96
wkk brandstofcel	30,2	33,0	24,8	14,0	1,56	1,59	0,62	- 0,64
gwp gasmotor	33,1	40,1	39,3	42,5	1,94	2,43	2,52	2,70
gwp absorptie	31,7	39,2	39,4	43,3	1,87	2,39	2,52	2,74
Besparing t.o.v. ketel								
wkk gasmotor	7,1	8,7	10,5	13,7	0,60	0,80	1,10	1,37
wkk brandstofcel	6,0	12,0	22,7	41,0	0,54	1,10	2,31	3,97
gwp gasmotor	3,1	4,9	8,1	12,5	0,16	0,25	0,41	0,63
gwp absorptie	4,5	5,8	8,1	11,7	0,23	0,29	0,41	0,59

Figuur 34 — Primaire energie en CO2-uitstoot voor ziekenhuizen.

Care								
jaar	Primaire energie [PJ]				CO2-uitstoot [Mton]			
	2010	2015	2020	2030	2010	2015	2020	2030
Verbruik / uitstoot absoluut								
finale vraag	21,6	20,8	21,1	28,3	n.v.t.			
ketel	31,5	30,2	29,3	38,4	1,76	1,73	1,72	2,22
wkk gasmotor	23,8	22,8	21,4	26,7	1,11	1,05	0,85	1,01
wkk brandstofcel	24,9	20,0	11,5	2,0	1,17	0,78	- 0,14	- 1,36
gwp gasmotor	28,0	26,3	23,6	28,0	1,59	1,53	1,43	1,69
gwp absorptie	26,4	25,3	23,2	28,3	1,51	1,48	1,41	1,70
Besparing t.o.v. ketel								
wkk gasmotor	7,7	7,4	7,9	11,7	0,66	0,69	0,87	1,20
wkk brandstofcel	6,6	10,2	17,8	36,4	0,59	0,95	1,86	3,58
gwp gasmotor	3,4	3,9	5,7	10,4	0,17	0,20	0,29	0,53
gwp absorptie	5,1	4,9	6,1	10,1	0,26	0,25	0,31	0,51

Figuur 35 — Primaire energie en CO2-uitstoot voor zorgsector.

jaar	Totaal Primaire energie [PJ]				CO2-uitstoot [Mton]			
	2010	2015	2020	2030	2010	2015	2020	2030
Verbruik / uitstoot absoluut								
finale vraag	109	114	119	131	n.v.t.			
ketel	177	187	186	202	10,3	11,2	11,6	12,5
wkk gasmotor	148	156	151	160	7,8	8,3	7,9	8,2
wkk brandstofcel	150	140	105	67	7,8	6,9	3,3	- 0,8
gwp gasmotor	163	168	158	163	9,6	10,3	10,2	10,5
gwp absorptie	156	164	157	164	9,2	10,1	10,2	10,6
Besparing t.o.v. ketel								
wkk gasmotor	30	31	35	42	2,5	2,9	3,7	4,3
wkk brandstofcel	28	46	81	135	2,5	4,3	8,4	13,2
gwp gasmotor	14	19	28	40	0,7	0,9	1,4	2,0
gwp absorptie	21	23	29	38	1,1	1,1	1,4	1,9

Figuur 36 — Totale primaire energie en CO2-uitstoot voor alle besproken sectoren.

jaar	Totaal - gevoeligheidsanalyse Primaire energie [PJ]				CO2-uitstoot [Mton]			
	2010	2015	2020	2030	2010	2015	2020	2030
Verbruik / uitstoot absoluut								
finale vraag	109	114	119	131	n.v.t.			
ketel	162	171	182	194	8,0	8,5	8,7	9,4
wkk gasmotor	145	152	151	159	7,3	7,7	7,6	8,0
wkk brandstofcel	147	142	104	65	7,4	7,2	5,8	4,1
gwp gasmotor	150	155	157	161	7,4	7,7	7,4	7,8
gwp absorptie	143	151	157	163	7,1	7,5	7,4	7,8
Besparing t.o.v. ketel								
wkk gasmotor	17,5	18,7	31,2	35,7	0,75	0,81	1,11	1,41
wkk brandstofcel	14,8	29,6	77,6	128,8	0,61	1,29	2,92	5,36
gwp gasmotor	11,8	15,8	24,7	33,1	0,60	0,80	1,25	1,67
gwp absorptie	18,8	19,9	25,2	31,5	0,95	1,01	1,27	1,59

Figuur 37 — Totale primaire energie en CO2-uitstoot voor alle besproken sectoren – gevoeligheidsanalyse.

jaar	WKK - gasmotor Referentiecasse				Gevoeligheidsanalyse			
	2010	2015	2020	2030	2010	2015	2020	2030
Energiebesparing primair [PJ]	29,7	30,9	34,6	42,2	17,5	18,7	31,2	35,7
CO2-besparing [Mton]	2,5	2,9	3,7	4,3	0,8	0,8	1,1	1,4

Figuur 38 — Besparingspotentieel – detailweergave voor gasmotor-wkk.

jaar	WKK - brandstofcel Referentiecasse				Gevoeligheidsanalyse			
	2010	2015	2020	2030	2010	2015	2020	2030
Energiebesparing primair [PJ]	27,5	46,4	81,0	135,3	14,8	29,6	77,6	128,8
CO2-besparing [Mton]	2,5	4,3	8,4	13,2	0,6	1,3	2,9	5,4

Figuur 39 — Besparingspotentieel – detailweergave voor brandstofcel-wkk.

GWP - gasmotor								
jaar	Referentiecasse				Gevoeligheidsanalyse			
	2010	2015	2020	2030	2010	2015	2020	2030
Energiebesparing primair [PJ]	14,5	18,5	28,1	39,6	11,8	15,8	24,7	33,1
CO2-besparing [Mton]	0,7	0,9	1,4	2,0	0,6	0,8	1,3	1,7

Figuur 40 — Besparingspotentieel – detailweergave voor gasmotorwarmtepomp.

GWP - absorptie								
jaar	Referentiecasse				Gevoeligheidsanalyse			
	2010	2015	2020	2030	2010	2015	2020	2030
Energiebesparing primair [PJ]	21,4	22,6	28,6	38,0	18,8	19,9	25,2	31,5
CO2-besparing [Mton]	1,1	1,1	1,4	1,9	0,9	1,0	1,3	1,6

Figuur 41 — Besparingspotentieel – detailweergave voor gasabsorptiewarmtepomp.