

50060657-KPS/SEN 02-3035

**Kansen voor lage-temperatuurwarmte in
combinatie met warmtepompen en onder-
grondse energieopslag bij (bijna) gesloten
kassen**

**Deel 1 en 2: haalbaarheid warmtepompgebaseerd
koel-/ontvochtigings- en verwarmingssysteem
met warmteopslag in aquifers**

Arnhem, 11 november 2002

Auteur J.A.F. de Ruijter

In opdracht van Novem en Productschap Tuinbouw

auteur : J.A.F. de Ruijter	02-11-11	beoordeeld : R.J.F. van Gerwen	02-11-12
B 149 blz.	9 bijl.	goedgekeurd : K.J. Braber	02-11-13

Dit rapport is mede mogelijk gemaakt door subsidieverlening door het Productschap Tuinbouw in het kader van de algemene subsidieverordening van het productschap (PT-projectnummer 10711) en door Novem op grond van het Besluit Subsidies Energie-programma's, programma-onderdeel Energiebesparing in agrarische bedrijven (Novem projectnummer 335519/0210).



© KEMA Nederland B.V., Arnhem, Nederland. Alle rechten voorbehouden.

Dit document bevat vertrouwelijke informatie. Overdracht van de informatie aan derden zonder schriftelijke toestemming van of namens KEMA Nederland B.V. is verboden. Hetzelfde geldt voor het kopiëren van het document of een gedeelte daarvan.

KEMA Nederland B.V. en/of de met haar gelieerde maatschappijen zijn niet aansprakelijk voor enige directe, indirecte, bijkomstige of gevolgschade ontstaan door of bij het gebruik van de informatie of gegevens uit dit document, of door de onmogelijkheid die informatie of gegevens te gebruiken.

INHOUD

	blz.
MANAGEMENTSAMENVATTING	5
1 Inleiding	15
1.1 Achtergrond	15
1.2 Doelstelling	16
1.3 Aanpak / leeswijzer	18
2 Analyse verwarmings-, koel- en ontvochtigingsbehoefte van een (bijna) gesloten kas	22
2.1 Energiebeschouwing gesloten kas / systeembeschrijving	22
2.2 Referentiekas, -teelt, en teeltcondities	26
2.3 Analyse energieverbruik referentiekas en (bijna) gesloten kas	28
2.3.1 Berekeningsmethodiek warmte, koude en CO ₂ -behoefte van kassen	28
2.3.2 Warmte-, CO ₂ - en elektriciteitsvraag van referentiekas	32
2.3.3 Warmte-, koude- en CO ₂ -vraag van geheel gesloten kas	39
2.3.4 Warmte-, koude- en CO ₂ -vraag bijna gesloten kas	43
2.3.5 Vergelijking utilitybehoefte referentie en (bijna) gesloten kas	46
3 Energievoorzieningsconcept (bijna) gesloten kas	48
3.1 uitgangspunten / overwegingen energievoorzieningsconcept	48
3.2 Energieproductiesysteem: componentkeuze en componentdimensionering	49
3.2.1 Varianten warmte- en koudeproductie: warmteproductie	49
3.2.2 Varianten warmte- en koudeproductie: koudeproductie	50
3.3 Warmte- en koude-afgiftesysteem	54
3.4 Invulling CO ₂ -vraag	57
3.5 Warmte-/koude-opslag	57
3.6 overzicht energievoorzieningsconcept	58
3.7 Gas- en elektriciteitsverbruik en inzetstrategie	62
4 Energiebesparingspotentieel concepten	69
4.1 Jaarrondverbruik gas en elektriciteit van het referentiesysteem	69
4.2 Jaarrondverbruik gas en elektriciteit van variant A ("EWP-only")	71
4.3 Jaarrondverbruik gas en elektriciteit van variant B (EWP+GM)	76
4.4 Jaarrondverbruik gas en elektriciteit van variant C (300 W/m ² koude)	80
4.5 Jaarrondverbruik gas en elektriciteit van variant D (200 W/m ² koude)	84
4.6 Besparing op primair energieverbruik en CO ₂ -emissiereductie	88

5	Bedrijfseconomische analyse (rentabiliteit)	92
5.1	Bedrijfseconomische uitgangspunten	92
5.2	Investeringskosten	95
5.3	Kasstromen	100
5.4	Rentabiliteit en investeringsbeoordeling	106
5.5	Gevoeligheidsanalyse rentabiliteitscijfers	109
6	Conclusies en aanbevelingen	120
6.1	Conclusies	120
6.2	Aanbevelingen	123
7	Literatuur	126
Bijlage A	Klimaatreferentiejaar	127
Bijlage B	Berekeningen referentiekas/-teelt met KASPRO	130
Bijlage C	Schadedrempels voor tomaat	132
Bijlage D	Details berekeningen gesloten en bijna gesloten kassen	133
Bijlage E	Vergelijking warmte- en koudevraag rekenprogramma's	136
Bijlage F	Inzetstrategie	141
Bijlage G	Specificaties componenten	143
Bijlage H	Berekening NCW, IRR en terugverdientijd	144
Bijlage I	Inzetberekeningen met FuEiCalc	145

MANAGEMENTSAMENVATTING

Achtergrond

In 1997 is tussen de overheid en de tuinbouwsector het ‘Convenant Glastuinbouw en Milieu’ gesloten (“GlaMi”). Hierin is ten aanzien van het aspect “energie” afgesproken dat in 2010 de energie-efficiëntie van de sector (gedefinieerd als primair energieverbruik per eenheid product) met 65% moet zijn verbeterd ten opzichte van 1980, en verder dat duurzame energie een aandeel van minstens 4% in het energieverbruik dient te hebben. In het per 1 april 2002 van kracht geworden Besluit Glastuinbouw zijn de sectordoelstellingen voor energie vertaald naar taakstellingen voor individuele bedrijven. Afhankelijk van de teelt en teeltwijze is er een plafond in het toegestane verbruik van energie vastgesteld. De gewasspecifieke normen worden tot 2010 jaarlijks aangescherpt. De normen zijn in een aantal gevallen ambitieus.

Om aan de steeds strenger wordende normen te kunnen blijven voldoen, zullen in veel gevallen maatregelen nodig zijn. In de laatste tien jaar zijn al op grote schaal besparingsopties toegepast zoals rookgascondensators, (beweegbare) energieschermen, gevelisolatie, warmteopslag in buffers en geavanceerdere regeltechniek (waaraan recentelijk ook “temperatuurintegratie” is toegevoegd). Ook zijn er veel warmtekrachtinstallaties (WK) geïnstalleerd. De rentabiliteit van WK-installaties staat de laatste tijd, mede als gevolg van de liberalisering van de elektriciteits- en gasmarkt, onder druk.

Gesloten of bijna-gesloten kas

Voor een verdere reductie van het primaire energieverbruik zijn nieuwe energievoorzieningsconcepten nodig. Een in potentie aantrekkelijk concept is de gesloten of bijna gesloten kas, waarbij overtollige (zonne)warmte op warme dagen niet via de ramen ‘weggelucht’ wordt, maar ‘geogst’ wordt middels een kaskoel- en ontvochtigingssysteem. De geogste laagtemperatuurwarmte kan in een ondergrondse watervoerende laag gedurende langere tijd worden opgeslagen en in het koude seizoen weer worden gebruikt als bronwarmte voor een warmtepomp waarmee de kas wordt verwarmd. Warmte-overschotten in het ene seizoen worden zo gebruikt in seizoenen met een tekort. Op deze wijze is in principe een flinke besparing op het energieverbruik mogelijk. Naast de potentiële *energiebesparing* heeft de gesloten kas het voordeel dat er op warme dagen veel minder CO₂ weglekt, waardoor er minder CO₂ gedoseerd hoeft te worden en een hogere CO₂-concentratie kan worden gehandhaafd in de kas. Daardoor kan er een *grotere oogst* worden gerealiseerd. Een ander voordeel is de potentiële *besparing op het waterverbruik*, omdat een groot deel van het door de planten verdampte water in de ontvochtiger wordt teruggewonnen.

Verder kunnen insecten voor biologische bestrijding eenvoudiger worden binnengehouden en is er minder bezoek van ongewenste insecten van buiten.

Om de potentiële voordelen te realiseren, moeten een aantal complexe problemen worden opgelost. In het bijzonder het op gelijkmatige wijze onttrekken van koude en vocht aan de kaslucht is geen sinecure. Een dergelijk energieconcept vraagt omvangrijke installaties die in het klassieke ketelhuis niet voorkomen, waaronder een koel- en ontvochtigingsinstallatie, een koudetransport- en verdeelsysteem, een ondergronds warmteopslagsysteem en een koelmachine/warmtepomp. De extra installaties vragen (forse) extra investeringen en hebben een niet te verwaarlozen eigen energieverbruik.

Doelstelling

In deze studie is de aantrekkelijkheid van de gesloten of bijna gesloten kas, met warmtepompen en ondergrondse energieopslag onderzocht. Hierbij is met name gefocust op de volgende twee vragen:

- A. Wat is het energetische perspectief: welke reductie op het primaire energieverbruik is haalbaar (en welke reductie van de CO₂-uitstoot)?
- B. Wat is het bedrijfseconomische perspectief?

Aanpak

De twee vragen vallen uiteen in een aantal deelvragen. Wat betreft het energetisch perspectief zijn de belangrijkste:

- A.1 Hoeveel energie kan er op jaarbasis worden geoogst?
- A.2 Hoeveel hulpenergie is er nodig voor de aandrijving van de extra installaties?
- A.3 Welk deel van de gewonnen energie kan worden hergebruikt?
- A.4 Hoeveel elektriciteit en/of gas is er uiteindelijk op jaarbasis nog nodig?
- A.5 Hoe groot is het resulterende jaarlijkse primaire energieverbruik?
- A.6 Hoe groot zijn de pieken in het verbruik van elektriciteit en gas, en hoe is de verdeling van het elektriciteitsverbruik over plateau- en daluren. Deze aspecten zijn nodig voor de bedrijfseconomische evaluatie (vraag B)

Wat betreft het bedrijfseconomische perspectief zijn de belangrijkste vragen:

- B.1 Hoe groot zijn de benodigde (meer)investeringen?
- B.2 Hoe groot zijn de extra exploitatiekosten (onderhoud, ureum, eventueel CO₂-inkoop)?
- B.3 Wat zijn de resulterende jaarenergiekosten van het energievoorzieningsconcept (verwachte gas- en elektriciteitsrekening in een geliberaliseerde gas- en elektriciteitsmarkt)
- B.4 Welke meeropbrengst als gevolg van meer fysieke productie mag er worden verwacht?
- B.5 Hoe groot zijn de rentabiliteitsbeoordelingskentallen, zoals terugverdientijd (TVT), netto contante waarde (NCW) en interne rendementsgraad (IRR)?
- B.6 Hoe gevoelig zijn deze kentallen voor onzekerheden in de belangrijkste invloedsfactoren (dit geeft inzicht in de financiële risico's van een (bijna-)gesloten kas)?

Om deze vragen te kunnen beantwoorden, was het nodig om het voor een gesloten kas benodigde energievoorzieningssysteem met de functies koelen, ontvochtigen, verwarmen (KOV) en CO₂-leveren nader te concretiseren, met name ten aanzien van de ontvochtigingstechniek, de verdeling van koude (en warmte) in de kas, het type koelmachine/warmtepomp, de aandrijving ervan en dergelijke. Ook dienden de verschillende componenten in het resulterende systeemconcept qua capaciteit en vermogen te worden gedimensioneerd. Dit is gebeurd aan de hand van een *vraaganalyse van de 'utilities' warmte, koude, elektriciteit en CO₂*. De vraag naar deze utilities zal variëren van seizoen tot seizoen, maar ook van uur tot uur fluctueren over een dag. De utilityvraag hangt onder meer af van:

- de actuele weerscondities
- de gewenste waarden van temperatuur en luchtvochtigheid (setpoints klimaatcomputer)
- de grootte van het gewas (leaf area index)
- de wijze van temperatuur en vochtbeïnvloeding (bij traditionele kas: luchtramen, bij gesloten kas: koel- en ontvochtigingssysteem).

Al vrij vroeg in het project is de keuze gemaakt voor ontvochtiging door uitkoeling. Het belangrijkste argument hiervoor was het feit dat koeling en ontvochtiging relatief eenvoudig in één systeem kunnen worden gecombineerd, waardoor op kapitaalslasten kan worden bespaard. Verder kunnen de functies verwarmen en koelen worden gecombineerd door te kiezen voor een warmtepomp als centrale component in de energievoorziening, daar dit apparaat zowel kan verwarmen als koelen.

Aan de hand van een fysisch model van de energiehuishouding van de kas en een representatieve weerdataset (klimaatreferentiejaar) zijn voor de geheel gesloten kas, de bijna gesloten kas met beperkt koelvermogen (van 300 resp. 200 W/m²) en de traditionele referentiekas - elk met een tomatenteelt met dezelfde klimaatinstellingen - de jaarvraagpatronen bepaald voor warmte, koude en CO₂. Hiervan zijn zogenaamde *jaarbeastingduurkrommen* (JBDK's) opgesteld, waarin tot uitdrukking komt hoeveel uur in een jaar een bepaalde vermogensvraag of CO₂-massastroom voorkomt. Ook de piekvragen komen hierin tot uiting. Tevens zijn JBDK's gemaakt van de ontvochtigungsstromen, de temperatuur, de luchtvochtigheid en de CO₂-concentratie over een jaar. Deze geven een goede indicatie in hoeverre aan de gewenste setpoints van temperatuur en luchtvochtigheid door het betreffende kastype met de beschikbare koel-/ontvochtigingscapaciteit kan worden voldaan.

Systemvarianten

Met name in de koudevraag-JBDK bleek een zeer grote, kortstondige piek voor te komen (circa 600 W/m²). Invulling hiervan door een koelmachine/warmtepomp, al dan niet aangevuld met koudelevering vanuit de koude bron van een aquifergebaseerd koude-/warmteopslagsysteem, leidt al op voorhand tot zeer hoge installatiekosten.

De koudepiek voor de genoemde installaties kan worden gereduceerd door toevoeging van een 'dag/nachtbuffer' voor koude, die 's nachts wordt gevuld (bijvoorbeeld vanuit de aquifer) en overdag wordt geleegd. Op analoge wijze kan een dag/nachtbuffer voor warmte (overdag laden 's nachts ontladen) ondersteuning leveren bij de invulling van de warmtepiek (circa 200 W/m²) en tevens bij het bufferen van tijdelijk overtollige warmte (bij bijvoorbeeld koelen met de koelmachine of CO₂-produceren met een gasmotor) en bij het reduceren van het aantal schakelmomenten van de warmteproductiemiddelen. Een verdere besparing op de benodigde investeringen kan worden verkregen door concessies te doen aan het uitgangspunt dat de kas geheel gesloten moet blijven. Met 300 respectievelijk 200 W/m² kan een bijna gesloten kas worden gerealiseerd waarbij de luchtramen nog circa 200 respectievelijk 400 uur open moeten. Door de kleinere koelcapaciteit kunnen de benodigde installaties kleiner worden gedimensioneerd, wat een besparing op de kapitaalslasten betekent. De koelcapaciteit komt hiermee veel beter in balans met de benodigde verwarmingscapaciteit, en omdat voor koelen en verwarmen deels dezelfde installaties worden gebruikt - de koelmachine in de zomer wordt gebruikt als warmtepomp in de winter - wordt de beschikbare capaciteit over het hele jaar beter benut.

Resultierend zijn er 4 *stysteemvarianten* onderzocht. Ze beschikken allemaal over een elektrische warmtepomp (EWP), een aquifergebaseerd warmte- en koudeopslagsysteem in de bodem (ATES = aquifer thermal energy storage), dag/nachtbuffers voor koude en warmte, luchtbehandelingskasten tegen de kasgevels en een luchttransport- en distributiesysteem in de kas. De varianten verschillen echter in de dimensionering, en eventueel ook in de aandrijving van de warmtepomp, en de beschikbare koelcapaciteit. De 4 varianten zijn in de tabel hieronder op hoofdlijnen gekarakteriseerd. Naast de varianten is, als referentiesysteem, een traditioneel geventileerde kas onderzocht.

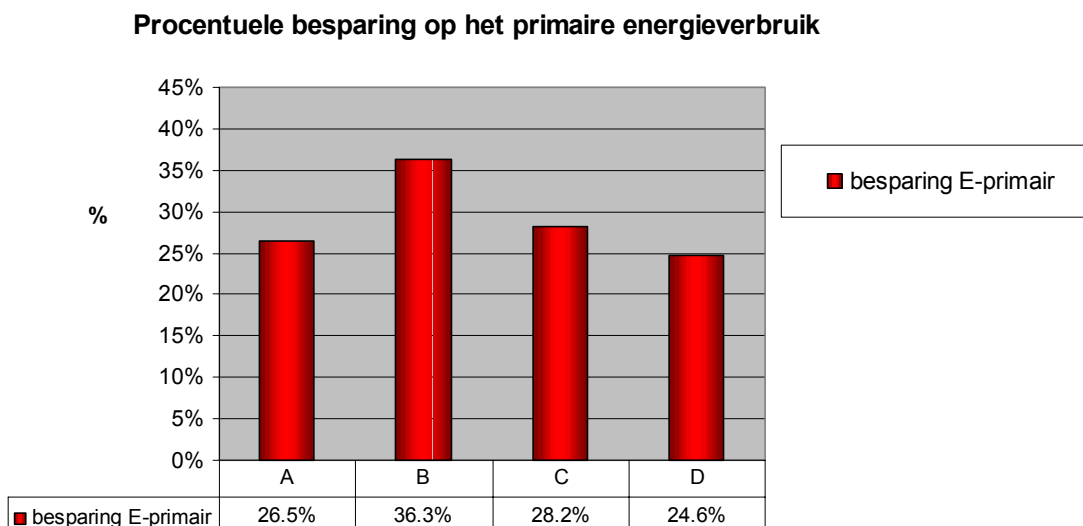
Tabel 0.1 Overzicht onderzochte systeemvarianten. De rode cijfers zijn verwarmingsvermogens, de blauwe, cursieve cijfers koelvermogens, de groene, vetgedrukte cijfers elektrische vermogens

Variant	type kas	EWP	gasmotor (GM)	ATES	ketel	Opmerking
		W _{th} /m ²	W _{th} /m ² W _e /m ²	W _{th} /m ²	W _{th} /m ²	
referentie	traditioneel geventileerd	geen	geen	geen	210	
A	geheel gesloten	205 / 160	geen	170	geen	elektric. EWP ingekocht
B	geheel gesloten	160 / 125	60 / 48	190	geen	elektric. EWP van GM
C	bijna gesloten (300 W/m ²)*	103 / 80	38 / 30	120	87	elektric. EWP van GM
D	bijna gesloten (200 W/m ²)*	77 / 60	30 / 24	80	120	elektric. EWP van GM

*) max. koudeproductie

Energieverbruik

Om de eerdergenoemde energiegerelateerde vragen A.1 tot en A.6 te kunnen beantwoorden, was het nodig een *inzetstrategie* voor de verschillende productiemiddelen te definiëren, die bepaalt wanneer welk productiemiddel op welk belastingsniveau moet worden ingezet. Vanwege het relatief grote aantal productiemiddelen en de (gedeeltelijke) gelijktijdigheid van de verschillende utilityvragen is de resulterende *jaarrond-inzetberekening* zeer complex. De berekeningen zijn uitgevoerd met het door KEMA ontwikkelde programma FuEiCalc. Het resultaat zijn inzetpatronen, elektriciteits- en/of gasverbruikspatronen van de verschillende productiemiddelen, alsmede warmte-, koudestromen en CO₂-stromen die door de middelen 'geproduceerd' worden, inclusief de stromen van en naar de opslagsystemen en naar de kas. Van deze stromen en de gas- en elektriciteitsverbruiken zijn jaarbelastingduurkrommen gemaakt, die op compacte wijze de inzet van de middelen, de energieverbruiken en de inkoop van gas- en elektriciteit over een jaar representeren. Uit de JBDK's worden verder kenmerken zoals piekverbruiken van gas- en elektriciteit bepaald, die bij de berekening van de energiekosten nodig zijn, en verder ook bedrijfstijden van de productiemiddelen, die bij de bepaling van de onderhoudskosten worden gebruikt (zie hoofdstuk 4). Op basis van een aangenomen gemiddeld centralerendement van het Nederlandse elektriciteitspark (inclusief transport- en distributieverliezen), is ook de *verbruikte primaire energie* van alle varianten bepaald. Alle vier de varianten leveren ten opzichte van het referentiesysteem een substantiële besparing op het primaire energieverbruik op. De besparingen zijn grafisch weergegeven in figuur 0.1.



Figuur 0.1 Procentuele besparing op het primaire energieverbruik van de verschillende energiesysteemvarianten voor gesloten (A en B) of bijna gesloten kassen (C en D), ten opzichte van het referentiesysteem: normaal geventileerde kas met ketel voor verwarming en CO₂-dosering.

Economie

Om de bedrijfseconomische aantrekkelijkheid te bepalen zijn de benodigde investeringen geraamd (die van het ATES door een hierin gespecialiseerd bedrijf; voor de warmtepompen, luchtbehandelingskasten en warmtetransport- en distributiesystemen zijn budgetoffertes bij leveranciers aangevraagd). Verder zijn de verwachte gas- en elektriciteitsrekening bepaald uitgaande van een geliberaliseerde energiemarkt. De gasrekening is gebaseerd op het Prijs-systeem Gasverkoop van Gasunie Trade & Supply met een (olieprijzafhankelijke) commodi-typrijs en dienstentarieven voor capaciteit, transport- en distributie. Voor de elektriciteitsrekening zijn volumekosten (kWh) voor plateau- en daluren geraamd en transport- en distributie-kosten op basis van de optredende maximum elektriciteitsinkoopiek en de verwachte maandpieken. Verder zijn de onderhoudskosten en de overige bedrijfsvoeringskosten (o.a. ureum- en CO₂-inkoop) geraamd.

Op basis van de verwachte (door PPO berekende) fysieke meerproductie als gevolg van de gemiddeld hogere CO₂-concentratie in de kas en een schatting van de gemiddelde verkoopprijs van het gewas, is de financiële meeropbrengst van het gewas geraamd.

Aan de hand van een kasstroomanalyse over de projectevaluatieperiode zijn vervolgens de investeringsbeoordelingskentallen terugverdientijd (TVT), netto contante waarde (NCW) en interne rendementsgraad (IRR) bepaald. Omdat een groot deel van de investeringen in aanmerking komt voor de fiscale instrumenten EIA (energieinvesteringaftrek) en VAMIL (Regeling willekeurige afschrijving milieu-investeringen) zijn de rentabiliteitscijfers ook bepaald voor de situatie waarin van deze instrumenten gebruikt wordt gemaakt. De resultaten van deze analyse zijn vermeld in onderstaande tabel.

Tabel 0.2 Rentabiliteitskentallen van de onderzochte systeemvarianten

Systeemvariant	Rentabiliteitskentallen	evaluatie- periode jaar	fiscale / financiële instrumenten	TVT jaar	NCW EUR/m ²	IRR %
A: gesloten kas; elektrische warmtepomp (EWP) met elektriciteitsinkoop		15	EIA+VAMIL	-	-151.2	-
B: gesloten kas: EWP + GM (GM levert elektriciteit voor EWP en fans)		15	EIA+VAMIL	49	-128.2	-13.6
C: bijna gesloten kas; max. koude 300W/m ² ; EWP+GM		15	EIA+VAMIL	33	-71.9	-9.8
D: bijna gesloten kas; max. koude 200 W/m ² ; EWP+GM		15	EIA+VAMIL	39	-67.7	-11.6

De bovengenoemde cijfers geven duidelijk aan dat - zelfs met EIA en VAMIL - geen van de varianten economisch rendabel is. De terugverdientijd is (te) lang. Variant A verdient zich in het geheel niet terug. De netto contante waarde - bepaald bij een verdisconteringsrente van 6% - is in alle gevallen (fors) negatief. Ook de IRR is voor alle varianten negatief.

(Belangrijkste) conclusies

- Een gesloten of bijna-gesloten kas op basis van een (afdelingsgewijs) centraal luchtbehandelingssysteem, warmtepomp en ondergrondse energieopslag is technisch en teelt-technisch realiseerbaar en levert bij een goed ontwerp een *forse besparing op het primaire energieverbruik* op (24 à 36%). De concepten leiden tot een jaarlijkse reductie in de CO₂-uitstoot van circa 300 à 420 ton per ha. Ook is een productieverhoging (in kg) haalbaar van circa 7-11%. De hoogste waarden gelden voor variant B, de laagste voor variant D).
- De *energie-efficiëntie* (energieverbruik per eenheid product) neemt met circa 30 - 43% toe (de hoogste waarde geldt voor variant B, de laagste voor variant D).
- Bij alle systeemvarianten treedt op jaarbasis een *overschot aan warmte in de aquifer* op (of anders gezegd, is er een koudetekort). Dit overschot is het kleinst bij variant A (met alleen een elektrische warmtepomp) - circa 34 % van geogste warmte - en circa 56 à 63% bij de varianten met een extra gasmotor. Het warmteoverschot zou bijvoorbeeld aan een belendend tuinbouwbedrijf kunnen worden geleverd (daar is in deze studie van uitgegaan). Indien dit niet gebeurt, zal in de winter op een andere wijze additioneel koude moeten worden geproduceerd (bijvoorbeeld koudewinning uit de buitenlucht), om het opslagsysteem op jaarbasis thermisch neutraal te bedienen. Vanuit energetisch (en financieel) oogpunt wordt dit echter niet aanbevolen.
- In de ontvochtigingsinstallatie wordt circa 0.31 à 0.36 m³ water per m² kas (optredend bij variant D respectievelijk B) teruggewonnen. Dit is circa 35 à 40 % van de gietwaterbehoefte. Dit is gedemineraliseerd water, waarvoor in principe 'hoogwaardige' toepassingen zijn te vinden (al dan niet op het eigen bedrijf). Met eventuele extra financiële opbrengsten (uit verkoop) hiervan is nog geen rekening gehouden.
- *Bedrijfseconomisch* gezien zijn de onderzochte energievoorzieningsconcepten - ook wanneer gebruik gemaakt wordt van de fiscale instrumenten EIA en VAMIL – (nog) *niet aantrekkelijk*. De slechte rentabiliteit wordt met name veroorzaakt door de in verhouding tot de jaarlijkse netto inkomsten (besparing op energiekosten en meeropbrengst van het gewas) benodigde zeer hoge investeringen. Met name de investeringen in het luchttransport- en distributiesysteem en de luchtbehandelingskasten en in iets minder mate in het ondergrondse warmte/koudeopslagsysteem zijn hieraan debet. Verder liggen de onderhoudskosten in dezelfde orde van grootte als de verwachte besparing op de energierekening. Daardoor resteert alleen (een deel van) de extra gewasopbrengst als positieve kasstroom die de investering moet terugverdienen.

- De netto-contante-waarde van de varianten is het meest gevoelig voor onzekerheden in de investering in het warmte-afgiftesysteem (luchttransport en -distributie) gevolgd door die in de procentuele productieverhoging en de gemiddelde verkoopprijs van het gewas. De invloedsfactor “standaardolieprijs” (P-factor), die direct invloed heeft op de commodity-gasprijs en indirect op de kWh-prijs van elektriciteit, komt qua gevoeligheid pas op de zesde, zevende of achtste plaats. Zelfs bij een 100% hogere olieprijs (en 100% hogere commodity-prijs voor een kuub aardgas), blijft de netto contante waarde van alle varianten (fors) negatief. Dit betekent dat niet mag worden verwacht dat stijgende olie- en gasprijzen het concept vanzelf wel aantrekkelijk maken.

Aanbevelingen

- Verder onderzoek zou zich vooral moeten richten op goedkope(re) opties voor koelen- en ontvochtigen. Hierbij blijft echter als randvoorwaarde gelden, dat de gekoelde en ontvochtigde lucht egaal in de kas moeten kunnen worden verdeeld en dat de inpassing geen of weinig licht onderschept.
- Het perspectief van de (bijna-)gesloten kas lijkt significant te kunnen worden verbeterd door clustering met een nabijgelegen glastuinbouwbedrijf dat in het koude seizoen wél een behoorlijke warmtevraag heeft, maar dat in het warme seizoen slechts een geringe ontvochtigings- (en koel-)vraag heeft. Dit bedrijf zou dan zijn warmtebehoefte kunnen dekken met een warmtepomp, waarbij de benodigde lage-temperatuur bronwarmte geleverd wordt uit het overschot, dat in de aquifer op het bedrijf met de (bijna-)gesloten kas voorhanden is. Ook zou levering van (overschot) CO₂, dat optreedt bij de varianten met een WK, en eventueel van (gedemineraliseerd) water aan het buurbedrijf kunnen plaatsvinden. Hiermee worden de beschikbare warmte-, CO₂- en wateroverschotten van het (bijna-)geslotenkasbedrijf beter benut, hetgeen goed is voor het milieu en de energieprestatie van het cluster. Tevens wordt het probleem van het koudetekort in de aquifer aangepakt. Er wordt voorgesteld deze “symbiotische” clustering van gesloten en niet-gesloten kassen in een projectvervolg nader te onderzoeken en de technische, energetische, bedrijfseconomische en juridische consequenties ervan nader in kaart te brengen.
- Het warmteoverschot in de aquifer kan (deels) ook worden aangewend om een hogere kastemperatuur in het koudeseizoen te realiseren. Daardoor ontstaat er een relatief goedkope stuurmogelijkheid om het oogstmoment te sturen naar de periode waarin de hoogste prijzen worden verwacht (en dus hogere opbrengsten). Het effect hiervan op de rentabiliteit zou in een nader onderzoek gekwantificeerd moeten worden.

Lijst met gebruikte afkortingen

- ATES = aquifer thermal energy storage (energieopslag systeem in watervoerende zand-
laag)
- COP = coefficient of performance (= nuttig geleverde warmte gedeeld door toegevoerde
hoogwaardige aandrijfenergie)
- EWP = elektrische warmtepomp
- EIA = energieinvesteringsaftrek
- GM = gasmotor
- JBDK = jaarbelastingduurkromme
- KM = koelmachine
- KO = koel- en ontvochtigingsapparaat (of -installatie)
- KOV = koel-, ontvochtigings- en verwarmingsapparaat (of -installatie)
- LBK = luchtbehandelingskast
- RGR = rookgasreiniger
- VAMIL = vrije afschrijving milieu-investeringen (Regeling willekeurige afschrijving van
milieu-investeringen)
- VRJ = verkort referentie jaar (NEN 5060)
- WK = warmtekrachtinstallatie
- WP = warmtepomp

Opmerking: in dit rapport is de internationaal gangbare cijfernotatie gebruikt met een decimale punt in plaats van de in Nederland gebruikelijke komma. Bij grote getallen zijn voor de leesbaarheid duizendtallen, waar dat qua automatische getalopmaak mogelijk was, middels een spatie gescheiden van honderdtallen, bijvoorbeeld “500 000” in plaats van “500000”.

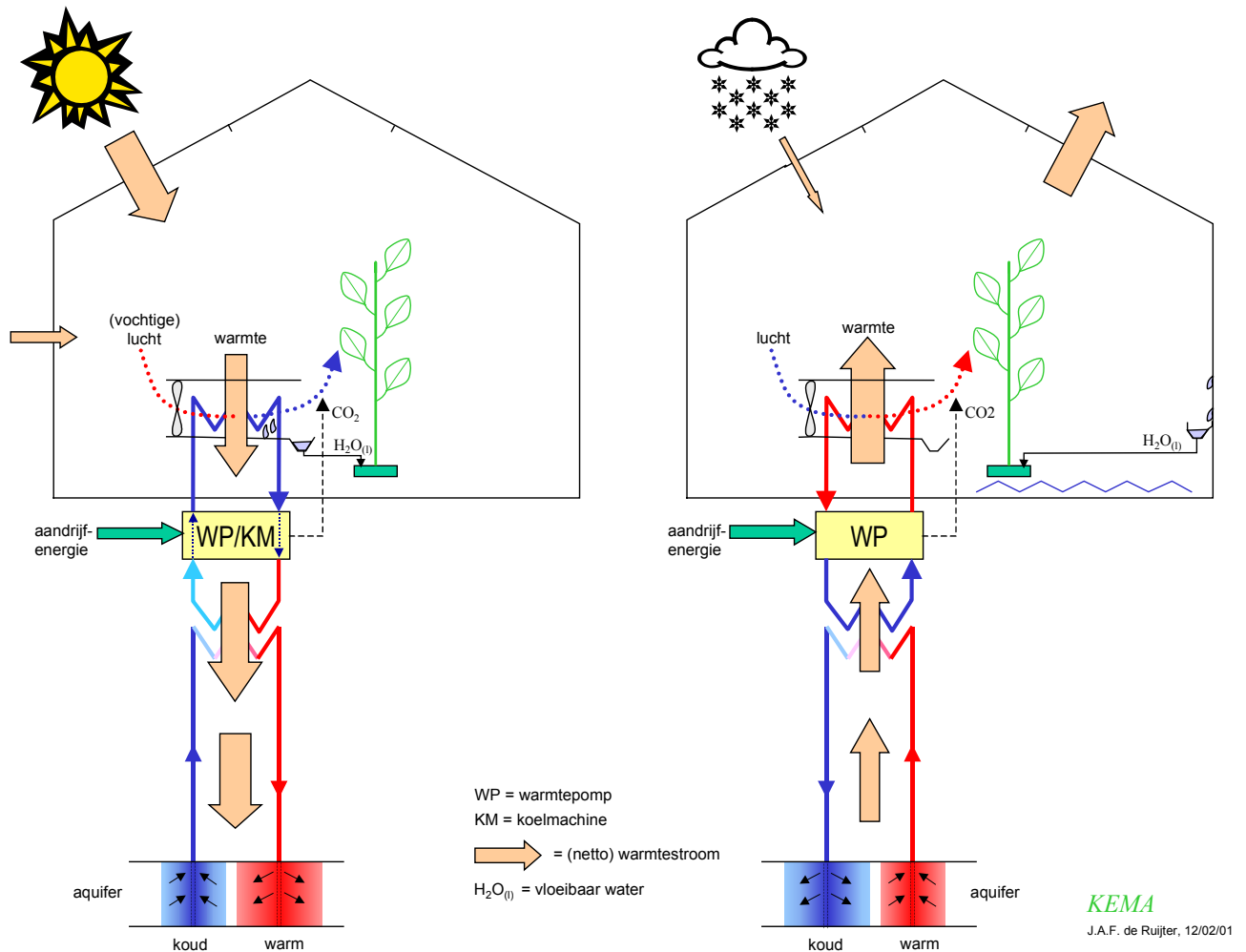
1 INLEIDING

1.1 Achtergrond

In 1997 is tussen de overheid en de tuinbouwsector het ‘Convenant Glastuinbouw en Milieu’ gesloten (“GlaMi”). Hierin is een Integrale Milieu Taakstelling opgenomen voor vermisting, verzuring, “verstoring”, verdroging en energie-efficiëntie. Ten aanzien van het aspect “energie” zijn de meest in het oog springende taakstellingen, dat in 2010 de energie-efficiëntie (gedefinieerd als primair energieverbruik per eenheid product) met 65% moet zijn verbeterd ten opzichte van 1980, en verder dat duurzame energie een aandeel van minstens 4% in het energieverbruik dient te hebben. Per 1 april 2002 is het Besluit Glastuinbouw van kracht geworden. Hierin zijn de sectordoelstellingen voor energie vertaald naar taakstellingen voor individuele bedrijven. In het Besluit zijn teeltspecifieke normen vastgelegd voor het “ten hoogste toegestane verbruik van energie” (in GJ/ha), die tot 2010 jaarlijks worden aangescherpt.

Besparingsopties zoals rookgascondensators, (beweegbare) energieschermen, gevelisolatie, warmteopslag in buffers en geavanceerdere regeltechniek (bijvoorbeeld “temperatuur-integratie”) laten in het laatste decennium een stijgende penetratiegraad zien. Ook zijn in de tuinbouwsector op grote schaal warmtekrachtinstallaties geïnstalleerd, die bij goed gebruik ten opzichte van gescheiden opwekking van warmte en elektriciteit minder primaire energie verbruiken. Voor een verdere verbetering van de energie-efficiëntie in de komende 10 jaar zijn ‘nieuwe’ energiebesparingsopties en energievoorzieningsconcepten nodig. Ook de taakstelling op het gebied van duurzame energie vraagt om innovaties in de energievoorziening van de glastuinbouwbedrijven.

Collectie (“oogsten”) van overtollige zonne-energie in de kas in combinatie met lange-termijn warmte-opslag in watervoerende zandlagen (aquifers) en warmtepompen bieden in potentie goede mogelijkheden om aan beide energietaakstellingen te kunnen voldoen. Dergelijke concepten kunnen tevens leiden tot een hogere gewasopbrengst, een besparing op het watergebruik, een lagere CO₂-behoefte en een lager verbruik van bestrijdingsmiddelen. Aan de basis van een dergelijk energievoorzieningsconcept staat een gesloten (of bijna gesloten) kas waarvan de ramen gesloten blijven, of veel meer gesloten dan bij de traditionele kas het geval is. Ter handhaving van het gewenste kasklimaat moet de kas dan in het warme deel van het jaar worden gekoeld en ontvochtigd. De warmte die hierbij aan de kaslucht wordt onttrokken, wordt opgeslagen in een aquifer en wordt op koude dagen (of dagdelen) middels een warmtepomp weer voor verwarming van de kas gebruikt. Het principe is geschetst in figuur 1.1. In dit rapport zal de energetische en bedrijfseconomische potentie van gesloten of bijna gesloten kassen in combinatie met warmtepompen en lange-termijn warmteopslag in aquifers worden onderzocht.



Figuur 1.1 Principe van een gesloten kas. In de zomer wordt de kas gekoeld en ontvochtigd. De warmtepomp werkt in dit geval als koelmachine. De onttrokken overtollige (voelbare en latente) warmte uit de kaslucht wordt opgeslagen in een aquifer. In de winter wordt de opgeslagen warmte weer opgepompt, door de warmtepomp in temperatuur verhoogd en vervolgens afgegeven aan de kaslucht. In de zomer kan ook direct worden gekoeld/ontvochtigd zonder tussenkomst van de warmtepomp/koelmachine.

1.2 Doelstelling

Het project heeft ten doel van het in paragraaf 1.1 geschetste energieconcept de (praktisch) haalbare energiebesparing en CO_2 -emissiereductie te bepalen, alsmede de technische en bedrijfseconomische haalbaarheid en het perspectief voor de glastuinbouw te analyseren en in kaart te brengen.

Doel achter het doel

Achter het hiervoor genoemde projectdoel ligt het volgende hogere beleidsdoel dat zijn oorsprong vindt in de energieparagraaf uit het GlaMi-convenant: het genereren (en beschikbaar maken) van technische, energetische en bedrijfseconomische kennis van een nieuw, potentieel interessant energievoorzieningsconcept teneinde de realisatie van de GlaMi-doelstelling voor 2010 op het gebied van primaire energie en duurzame energie een stap dichterbij te brengen.

De potentie van het onderhavige systeemconcept ligt behalve op het energetische vlak ook op teelttechnisch en milieutechnisch terrein. Het **energie-technische potentieel** heeft te maken met:

- *Mogelijkheden van energiebesparing* door reductie van warmteverliezen door de “gebouwschil” (i.h.b. ventilatieverliezen)
- *Efficiëntere warmteproductie* door middel van warmtepompen
- *Gebruik van duurzame energie* door toepassing van warmtepompen in combinatie met op warme dagen uit de kaslucht geogoste, overtollige (passieve) zonne-energie (die voor hergebruik is opgeslagen in een ondergronds energieopslagsysteem)
- *Reductie van warmteverliezen door opslag* van bovengenoemde maar ook eventuele andere tijdelijke warmte-overschotten en *hergebruik* van opgeslagen warmte op momenten van netto warmtevraag.

Teelttechnisch potentieel:

- *Verbetering van de beheersing van het kasklimaat* en daarmee het verkrijgen van meer optimale teeltcondities: temperatuur en luchtvochtigheid worden onafhankelijk regelbaar. (Bij klassieke kasconcepten is dit niet het geval door koppeling van temperatuurregeling met de vochtregeling via het gemeenschappelijke ingrijporgaan, de beweegbare ventilatieramen).
- *Betere handhaving en zo mogelijk verhoging van de CO₂-concentratie in de kaslucht.* Doordat met name op warme dagen de ventilatie wordt beperkt kan de CO₂-concentratie op een hoger (en meer optimaal peil) worden gehouden, waardoor een *verhoging van de teeltopbrengst* (kg/m²) mag worden verwacht.

Milieutechnisch potentieel:

- *Verminderen van CO₂-ventilatieverliezen* (en daarmee gepaard gaand warmteverlies)
- *Minder waterverlies* (door beperking ventilatieverliezen, en terugwinning/hergebruik van vocht uit ontvochtiger).
- *Minder verlies van insecten voor biologische bestrijding naar buiten toe, en minder bezoek van ongewenste insecten van buiten.*

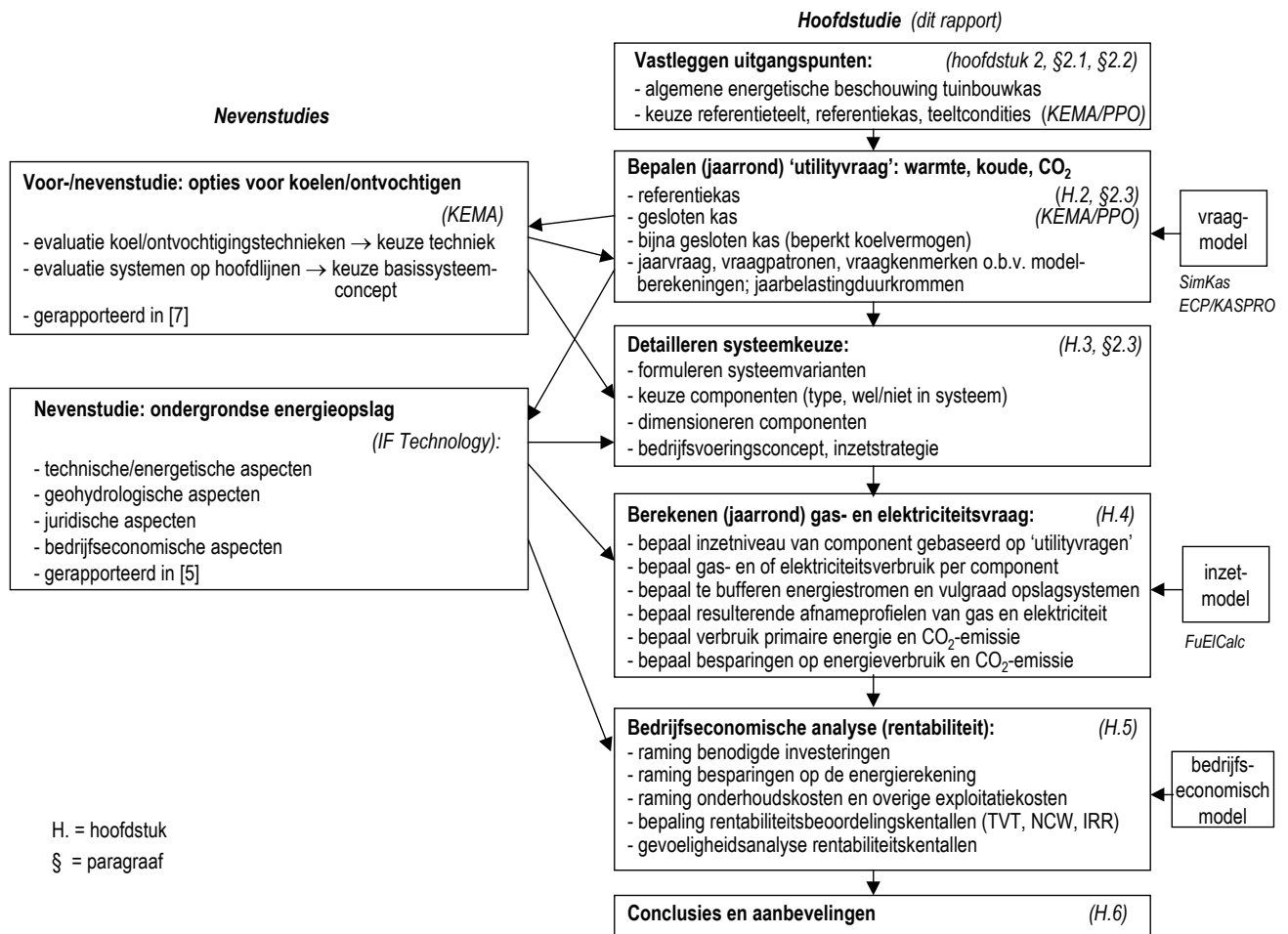
1.3 Aanpak / leeswijzer

Om de in paragraaf 1.2 geformuleerde doelstelling te kunnen bereiken, is gekozen voor een aanpak zoals geschetst in figuur 1.2. Het project bestaat ruwweg uit een *hoofdstudie* en twee nevenstudies. De hoofdstudie is in dit document gerapporteerd. Van de nevenstudies zijn aparte rapportages opgesteld ([5], [7]). De pijlen geven de interacties tussen de hoofd- en de nevenstudies weer. Per blok is aangegeven waar de betreffende informatie kan worden gevonden (rapport, hoofdstuknummer en eventueel paragraafnummer). Hieronder wordt de aanpak en samenhang tussen hoofd- en nevenstudies beknopt besproken:

De *hoofdstudie* start met het vastleggen van de uitgangspunten en het bepalen van de (jaar-)vraag naar de ‘utilities’ warmte, koude en CO₂ in de kas¹ (hoofdstuk 2). Bij het bepalen van de (uiteindelijke) utilityvraag is gebruik gemaakt van een deelresultaat uit de *nevenstudie* “Opties voor koelen en ontvochtigen” (namelijk de keuze van de ontvochtigingstechniek, daar deze mede de koude- en herverwarmingsvraag bepaalt). In die nevenstudie, die zelf uitging van (initiële) ramingen van koude- en warmtevraag uit de hoofdstudie, zijn verschillende koel- en ontvochtigingsconcepten geëvalueerd en is uiteindelijk gekozen voor “ontvochtigen door uitkoelen op een koud oppervlak”. Tevens zijn in die studie de contouren en voor- en nadelen geschetst van potentiële geschikte, overall systeemontwerpen voor de energievoorziening van een (bijna) gesloten kas. Aan het eind is een keuze voor een bepaald concept (op hoofdlijnen) gemaakt. In de hoofdstudie wordt dat concept voor de gekozen referentie-teelt (tomaat) nader uitgewerkt en onderzocht. In *hoofdstuk 3* wordt het systeemconcept nader gedetailleerd (onder andere keuze van het type warmtepomp (WP), wel/geen gasmotor (GM) voor aandrijving van WP, dimensionering van componenten WP, GM, buffers, ondergronds warmteopslagsysteem en warmte- en koudetransport- en -distributiesysteem). Er worden 4 verschillende systeemvarianten binnen het gekozen concept gedefinieerd, die qua aandrijving en/of koelcapaciteit (en - daarmee samenhangend - qua investeringskosten) verschillen. Tevens wordt in hoofdstuk 3 de bedrijfsvoering van het systeemconcept besproken en de ‘inzetstrategie’ van de componenten daarin. Het vormt de basis van de systeemintegratie.

In *hoofdstuk 4* vindt een energieanalyse plaats. Per variant wordt aan de hand van de inzetstrategie met behulp een ‘inzetmodel’ (dat berekent wanneer welk productiemiddel op welke belasting moet worden ingezet) de netto warmteoogst over een jaar bepaald en verder het benodigde elektriciteits- en/of gasverbruik van de verschillende componenten en van het totale energiesysteem. Hierbij wordt rekening gehouden met de verschillende buffer- en opslagmogelijkheden in het systeem.

¹ de vraag naar elektriciteit wordt later bepaald, daar deze - bij niet-belichte teelten - vooral bepaald wordt door het verbruik van de installaties zelf



Figuur 1.2 Schematische voorstelling aanpak van het project. De pijlen tussen de hoofd- en nevenstudies representeren de interacties ertussen. De figuur is tevens een soort “road map” die aangeeft waar de verschillende deelresultaten van de studie kunnen worden gevonden. Verder is aangeduid waar de bijdrage van projectpartners IF-Technology en PPO is geleverd. Tot slot geven de blokjes helemaal rechts aan in welke stappen modelberekeningen zijn uitgevoerd. Tevens is het type model en zo mogelijk de naam van het gebruikte model genoemd.

Uit de jaarafnamepatronen van gas- en elektriciteit (berekend op kwartierbasis) worden (prijsbepalende) afnamekenmerken zoals totaal volume, piekgrootte, fractie in plateau-uren en dergelijke bepaald. Ook wordt het jaarlijkse aantal draaiuren van de verschillende productiemiddelen bepaald (in verband met onderhoudskosten). Het gas- en elektriciteitsverbruik wordt omgerekend naar primaire energie. Per variant wordt de besparing op het primaire energieverbruik bepaald ten opzichte van het verbruik van het referentiesysteem, de klassiek geventileerde kas met een ketel voor verwarming en CO₂-dosering. Verder wordt voor elke variant de reductie van de met het energieverbruik samenhangende CO₂-uitstoot berekend.

In *hoofdstuk 5* wordt de bedrijfseconomische analyse van de verschillende varianten gemaakt. Een belangrijk onderdeel hiervan is de raming van de investeringskosten. Hierbij wordt onder meer gebruikt gemaakt van informatie uit de nevenstudie “ondergrondse energieopslag” (uitgevoerd door IF-Technology). Verder wordt, ervan uitgaande dat het glastuinbouwbedrijf een ‘vrije’ klant is op de energiemarkt, op basis van de afnamekenmerken van gas en elektriciteit, de verwachte gas- en elektriciteitsrekening bepaald en de reductie (of wellicht verhoging) van de totale energierekening ten opzichte van die van het referentiesysteem. Ook worden de meerkosten voor onderhoud en additieven (ureum, CO₂) bepaald. Aan de hand van een kasstroomanalyse worden de investeringsbeoordelingskentallen terugverdiëntijd (TVT), netto-contante-waarde (NCW) en interne rendementsgraad (IRR) berekend. Een gevoeligheidsanalyse geeft inzicht in de effecten van onzekerheden in de belangrijkste invloedsgrootheden op de rentabiliteitskentallen. Daarmee worden de grootste risico’s van de investering in een (bijna) gesloten kas in kaart gebracht. *Hoofdstuk 6* geeft tot slot de conclusies van de studie en een aantal aanbevelingen.

De nevenstudie “ondergrondse energieopslag” gaat naast de reeds genoemde investeringsraming in op de dimensionering van het opslagsysteem (onder andere vermogen per put, aantal putten, mogelijke verdeling over kasperceel), het eigen energieverbruik en overige exploitatielasten, en verder beknopt op de geohydrologie van Nederland en algemene juridische aspecten (vergunningen en dergelijke) ten aanzien van grondwatersystemen.

Leesadvies

De lezer die vooral geïnteresseerd is in de bedrijfseconomische haalbaarheid van de onderzochte varianten en minder in de techniek, kan besluiten om na de eerste twee paragrafen van hoofdstuk 2 verder te gaan met hoofdstuk 5 (of eventueel paragraaf 4.6). De tussenliggende paragrafen gaan vrij diep in op de techniek van het systeemconcept en op de (zeer) omvangrijke berekeningen die nodig zijn om de energetische prestatie van de varianten te bepalen. Er van uitgaande dat de lezer de systeemkeuzen en uitkomsten van die berekeningen ‘accepteert’, kan hij zonder problemen in hoofdstuk 5 (of desgewenst paragraaf 4.6) verder lezen. Op zichzelf vormen de paragrafen over vraagberekeningen, de ontwerpkeuzen ten aanzien van systeemconcept, systeemcomponenten daarin en de bedrijfsvoering ervan en de inzetberekeningen een essentieel (en omvangrijk) onderdeel van de onderhavige studie. Voor een goede interpretatie van de eindresultaten is het gewenst op de tussenresultaten van de vraag- en inzetberekeningen en op de ontwerpkeuzen en motivatie daarvan te kunnen terugvallen.

De tussenresultaten (in het bijzonder de zogenaamde “jaarbelastingduurkrommen”) hebben tevens waarde omdat ze op compacte wijze een goed inzicht geven in het functioneren van het systeem (en de belangrijkste componenten daarin) over een tijdspanne van een jaar. In het kader van de gewenste kennisopbouw is daarom aan bovengenoemde zaken in dit rapport dan ook substantieel aandacht besteed.

Opmerking: in dit rapport is de internationaal gangbare cijfernotatie gebruikt met een decimale punt in plaats van de in Nederland gebruikelijke komma. Bij grote getallen zijn voor de leesbaarheid duizendtallen, waar dat qua automatische getalopmaak mogelijk was, middels een spatie gescheiden van honderdtallen, bijvoorbeeld “500 000” in plaats van “500000”.

2 ANALYSE VERWARMINGS-, KOEL- EN ONTVOCHTIGINGS-BEHOEFTEN VAN EEN (BIJNA) GESLOTEN KAS

2.1 Energiebeschouwing gesloten kas / systeembeschrijving

Energiefuncties conventionele kas

Energie is op een glastuinbouwbedrijf vooral nodig voor de volgende energie- (of energiege-relateerde) functies:

- *verwarming*: handhaven van een voldoende hoge teelttemperatuur in de kas
- *CO₂-bemesting* ter bevordering van de fotosynthese
- *assimilatiebelichting*: ter bevordering van de fotosynthese op dagdelen met te weinig zonne-instraling (vooral gebruikt in de bloemeteelt en noodzakelijk bij 'jaarrondlevering' in de groenteteelt)

Met behulp van de beschikbare functies realiseert de tuinder een - uit bedrijfseconomisch oogpunt gezien - optimaal klimaat in de kas.

Extra energiefuncties gesloten of bijna gesloten kas

Ter handhaving van het gewenste teeltklimaat zijn er naast de hierboven genoemde functies nog twee belangrijke (klimaatbeïnvloedings)functies nodig:

- *ontvochtiging*: het gewas brengt (vooral) onder invloed van zonlicht door verdamping in de huidmondjes in de bladeren veel waterdamp in de kaslucht. Hierdoor wordt de plant gekoeld en wordt (mede) de stijgende sapstroom van de wortels naar de bladeren op gang gehouden. Een te hoge relatieve vochtigheid (RV) in de kas leidt tot een verhoogde infectiedruk in de kas. Boven een bepaalde RV dient de kaslucht te worden ontvochtigd. Dit gebeurt in de huidige kassen vrijwel altijd door ventilatie via dakramen, die door de klimaatcomputer kunnen worden opengestuurd. Nadeel hierbij is dat, indien er verwarmd wordt, er met de ventilatielucht ook (extra) warmte verloren gaat. Indien er CO₂ wordt ge-doseerd, zal bij open ventilatieramen de toegevoerde CO₂ grotendeels via de ramen ver-loren gaan, zonder in het gewas te worden vastgelegd. Bij lage buitentemperaturen zal ontvochtiging ook plaats vinden door condensatie tegen de binnenzijde van het kasdek.
- *koeling*: vooral in de zomer, late lente en vroege herfst kan onder invloed van hoge zon-ne-instraling de kastemperatuur oplopen tot waarden die niet optimaal meer zijn of zelfs schadelijk voor het gewas. De kaslucht dient dan te worden gekoeld. Normaliter is de belangrijkste koelmogelijkheid ventilatie via de kasramen. De kastemperatuur zal in dit geval altijd hoger (moeten) zijn dan de heersende buitenluchttemperatuur. Soms wordt ook additioneel gekoeld door water over de kap te versproeien of in de kas zeer fijn te vernevelen (additionele verdampingskoeling).

Zoals hierboven aangegeven wordt de (boven de plantverdampingskoeling en kasdekcondensatie uitkomende) koel- en ontvochtigingsbehoefte in traditionele kasconcepten bijna altijd door natuurlijke ventilatie gerealiseerd (eventueel aangevuld met 'topkoeling' door waterverneveling/-sproeien). Natuurlijke ventilatie via dakramen heeft echter behalve het voordeel dat het relatief gemakkelijk kan worden gerealiseerd, een aantal belangrijke bijwerkingen/nadelen:

- tijdens perioden waarin nog verwarmd moet worden, gaat door ventilatie extra warmte verloren (treedt vooral op bij ontvochtiging in de vroege ochtend: 'droogstoken')
- bij gelijktijdig CO₂-doseren en ventileren verdwijnt CO₂ grotendeels naar buiten en wordt dus niet in het gewas vastgelegd
- er treedt ongewenste insectenuitwisseling op (insecten voor biologische bestrijding gaan verloren; bezoek van ongewenste insecten)
- de kastemperatuur is bij alleen natuurlijke ventilatie altijd hoger dan de buitentemperatuur (en vooral op hete dagen niet optimaal c.q. ongewenst hoog)
- vocht en temperatuur kunnen met ventilatie niet onafhankelijk worden geregeld.

Actieve koeling en ontvochtiging

Door in de koel- en ontvochtigingsbehoefte *actief* middels een geschikte installatie te voorzien, kan een gesloten (of bijna gesloten) kas worden gerealiseerd waarbij de bovengenoemde bijwerkingen/nadelen niet meer (of nog maar in veel mindere mate) optreden. Doordat de klimaatcondities (temperatuur, RV, CO₂, insecten) - ook in het warme seizoen - beter in de hand kunnen worden gehouden, kan tevens een hogere gewasopbrengst en een beter product worden gerealiseerd.

Warmtepompen

Warmtepompen kunnen worden ingezet voor 4 van de 5 genoemde kasklimaatfuncties te weten *verwarmen, koelen, ontvochtigen* en - bij (direct of indirect) gasgestookte warmtepompen – ook *CO₂-dosering*. Naast een deel hoogwaardige energie gebruiken ze laagwaardige warmte, waardoor ze in principe zeer geschikt zijn als basis voor een energie-efficiënt, duurzaam kasenergievoorzieningsconcept. De laagwaardige warmte kan bijvoorbeeld direct aan de omgeving worden onttrokken (lucht, water) of uit een warmteopslag met eerder duurzaam gewonnen of uit de energie-installaties gerecupereerde laagwaardige warmte. Gezien de grote hoeveelheden laagwaardige warmte die bij kasverwarming nodig zijn, en de seizoensverschuiving van vraag en aanbod, is het benodigde volume van het warmte-opslagmedium al gauw zo groot dat dit niet meer in hanteerbare bovengrondse buffers past. Bij seizoensopslag van warmte wordt derhalve gekozen voor watervoerende zandlagen in de bodem (aquifers).

Hierin kunnen grote hoeveelheden laagwaardige warmte worden opgeslagen en weer met een redelijk cycluserendement worden teruggewonnen [5]. In de onderhavige studie zijn gebruik van warmtepomp en seizoensopslag van laagwaardige warmte een uitgangspunt.

Uit eerdere ervaringen met warmtepompen in de glastuinbouw – geplaatst in de tachtiger jaren toen de gasprijzen heel hoog lagen - is duidelijk geworden, dat zaken als dimensionering, keuze van type warmtebron en warmte-afgiftesysteem, en inpassing in kas en ketelhuis van cruciaal belang zijn voor een geslaagde toepassing. Gezien de variaties in grootte en (on)gelijktijdigheid van de verschillende behoeften, zullen warmtepompen de bovengenoemde klimaatfuncties bij voorkeur niet alleen vervullen, maar als onderdeel van een geïntegreerd energievoorzienings- en klimaatbeheersingssysteem. In zo'n systeem kunnen naast de warmtepomp - met geschikt gekozen warmtebron en een warmte-afgiftesysteem - eventueel ook conventionele productiemiddelen als ketel, warmtekrachtinstallatie (WK) en buffers voor opslag van tijdelijk overtollige warmte (korte en lange termijn) worden opgenomen. In de context van (bijna) gesloten kasconcepten horen hier ook installaties bij voor het ontvochtigen en koelen van de kaslucht. Om te besparen op kapitaalskosten worden deze laatste installaties bij voorkeur gecombineerd met het warmte-afgiftesysteem. In de koel- en ontvochtigingsinstallatie wordt voelbare en latente warmte onttrokken aan de warme en/of vochtige kaslucht. De laagwaardige, duurzame (want van de zon afkomstige) warmte kan dienen als bronwarmte voor de warmtepomp. Dit aspect van (her)gebruik van overtollige zonnewarmte op momenten met een netto warmtevraag vormt één van de belangrijkste fundamenten van het energievoorzieningsconcept van de gesloten (of bijna gesloten) kas.

Combineren van functies voor koelen, ontvochtigen en verwarmen

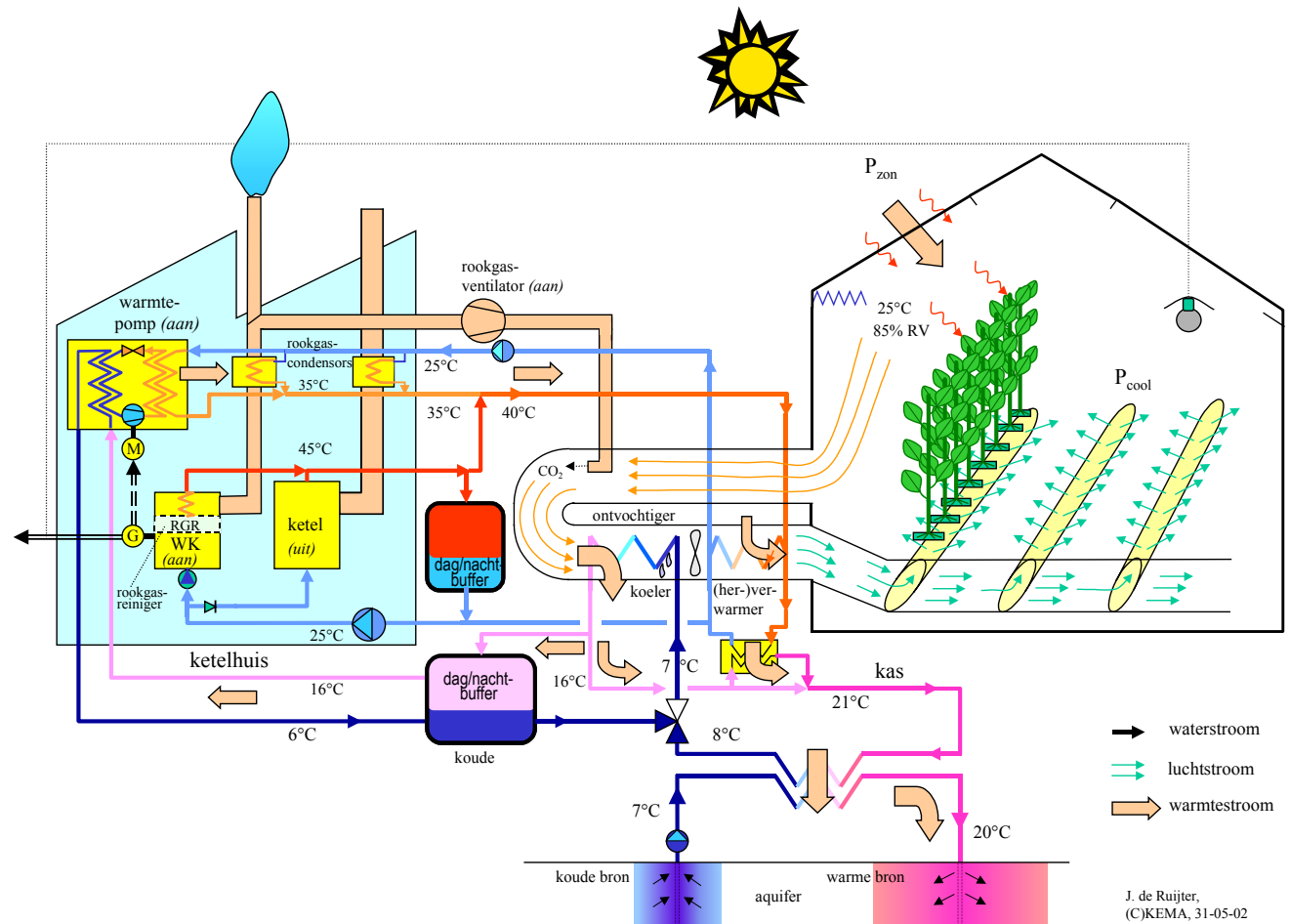
In de deelstudie “Opties voor koelen en ontvochtigen” [4], onderdeel van dit project, is aangegeven dat een combinatie van koelen-, ontvochtigen en (her)verwarmen (KOV) goed kan worden uitgevoerd in een luchtbehandelingskast (LBK). Vanwege de combineerbaarheid van de drie functies - en de daarmee samenhangende besparing op de benodigde installaties - is qua ontvochtigingstechniek gekozen voor condensatieontvochtiging ('uitkoelen') en niet voor absorptieontvochtiging (alhoewel dat principe op zich zelf enkele andere voordelen had, zie [4]). De LBK kan centraal of decentraal worden uitgevoerd (waarbij voor het gemak onder “centraal” ook verstaan wordt een beperkt aantal (bijvoorbeeld maximaal 8) grote LBK's per ha kas, die in principe buiten de teeltruimte (bijvoorbeeld tegen de gevels van de kas) zullen worden opgesteld. Decentrale units zijn in dit verband kleine KOV-units die in de kas worden geplaatst of worden opgehangen.

Systemconcept

Het concept dat in deze studie nader wordt uitgewerkt (zie ook [4]) bestaat uit:

- een centrale luchtbehandeling voor de KOV-functies
- een warmtepomp voor het produceren van koude en warmte
- een seizoensopslagsysteem voor warmte respectievelijk koude in een aquifer (ATES = aquifer thermal energy storage)
- 'dag/nacht-buffers' voor kortstondige opslag van warmte respectievelijk koude
- eventueel een warmtekrachtinstallatie voor de opwekking van de benodigde elektriciteit
- Eventueel een ketel voor de levering van een eventueel nog aanwezige restwarmte-vraag.

Dit concept is (in zijn meest uitgebreide configuratie) geschetst in figuur 2.1



Figuur 2.1 Principeschema van het onderzochte energievoorzieningsconcept voor een (bijna) gesloten kas. Het concept omvat - in zijn meest uitgebreide vorm - een centrale luchtbehandeling, een warmtepomp, een WK-installatie, een ketel, dag/nachtbuffers voor warmte en koude en een aquifergebaseerd warmteopslagsysteem in de bodem. In de eenvoudigste variant ontbreken de WK en de ketel. Getekend is de zomersituatie waar de kaslucht gekoeld en ontvochtigd wordt (en gedeeltelijk wordt herverwarmd).

In het vervolg zal een energetische en bedrijfseconomische analyse van dit concept worden gemaakt. De energetische analyse gaat in op de benodigde warmte- en koudestromen en de daarvoor benodigde elektriciteit en aardgas. De verbruiken en economie worden vergeleken met die van een referentiekas en referentieteelwijze. Hierop wordt in de volgende paragraaf ingegaan.

2.2 Referentiekas, -teelt, en teeltcondities

Het uiteindelijke gas- en elektriciteitsverbruik van een tuinbouwkas wordt in principe door twee zaken bepaald:

- de energievraag van de kas (warmte, elektriciteit, CO₂ en eventueel koude)
- de productie van de benodigde energiehoeveelheden (of eigenlijk de conversie van primaire energie naar de gewenste energievormen in de gewenste hoeveelheden)

De energievraag in de kas hangt weer af van de bouwfysische kenmerken van de kas, het gewenste binnenklimaat, de teelt en de optredende buitencondities. In deze studie is uitgegaan van een kas met een enkel-glas kasdek (met dubbelglasgevels) en voorzien van (een beweegbaar) energiescherm. De belangrijkste kenmerken zijn samengevat in tabel 2.1.

Tabel 2.1 Referentiekas

<u>Kas</u>	<u>Specificatie</u>	<u>Opmerkingen / aannamen</u>
Oppervlak	2 ha	
Type	Venlo	kapbreedte 3.2 m
Gemiddelde hoogte	4 m	
Kap	enkel glas dakhoek 23°	warmtedoorgangscoefficiënt U=6.82 W/m ² K bij windsnelheid 0 m/s
Gevel	geïsoleerd	warmtedoorgangscoefficiënt U=3.5 W/m ² K
Scherm	energiescherm (transparant, vocht- doorlatend)	circa 42 % energiebesparing indien gesloten.
Verhouding oppervlak ventilatieramen/kasoppervlak	0.234	

Wat betreft de teelt is, zoals in de inleiding al aangegeven, uitgegaan van een *tomatenteelt*. Deze keuze is in overleg met projectpartner PPO gemaakt. De belangrijkste argumenten hiervoor zijn:

- deze teelt komt in Nederland veel voor (circa 1180 ha in 2001; dit komt overeen met circa 30% van het glasgroente areaal van in totaal 3985 ha; bron CBS)
- het is een gewas met een relatief hoge verdamping. Daardoor moet er ten behoeve van ontvochtiging veel worden gelucht. Dit betekent een relatief gunstig perspectief voor een (bijna) gesloten kas
- er zijn veel gewassen die qua kasklimaat lijken op de tomaat (bijvoorbeeld paprika en komkommer, maar ook de bloementeelten roos en chrysant). De keuze voor de tomaat is wat dat betreft dus representatief voor een groot deel van het areaal van de Nederlandse glastuinbouw.

De gehanteerde setpoints van de belangrijkste kasklimaatgrootheden gedurende het jaar zijn weergegeven in tabel 2.2.

Tabel 2.2 Teelt en teeltcondities voor referentieteelt

<u>Teelt</u>	<u>Specificatie</u>	<u>Opmerkingen</u>
Gewas	ronde tomaat	steenwol, hoge draad
Plantdatum	week 50	
Ruimdatum	week 47	
Assimilatiebelichting	geen	
Kasoppervlak	2 ha	
<u>Teeltklimaat</u>		
Verwarmingstemperatuur	11-12 t.m. 10-1: dag 19°C, nacht 18 °C 11-01 t.m. 20-11: dag 18°C, nacht 17 °C 20-11 t.m. 10-11: dag 10°C, nacht 8 °C	'lichtverhoging': tussen 100 en 300 W/m ² globale instraling wordt de verwarmings- temperatuur lineair met 0 tot 2 °C ver- hoogd
Ventilatietemperatuur	2 °C boven verwarmingstemperatuur	'lichtverhoging': tussen 100 en 300 W/m ² globale instraling wordt de ventilatie- temperatuur lineair met 0 tot 4 °C ver- hoogd
RV	streefwaarde: max. 85%	
Minimum buis temp.	geen	
Energiescherm	transparant; vochtdoorlatend	dicht als buitentemperatuur 10 °C lager is dan kastemperatuur, mits globale instra- ling minder dan 50 W/m ² (2267 schermuren)
CO ₂ -bemesting	door ketel; gewenste waarde: 800 ppm	maximale dosering: 205 kg/ha.h

De verwachte jaarproductie bedraagt circa 55.4 kg/m² [1].

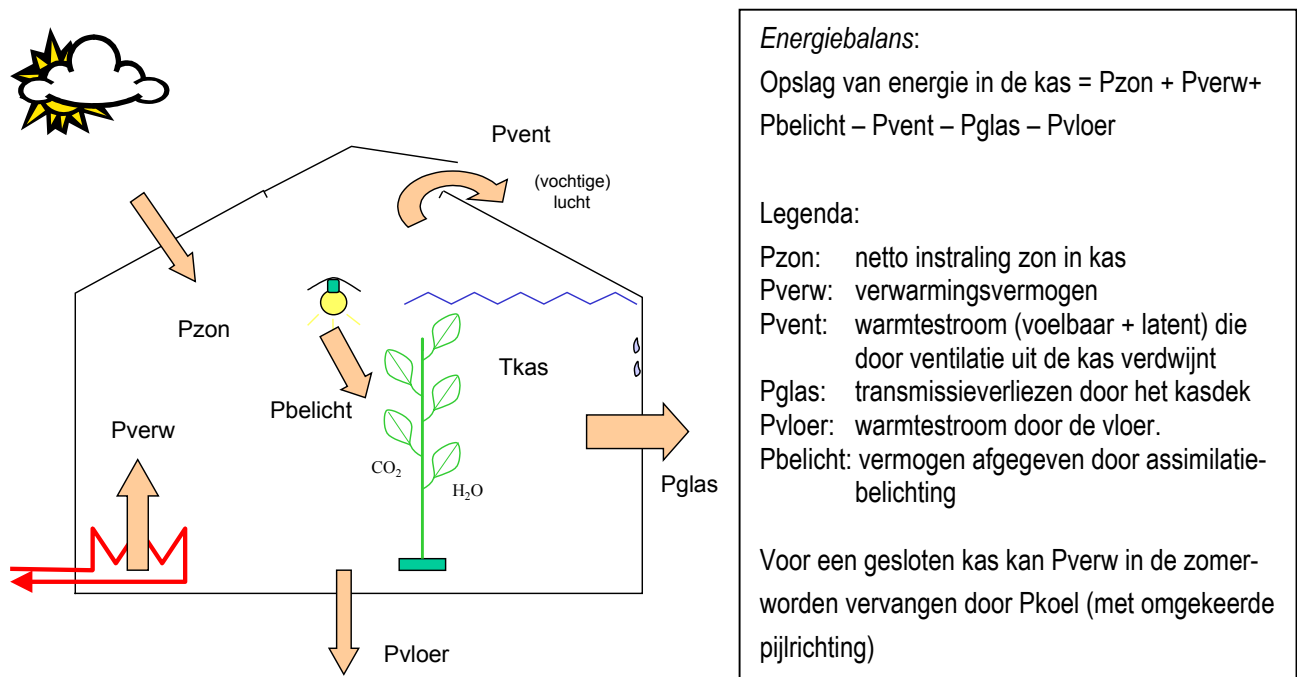
2.3 Analyse energieverbruik referentiekas en (bijna) gesloten kas

2.3.1 Berekeningsmethodiek warmte, koude en CO₂-behoefte van kassen

Om het in tabel 2.2 beschreven kasklimaat te realiseren, is een bepaalde hoeveelheid warmte, koude en CO₂ nodig. Behalve van de klimaatsetpoints, de teelt en de bouwfysica van de kas, hangen de benodigde hoeveelheden natuurlijk ook sterk af van het buitenklimaat. Het is gebruikelijk om ter karakterisering van het energieverbruik uit te gaan van een langjarig gemiddeld buitenklimaat maar met behoud van belangrijkste daarin binnen een jaar optredende variaties (de zogenaamde referentie jaren [2], zie ook bijlage A).

De actuele warmte-, CO₂- en - bij een (bijna) gesloten uitvoering – koudebehoefte van de kas kunnen in kaart worden gebracht met behulp een dynamisch procesmodel van de kas. Hiermee kunnen de dominante energiestromen en – bij de uitgebreidere modellen - ook de massastromen van waterdamp respectievelijk CO₂ worden berekend die op een bepaald moment de kas binnenkomen respectievelijk uitgaan. Aan de basis van deze berekeningen staan de (dynamische) *energie- en massabalansen* voor het systeem “kas”. Voor warmtestromen is het principe schematisch geschetst in figuur 2.2. De benodigde hoeveelheid warmte (P_{verw}) voor het actief op temperatuur houden van de kas wordt in dit voorbeeld toegevoerd via het links onder getekende warmteafgiftesysteem. De hoeveelheid is zodanig dat de verliezen $P_{\text{vent}}+P_{\text{glas}}+P_{\text{vloer}}$ en de eventuele gevraagde aanwarmenergie die nodig is voor een temperatuurstijging, juist gecompenseerd worden door de zonne-instraling P_{zon} plus de (eventuele) warmte afkomstig van de assimilatiebelichting P_{belicht} plus het (te bepalen) verwarmingsvermogen P_{verw} . (Eventuele koude kan in dit verband worden gezien als een negatieve warmtestroom). Door de balansberekeningen op meerdere tijdstippen uit te voeren, wordt inzicht verkregen in de variaties die in de verschillende stromen optreden. Hoewel het principe eenvoudig is, zijn de uiteindelijke berekeningen zeer complex, daar de grootte van de diverse warmtestromen (en massastromen) afhangt van bijvoorbeeld grootheden als windsnelheid, buitentemperatuur, zonnestand, vocht- en CO₂-concentraties binnen en buiten, raamstanden, etc. Het voert in dit kader te ver om deze afhankelijkheden hier nader te behandelen. Hiervoor wordt verwezen naar de literatuur [3], [4], [8].

Inzicht in de vochthuishouding is essentieel voor de gesloten of bijna gesloten kas. Aan de basis hiervan staat de *vochtbalans*. Wat betreft de *vochtbalans*, waaruit de relatieve vochtigheid in de kas wordt afgeleid en - bij de gesloten kas - de actieve ontvochtigingsbehoefte wordt bepaald, wordt hier nog opgemerkt dat deze in principe uit 4 termen bestaat:



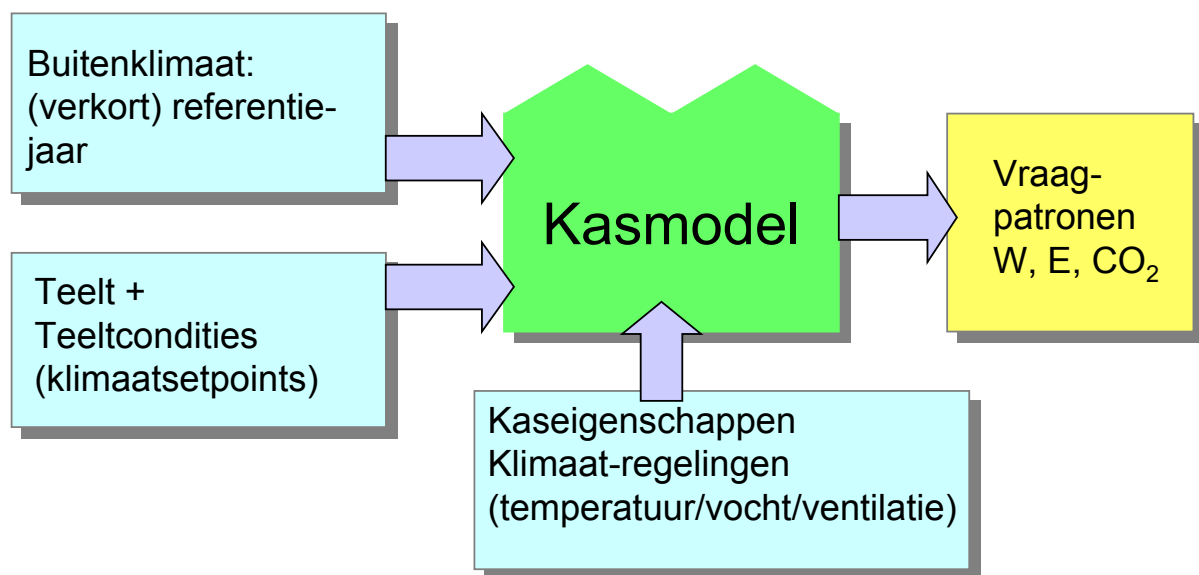
Figuur 2.2 Principeschema van de energiebalans voor een kas. De systeemgrens is in dit geval de kasomhulling en de vloer. De verwarmingsstroom Pverw moet de verliezen compenseren.

1. Vochtproductie: dit is met name de verdamping door het gewas (transpiratie). Deze hangt onder meer af van de zonne-instraling, de bladtemperatuur, de CO₂-concentratie en het dampdrukverschil tussen kaslucht en lucht in de huidmondjes in de bladeren van het gewas. Deze relaties zijn gewasspecifiek [8]. Verder speelt de bladhoeveelheid een belangrijke rol (of liever gezegd het bladoppervlak per eenheid vloeroppervlak, de zogenaamde leaf-area-index, LAI).
2. Condensatie tegen kasdek. Als de temperatuur van het kasdek lager is dan het dauwpunt van de kaslucht, zal er waterdamp op de binnenzijde van het kasdek condenseren. Deze wordt dus aan de kaslucht onttrokken en maakt de lucht droger.
3. Ventilatie: indien er lucht wordt uitgewisseld tussen de kasruimte en de buitenlucht, dan zal er i.h.a. ook vocht worden afgevoerd. De hoeveelheid is afhankelijk van het ventilatie-debiet en het verschil in waterdampconcentratie tussen kaslucht en buitenlucht.
4. Actieve ontvochtiging: bij een (bijna) gesloten kas, dient er actief vocht aan de kaslucht te worden onttrokken, omdat het (resterende) ventilatiedebiet hiervoor onvoldoende is.

Voor energiestudies van kassen dienen de berekeningen van de verschillende relevante warmte- en massastromen over een jaar plaats te vinden (*jaarrond*) met een tijdsresolutie van één uur of kleiner (dit laatste om in voldoende mate de variaties over een dag te kunnen weerspiegelen).

De resultaten van deze herhaalde berekeningen zijn vraagpatronen van warmte, koude en CO₂, die zowel inzicht verschaffen in de optredende dag- / nachtvariaties als in de seizoensvariaties. Inzicht in de variaties die gedurende een dag optreden is belangrijk omdat de verwarmings- c.q. koelinstallaties de benodigde vermogens zullen moeten kunnen leveren. Daarvoor is het nodig de pieken in de vraag te kennen en te weten wanneer deze optreden. Hiervoor is een dag- of weekgemiddelde – zoals bijvoorbeeld gegeven in [6] - onvoldoende. De aanpak van de 'jaarrondberekeningswijze' is geïllustreerd in figuur 2.3.

Uit de verkregen jaarpatronen kunnen afgeleide gegevens worden bepaald, zoals jaartotalen en pieken. De jaarpatronen kunnen worden geordend in zogenaamde 'jaarbelastingduurkrommen' waaruit gemakkelijk kan worden afgelezen hoeveel uur een bepaald vermogen (of meer) vóórkomt in een jaar (zie paragrafen hierna).



Figuur 2.3 Schematische voorstelling berekeningswijze van vraagpatronen voor warmte (W), elektriciteit (E) en CO₂ voor een kas. Centraal staat een dynamisch procesmodel van de kas.

Berekeningen / keuze van kasmodel

In deze studie zijn de warmte, koude en CO₂ -berekeningen uitgevoerd met behulp van de berekeningsprogramma's KASPRO (IMAG), ECP (PPO) en SimKas (KEMA). In eerste instantie was voorzien om de energie- en CO₂-vraagberekeningen van de referentiekas – voor zowel de normaal geventileerde situatie, als de situatie waarbij de ramen gesloten blijven (gesloten kas) uit te voeren met het programma ECP van projectpartner PPO.

Een belangrijk argument hiervoor was dat dit programma behalve de energievraag tegelijkertijd ook de gewasproductie meeraamt. Tijdens de uitvoering van het project bleek echter dat ECP niet goed geschikt was om de energievraag van de gesloten kas te berekenen, daar de vochthuishouding hierin onvoldoende verdisconteerd was. Aanpassing hiervan bleek binnen het tijdsvenster van het project niet mogelijk. Daarna is aan IMAG gevraagd om de berekeningen met KASPRO uit te voeren, dat hiervoor wel geschikt is. Het nadeel van deze aanpak was, dat IMAG niet bereid was urengegevens te leveren, maar alleen ‘ingedikte’ daggegevens en jaarbelastingduurkrommen. Zoals hiervoor al aangegeven, zijn daggemiddelden onvoldoende om een energievoorzieningsconcept op te dimensioneren en jaarrond door te rekenen. Om die reden heeft KEMA additioneel ook berekeningen uitgevoerd met het eigen kascalculatieprogramma SimKas. Dit rekenmodel beschikt, evenals KASPRO, wel over een vochtbalans met berekening van de relatieve luchtvochtigheid in de kas, de waterdampproductiestromen als gevolg van bladtranspiratie, en de waterdampafvoerstromen ten gevolge van condensatie (tegen het koudere kasdek) en ontvochtiging via ventilatie.

Verschillen

Een verschil tussen SimKas enerzijds ECP/KASPRO anderzijds is, dat SimKas de behoefte aan warmte, koude en CO₂ berekent op basis van “ideale regelingen”. Voor verwarming betekent dit bijvoorbeeld dat de warmtebehoefte is gedefinieerd als de hoeveelheid warmte die moet worden toegevoerd om de temperatuur van de kas exact op het gewenste temperatuursetpoint te houden (mits die hoeveelheid binnen de maximum warmteproductiecapaciteit valt). Bij KASPRO en ECP zijn temperatuurregelingen geïmplementeerd met een proportionele band (de zogenaamde P-band). Hierbij hangt de inzet van het warmteproductiemiddel (bijvoorbeeld ketel) en de daarvan afgeleide warmtebehoefte af van de regelfout (= gewenste kastemperatuur – feitelijke kastemperatuur) en van de instelling van de regelaar (de P-waarde). Hierdoor zullen er kleine verschillen kunnen ontstaan tussen de berekende warmtebehoefte van beide categorieën programma’s. Bij SimKas blijven de gewenste setpoints door de ideale regeling langer gehandhaafd.

Iets dergelijks geldt ook voor de bepaling van de ontvochtigingsbehoefte. Simkas bepaalt de ontvochtigingsbehoefte aan de hand van de feitelijke RV in de kas. Er is een ideale vochtregeling die is geïmplementeerd als een grenswaarderegeling. Zou de RV in de kas door de op de kas/gewas inwerkende klimatologische omstandigheden boven het maximum-setpoint stijgen, dan worden de ramen zover geopend (of de ontvochtigingsinstallatie zover ingeschakeld) dat de RV op de toegestane maximumwaarde blijft. ECP heeft geen vochtregeling. In dit model worden de ramen niet direct door de RV in de kas geregeld. Zolang gebruik gemaakt wordt van een minimum raamstand en/of van een minimum buis, hoeft dit geen probleem te zijn, daar in die omstandigheden er naar verwachting – direct of indirect - altijd zoveel ventilatiedebiet is, dat overtollig vocht toch wordt afgevoerd.

Bij de gesloten kas gaat dit niet meer op. In dit geval dient actieve ontvochtiging plaats te vinden. ECP is hiervoor in de huidige vorm ongeschikt. KASPRO regelt het vochtgehalte middels een proportionele regeling die bij een normaal geventileerde kas op de raamstand inwerkt, maar die desgewenst (bij gesloten kas) de belasting van een ontvochtigingsmachine kan sturen.

In de paragrafen hierna zullen de resultaten van de vraagberekeningen van de 'utilities' warmte, koude, elektriciteit en CO₂ worden gerapporteerd voor zowel de referentiesituatie (normaal geventileerde kas) als de gesloten kas. In de volgende hoofdstukken zal daarna worden geanalyseerd hoe de utilityvraag wordt "ingevuld" door het referentie- respectievelijk het alternatieve 'gesloten-kasenergievoorzieningssysteem', waarbij tevens de daarvoor benodigde gas- en elektriciteitsstromen en -hoeveelheden worden bepaald.

2.3.2 Warmte-, CO₂- en elektriciteitsvraag van referentiekas

In deze paragraaf wordt de verwachte utilityvraag van de referentiekas (zie tabel 2.1) behandeld, die optreedt bij de in tabel 2.2 genoemde teeltcondities. De berekeningen met SimKas zijn uitgevoerd met het Verkort Referentiejaar voor Buitencondities (NEN 5060) als klimaatdata-invoerfile (zie bijlage A en figuur 2.3). Het voordeel van het Verkort Referentiejaar (VRJ) is, dat het een compacte dataset is, die toch de karakteristieke lange-termijn variaties gedurende het jaar en korte-termijn variaties in de dag-nachtijdsspannen voldoende representeert, waardoor de jaarrondberekeningen sneller kunnen worden uitgevoerd. Zoals in bijlage A aangegeven, is het jaar opgedeeld in 4 seizoenen van elk 14 dagen. Doordat maar 56 dagen hoeven te worden doorgerekend, is de simulatie een factor 6.5 sneller gereed dan bij een vol jaar.

De belangrijkste in het VRJ voorkomende en in het model gebruikte signalen (globale zonneinstraling, buitentemperatuur, windsnelheid en luchtvochtigheid) zijn als functie van de tijd geplot in figuur A.1 van bijlage A.

Voor de ECP- en KASPRO-simulaties is gebruikt gemaakt van het zogenaamde SEL-referentiejaar [22].

Trends

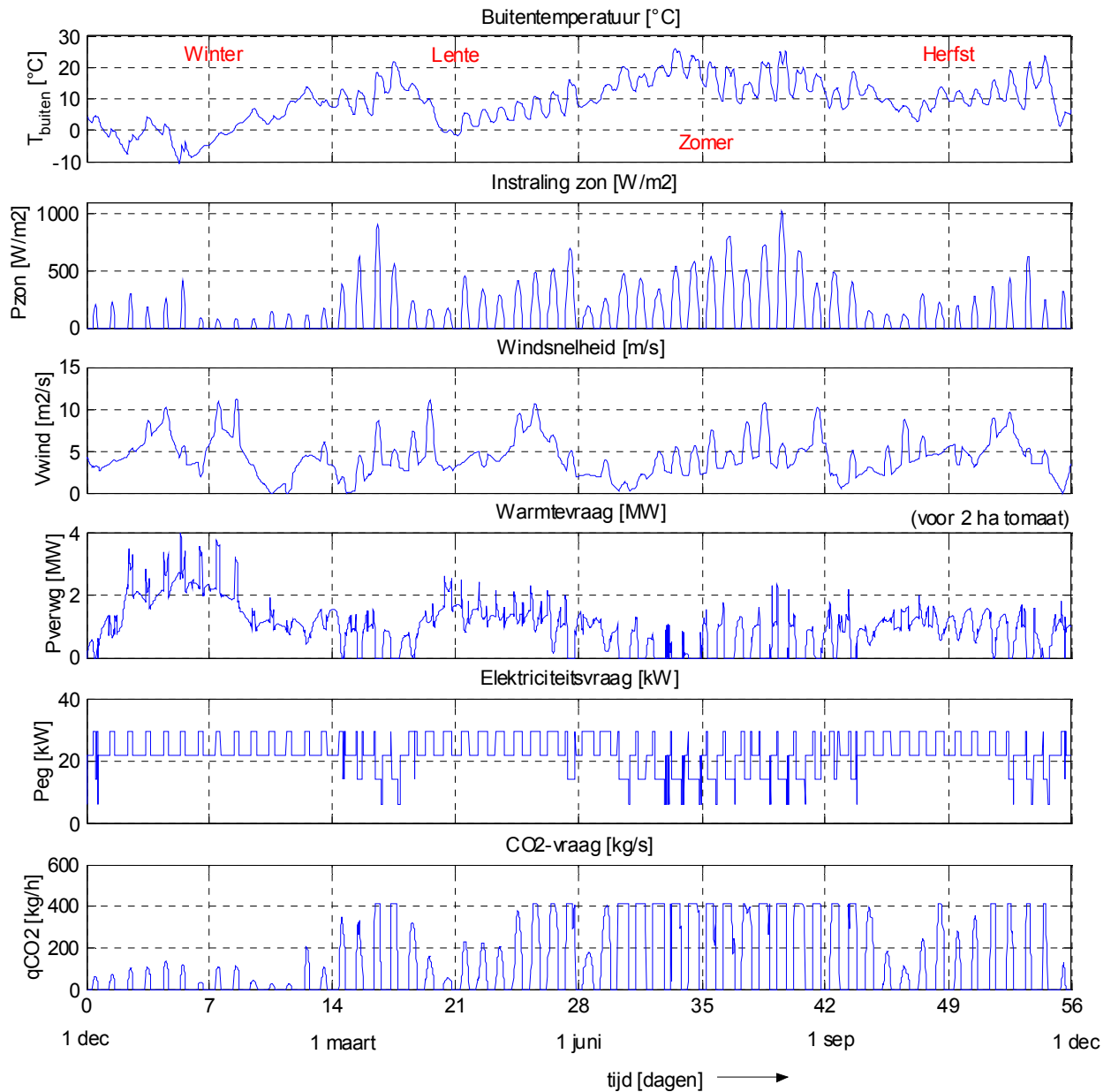
Figuur 2.4 laat het verloop van de met SimKas berekende patronen zien van de warmtevraag, de elektriciteitsvraag (alleen voor ketel- en rookgasventilator en voor de CV-pompen) en van de CO₂-vraag. Tevens zijn ter referentie de patronen van buitentemperatuur, zonneinstraling en windsnelheid gegeven. Opmerking: het hier berekende elektriciteitsverbruik geldt voor warmte-opwekking met behulp van een ketel en CO₂-bemesting met de ketel.

Mocht de warmte (gedeeltelijk) worden opgewekt met een warmtepomp (WP) dan dient het extra elektriciteitsverbruik hiervoor, afhankelijk van de inzet van de WP, nog apart in rekening te worden gebracht.

Ten aanzien van de CO₂-vraag dient nog te worden opgemerkt, dat deze aan de bovenzijde is begrensd (in dit geval op 205 kg/h per ha; dit is gedaan omdat de ketel maar een eindige hoeveelheid kan leveren en omdat bij grotere hoeveelheden onevenredig veel warmte verloren gaat die 's nachts niet meer kan worden gebruikt). Het feit dat de CO₂-pieken in de onderste stripplot van figuur 2.4 een aantal malen de maximumwaarde bereiken, betekent dat in die situaties de feitelijke vraag - dat wil zeggen de hoeveelheid die nodig is om de CO₂-concentratie in de kas op het gewenste setpoint (van 800 ppm) te houden - hoger is. Door de begrenzing daalt de feitelijke concentratie dan onder de gewenste waarde. Dit gebeurt wanneer er relatief veel ventilatie nodig is om de kas bij hoge zonne-instraling te koelen en/of wanneer er veel vocht moet worden afgevoerd.

Verschillen in energieverbruik referentie en alternatief

Bij het beschouwen van de patronen is het van belang te realiseren, dat het in deze studie uiteindelijk gaat om *verschillen* in het warmte-, elektriciteits-, en CO₂-vraag - en de daaraan indirect gekoppelde gasinkoop en elektriciteitsinkoop – tussen de referentiesituatie (normaal geventileerde kas met referentie-energievoorzieningssysteem) en de alternatieve situatie (gesloten of bijna-gesloten kas met warmtepomp gebaseerd energievoorzieningssysteem). In dat kader zijn dan ook de absolute niveaus minder van belang. Via het verkort referentiejaar is wel gepoogd een zo goed mogelijk gemiddeld klimaat aan te bieden (zodat ook de totale jaarwarmtevraag redelijk is) maar met behoud van typische dag/nachtvariaties en seizoensvariaties (zodat ook de variaties in de vraag representatief zijn).



Figuur 2.4 Vraagpatronen van respectievelijk warmte, elektriciteit en CO₂ van de - normaal geventileerde - referentiekas (2 ha). Opmerking: de CO₂-levering (en daarmee de CO₂-vraag) is begrensd op een maximumwaarde van 205 kg/h/ha. De piekvraag naar warmte is circa 4 MW/2ha (= 200 W/m²).

Jaarbelastingduurkrommen

De tijdplots laten zien hoe de vraag over een jaar verloopt. Inzicht in hoeveel uur een bepaald vermogen nodig is, kan worden verkregen in zogenaamde “jaarbelastingduurkrommen” (JBDK’s). Een JBDK wordt ook wel “geordend vermogensdiagram” genoemd. Horizontaal staat de tijd uit in uren (van 0 tot maximaal 8760 uur = 1 jaar). Verticaal staat het vermogen uit, te beginnen bij het hoogste vermogen dat optreedt in het jaar. Het hele vermogensgebied van 0 tot het maximumvermogen wordt opgedeeld in aansluitende vermogensbandjes (bijvoorbeeld 100 stuks), die het totale vermogensgebied afdekken. Per vermogensbandje wordt bepaald hoeveel uur per jaar het vermogen in het betreffende bandje ligt. Vervolgens wordt in volgorde van afnemend vermogen voor elk van de bandjes het gemiddelde vermogen van dat bandje uitgezet tegen het aantal uren dat het voorkomt. Daarbij wordt voor elk volgend punt het aantal uren in het bandje opgeteld bij het totaal aantal uren van alle vorige punten samen. Door de punten onderling te verbinden wordt een kromme verkregen waarin de in het jaar optredende vermogens in afnemende richting zijn geordend. De kromme kan onder meer worden gebruikt om snel te zien hoeveel uur per jaar het vermogen groter is dan een bepaald (grens)vermogen, of hoeveel uren het vermogen ligt tussen een bepaalde onder- en bovengrens. De JBDK geeft in één oogopslag de verdeling van de vermogens over een jaar. Er kan echter niet meer uit worden afgelezen wanneer een bepaald vermogen in het jaar voorkwam. Hiervoor moet de tijdplots worden geraadpleegd. Behalve voor vermogens kunnen ook voor een andere grootheden jaarduurkrommen worden opgesteld.

In figuur 2.5 zijn de JBDK’s voor de (normaal geventileerde) referentiekas gegeven. Behalve de jaarbelastingduurkrommen van warmte-, CO₂- en elektriciteitsvraag, zijn ook de JBDK’s van de waterdampstromen gegeven voor zowel plantverdamping (transpiratie), condensatie tegen het kasdek als vochtafvoer via ventilatie, zoals die door SimKas zijn berekend. Alle grootheden zijn uitgedrukt per vierkante meter kas. Uit de figuren blijkt duidelijk dat verreweg het grootste deel van het geproduceerde vocht door ventilatie wordt afgevoerd. De condensatie treedt vooral in het koude seizoen op (dit is echter in de JBDK niet te zien). De twee plots onderaan zijn bedoeld voor de actieve ontvochtiging (links onder) respectievelijk benodigde (actieve) koude hiervoor (rechtsonder). Bij een normaal geventileerde kas zijn deze nul, maar bij de gesloten kas uiteraard niet meer (zie hiervoor paragraaf 2.3.3).

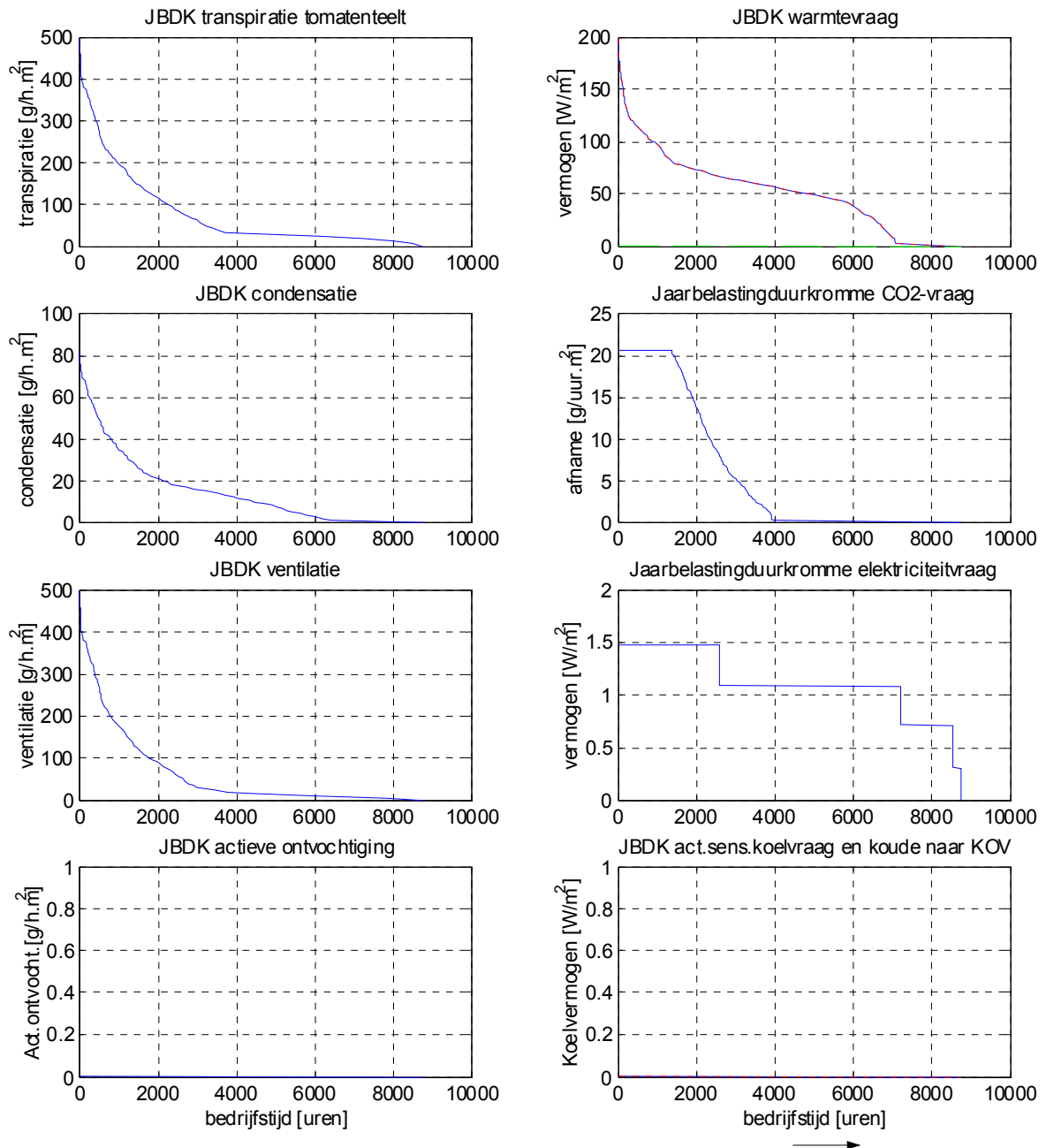
Jaarvraag utilities

De totale jaarvraag warmte, CO₂ en elektriciteit voor de normaal geventileerde referentiekas zijn weergegeven in tabel 2.3. Tevens zijn de resultaten van ECP en KASPRO vermeld.

Tabel 2.3 Verwachte jaarvraag warmte-, CO₂ en elektriciteit van de ('normaal geventileerde') referentiekas, met referentieteelt en bij referentieteeltcondities

	Eenheid	SimKas	ECP	KASPRO	Opmerkingen
Vochtregeling		ideale RV-grenswaarde-regeling via ramen	indirect via 'minimum buis'	indirect via minibus + min.raamstand + P-regeling	-min. buis 45°C (afgebouwd in traject van 100-200 W/m ²) - 5% lijzijde mits T _{buiten} >10°C
Referentiejaar		Verkort referentiejaar	"SEL-jaar"	"SEL-jaar"	
Gemid.buiten-temperatuur	°C	9.1	9.4	9.4	
Warmte	GJ/m ²	1.60	1.39 1.49	1.27	← zonder minimum raamstand ← met min. raamstand (als T>10 °C)
CO ₂ ^{*)}	kg/m ²	50.5	34. [58.9]	33.7	← zonder minimum raamstand ← met minimum raamstand
Electriciteit	kWh	9.85	niet berekend	niet berekend	energie voor ketel- en rookgasventilator en pompen (indicatief)
Koude	GJ/m ²	-	-	-	

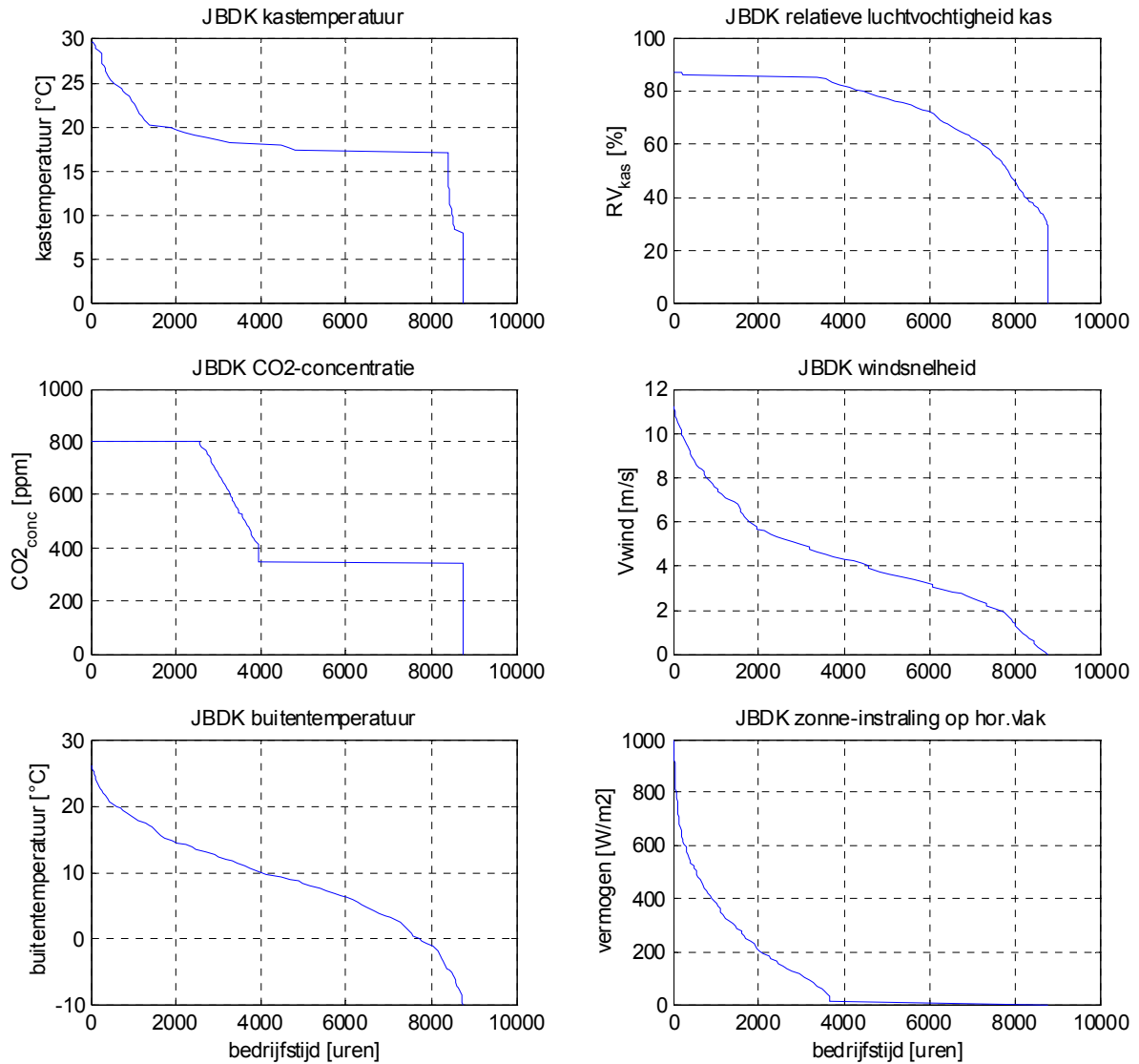
*) de CO₂-doserhoeveelheden zijn beperkt (205 kg/h/ha bij SimKas en 177 kg/h/ha bij KASPRO en ECP)



Figuur 2.5 Jaarbelastingduurkrommen van referentiesituatie (conventioneel geventileerde kas). Rechts staan de JBDK's van warmtevraag, CO₂-vraag en elektriciteitsvraag. Links die van plantverdamping en ontvochtiging (berekend met SimKas). In deze situatie is er geen actieve ontvochtiging. Ventilatie is verantwoordelijk voor het merendeel van de vochtafvoer, maar tevens ook voor de CO₂-afvoer!

Uit de tabel blijkt dat de totale jaarwarmtevraag van de KASPRO en ECP berekeningen wat lager liggen dan die van SimKas. Dit verschil kan grotendeels worden verklaard uit het andere referentiejaar (SEL-jaar versus Verkort Referentiejaar, met een iets lagere gemiddelde buitentemperatuur dan bij het VRJ) en met de iets andere schermstrategie (bij KASPRO/ECP wordt circa 1100 uur meer geschermd, zie ook bijlage E). Daarnaast hanteert SimKas een iets andere benadering bij het berekenen van de 'utilityvraag' (zie ook paragraaf 2.3.1, alinea "verschillen" en bijlage E). Bij een ideale regeling (gehanteerd in SimKas voor de vraagbepaling) blijft het binnenklimaat beter op de gewenste waarde dan bij een P-regeling (van KASPRO/ECP), waarvoor altijd afwijkingen nodig zijn. De 'prestatie' van de SimKas regelingen is geïllustreerd in figuur 2.6, waarin de kastemperatuur, luchtvochtigheid en CO₂ zijn uitgezet als jaarbelastingduurkrommen. Ter vergelijking zijn in bijlage B ook de vergelijkbare jaarbelastingduurkrommen van KASPRO opgenomen. Het valt op dat de vorm van de curven goed overeen komt. Wel liggen de temperatuurpieken bij KASPRO wat hoger vanwege de P-regelingen. Door diezelfde P-regeling zullen de KASPRO-JBDK's ook iets vloeiender lopen dan bij Simkas waar de ideale regelingen tot horizontale secties in de JBDK's leiden (daar wordt de betreffende grootte door de ideale regeling juist op zijn set-point gehouden!).

In bijlage B zijn verder ter vergelijking met de JBDK's van figuur 2.5 (SimKas) ook de (KASPRO) JBDK's van de vochtproductie, condensatie en vochtafvoer-door-ventilatie gegeven, en verder van de warmtevraag, CO₂-vraag en van ventilatiedebiet. De vocht-JBDK's van beide simulaties komen qua vorm en grootte goed overeen. Dit geldt ook vorm van de warmtevraag (het niveau van de KASPRO-simulaties ligt - zoals reeds aangegeven - iets lager). De CO₂-curve van SimKas is wat breder (en hoger) dan die van KASPRO. CO₂ is bij de eerste langer begrensd. Dit komt omdat bij de ideale regeling de ramen eerder (en wat 'agressiever') worden geopend dan bij gebruik van een P-regeling. Doordat de ramen gemiddeld iets verder open gaan, wordt er ook wat meer CO₂ 'weggeventileerd' en is er dus een wat hogere en bredere CO₂-behoefte.



Figuur 2.6 Jaarbelastingduurkrommen van kasttemperatuur, relatieve luchtvochtigheid en CO₂-concentratie in de kas, en tevens van de buitencondities windsnelheid, buitentemperatuur en zonneinstraling op een horizontaal vlak voor de referentiesituatie (normale kas met tomaat).

2.3.3 Warmte-, koude- en CO₂-vraag van geheel gesloten kas

In deze paragraaf wordt de utility-vraag van de gesloten en bijna gesloten kas besproken. Naast de 'utilities' warmte, CO₂ en elektriciteit is in dit geval ook koude nodig.

De koude wordt in luchtbehandelingskasten gebruikt om de kaslucht te koelen, alsmede om deze te ontvochtigen. De actieve ventilatie - door het openen van de ramen – treedt bij de geheel gesloten kas niet meer op, en bij de bijna-gesloten kas veel minder dan bij een normale kas.

Koudevraag

Bij het bepalen van de koudevraag door SimKas wordt rekening gehouden met de aard van de koel- en ontvochtigingsinstallatie. Zoals in paragraaf 2.1 reeds aangegeven, is er in dit project voor gekozen om gebruik te maken van koude oppervlakken (geïmplementeerd in luchtbehandelingskasten, LBK's) om gelijktijdig koeling en ontvochtiging te realiseren (zie figuur 2.1). De overwegingen voor de *condensatie-ontvochtigingstechniek* zijn in het deelrapport "Opties voor koelen en ontvochtigen" uiteen gezet [7]. Het belangrijkste argument hiervoor was dat condensatie-ontvochtiging door de combineerbaarheid met de koelfunctie minder investeringen vraagt, dan absorptie-ontvochtiging, waarbij additioneel nog steeds een luchtkoelinstallatie nodig is.

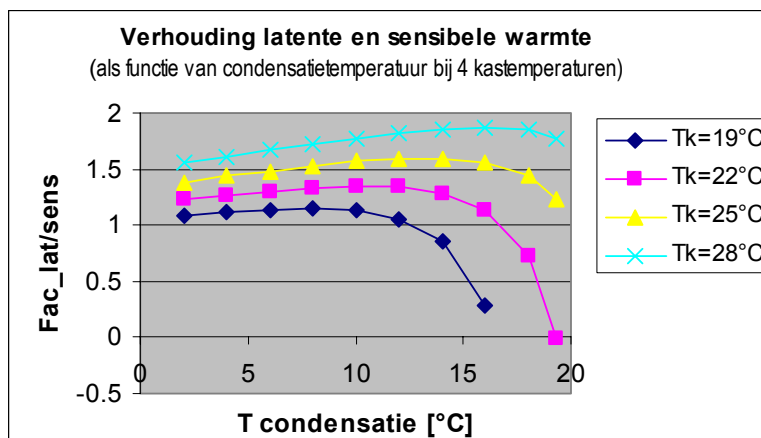
Koude voor koelen en ontvochtigen

Uitgangspunt bij de berekening is de lucht in de LBK af te koelen tot CIRCA 12 °C (hiervoor wordt koud water van CIRCA 7 à 10 °C gebruikt afkomstig van bijvoorbeeld een koelmachine). Hierbij zal een deel van het vocht in de aangezogen kaslucht condenseren (CIRCA 50% uitgaande van intredecondities van 25 °C en 85% RV, 17.1 g/kg droge lucht → 8.8 g/kg droge lucht). De latente warmte die hierbij vrijkomt, wordt opgenomen door het koelwater evenals de voelbare warmte die voor afkoeling van de lucht moet worden onttrokken. De latente en voelbare warmte staan in een bepaalde verhouding tot elkaar, die afhangt van de intrede condities van de lucht (temperatuur, RV) en de terugkoeltemperatuur van de lucht (de laatste wordt in de berekeningen vast op 12°C gesteld). Het zou toeval zijn als de verhouding tussen onttrokken warmte ten behoeve van het koelen van de kas en die ten behoeve van het ontvochtigen precies goed is. Vaak zal er meer ontvochtigd moeten worden dan gekoeld (bijvoorbeeld in de vroege ochtend, als de buitentemperatuur nog laag is, en de vochtproductie onder invloed van de opkomende zon al flink op gang is gekomen). Als in dit geval de lucht tot 12 °C is afgekoeld (om voldoende te ontvochtigen), zal de retourlucht daarna weer wat moeten worden herverwarmd om uiteindelijk de gewenste kastemperatuur te realiseren (of te houden). Ook kan het voorkomen dat er meer gekoeld moet worden dan ontvochtigd. Indien dat zo is, dan zal de retourlucht wat droger zijn dan vereist is ten aanzien van de maximaal toelaatbare kasluchtvochtigheid. Desgewenst kan de lucht in die situatie worden herbevochtigd, waarbij en passant ook nog een stuk verdampingskoeling wordt gerealiseerd; hierdoor hoeft er in dat geval in principe iets minder diep door de 'koud-oppervlakkoeler' te worden gekoeld als uit hoofde van de totale koelvraag nodig zou zijn. Herbevochtiging is echter verder niet meegenomen in deze studie.

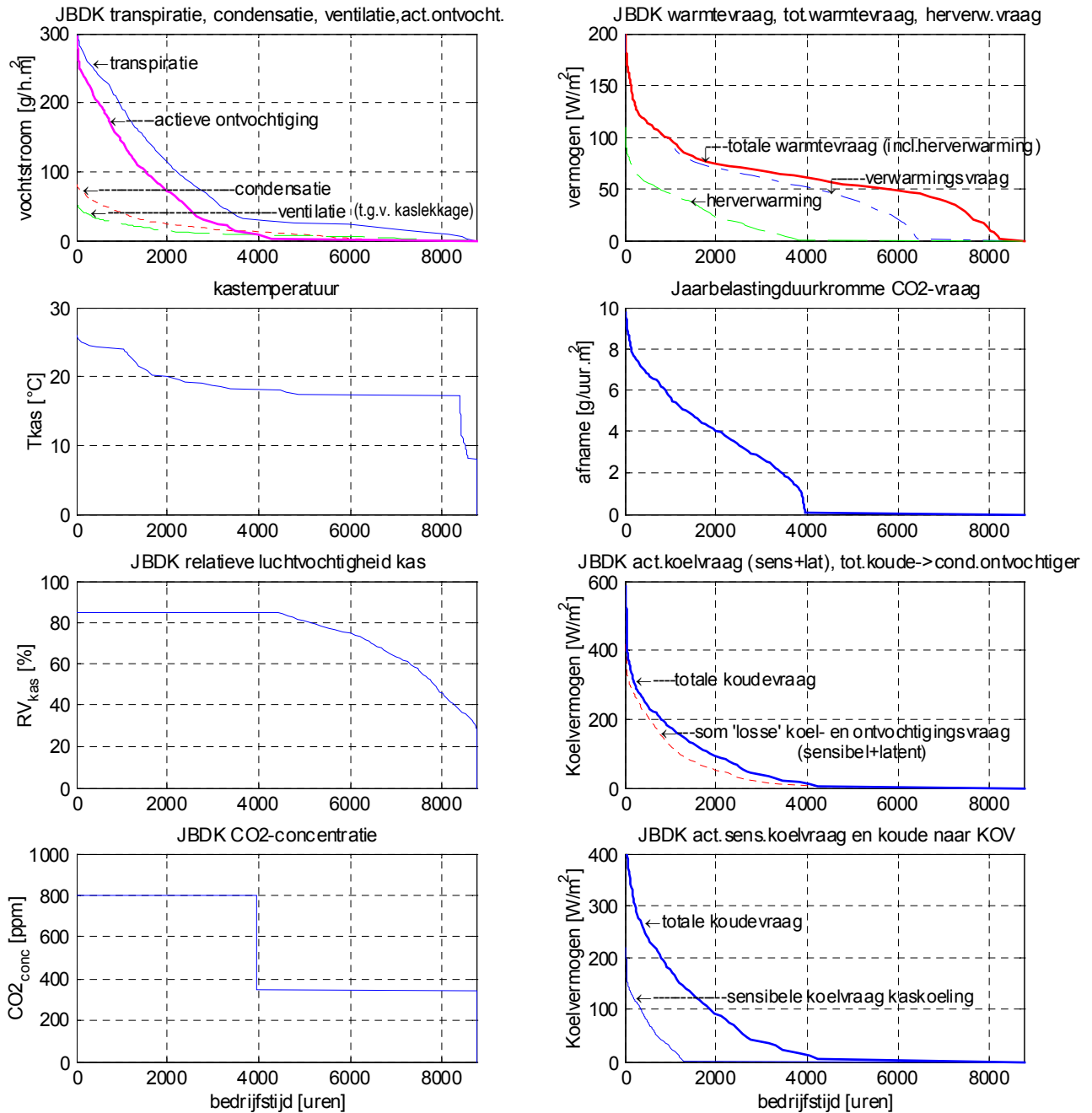
Bij de berekening van de benodigde koude voor een gesloten kas met SimKas spelen zowel de temperatuurregeling als de vochtregeling een rol. Het komt er in feite op neer dat de ventilatie van de conventionele kas wordt vervangen door een actief koel- en (condensatie)ontvochtigingssysteem. Als de temperatuur in de kas hoger mocht worden dan de zogenaamde 'ventilatietemperatuur' dan wordt de koeling ingeschakeld, en wel zover dat de kastemperatuur op de ventilatietemperatuur wordt gehouden. Zou de relatieve vochtigheid groter worden dan het RV-setpoint (RV-grenswaarde), dan wordt de ontvochtiging ingeschakeld (wat in dit geval dezelfde installatie is als de koeling), en wel zover dat de RV de grenswaarde niet overschrijdt. Daalt de temperatuur van de lucht hierbij verder dan de kastemperatuurregeling vereist, dan wordt de lucht weer herverwarmd.

De koeling en ontvochtiging vinden plaats door de lucht in contact te brengen met een koudoppervlak. Aan de lucht wordt dan zowel voelbare als latente warmte onttrokken. De verhouding tussen latente en voelbare warmte is niet vast, maar hangt af in het bijzonder af van de temperatuur en de relatieve luchtvochtigheid van de kaslucht en van hoever de lucht wordt afgekoeld. Het verband is grafisch weergegeven in figuur 2.7.

Figuur 2.8 geeft de jaarbelastingduurkrommen van de vochthuishouding en de warmte-, CO₂-, koudevraag en herverwarmingsvraag van de geheel gesloten kas voor een tomatenteelt met condities zoals genoemd in tabel 2.2. De elektriciteitsbehoefte kan in deze fase nog niet worden geraamd, omdat deze sterk afhangt van hoe het energievoorzieningsconcept er uit ziet, dat in de warmte-, koude en CO₂-vraag moet voorzien. We zullen hierop in hoofdstuk 3 nader in gaan.



Figuur 2.7 Verhouding tussen latente warmte en sensibele warmte bij simultane koeling en ontvochtiging van kaslucht als functie van de condensatietemperatuur voor 4 waarden van de kastemperatuur. De relatieve vochtigheid van de intredende kaslucht is in alle gevallen 85%.



Figuur 2.8 Jaarbelastingduurkrommen van verwarming, koeling en ontvochtiging van een geheel gesloten kas met een tomatenteelt. In de derde JBDK in de rechter kolom is de “som losse koel- en ontvochtigingsvraag” respectievelijk “totale koudevraag” gegeven. De eerste is gedefinieerd als de som van koude die in de KOV nodig is om een zodanige hoeveelheid lucht af te koelen (tot 12 °C) dat de kastemperatuur op het ‘ventilatiesetpoint’ blijft plus de koude nodig om (een andere hoeveelheid lucht) zodanig te ontvochtigen (uit te koelen bij 12 °C) dat de RV in de kas de 85% niet overschrijdt. Beide verschijnselen treden echter gelijktijdig op en zijn niet onafhankelijk van elkaar. De “totale koudevraag” omvat ook de extra koude die nodig is om de bij relatief grote ontvochtiging vereiste ‘extra’ hoeveelheid lucht af te koelen (die later weer wordt herverwarmd), en die bij grote zonne-instraling en relatief lage ontvochtigingsbehoefte nodig kan zijn, om een bepaalde extra hoeveelheid lucht te koelen ter voorkoming dat de maximum toegelaten temperatuur wordt overschreden. De piek in de totale koudevraag - die slechts kortstondig voorkomt - bedraagt ca 585 W/m² .

Uit de derde JBDK in de rechter kolom van figuur 2.8 dat de maximale totale koudevraag CIRCA 585 W/m² bedraagt. Dit piekvermogen komt echter maar zeer kortstondig voor, zodat het de vraag is of het energievoorzieningsconcept in kwestie wel op dit vermogen moet worden gedimensioneerd (zie hiervoor paragraaf 3.1).

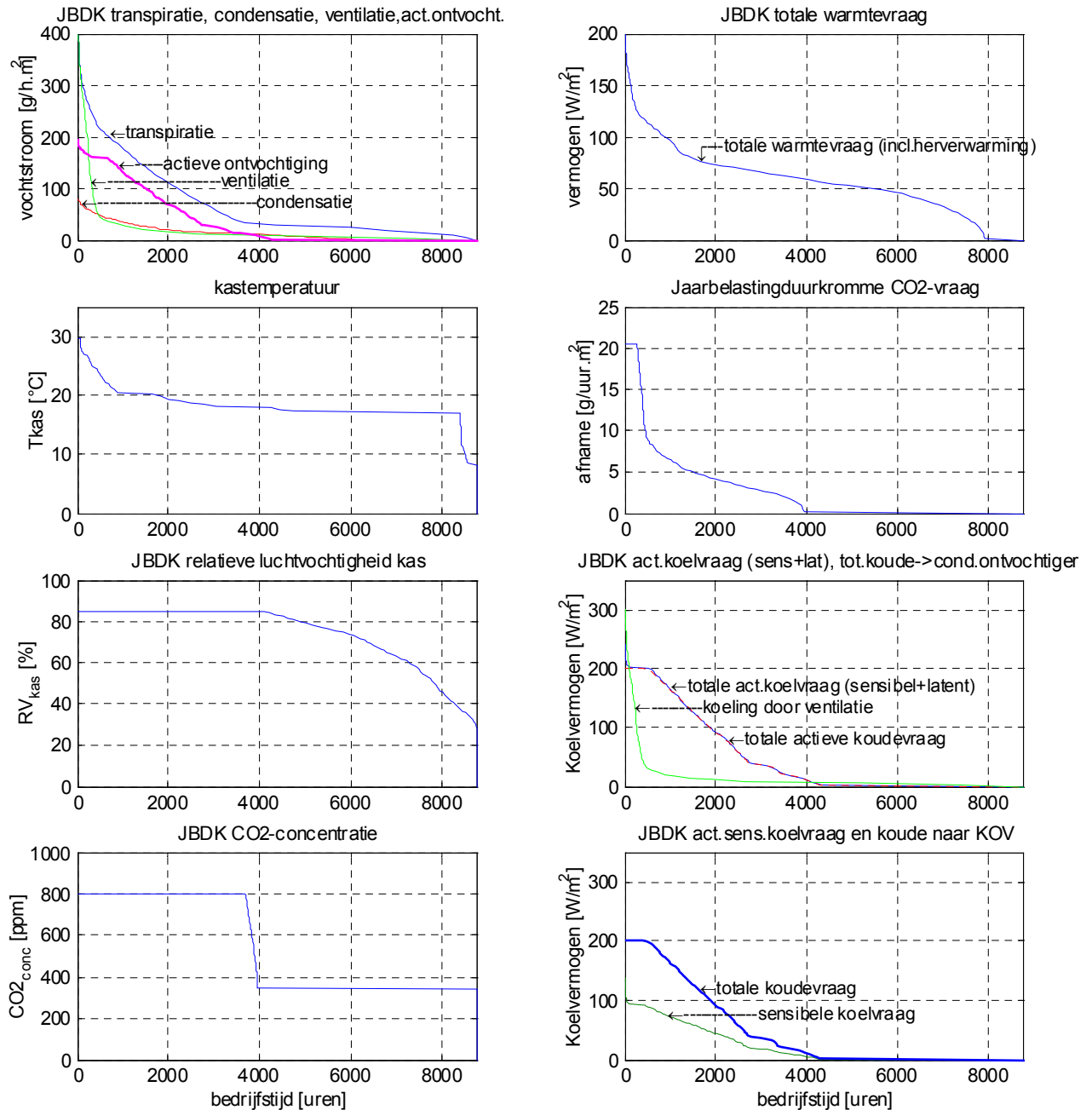
2.3.4 **Warmte-, koude- en CO₂-vraag bijna gesloten kas**

Als het koelvermogen gelimiteerd is, kunnen er situaties optreden waarbij de benodigde ontvochtiging en/of koeling niet meer geheel kunnen worden gerealiseerd. In dat geval worden de ramen geopend om additioneel te ontvochtigen / koelen. Afhankelijk van het beschikbare koelvermogen, zal deze situatie een bepaald aantal uren per jaar optreden.

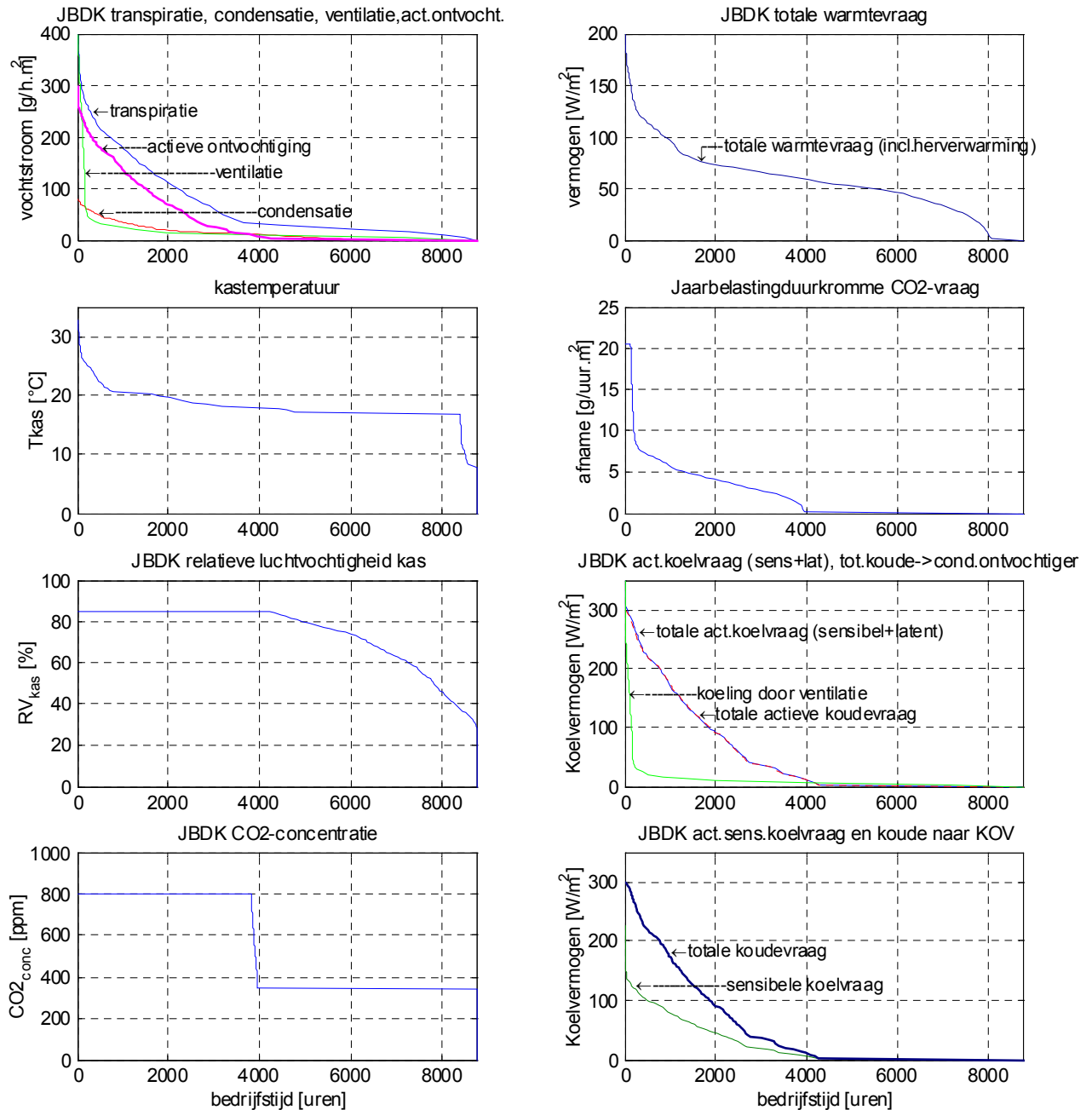
In deze paragraaf zijn de resultaten gegeven van de warmte-, koude- en CO₂-vraagberekeningen van een bijna gesloten kas, waarbij het koelvermogen wordt beperkt op respectievelijk 200 en 300 W/m² (de motivatie van deze vermogens komt aan de orde in paragraaf 3.2). De jaarbelastingduurkrommen zijn gegeven in figuur 2.9 respectievelijk 2.10. Indien de actieve koeling/ontvochtiging in capaciteit tekortschiet, komt de ventilatieregeling in die via de dakramen additionele koeling en/of ontvochtiging probeert te realiseren.

Aan de ventilatieterm in de JBDK linksboven en in die van de CO₂-vraag, is duidelijk het effect te zien van het actief worden van de ventilatieregeling. Bij de met maximaal 200 W/m² gekoelde kas is de ventilatie circa 400 uur actief, bij de 300 W/m² versie circa 200 uur. Het natuurlijke koelvermogen (latente+voelbare warmte) van de ventilatie loopt op tot boven de 300 W/m².

De jaarvraag naar koude, warmte en CO₂ van de twee bijna gesloten kasvarianten en die van de geheel gesloten kas variant (zie paragraaf 2.3.3) en referentiesituatie (paragraaf 2.3.2) worden onderling vergeleken in de volgende paragraaf.



Figuur 2.9 Jaarbelastingduurkrommen van een bijna gesloten kas met een koelcapaciteit van maximaal 200 W/m². In de JBDK van de koelvraag is ook de warmteafvoer door ventilatie opgenomen (bestaande uit zowel latente als sensibele warmte).



Figuur 2.10 Jaarbelastingduurkrommen van een bijna gesloten kas met een koelcapaciteit van maximaal 300 W/m². In de JBDK van de koelvraag is ook de warmteafvoer door ventilatie opgenomen (bestaande uit zowel latente als sensibele warmte).

2.3.5 Vergelijking utilitybehoefte referentie en (bijna) gesloten kas

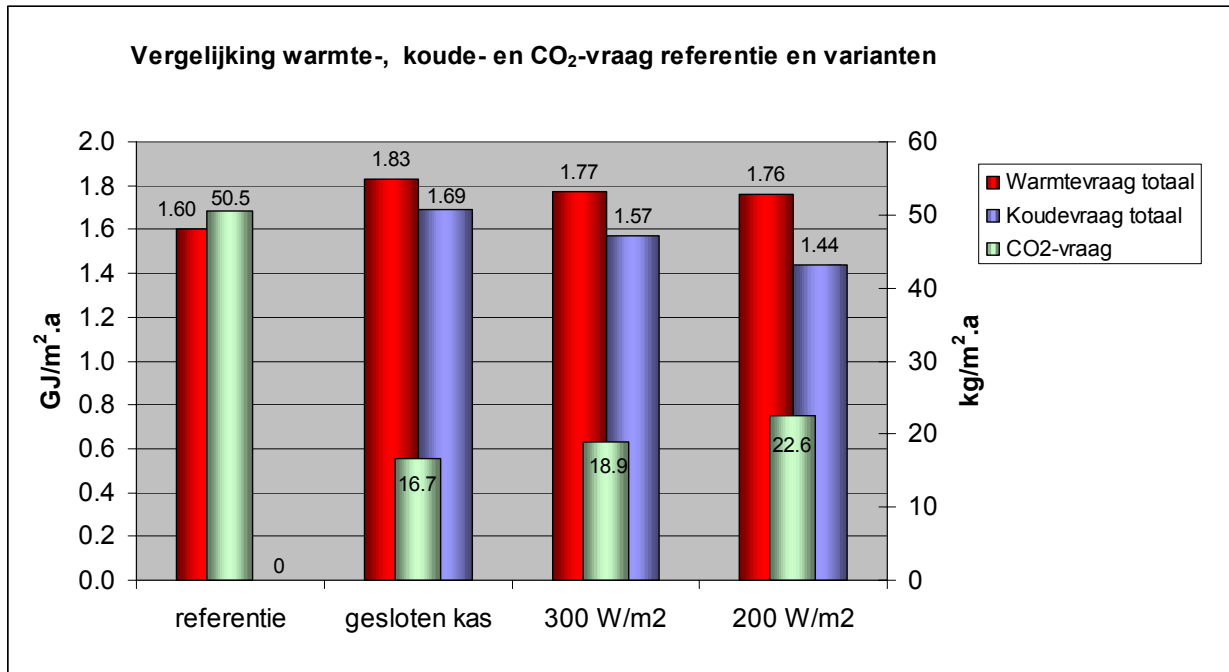
De verschillende warmte-, koude- en CO₂-vragen en ontvochtigingsvragen van de verschillende varianten zijn samengevat in tabel 2.4 en figuur 2.11.

Tabel 2.4 Jaarvraag koude, warmte en CO ₂ ; totale transpiratie gewas en actieve ontvochtiging						
waarden per m ² kas						
Teelt: tomaat						
Grootheid	eenheid	referentie	gesloten kas	max.koeling 300 W/m ²	max.koeling 200 W/m ²	Opmerking
Koudevraag totaal	GJ/m ² .a %	0	1.69 100%	1.57 93%	1.44 85%	dit is de bruto warmteoogst
Netto warmteoogst	GJ/m ² .a	0	1.28	niet expliciet bepaald		na aftrek herverwarming
Warmtevraag totaal	GJ/m ² .a %	1.60 100%	1.83 114%	1.77 111%	1.76 110%	incl. herverwarming
CO ₂ -vraag	kg/m ² .a %	50.5 100%	16.7 33%	18.9 37%	22.6 45%	
Transpiratie gewas	l/m ² .a %	633 100%	590 93%	567 90%	571 90%	
Actieve ontvochtiging	l/m ² .a %	0	361 61%	342 60%	315 55%	perc.van transpiratie

De koudevraag is bij de geheel gesloten kas uiteraard het hoogste. Indien de koeling wordt begrensd op 300 respectievelijk 200 W/m², dan daalt de koudebehoefte met circa 7 respectievelijk 15%. Een eventueel resterende deel van de koudepieken (of liever gezegd koel- en ontvochtigingsbehoeftepieken) worden bij begrensde koeling ingevuld door ventilatie.

Aan de totale warmtevraag valt op dat deze voor de gesloten en bijna gesloten kassen hoger ligt dan bij de conventionele referentiekas. De reden hiervan is dat een deel van de gekoelde lucht - in het geval dat er relatief veel ontvochtigingsbehoefte is - moet worden herverwarmd om te voorkomen dat de kastemperatuur te laag wordt. Deze herverwarmingsbehoefte is bij de geheel gesloten kas circa 22% van de totale warmtevraag. (Voor de andere varianten is de herverwarming vanwege een iets andere berekeningswijze niet expliciet berekend). Als herverwarming niet nodig zou zijn geweest, zou de warmtevraag van de gesloten en bijna gesloten kassen door de verminderde ventilatie lager gelegen hebben.

De CO₂-vraag ligt bij de gesloten en bijna gesloten kassen aanzienlijk lager dan bij de conventioneel geventileerde kas. Bij de geheel gesloten kas is nog circa 33% van de referentiehoeveelheid CO₂-hoeveelheid nodig. Bij 300 W/m² koeling is dat circa 37% en bij 200 W/m² circa 45%.



Figuur 2.11 Vergelijking tussen warmte-, koude- en CO₂-vraag (per jaar per m² kas) van referentie, gesloten kas en bijna gesloten kas met 300 respectievelijk 200 W/m² actief koelvermogen.

Verder valt op dat de verdamping van het gewas (transpiratie) bij de (bijna) gesloten kassen circa 7 à 10% lager ligt dan bij de normaal geventileerde kas. Dit komt omdat de (bijna) gesloten kassen gemiddeld iets vochtiger zijn, dan de normaal geventileerde kas (het RV=85%-plateau is bij de geheel gesloten kas - zie figuur 2.8 - circa 800 uur per jaar langer dan dat van de conventionele kas - zie figuur 2.6).

Het verschil tussen de transpiratie en de actieve ontvochtiging wordt afgevoerd door condensatie tegen het kasdek (dit gebeurt vooral als het buiten koud is, totaal circa 117 à 135 l/m².a), en voor de rest door ventilatie. Ook bij de geheel gesloten kas is er een kleine ventilatiebijdrage, omdat een kas nooit geheel lekvrij is (circa 92 l/m².a, bij een aangenomen res-terend ventilatievoud van 0.5 bij een windsnelheid van 4 m/s).

De vraag naar warmte, koude en (eventueel) CO₂ - op elk moment in het jaar - zal door het toe te passen energievoorzieningssysteem moeten worden geleverd. Hiervoor is, afhankelijk van de dimensionering van de componenten en de bedrijfsvoeringswijze, een nog vast te stellen hoeveelheid aardgas en elektriciteit nodig. Bij de alternatieve (gesloten en bijna-gesloten kas) systeemvarianten zorgt ook de zon – indirect - voor een bijdrage in de energievoorziening. Op deze materie zal in het volgende hoofdstuk nader worden ingegaan.

3 ENERGIEVOORZIENINGSCONCEPT (BIJNA) GESLOTEN KAS

In dit hoofdstuk wordt het energievoorzieningsconcept van de (bijna) gesloten kas nader besproken en het jaargas- en elektriciteitsverbruik bepaald dat nodig is voor de invulling van de warmte, koude- en (zo mogelijk) de CO₂-vraag. Ter vergelijking wordt ook het gas- en elektriciteitsverbruik van de conventioneel geventileerde referentiekas bepaald.

3.1 uitgangspunten / overwegingen energievoorzieningsconcept

Principe

In paragraaf 2.3 zijn de grootte en kenmerken van de warmte-, koude- en CO₂-vraag bepaald van de gesloten en bijna gesloten kasvarianten. In figuur 2.11 valt op dat de jaarvraag naar koude dezelfde orde-grootte heeft als de warmtevraag. Zoals in het principeschema van figuur 2.1 aangegeven, wordt de koude (op een temperatuurniveau van circa 6-9 °C) gebruikt om een koud oppervlak te creëren waarmee de kaslucht gekoeld en partieel ontvochtigd wordt. De daarbij vrijkomende warmte wordt afgegeven aan de koudwaterstroom, die daarbij opgewarmd wordt (tot bijvoorbeeld circa 16 °C). In principe is deze lage-temperatuurwarmte (LT-warmte), direct of indirect (dat wil zeggen na opslag) te gebruiken door een warmtepomp die deze naar een voor verwarming geschikt temperatuurniveau brengt (bijv. 35 à 45 °C). De aan de warme kant van de warmtepomp vrijkomende warmte kan in een (her)verwarmingsbatterij worden gebruikt om de kaslucht te (her)verwarmen. Doordat er ook hoogwaardige energie aan de warmtepomp wordt toegevoerd, is de warmteproductie van de warmtepomp hoger dan er aan laagwaardige warmte aan de koude zijde is ingestopt. In principe is - afgezien van verliezen - de (als WP bronwarmte) beschikbare hoeveelheid laagwaardige warmte gelijk aan de hoeveelheid die aan de kaslucht is onttrokken (en die op zich zelf weer grotendeels door de zon is toegevoerd, en dus een duurzame oorsprong heeft).

Verhouding warmte- en koudevraag en -productie

Bij een warmtepomp met een gemiddelde COP (= coefficient of performance = verhouding tussen warmteoutput en hoogwaarde energie-input) van 4 (die naar verwachting haalbaar is, zie paragraaf 4.2) betekent dit dat er bij een totale koudevraag van 1.69 GJ/m² voor een gesloten kas met de warmtepomp circa $(4/3) \times 1.69 = 2.25$ GJ/m² warmte kan worden geproduceerd. Dit is circa 23% meer dan de totale warmtevraag inclusief herverwarming (1.83 GJ/m², zie figuur 2.11). In feite betekent dit dat er in deze situatie op jaarbasis een (LT-)warmteoverschot is. Omdat de LT-warmte opgenomen is door de aan de koeler/ontvochtiger toegevoerde koud waterstroom betekent dit ook dat er op jaarbasis een koudetekort is (immers het niet gebruikte 'warme' water is nog niet als WP-bronwarmte gebruikt en dus nog niet teruggekoeld).

In een situatie waarbij er naast een warmtepomp nog andere warmteproductiemiddelen worden gebruikt, komt de situatie nog schever te liggen. Immers alle warmte die anders opgewekt wordt, hoeft niet meer met de warmtepomp te worden geproduceerd, en betekent dus een lager verbruik van LT-bronwarmte. Vanuit het standpunt van maximaal gebruik van de LT-warmte is het dus zaak de warmtepomp zoveel mogelijk in te zetten en een warmtepomp te kiezen met een zo hoog mogelijke COP. Dit laatste punt impliceert dat een absorptiewarmtepomp (met een typische COP van circa 1.6 à 1.7) in dit geval minder geschikt is, omdat deze bij aan elke GJ LT-bronwarmte circa 1.5 GJ hoogwaardige energie moet worden toegevoerd om 2.5 GJ geproduceerde WP-warmte te produceren. Indien de volledige warmtebehoefte met een absorptiewarmtepomp zou worden gedekt, is er een LT-warmteoverschot van circa 57% van de totale 'gewonnen warmte' (= koudebehoefte).

3.2 **Energieproductiesysteem: componentkeuze en componentdimensionering**

3.2.1 **Varianten warmte- en koudeproductie: warmteproductie**

Een zo hoog mogelijke COP met zo min mogelijk addtionale andere warmteproductie wijst in de richting van het gebruik van een *elektrisch aangedreven warmtepomp* (EWP) waarvoor de benodigde elektriciteit wordt ingekocht. Dit zal dan ook één van de alternatieven zijn, waarvan in het vervolg de energetische en economische prestatie zal worden onderzocht. Vanwege de hoge kosten van de voor de EWP-aandrijving benodigde elektriciteitsinkoop is het financieel mogelijk interessanter om de benodigde elektriciteit zelf op te wekken met een eigen *gasmotor*. Het feit dat hierbij extra warmte vrijkomt wordt in eerste instantie op de koop toegenomen. Een voordeel van de warmteproductie van de gasmotor is, dat het grotendeels hoogwaardige warmte betreft. Hiermee kan de geproduceerde warmte van de warmtepomp verder mee in temperatuur worden verhoogd. Ook kan bij een bepaalde minimaal vereiste aanvoertemperatuur door inzet van de WK-warmte de warmtepomp zijn warmte op een lager temperatuur produceren, wat gunstig is voor de COP ervan. De (compressie) warmtepomp in combinatie met een gasmotor is het tweede alternatief dat zal worden onderzocht.

Bij toepassing van warmtepompen is het bedrijfseconomisch vaak niet optimaal om de volledige warmtevraag met de WP in te vullen. Een dimensionering waarbij de WP - eventueel met de warmtebijdrage van een gasmotor - een dekkingsgraad heeft van circa 70 à 80 % van de benodigde warmte en waarbij de restvraag wordt ingevuld met een (per kW goedkopere) ketel, is vaak gunstiger. Daarom zal ook deze variant worden geanalyseerd, en wel bij de koelsituaties waarbij het koelvermogen is gelimiteerd (tot 300 respectievelijk 200 W/m²).

Bedenk dat deze “beperkt koelvermogen-varianten” sowieso waren geïntroduceerd om te besparen op de benodigde investeringen (van met name de koudeproductie en koelcapaciteit in het KOV-systeem). De verschillende te onderzoeken varianten voor wat betreft warmteproductie zijn samengevat in tabel 3.1. De eisen voortkomend uit de invulling van de koudevraag worden hierna behandeld en hebben zeker ook invloed op de uiteindelijke dimensionering van de verschillende systeemcomponenten.

Tabel 3.1: Overzicht hoofdlijnen systeemvarianten voor wat betreft warmteproductie

Variant	target-dekking warmte-behoefte door EWP+GM	'koel-case'	dimensionering warmteproductie-capaciteit ^{*)} W_{th}/m^2	Opmerking
A Alleen EWP	100%	gesloten kas	200 (excl. evt. 5 à 10% spare)	elektriciteit EWP wordt ingekocht
B EWP+gasmotor	100%	gesloten kas	200 (EWP+GM)	elektriciteit voor EWP wordt opgewekt door gasmotor
C EWP+gasmotor + ketel	80%	300 W/m^2 koelvermogen	200 (EWP+GM) > 108 (WP)	elektriciteit voor EWP wordt opgewekt door gasmotor
D EWP+gasmotor + ketel	70%	200 W/m^2 koelvermogen	200 (EWP+GM) > 77 (WP)	elektriciteit voor EWP wordt opgewekt door gasmotor

^{*)} De warmte-afgiftecapaciteit dient minimaal 200 W/m^2 te zijn (zie jaarbelastingduurkrommen figuur 2.5, 2.8, 2.9 en 2.10)

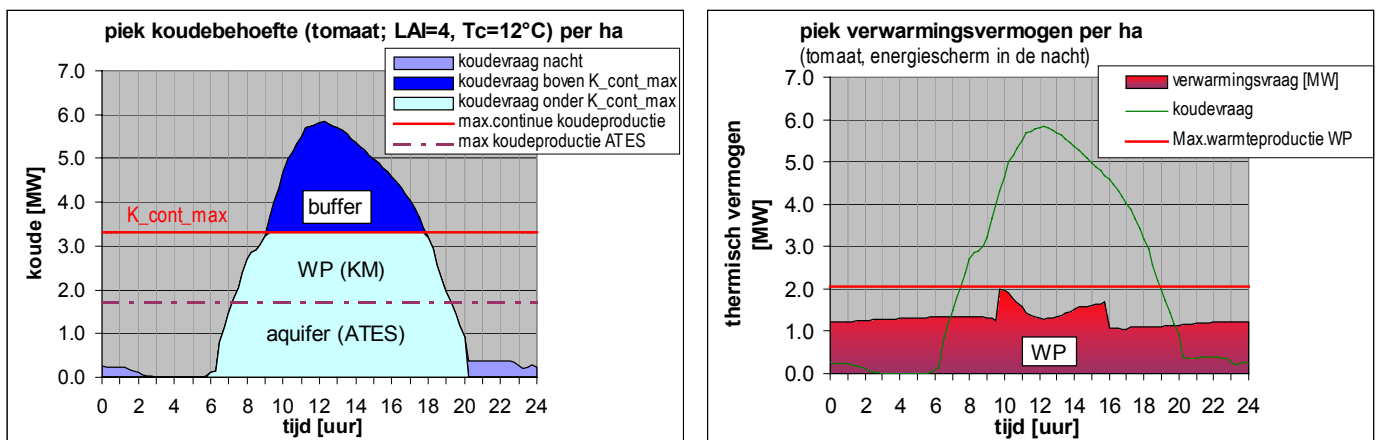
3.2.2 Varianten warmte- en koudeproductie: koudeproductie

De benodigde koude wordt in principe geproduceerd door de koude kant van de warmtepomp². De geproduceerde koude wordt of direct gebruikt in de koel- en ontvochtigingssectie van de luchtbehandelingskast (LBK), of opgeslagen in een koudebuffer, of - indien er geen koudevraag in de kas is - opgeslagen in een ondergrondse warmte/koude-opslagsysteem (ook wel aangegeven met aquifer thermal energy storage, afgekort met ATES), zie ook figuur 2.1. Een tekort aan koude kan bijvoorbeeld worden aangevuld door in de winter middels een luchtgekoelde warmtewisselaar koude aan de buitenlucht te onttrekken. Hierbij wordt in principe de in de zomer geogste zonnearmte weer afgegeven aan de omgeving. Een energetisch fraaiere oplossing is meer koude te produceren met de warmtepomp (of met een additieve warmtepomp). Daar die warmte echter niet meer op het bedrijf nodig is, zou deze aan derden geleverd moeten worden, bijvoorbeeld aan een belendend glastuinbouwbedrijf.

² De warmtepomp is in de hier behandelde energieconcepten dus tevens de koelmachine. De termen koelmachine (KM) en warmtepomp (WP) kunnen in dit rapport door elkaar worden gebruikt. Steeds is echter hetzelfde apparaat bedoeld.

Zo zou dat bedrijf een warmtepomp kunnen bedienen zonder zelf over een warmtebron te beschikken. Dit vergt echter goede afspraken met de collega-tuinder en een goede dimensionering van de extra warmtepomp.

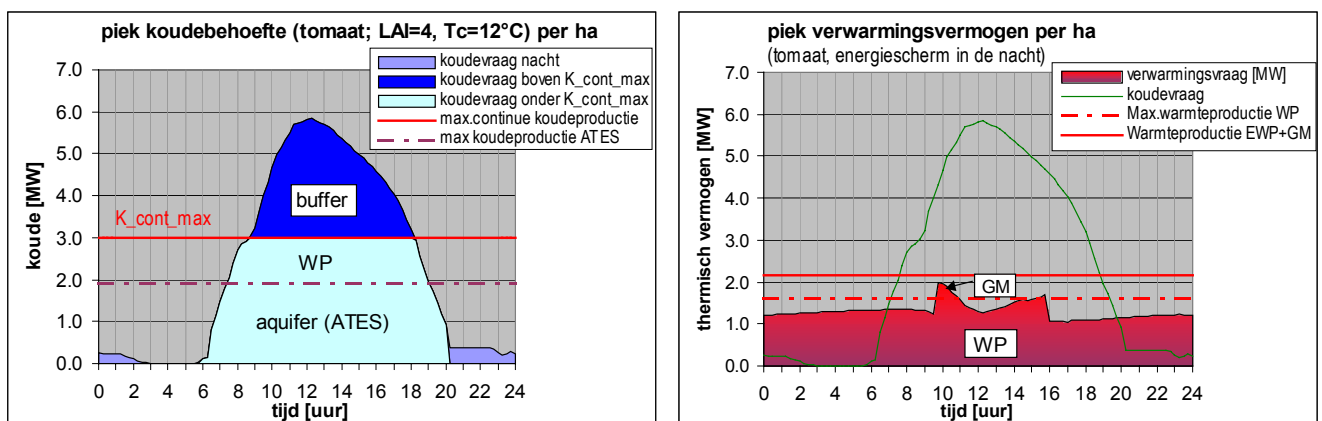
Meer nog dan de dimensionering op de jaarvraag, is de dimensionering op de maximaal optredende momentane koudevraag van belang. Bij de gesloten kas bedraagt de piekvraag circa 585 W/m^2 (zie figuur 2.8). Het verloop van koudevraag op de dag met de grootste behoefte is weergegeven in figuur 3.1. Voor 2 ha is dit circa $9.5 \text{ MW}_{\text{th}}$. In de figuur is ter referentie ook de dag met de grootste warmtevraag opgenomen. Om de kas gesloten te kunnen houden zal in principe de koudepiek van figuur 3.1 moeten kunnen worden geleverd. Als dit momentaan door òf alleen de warmtepomp òf alleen door de ATES (aquifer thermal energy storage) zou moeten gebeuren, dan leidt dit tot grote (en kapitaalintensieve) installaties. Vandaar dat piek verdeeld wordt over de warmtepomp en de ATES, en verder zal hij gedeeltelijk geleverd worden uit een bovengronds (dag/nacht) koudebuffer. Het principe van deze benadering is aangegeven in figuur 3.1 voor de situatie van een gesloten kas met alleen een elektrische warmtepomp als actief warmte- en koudeproductiemiddel.



Figuur 3.1 Maximale dagpiek van koudebehoefte respectievelijk warmtebehoefte van de geheel gesloten kas. In de figuur is tevens de gehanteerde verdeling van de benodigde vermogens over de potentiële warmte- en koudeproductiemiddelen aangegeven voor variant A die alleen een elektrische warmtepomp/koelmachine voor actieve productie heeft. Daarnaast beschikt het systeem echter ook over een lange termijn aquifer-gebaseerd warmte/koudeopslagsysteem (ATES) en een korte-termijn koudeopslagbuffer, waaruit eerder opgeslagen koude kan worden onttrokken. De rode lijn in de rechter figuur representeert het gekozen maximum warmteproductievermogen (capaciteit) van de warmtepomp. De onderbroken paarse lijn in de linker figuur is het maximale koudeleveringsvermogen van de aquifer. De rode lijn in die figuur is het vermogen dat door ATES en WP (als koelmachine) - continu - kan worden geleverd. De rest van de koude wordt uit een buffer geleverd, die daartoe voldoende moet zijn gevuld.

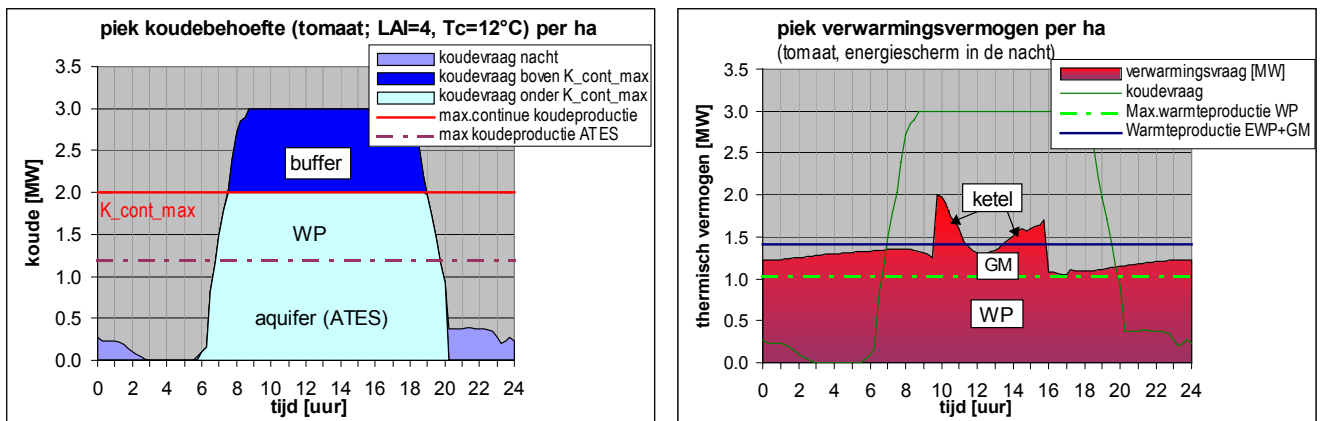
Bij deze systeemvariant wordt de benodigde warmte volledig geleverd door de warmtepomp. De WP moet volledige warmtevraag kunnen leveren (circa 2 MW/ha). In deze situatie is een WP-vermogen van 2.05 MW/ha gekozen. Dimensionering op de warmtevraag bepaalt ook - uitgaande van de verwachte COP voor de verwachte bedrijfssituatie (circa 4.5) - hoeveel koude de warmtepomp in zijn hoedanigheid als koelmachine aan de koude zijde ongeveer kan produceren (circa 1.6 MW). De rest van de koude (boven de lijn K_{cont_max}) wordt direct uit het ATES geleverd (tot 1.7 MW) en deels (circa 27%, maximaal 2.6 MW/ha) uit een bovengronds buffer (dat 's nachts dient te worden gevuld uit de koude bron van de aquifer en/of middels de warmtepomp/koelmachine). De buffergrootte dient te zijn afgestemd op energie-inhoud van het bovenste deel van de piek en op de maximale koudeleveringscapaciteit van het ATES en bedraagt in dit geval circa 1550 m³/ha. Hierin wordt bij een temperatuurverschil tussen warme en koude zijde van 8 °C, maximaal circa 14.4 MWh koude opgeslagen.

Voor variant B (EWP+GM voor gesloten kas) wordt de benodigde warmte behalve door de EWP deels ook door de gasmotor geleverd. De EWP kan daardoor iets kleiner worden gedimensioneerd (circa 1.6 MW warmte en circa 1.24 MW koude). Hierdoor daalt in principe de totale continue koudeproductiecapaciteit en dient er meer in het dag/nachtbuffer te worden opgeslagen. Bij een maximaal aquiferkoudestroom van 1.7 MW (en rekening houdend met de kleine koudevraag in de nacht) kan de buffer dan in de nacht niet meer voldoende worden gevuld. Om deze reden is het maximale koudevermogen van de aquifer iets groter gekozen (1.9 MW) waardoor de buffer ook weer iets kleiner kan worden (de resulterende grootte is 1750 m³/ha). De dimensionering van deze situatie is geschetst in figuur 3.2.

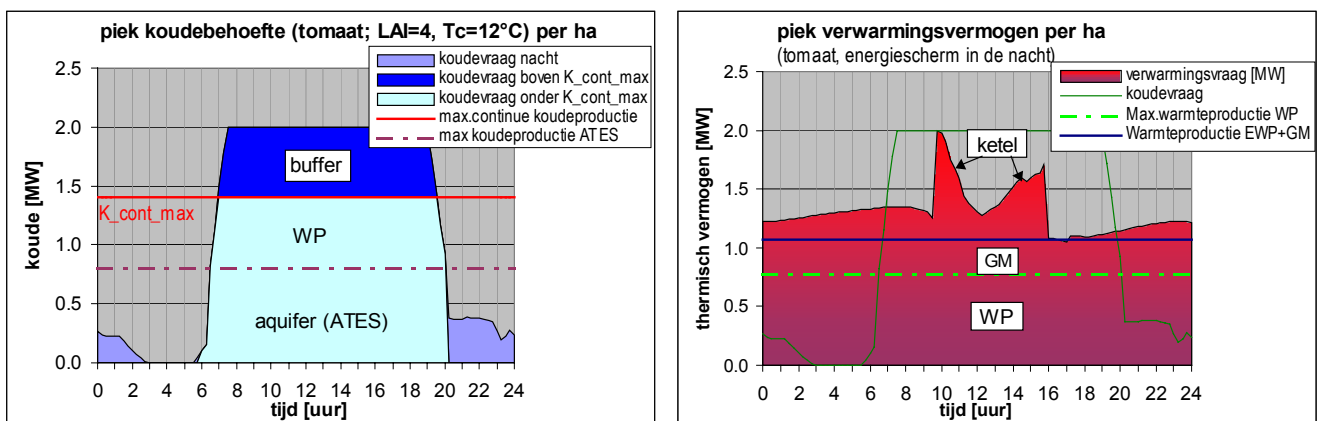


Figuur 3.2 Maximale (dag)pieken van koude respectievelijk warmte voor geheel gesloten kas. In de grafieken is de dimensionering van EWP, GM, ATES en buffer voor situatie B aangegeven (= situatie A met extra gasmotor voor elektriciteitsproductie van EWP).

Het vermogen van de gasmotor wordt zo groot gekozen, dat deze in de elektriciteitsvraag van de warmtepomp (circa 375 kWe/ha) voorziet plus in de basislast van de elektriciteitsvraag van de benodigde pompen en ventilatoren (deze is ingeschat op circa 100 kWe/ha). Bij de varianten met een beperkt koudevermogen wordt gepoogd zoveel mogelijk op kapitaalkosten te besparen. Om die reden wordt de maximale (EWP+GM) warmteopwekking kleiner gekozen dan de piekwarmtevraag. Het resterende deel van de pieken wordt ingevuld met een ketel, die qua investering per kW veel goedkoper is. De warmtepomp en ATES dienen echter nog wel zo groot te zijn, dat ze samen met de levering uit de koudebuffer de koudepiek kunnen invullen. De in dit rapport onderzochte invulling van variant C (maximaal 300 W/m² koude) en D (maximaal 200 W/m² koude) is gegeven in figuur 3.3 respectievelijk 3.4.



Figuur 3.3 Invulling koude- en warmteproductievermogen bij variant C (max 300 W/m² koelvermogen).



Figuur 3.4 Invulling koude- en warmteproductievermogen bij variant D (max. 200 W/m² koelvermogen).

In tabel 3.2 zijn voor elk van de 4 varianten zijn de geselecteerde capaciteiten van de hoofdcomponenten van het energievoorzieningsconcept samengevat.

Tabel 3.2 Overzicht dimensionering systeemvarianten voor warmte- en koudeproductie

Variant		EWP (W/K) *) W_{th}/m^2	GM W_{th}/m^2 W_e/m^2	ATES (koude) W_{th}/m^2	koude buffer m^3/ha	ketel W_{th}/m^2	Opmerking
A	Alleen EWP	W	205**)			0	elektriciteit EWP wordt ingekocht
	gesloten kas	K	160	170	1550		
B	EWP+gasmotor	W	160	60		0	elektriciteit EWP wordt opgewekt door gasmotor
	gesloten kas	K	124.5	48***)	190	1750	
C	EWP+GM+ketel	W	103	38		87	elektriciteit EWP wordt opgewekt door gasmotor
	Pcold: 300 W/m ²	K	80	30***)	120	1150	
D	EWP+GM+ ketel	W	77	30		120	elektriciteit EWP wordt opgewekt door gasmotor
	Pcold: 200 W/m ²	K	60	24***)	80	780	

*) W = warmte, K = koude

**) De warmte-afgiftecapaciteit dient minimaal 200 W/m² te zijn (zie jaarbelastingduurkrommen figuur 2.5, 2.8, 2.9 en 2.10)

***) Elektrisch vermogen van gasmotor (dit vermogen is wat groter gekozen dan nodig is voor alleen de EWP, en dient ook ter dekking van het elektriciteitsverbruik van de fans in de LBK's en de diverse pompen (basislast).

3.3 Warmte- en koude-afgiftesysteem

De geproduceerde warmte en koude moet gelijkmatig in de kas worden afgezet. Een groot deel van de warmte- en koudeproductie vindt plaats middels een warmtepomp/koelmachine. Deze werkt optimaal bij een zo klein mogelijk temperatuurverschil. De koude dient te worden geproduceerd op een temperatuurniveau van circa 5 à 8 °C (om lucht ten behoeve van koeling/ontvochtiging te kunnen afkoelen tot circa 12 °C). Aan de warme kant wordt de warmte bij voorkeur op een zo laag mogelijk temperatuurniveau weer afgegeven. Bij herverwarming wordt gedacht aan 15 à 35 °C en bij alleen verwarming aan 25 à 45 °C afhankelijk van de benodigde warmtevraag.

Zoals reeds in paragraaf 2.1 en [4] aangegeven en gemotiveerd, is er in deze studie voor gekozen om de warmte en koude aan de lucht over te dragen in luchtbehandelingskasten (LBK's). Het belangrijkste argument hiervoor was de combineerbaarheid van de functies koelen, ontvochtigen en (her)verwarmen (KOV) in één systeem. Consequentie van deze keuze is dat om de kaslucht in contact te brengen met de koel- resp. verwarmingsbatterijen in de LBK ze geforceerd moet worden aangezogen en weer teruggeblazen.

Op de exacte details van de inpassing van het KOV-systeem en afgiftesysteem in de kas wordt in dit onderdeel van de studie niet ingegaan (dit is bij gebleken haalbaarheid gepland in deel 3 van de studie).

Wel zijn er ten behoeve van de energetische en economische analyse van de onderhavige studie reeds een aantal principekeuzen gemaakt van een technisch mogelijk systeem (het systeem is schematisch geschetst in figuur 2.1), Een aantal belangrijke aspecten hiervan wordt hieronder kort vermeld:

- Er wordt uit gegaan van een aantal (bijvoorbeeld 6 à 8 stuks) grote LBK's die aan weerszijden tegen de gevels van de kas (aan de kopse zijden) worden opgesteld.
- Langs de gevels worden luchttransportkanalen geplaatst voor aanvoer respectievelijk afvoer van lucht.
- Lucht wordt zo hoog mogelijk in de kas via openingen in de aanvoerkanalen aangezogen (maar bij toepassing van een scherm juist onder het scherm).
- Loodrecht op de transportkanalen worden luchtverdeelslangen bevestigd waarmee de behandelde lucht weer in de kas wordt geblazen. Om onderschepping van licht te voorkomen worden de slangen onder de teeltgoten bevestigd. Afhankelijk van de benodigde hoeveelheid lucht wordt één slang per rij of per dubbele rij gemonteerd.
- Om een goede menging van de behandelde lucht met de omringende lucht te verkrijgen, wordt de lucht via gaatjes met een bepaalde snelheid uitgeblazen. De uitgeblazen lucht 'sleurt' omgevingslucht mee en vermengt zich daardoor snel met deze lucht. (Voor een hoog inducerende toevoer is een geschikt gatenpatroon vereist.)
- Hoge snelheden rondom het product moeten worden voorkomen. Door de hoge inductie wordt de ingeblazen lucht snel afgeremd en opgemengd met de omgevingskaslucht.
- Via dit luchtdistributiesysteem wordt een goede horizontale verdeling van de behandelde lucht in de kas verwacht. Om ook een goede verticale verdeling te krijgen is een hoge inductie nodig en een goede uitblaasrichting (een en ander afhankelijk van de situatie in kwestie, bijvoorbeeld breedte van de goot, enkele of dubbele goot, en dergelijke).
- Bij een geheel gesloten kas is een maximum luchtdebiet van circa 500 000 m³/h per ha nodig (uitgaande van een piekwarmte-onttrekking van 585 W/m² (bij koelen en ontvochtigen van lucht van 25 °C, RV=85% naar 12 °C, RV=100%). Bij 300 W/m² koelvermogen kan uitgaande van dezelfde condities worden volstaan met een kleiner debiet (circa 260 000 m³/h). Voor verwarmen zou voor het toevoeren van het piekvermogen van 200 W/m² (bij verwarmen van lucht van 18 naar 35 °C) circa 338 000 m³/h per ha nodig zijn. In tabel 3.3 zijn voor een aantal verschillende kascondities en koel-/ontvochtigingsvermogens de benodigde luchtdebieten weergegeven. Het valt op dat met name wanneer bij lagere (kas)temperatuur gekoeld en ontvochtigd moet worden het benodigde debiet fors oploopt.
- De koel-/ontvochtigingspiek van 585 W/m² komt maar zeer weinig voor (zie jaarbelastingduurkromme figuur 2.8). Het lijkt in dat geval acceptabel de luchttemperatuur naar 25 °C op te laten lopen. Voor de gesloten kas is dus een luchtdebiet van 500 000 m³/h per ha voldoende om de te onttrekken piekwarmte te transporteren naar de LBK's.

Tabel 3.3 Luchtdebiet per ha bij verschillende condities en gevraagde vermogens voor koelen/ontvochtigen respectievelijk verwarmen. T_{in} is de temperatuur waarmee de lucht de LBK binnentreedt (\approx kasluchttemperatuur).

Functie	Vermogen W/m ²	T_{in} °C	RV_{in} %	T_{uit} °C	RV_{uit} %	luchtdebiet m ³ /h per ha	ventilatievoud [h ⁻¹] (bij 4m kashoogte)
Koelen + ontvochtigen	585	25	85	12	100	501 000	12.5
Koelen + ontvochtigen	585	24	85	12	100	560 000	14
Koelen + ontvochtigen	585	22	85	12	100	720 000	18
Koelen + ontvochtigen	300	25	85	12	100	257 000	6.4
Koelen + ontvochtigen	300	22	85	12	100	369 000	9.2
Koelen + ontvochtigen	300	20	85	12	100	501 000	12.5
Koelen + ontvochtigen	200	20	85	12	100	334 000	8.4
Verwarmen	200	18	85	35	31.2	338 000	8.4
Verwarmen	200	18	85	40	23.7	260 000	6.5

- Bij een op 300 W/m² begrensde koel-/ontvochtingsvraag is, er van uitgaande dat een kastemperatuur van circa 22.5 °C acceptabel is bij het ontvochtigen, een debiet van circa 340 000 m³/h nodig. Hiermee kan ook bij lage temperatuur (tot maximaal 35 °C bij 200 W/m²) worden verwarmd! Indien ontvochtiging bij 25 °C nog acceptabel is, en verwarming van het piekvermogen bij 40 °C inblaastemperatuur, dan is 260 000 m³/h per ha voldoende om de optredende voelbare en latente warmtestromen (300 W/m² koelen/ontvochtigen, 200 W/m² verwarmen) te transporteren. Om kosten te besparen wordt voor de laatste optie gekozen.
- Bij de 200 W/m² koelvermogenvariant wordt dezelfde dimensionering gekozen, omdat in dit geval hetzelfde verwarmingsvermogen vereist is en bij een zelfde maximum inblaas-temperatuur van 40 °C hetzelfde luchtdebiet nodig is.
- Het voordeel van een lager luchtdebiet is, behalve de lagere investering ook het feit, dat er minder hulpenergie nodig is voor het rondpompen van dit debiet. Een nadeel is het feit dat bij het verwarmen een hogere luchttemperatuur nodig is, waardoor de warmtepomp op een hoger temperatuurniveau moet worden bedreven. Hierdoor daalt zijn COP, en zal hij derhalve meer elektrische aandrijfenergie consumeren.
- Ook bij het bedrijven van de installatie op deellast, dient bij de keuze lager temperatuurverschil of lager debiet met de in het vorige punt genoemde energetische consequentie rekening te worden gehouden. In de inzetstrategie van de productiemiddelen moet een geschikt compromis worden gevonden tussen E-verbruik van de fans in de LBK's en het E-verbruik van de warmtepomp.

3.4 Invulling CO₂-vraag

De wijze waarop in de benodigde hoeveelheid CO₂ wordt voorzien is, is afhankelijk van de variant (zie tabel 3.4).

Tabel 3.4 CO₂-voorziening systeemvarianten

Variant	CO ₂ -voorziening	Opmerking
A gesloten kas met EWP	zuivere CO ₂ -toediening vanuit tank	huren van tank met regelpaneel
B gesloten kas met EWP+GM	gasmotor *)	rookgasreiniger nodig
C 300 W/m ² koeling met EWP+GM+ketel	gasmotor *) **)	rookgasreiniger nodig
D 200 W/m ² koeling met EWP+GM+ketel	gasmotor *) **)	rookgasreiniger nodig

*) bij een substantieel tekort wordt dit aangevuld met zuivere CO₂ vanuit een tank

***) bij variant C en D zou eventueel ook CO₂ vanuit de ketel kunnen worden geleverd. Op basis van de jaarbelasting durkrommen en de gekozen componentvermogens bestaat echter de verwachting dat de ketel maar een klein aantal uren zal bijspringen, waardoor deze voor CO₂ dosering minder geschikt is. Bovendien draait de ketel vooral in de winter als het kasdek gesloten blijft en de CO₂-vraag relatief gering is.

3.5 Warmte-/koude-opslag

In alle 4 systeemvarianten is er sprake van drie systemen voor warmte- c.q. koude-opslag (zie ook figuur 2.1). Ze worden hieronder kort besproken.

1. *Koudebuffer (dag/nacht)*: de functie van deze buffer is het reduceren van het benodigde (relatief dure) permanente koudeproductievermogen (bedoeld is de koelmachine/warmtepomp en de koude bron van het ondergrondse energieopslagsysteem). De buffer kan tijdelijk koude leveren en daarmee een deel van vraagpieken invullen. Functie en dimensionering zijn al uitgebreid aan de orde geweest in paragraaf 3.3.2.
2. *Warmtebuffer (dag/nacht)*. In het warme deel van het jaar is overdag vaak behoefte aan ontvochtiging en koeling en 's nachts nog aan verwarming. Indien voor de productie van de koude de koelmachine/warmtepomp wordt ingezet, dan wordt hierbij warmte geproduceerd. Wanneer deze niet (of niet geheel) nodig is voor herverwarming van de lucht wordt ze opgeslagen in een bovengronds dag/nachtbuffer, waardoor ze in de nacht alsnog nuttig kan worden gebruikt worden voor verwarming. Zodra de buffer vol is, wordt het overschot opgeslagen in de ondergrondse opslag (zie hieronder). Wat betreft het volume kan worden opgemerkt, dat dit groter moet zijn dan bij conventionele hoge-temperatuur verwarmingssystemen gebruikelijk is (circa 200 à 250 m³/ha i.p.v. 100 m³/ha).

De reden hiervan is, dat het temperatuurverschil tussen warm en koud water in de buffer bij het onderhavige lage-temperatuursysteem ongeveer de helft kleiner is dan bij HT-systemen gangbaar is.

3. *Ondergrondse lange-termijn warmte- en koudeopslag (seizoensopslag)*, ook wel ATES genoemd (aquifer thermal energy storage). Dit systeem bestaat uit een ondergrondse watervoerende zandlaag (aquifer), waarin op enige afstand 2 bronnen zijn aangebracht (doublet), een zogenaamde koude en warme bron. Uit de koude bron wordt in de zomer koud water opgepompt. De koude wordt via een scheidingswarmtewisselaar overgedragen aan het watercircuit van het koel-/ontvochtigingssysteem in de kas. Het koude bronwater wordt daarbij opgewarmd en eventueel nog wat naverwarmd met overtollige warmte van de warme zijde van de koelmachine (in het geval dat de dag/nachtwarmtebuffer vol is). Het opgewarmde water wordt in de warme bron geïnjecteerd. In de winter wordt de stroomrichting omgekeerd. Uit de warme bron wordt dan warm water opgepompt en de warmte gebruikt als bronwarmte voor warmtepomp. Het opgepompte water koelt daarbij af en wordt weer in de koude bron geïnjecteerd. Het is de bedoeling dat het systeem over enkele jaren beschouwd thermisch neutraal wordt bedreven. Het systeemconcept en de dimensionering van de bronnen is nader uitgewerkt in een aparte deelstudie door IF-Technology [5]. Hierin komen ook geohydrologische, juridische en financiële aspecten van ondergrondse warmte-/koudeopslag aan de orde.

3.6 overzicht energievoorzieningsconcept

In figuur 3.5 en 3.6 is het basis processchema van het energievoorzieningsconcept gegeven voor zowel een zomerdagsituatie met koelen, ontvochtigen en gedeeltelijk herverwarmen en een winterdagsituatie waarin alleen wordt verwarmd. Het schema geldt in principe voor alle varianten A tot en met D, met dien verstande dat voor variant A de gasmotor moet worden weggelaten en voor variant D aanvullend een ketel vereist is (die parallel aan WK installatie draait). In tabel 3.5 is nogmaals beknopt de functie van de verschillende componenten van het concept samengevat.

Afkortingen:

ATES = aquifer thermal energy storage

LBK = luchtbehandelingskast

LuV = luchtverwarmingsbatterij (in LBK)

LuK = luchtkoelbatterij in LBK

LT = lage-temperatuur (hier circa 6 à 20 °C)

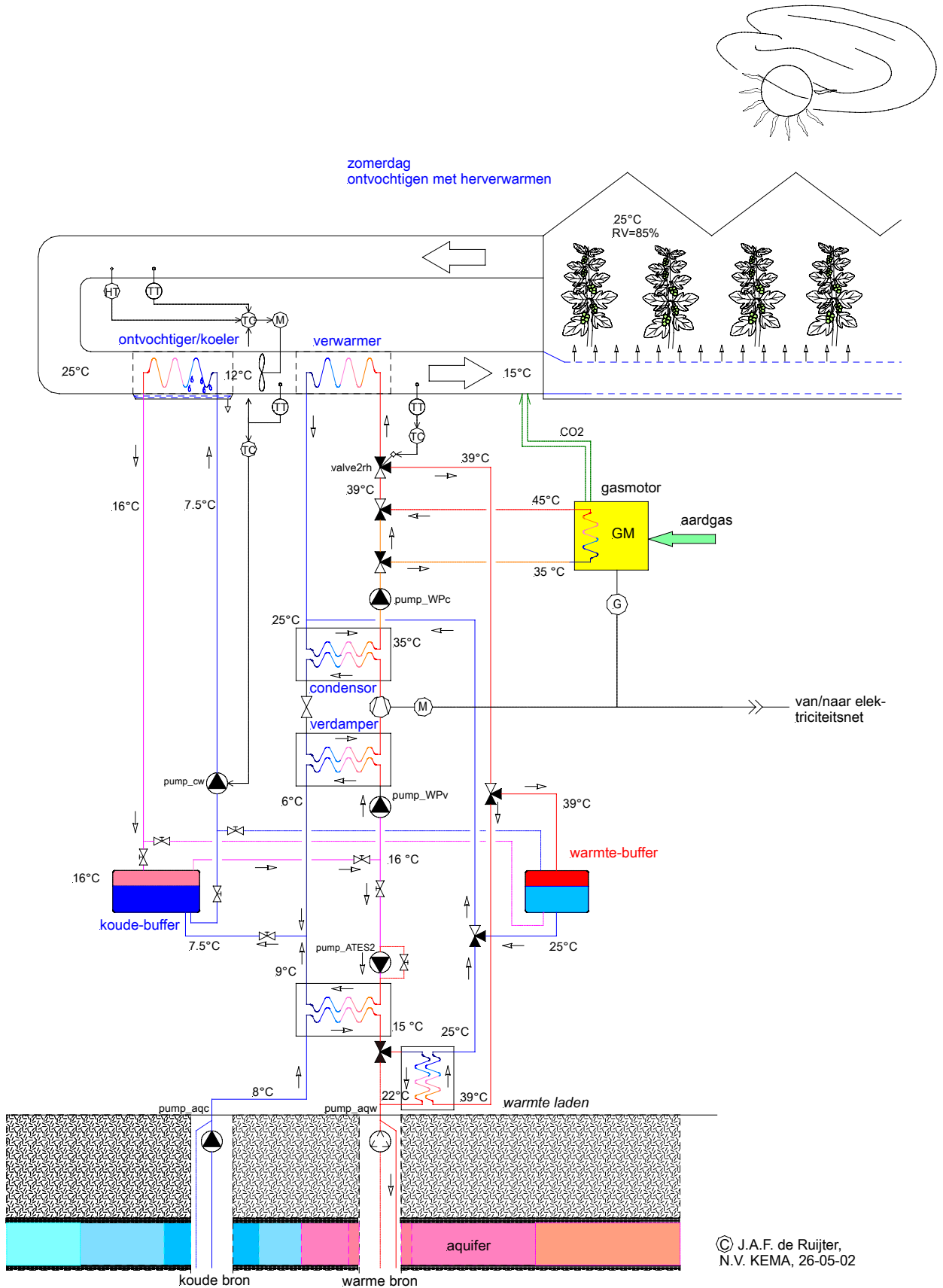
MT = midden-temperatuur (hier circa 22 à 50 °C)

Tabel 3.5 Overzicht van belangrijkste functies van de hoofdcomponenten in het energievoorzienings-systeem. Horizontaal staan de verschillende combinaties van koelen, ontvochtigen en verwarmen die kunnen optreden en die elk een verschillende aansturing van de diverse componenten vereisen).

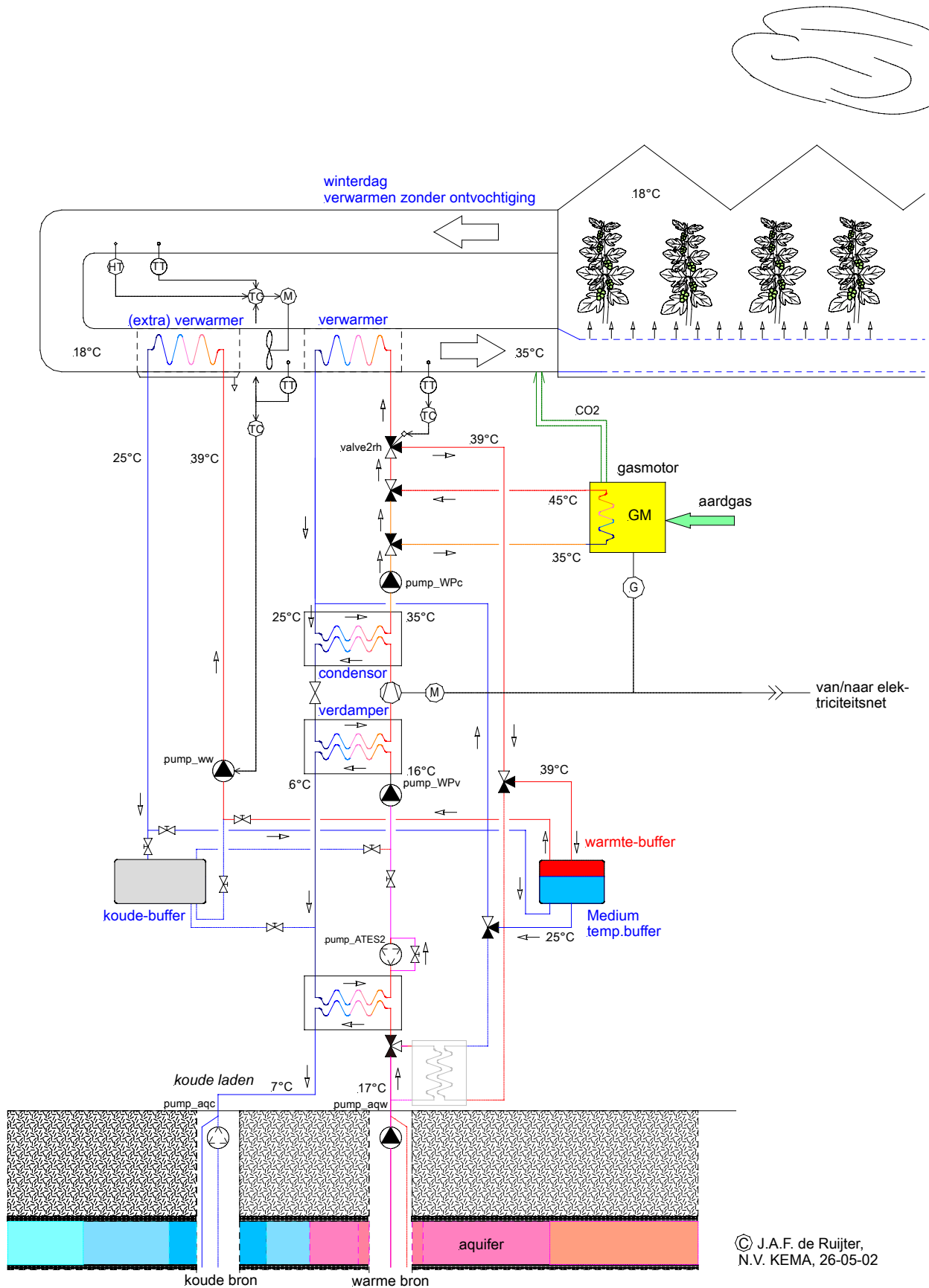
Energiefunctie→ E-systeem	verwarmen; niet koelen en/of ontvochtigen	ontvochtigen+ (her)verwarmen	ontvochtigen / koelen (niet herverwarmen)	koelen / niet- ontvochtigen
wanneer (typisch)	winter dag+nacht; lente, herfst, zomer nacht	lente, herfst overdag	zomer overdag	komt niet voor
warmtepomp (koelmachine)	- warmtelevering LuV - warmteonttrekking aan aQUIFER	- warmtelevering aan LuV; overschot warmte laden in MT-buffer - aanvulling koude op vermogen ATES - (mogelijk discrete be- lastingsniveaus)	- aanvulling koude op koudestroom van ATES - warmte laden in MT- buffer en surplus in warme bron ATES	
aQUIFER (ATES)	- ontladen warme bron: warmtelevering tbv WP; - laden koude bron	- koudelevering aan LuK tbv ontvochtiging (of aan LT-buffer); - opslaan overtollige MT- warmte in warme bron	- basis koudelevering tbv ontvochtiging (direct aan LuK of aan LT- buffer); - opslaan overtollige MT- warmte in warme bron	
LT- koudebuffer	- leveren 'bronwarmte' voor WP in zomernacht (afkoelen koudebuffer)	- koude uit ATES buffe- ren in de nacht tbv ont- vochtiging overdag	- (piek) koude leveren overdag t.b.v. koelen/ ontvochtigingen	
MT- warmtebuffer	- leveren van MTwarmte	- bufferen van MT- warmte die bij ontvoch- tiging over is	- bufferen van MT-warm- te die bij ontvochtiging en koeling over is (eventueel surplus gaat naar aQUIFER)	
mini-WK	- levering E tbv WP - levering CO ₂ - levering warmte aan LuV	- aan indien WP-draait - E tbv WP als koelmach. - CO ₂ -levering - levering warmte aan LuV**); overschot naar MT-buffer	- aan indien WP-draait - E tbv WP als koelmach. - levering warmte aan MT-warmtebuffer en eventueel surplus aan warme bron ATES	
ketel	- levering piek warmte- vraag (bij var. C en D)	- n.v.t.	- n.v.t.	

^{*)} indien er geen LT-buffer wordt toegepast zou het koelvermogen met aQUIFERpomp kunnen worden gemoduleerd.

^{**)} of aan buisrailnet of ander buizenet indien dit in een bestaande kas voorhanden zou zijn.



Figuur 3.5 Basis processchema energievoorzieningsconcept met warmtepomp, warmteopslag, koeling, ontvochtiging en herverwarming en (eventueel) gasmotor. Getekend is een zomerdag met koelen, ontvochtigen en gedeeltelijk herverwarmen. De genoemde temperaturen zijn indicatief.



Figuur 3.6 Basis proceschema energievoorzieningsconcept met warmtepomp, warmteopslag, luchtbehandeling kaslucht en (eventueel) gasmotor. Getekend is een winterdagsituatie waarin wordt verwarmd.

3.7 Gas- en elektriciteitsverbruik en inzetstrategie

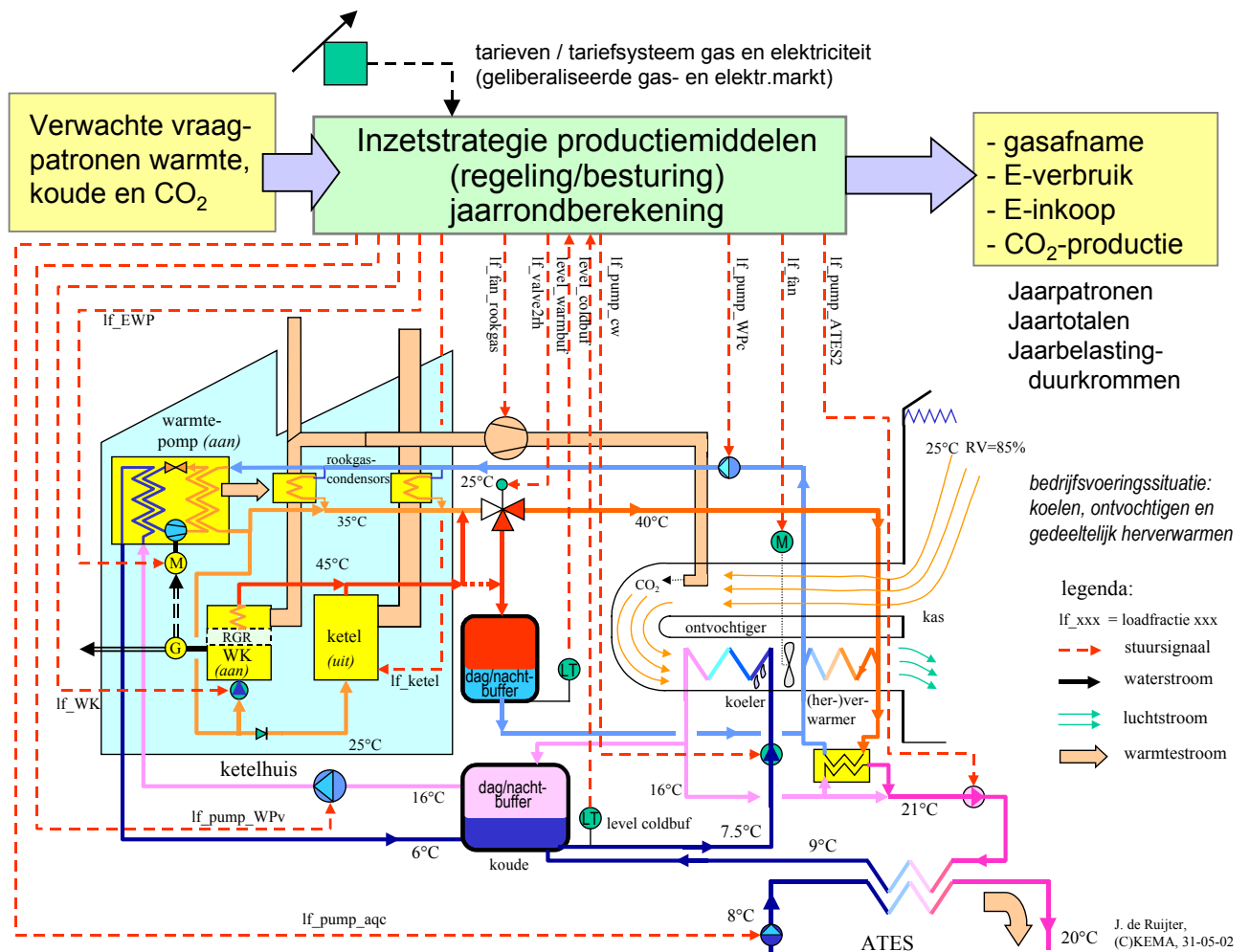
Het terugverdienen van de benodigde meerinvesteringen van de nieuwe energievoorzieningsconcepten berust in principe op twee pijlers:

- besparing op de energierekening (gasinkoop en elektriciteitsinkoop)
- meeropbrengst ten gevolge van productieverhoging (meer oogst).

Het bepalen van de verwachte besparing op de energierekening is een zeer complex vraagstuk. Enerzijds hangt deze af van wat over een jaar gezien aan “m³” gas en “kWh” elektriciteit door de meter gaat’ (jaartotalen), anderzijds zijn in de huidige geliberaliseerde markt met name ook de afnameprofielen van groot belang, omdat de prijs van de ‘commodities’ aardgas en elektriciteit daarvan voor een belangrijk deel afhankelijk zijn gemaakt.

In deze paragraaf wordt besproken hoe de afnameprofielen en jaartotalen worden bepaald. In hoofdstuk 4 zijn de (energetische) resultaten van de inzetberekeningen gegeven. In hoofdstuk 5 wordt aangegeven wat dat financieel betekent.

Voor elk van de systeemvarianten (zoals beschreven in paragraaf 3.2) en de referentiesituatie (normaal geventileerde kas met ketel) zal een raming van de gas- en elektriciteitsinkoop over een jaar worden berekend uitgaande van verwachte warmte- en koudevraagpatronen zoals berekend in paragraaf 2.3 voor het verkorte referentiejaar. Deze berekeningen worden uitgevoerd met een ‘simulatie-inzetmodel’, waarin voor elk kwartier uit de warmte- en koudevraagpatronen de inzet - d.w.z. bedrijfsvoeringstoestand: “aan/uit” respectievelijk de belastingsfractie (of ‘loadfraction’) - van de verschillende productiemiddelen wordt bepaald aan de hand van een adequate inzetstrategie voor elk van de systeemcomponenten. De inzetstrategie zal per variant op bepaalde aspecten verschillen. De strategie dient zodanig te zijn, dat de warmte- en koudevraag (op kwartierbasis) volledig wordt ingevuld (waarbij moet worden bedacht dat - zoals eerder aangegeven - de koudevraag bij variant C en D is begrensd). De productiemiddelen worden in de uitgevoerde inzetberekeningen niet op CO₂ gestuurd (zie ook paragraaf 3.4). Daar de varianten over opslagmogelijkheden beschikken voor warmte en koude, kan een eventueel momentaan warmte- of koudeoverschot worden opgeslagen in de daarvoor bestemde buffer (mits er nog ruimte is) of anders in de ATES. Voor elke tijdstap wordt per hoofdcomponent de gasconsumptie en - waar van toepassing - het elektriciteitsverbruik bepaald. De berekening hiervan is gebaseerd op de actuele belastingsfracties zoals door de inzetstrategie berekend en de rendementscijfers van de componenten (zie tabel in bijlage G). Alle gas- respectievelijk elektriciteitsverbruiken van de componenten in kwestie worden bij elkaar opgeteld tot totaalverbruiken per uur. Voor elektriciteit wordt verder het inkoopsaldo bepaald (= totaal E-verbruik minus eigen E-opwekking). Bovendien wordt het cumulatieve gas-, en elektriciteitsverbruik over het complete referentiejaar bepaald, en tevens de jaarpieken in het verbruik. Deze procedure is schematisch aangegeven in figuur 3.7.



Figuur 3.7 Schematische voorstelling van jaarrondberekening van gas- en elektriciteitsverbruik en –inkoop van de energiesystemen. De basis wordt gevormd door de vraagpatronen van warmte- en koude en een inzetstrategie van de diverse productiemiddelen. In de figuur is een zomerbedrijfssituatie getekend, waarin de kaslucht gekoeld en ontvochtigd wordt en gedeeltelijk herverwarmd. Tevens wordt er warmte geladen in de ondergrondse warmte-opslag.

De onderstaande tabel geeft een overzicht waar de ‘utilities’ warmte, koude, elektriciteit en CO₂ bij de verschillende varianten vandaan komen.

Tabel 3.6: oorsprong van de diverse benodigde 'utilities' bij de verschillende systeemvarianten

utilitybehoefte → case	warmte	koude	elektriciteit	CO ₂
variant A wel EWP geen WK	EWP levert warmte; benodigde bronwarmte uit warme put aquifer of 'war- me' zijde van koudebuffer	koude zijde EWP + koude put aquifer (piek uit koude buffer)	net	zuiver uit reservoir
variant B+C wel EWP wel WK	EWP+WK leveren warmte (bronwarmte: zie boven)	koude zijde EWP + koude put aquifer (piek uit koude buffer)	WK (+ restant uit net) (event.teruglevering)	na RGR*) uit WK eventueel aanvullen met zuivere CO ₂ uit reservoir
variant D wel EWP en WK; wel ketel	EWP+WK piek door ketel	koude zijde EWP + koude put aquifer (piek uit koude buffer)	WK (+ restant uit net) (event.teruglevering)	na RGR uit WK eventueel aanvullen met zuivere CO ₂ uit reservoir

*) RGR = rookgasreiniging

Regelstrategie:

Voor een optimaal energieverbruik voor koelen/ontvochtigen en verwarmen zijn de volgende energetische uitgangspunten/feiten/constateringen van belang:

1. De energieprestatie (COP) van de warmtepomp/koelmachine (WP/KM) is beter naarmate het temperatuurverschil tussen de warmtebron aan de koude zijde van de WP (i.c. water uit de warme bron van de aquifer of warme zijde koudebuffer) en afgifte van warmte aan de warme zijde van WP (aan verwarmingswater voor luchtbehandelingskasten) kleiner is.
2. Naarmate in het KOV-circuit (met luchtbehandelingskasten) een groter luchtdebiet circuleert kan – in het geval van koelen/ontvochtigen - het temperatuurniveau van de benodigde koude in principe hoger zijn en – in het geval van verwarmen – het temperatuurniveau van het verwarmingswater lager. Een groter luchtdebiet leidt dus tot een betere COP van de koelmachine (KM) respectievelijk warmtepomp.
3. Een groter luchtdebiet betekent een hoger eigen energieverbruik voor transport van de lucht door het luchtbehandelingssysteem inclusief aanvoerkanalen, afvoerkanalen en luchtverdeelslangen. Het energieverbruik van ventilator in het luchtcircuit is ongeveer evenredig met de derde macht van het toerental. Bij halvering van het luchtdebiet neemt het energieverbruik theoretisch af met een factor 8. Rekening houdend met een verminderd rendement van de aandrijfmotor en de toerenregeling, zal de besparing in de praktijk wat minder zijn (factor 6 à 7).
4. De optimale situatie is een compromis tussen 2 en 3: een zo hoog mogelijke debiet ten behoeve van een zo laag mogelijke temperatuurlift in de KM/WP en dus een zo hoog mogelijke COP, maar niet zodanig hoog dat het extra elektriciteitsverbruik van de aandrijfventilator groter wordt dan elektriciteit die door een hogere COP bij de warmtepomp wordt bespaard. In dat geval is ook een onverantwoord grote aandrijfmotor nodig en dito elektrische installatie hiervoor.

5. De gebruikte slangen voor de distributie van de lucht vragen een bepaalde minimale voordruk van circa 130 à 250 Pa. Dit stelt eisen aan het minimum toelaatbare luchtdebiet.
6. Indien er niet actief ontvochtigd en/of gekoeld wordt, is de warmtewisselaar voor koelen en/of ontvochtigen in principe beschikbaar voor verwarmen. Hiermee wordt dan een groter warmtewisselend oppervlak verkregen waardoor een kleinere temperatuurval tussen wateraanvoertemperatuur en luchttemperatuur ontstaat. Dit is gunstig voor het rendement van het systeem.

Inzetstrategie

De aansturing van de individuele componenten in het energievoorzieningsconcept is een complex probleem. Er zijn (maximaal) 3 'momentane' productiemiddelen (EWP, WK, ketel). Twee productiemiddelen leveren tegelijkertijd 2 of meer utility-producten (EWP: warmte en koude; WK: warmte, elektriciteit en CO₂). Verder zijn er 3 opslagsystemen (warmtebuffer, koudebuffer, ATES). Met name van de eerste 2 dient de actuele status (vulgraad) in de inzetstrategie te worden verdisconteerd (zie ook figuur 3.7). De buffers dienen tijdig te worden gevuld, om te vermijden dat er een vermogenstekort optreedt (dit is met name bij koudevraag van belang). Van de andere kant dienen de buffers ook op momenten dat het kan (grotendeels) te worden 'leeggetrokken' om te zorgen dat er bij nieuwe overschotten weer plaats is (en om bufferverliezen zo veel mogelijk te reduceren).

Basisuitgangspunt van de inzetstrategie is dat de 'momentane' productiemiddelen globaal op het juiste vermogen worden ingezet (eventueel afhankelijk van het moment op de dag), en dat eventueel tekorten c.q. overschotten door de buffer worden geleverd c.q. worden opgenomen.

De functies van de energiecomponenten en de oorsprong van de verschillende benodigde utilities zijn hiervoor al aangegeven. Tabel 3.5 liet zien dat het zinvol is onderscheid te maken tussen de volgende bedrijfsvoeringssituaties:

- verwarmen
- koelen en ontvochtigen (en eventueel herverwarmen)
- alleen ontvochtigen (en eventueel herverwarmen).

Daarnaast wordt onderscheid gemaakt tussen een dag- en nachtsituatie. In de nacht dient (in het warme seizoen) onder andere de koudebuffer te worden gevuld.

Belastingsfracties

Van elk van de productiemiddelen wordt over een (verkort) jaar op elke tijdstap (van 15 minuten) de belastingsfractie (loadfraction) bepaald, dat wil zeggen het deel van de nominale productie van het apparaat waarop het wordt ingezet.

Voor de warmtepompen is er in deze studie voor gekozen deze op discrete belastingsniveaus in te zetten (bijvoorbeeld van 25 % van nominale WP-vermogen). Het nominale WP-vermogen kan fysiek uit één warmtepomp bestaan, maar bijvoorbeeld ook uit 4 identieke warmtepompen met elk een kwart van het nominale, totale WP-vermogen. Het voordeel van het laatste is, dat de warmtepompen veel meer op vollast worden bedreven, wat in het algemeen gunstiger is voor het rendement van de compressor in de WP en daarmee voor de COP (ondanks de iets hogere temperatuurverschillen over de verdamper- en condensor-warmtewisselaars bij vollast). Een ander voordeel van meerdere machines is de beschikbaarheid. Bij 4 warmtepompen is – onder de aanname van een gelijke beschikbaarheid per apparaat - de kans dat er één WP defect is, weliswaar 4x groter, dan in de situatie met één WP, maar de kans dat het volledige WP vermogen door WP-defecten uitvalt is in de eerste situatie veel kleiner.

Een eventuele WK-installatie (variant B, C en D) loopt qua elektrische belasting in principe 'parallel' aan de warmtepomp. Echter als er een significante meervraag naar elektriciteit is (bijvoorbeeld als de fan in de LBK het maximale luchtdebiet moet leveren, wordt de WK één of meerder trappen hoger geschakeld.

Bij variant C en D wordt ook nog een ketel ingezet. Deze vult de restwarmtevraag in, die overblijft als de WP en gasmotor maximaal zijn ingezet.

Bij de invulling van de verwarmingsbehoefte wordt rekening gehouden met de actuele situatie. Is er warmtebehoefte, maar geen simultane koudebehoefte en wordt er ook geen koudevraag verwacht voor de komende dag, dan wordt de benodigde bronwarmte voor de warmtepomp onttrokken aan de warme put van de ATES, en anders aan het warme deel van het koudebuffervat. In het eerste geval wordt er dus koude geladen in de ATES en in het tweede geval in de dag/nachtbuffer.

Temperatuurregeling en luchtdebiet

De massastroom lucht door de luchtbehandelingskasten wordt – in het geval van koelen – ongeveer evenredig genomen met het koudevermogen dat naar de koelbatterij in de LBK wordt gepompt (zodanig dat de lucht afkoelt tot circa 12°C). De (massastroom)belastingsfractie van de ventilator (fan) in de LBK mag echter niet lager worden dan circa 0.4 (op een schaal van 0 tot 1). Bij een keuze van de opvoerhoogte van de fan van 1440 Pa bij vollast, resteert bij een belastingsfractie van 0.4 circa 230 Pa (circa 150 Pa is nodig als minimum overdruk voor de slangen; de rest is voor de LBK en de transportkanalen). Treedt de begrenzing op, dan is de resulterende afkoeling minder. Bij alleen verwarmen mag de belastingsfractie van de fan variëren tussen circa 0.4 en 0.6 (evenredig met het verwarmingsvermogen).

De bovengrens is ingevoerd om elektrische hulpenergie door de fan te beperken (voor verwarmen is bij de varianten A t/m C een kleiner debiet nodig dan voor koelen, zie ook tabel 3.3).

Bij verwarming wordt, uitgaande van de actuele kasttemperatuur en het luchtdebiet, de benodigde wateraanvoertemperatuur in de verwarmingsbatterij berekend en verder de temperatuur die 'koelmiddelzijdig' in de condensor nodig is om het gevraagde vermogen te kunnen leveren. Indien de warmtebuffer wordt gevuld, wordt de condensortemperatuur, indien nodig, verder verhoogd, zodanig dat temperatuur van het water naar de buffer op een minimumwaarde ligt (de zogenaamde bufferminimumtemperatuur, waarvoor hier 39 °C is genomen). Er is voor een minimumtemperatuur gekozen, omdat bij een eventuele piekvraag naar warmte, deze uit de buffer geleverd moet kunnen worden en verder om een minimum opslagcapaciteit te kunnen garanderen. In het geval dat naast de EWP een gasmotor wordt gebruikt, kan de condensortemperatuur van de warmtepomp lager liggen dan de bufferminimumtemperatuur, omdat het WP-water naverwarmd wordt met de gasmotor, waardoor de minimumtemperatuur toch kan worden gehaald.

Verder wordt afhankelijk van de temperatuur van de bronwarmte de temperatuur van het koelmiddel aan de verdamperzijde berekend. In eerste instantie is als ontwerpuitgangspunt genomen een uitkoeling in de verdamper van circa 16 °C naar circa 6 °C. (De warmte uit de aquifer zou dan, bij een delta-T van 1 °C over de scheidingswarmtewisselaar een temperatuurtraject van circa 17 naar 7 °C moeten hebben).

In verband met de noodzakelijke bepaling van het benodigde elektrische hulpvermogen van het energievoorzieningsconcept in kwestie, worden op basis van de benodigde water- en luchtdebieten (en een aangenomen debietafhankelijke ontwerpdrukval) de benodigde aandrijfvermogens van de (hoofd)pompen en de fan van de LBK bepaald (zie schema's van figuur 3.5 en 3.6). Indien een WK in het energiesysteem voorhanden is, wordt de totale elektriciteitsvraag zoveel mogelijk met de WK ingevuld. Een eventueel tekort wordt uit het net betrokken.

Het zou te ver voeren hier alle details van de inzetstrategie te behandelen. Voor verdere details wordt verwezen naar bijlage F.

De complexe inzetberekeningen zijn uitgevoerd met het multi-component gas- en elektriciteitsverbruik calculatieprogramma "FuEICalc" van KEMA. De resultaten zijn gegeven in hoofdstuk 4. In bijlage I zijn ter illustratie voor variant C een aantal tussenresultaten gegeven (tijdplots van de invulling van de warmte- en koudevraag door de verschillende productiemiddelen, en het verloop van de warmte/koude-inhoud van buffers en ATEs).

Opmerking

De vaak toegepaste en veel eenvoudigere methode van berekenen van de jaarinzet van de productiemiddelen op basis van alleen een jaarbelastingduurkromme is in dit geval niet bruikbaar, omdat:

- er meerdere vragen simultaan moeten worden ingevuld. Aan de 2 jaarbelastingduurkrommen van bijvoorbeeld de warmte- en de koudevraag (zie figuur 2.8, 2.9 of 2.10) is niet te zien welke koude- en (her)verwarmingsvermogens bij elkaar horen. Bij de inzet dient met dit gelijktijdigheidsaspect wel rekening te worden gehouden.
- er rekening moet worden gehouden met dag- en nachtsituaties. Deze zijn ook niet uit de JBDK's te halen.

4 ENERGIEBESPARINGSPOTENTIEEL CONCEPTEN

In dit hoofdstuk wordt het gas- en elektriciteitsverbruik van de verschillende systeemvarianten gerapporteerd dat nodig is, voor de benodigde koel-, ontvochtigings- en verwarmingsdiensten voor de gesloten (of bijna gesloten) kas (zie hoofdstuk 2). Verder wordt de besparing op primaire brandstof en CO₂-uitstoot bepaald. De getallen worden vergeleken met die van de referentiesituatie (normaal geventileerde kas met een ketel). De financiële consequenties, die in relatie tot de benodigde investeringen moeten worden beschouwd, komen in hoofdstuk 5 aan de orde. De verbruiken zijn bepaald voor een kas van 2 ha.

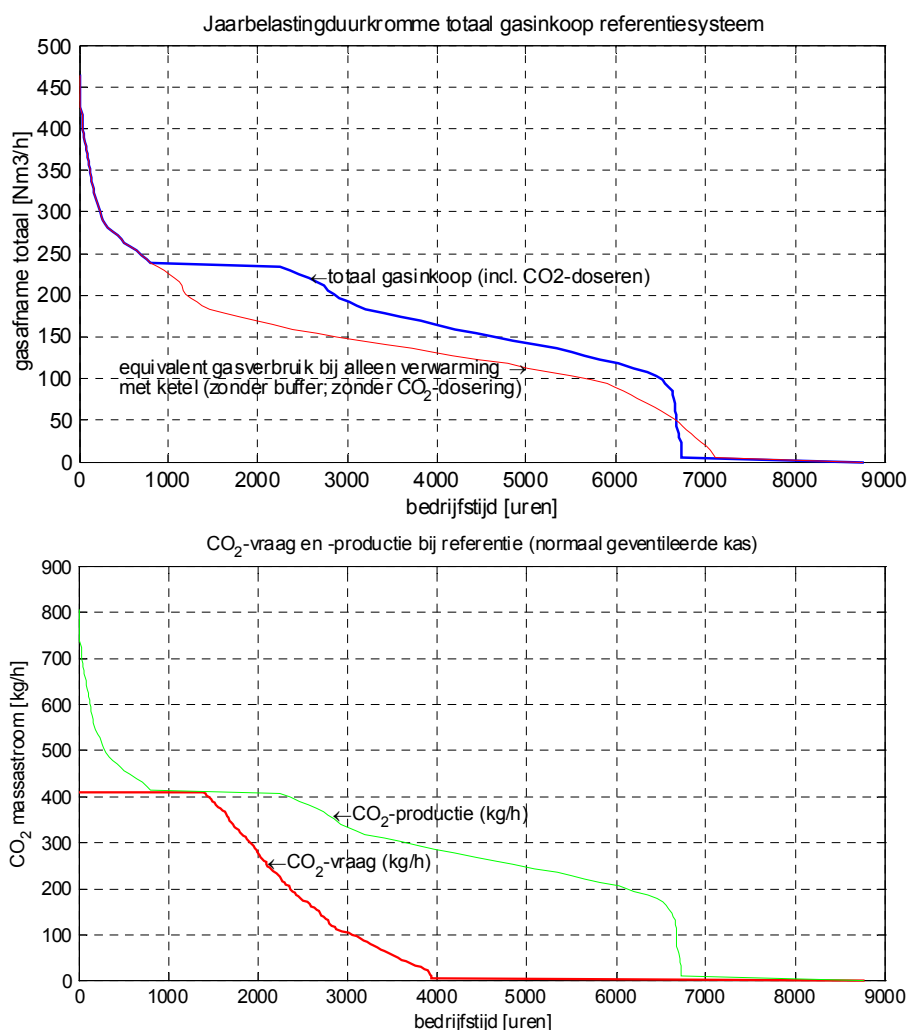
4.1 Jaarrondverbruik gas en elektriciteit van het referentiesysteem

In tabel 4.1 is het jaargas- en elektriciteitsverbruik van het referentiesysteem gegeven. Dit is bepaald met behulp van een inzetmodel zoals beschreven in paragraaf 3.7. De referentiesituatie is verreweg de eenvoudigste case. Er is in dit geval maar één productiemiddel (ketel met rookgascondensor) en alle benodigde elektriciteit wordt ingekocht. De ketel levert in dit geval zowel de benodigde warmte als de CO₂ voor bemesting. Er is een warmtebuffer van 100 m³/ha, waarin tijdelijk overtollige warmte kan worden gebufferd. Zoals in paragraaf 2.3.2 aangegeven vindt koeling en ontvochtiging bij het referentiesysteem plaats middels ventilatie via de dakramen. Naast de jaarverbruiken geeft de tabel ook de piekafnames van gas en elektriciteit en de warmteverliezen ten gevolge van CO₂-doseren.

Tabel 4.1 Jaarrond-energiecijfers referentiesysteem

Energykengetal	waarde per 2 ha	waarde per m ²	eenheid	Opmerking
jaarwarmtevraag	31 999	1.60	GJ	
jaarelektriciteitsvraag	196 919	9.8	kWh	dit komt overeen met 709 GJ/2ha
jaargasverbruik	1 249 542	62.5 ³⁾	Nm ³	voor verwarmen + CO ₂ -doseren (800 ppm)
jaarelektriciteitsinkoop	196 919	9.8	kWh	48.2% in plateau-uren en 51.8% in daluren
jaarelektriciteitsproductie	0		kWh	geen WK
warmteproductie WK	0		GJ	
warmteproductie ketel	38 810	1.94	GJ	nominaal ketelrendement van 98% op onderwaarde
warmteverlies naar omgeving	6 811	0.34	GJ	bufferverliezen + niet gebruikte warmte bij CO ₂ -doseren
piekgasverbruik	463		Nm ³ /h	
piekelektriciteitsafname	30		kW	alleen ten behoeve van CV-systeem en CO ₂ -doseren
aantal draaiuren WK-installatie	0		uur	
aantal draaiuren ketel	6 725		uur	2695 equivalente vollast uren uitgaande van nominale ketelcapaciteit van 200 W/m ²

In figuur 4.1 zijn voor het referentiesysteem de jaarbelastingduurkrommen (JBDK's) gegeven van de aardgasinkoop en van de CO₂-vraag en -productie. Ter referentie is in de eerste JBDK ook het equivalente aardgasverbruik geplott, dat zou zijn opgetreden bij de invulling van alleen de warmtebehoefte met de ketel (dus zonder CO₂-dosereren en zonder buffer). De verschillen tussen de blauwe lijn en rode lijn representeren het extra gasverbruik t.b.v. CO₂-dosereren (inclusief bufferverliezen). De resulterende totale duur van de gasinkoop (en dus het aantal draaiuren van de ketel) is als gevolg van de buffer zo'n 500 uur minder dan in de situatie zonder buffer/CO₂-dosereren.



Figuur 4.1 Jaarbelastingduurkrommen van aardgasinkoop en CO₂-vraag/productie van het referentiesysteem.

³⁾ Het absolute aardgasverbruik is relatief hoog ten opzichte van wat bij tomatenteelten met schermen in bijvoorbeeld [1] wordt aangegeven. Verklaringen hiervoor zijn: SimKas gebruikt een relatief koud referentiejaar (zie ook bijlage A), andere geografische locatie (de Bilt vs Naaldwijk), andere schermstrategie (minder schermuren), andere CO₂-concentratie (langer en meer CO₂-dosereren), en andere regeling (zie ook bijlage E). Er wordt hier nogmaals benadrukt, dat het in deze studie niet zo zeer gaat om de absolute getallen maar om de *verschillen tussen alternatieve en referentiesituatie*. Een eventuele 'offset' in het gasverbruik (als gevolg van andere uitgangspunten) valt in het verschil grotendeels weg.

4.2 Jaarrondverbruik gas en elektriciteit van variant A (“EWP-only”)

In deze paragraaf worden de gas- en elektriciteitsverbruiken en -verbruiksprofielen van de systeemvariant bekeken met alleen een elektrische warmtepomp als actief warmte- en koude productiemiddel. Belangrijkste argument voor deze variant was het feit, dat deze maximaal gebruik maakt van de beschikbare geogste LT-warmte (zie paragraaf 3.1). Daardoor wordt bij deze variant het kleinste warmte-overschot verwacht. De dimensionering en specificaties van het energievoorzieningssysteem zijn gegeven in de tabel in bijlage G. De financiële consequenties van het energieverbruiksprofiel van deze variant zijn uitgewerkt in hoofdstuk 5.

Tabel 4.2 geeft een overzicht van de belangrijkste ‘jaarrondcijfers’. Het totale warmteproductievermogen van 4 MW van de elektrische warmtepomp is in bij deze ‘case’ verdeeld over 4 warmtepompen van elk 1 MW. Elke warmtepomp draait of op vollast of op halflast waardoor er in totaal 8 vermogensstappen zijn. Een dergelijk gestaffeld bedrijf is met de beschikbare warmte- en koudebuffers goed mogelijk en regeltechnisch relatief eenvoudig te realiseren. Afhankelijk van de koude- en/of warmtebehoefte en de koude- respectievelijk warmtevoorraden in de buffers worden er een volgende stap bij- of afgeschakeld (zie ook paragraaf 3.7). Het thermisch vermogen naar de luchtbehandelingskasten, dat in principe aan de buffers wordt onttrokken, wordt uiteraard gemoduleerd afhankelijk van de actuele ontvochtigings-, koel- en (her)verwarmingsbehoefte.

Deze variant is in feite een “all-electric” kas zonder gasaansluiting. De benodigde elektrische energie bedraagt op jaarbasis circa 174 kWh/m², wat overeenkomt met 0.63 GJ/m². (In paragraaf 4.6 zal worden aangegeven wat dat betekent voor het primair brandstofverbruik). Zoals uit de tabel blijkt worden er bij deze variant circa 7000 draaiuren door de EWP gemaakt, en wordt twee-derde van de geogste warmte later weer gebruikt. Er is dus een warmteoverschot van circa 33%.

Tabel 4.2 Jaarrond-energiecijfers variant A: gesloten kas met elektrische warmtepomp (4x1 MW_{th}; 8 stappen van 0.5 MW_{th})

Energiekengetal	waarde per 2 ha	waarde per m ²	waarde per m ² referen- tie	een- heid	proc. verschil tov refe- rentie	Opmerking
jaarwarmtevraag	36 620	1.83	1.60	GJ	14%	"all-electric greenhouse"
jaarelektriciteitsvraag	3 526 329	176.3	9.8	kWh	1699%	dit komt overeen met 12672 GJ/2ha
jaargasverbruik	0	0.0	62.5	Nm ³	-100%	geen gasaansluiting nodig
jaarelektriciteitsinkoop	3 526 329	176.3	9.8	kWh	1699%	64.8% in plateau-uren; 35.2% in dal-uren
jaarelektriciteitsproductie	0	0	0	kWh		geen WK
warmteproductie WK	0	0	0	GJ		
warmteproductie EWP	39 564	1.98	0	GJ		jaargemiddelde COP-verwarmen 4.22
warmteproductie ketel	0	0	1.94	GJ		
netto geogoste warmte	23 551	1.18	0	GJ		= warmte geladen in aquifer ^{*)}
overschot LT-warmte	8 050	0.40	0	GJ		34% van geogoste warmte
CO ₂ -inkoop	334 122	16.7	0	kg		er is geen eigen CO ₂ -productie
piekgasverbruik	0		0.0232	Nm ³ /h		
piekelektriciteitsafname	1 757	0.09	0.0015	kW	5900%	tbv EWP+fan+pompen systeem
aantal draaiuren EWP		7055	0	uur		2665 equivalente vollast uren
aantal draaiuren WK		0	0	uur		
aantal draaiuren ketel		0	6725	uur		

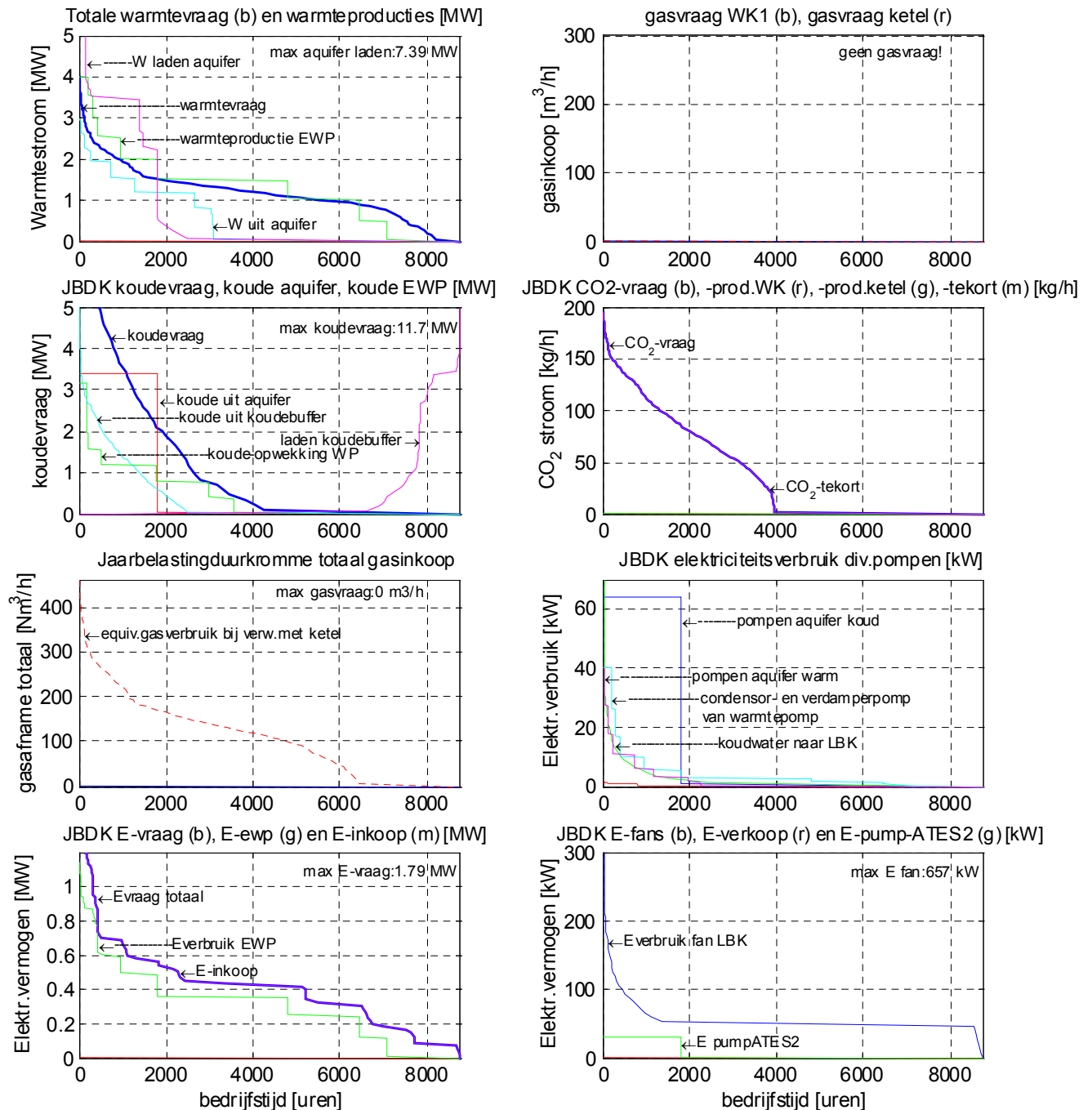
^{*)} Bij het aquifergebaseerde opslagsysteem zijn thermische verliezen aangenomen van circa 5% van de geladen warmte per jaar. Het opslagsysteem wordt qua temperaturen dicht bij de natuurlijke bodemtemperatuur bedreven. In principe kan er ook 100% van de erin opgeslagen warmtehoeveelheid aan worden onttrokken, maar wel zal de temperatuur enigszins degraderen (zie ook [5]).

In figuur 4.2 zijn verschillende jaarbelastingduurkrommen gegeven van onder meer warmte- en koudestromen en elektriciteitsverbruik en –inkoop. Ze laten op een compacte wijze zien hoe het systeem zich qua energiestromen over een jaar gezien gedraagt. JBDK's laten niet zien wanneer een bepaalde situatie optreedt, maar geven wel een goed inzicht in hoeveel uur per jaar een bepaald vermogen of verbruik mag worden verwacht. De volgende jaarbelastingduurkrommegroepen zijn samengesteld (die ook voor de andere varianten zullen worden gebruikt):

1. Linksboven: warmtevraag en warmteproducties:
 - (totale) warmtevraag (blauw)
 - warmteproductie elektrische warmtepomp (groen)

- warmteproductie WK-installatie (rood)
 - warmteonttrekking uit aquifer (bronwarmte EWP, cyaan)
 - warmte laden in aquifer (magenta)
2. Rechtsboven: gasverbruik WK en ketel (in deze variant niet nodig):
 - gasvraag WK-installatie (blauw)
 - gasvraag ketel (rood)
 3. Links, 2-de van boven: koudevraag en koudeproducties:
 - totale koudevraag (naar luchtbehandelingskasten; blauw)
 - koude-opwekking door EWP (groen)
 - koudelevering uit dag/nacht-koudebuffer (cyaan)
 - koudelevering uit koude bron ATES (rood)
 - laden van koudebuffer (gespiegeld t.o.v. denkbeeldige verticale lijn in het midden van de plot)
 4. Rechts, 2-de van boven: CO₂-vraag en productie:
 - CO₂-vraag (bij gewenst setpoint van 800 ppm en begrensde dosering; blauw)
 - CO₂-productie WK-installatie
 - CO₂-productie ketel
 - CO₂-tekort (= vraag – productie; paars)
 5. Links, 3-de van boven: gasinkoop:
 - totale gasinkoop (blauw)
 - referentiegasverbruik bij gebruik van alleen een ketel voor verwarming (rood)
 6. Rechts, 3-de van boven: elektriciteitsverbruik van pompen:
 - elektriciteitsverbruik aquiferpomp koude put (blauw)
 - elektriciteitsverbruik condensor- en verdamperpompen (cyaan)
 - elektriciteitsverbruik koudwaterpomp naar LBK (groen)
 - elektriciteitsverbruik van aquiferpomp in warme put (paars)
 7. Linksonder, elektriciteitsvraag, -productie en -inkoop:
 - elektriciteitsvraag totaal (inclusief aandrijfenergie van de warmtepomp en hulpenergie voor pompen in het systeem (blauw)
 - elektriciteitsproductie door WK (rood, indien aanwezig)
 - elektriciteitsverbruik EWP (groen)
 - elektriciteitsinkoop (paars)
 8. Rechtsonder, elektriciteitsverbruik fan van LBK en E-verkoop:
 - elektriciteitsverbruik van ventilatoren in LBK's (blauw)
 - elektriciteitsverkoop (E-overschotten; rood, indien aanwezig)
 - elektriciteitsverbruik van pomp "pump_ATES2" die bij het onttrekken van koude aan de aquifer en het laden van warmte het water door de scheidingswarmtewisselaar pompt (groen).

Jaarbelastingduurkrommen warmtevraag/koudevraag, W/K-productie, Evraag/productie/gebruik variant A: alleen EWP (4x1 MW_{th} warmte; 8 stappen van 0.5 MW_{th})



Figuur 4.2 Jaarbelastingduurkrommen van systeemvariant A: gesloten kas met alleen elektrische warmtepomp/koelmachine met koude- en warmtebuffer (4 x EWP à 1 MW_{th}; 8 belastingsstappen van 0.5 MW_{th}).

Uit de JBDK's kan worden geconcludeerd:

Ad 1. De *warmtevraag* wordt nagenoeg geheel gedekt door de warmtepomp (die circa 7050 draaiuren maakt). Het aantal draaiuren van de warmtepomp is circa 1200 uren minder dan de duur van de warmtevraag. In de resterende verwarmingsuren wordt de warmte aan de warmtebuffer onttrokken (de buffer staat niet in de figuur). De laagwaardige warmte voor de warmtepomp wordt gedurende circa 3100 uur aan de aquifer onttrokken (cyaan-kleurige lijn). Voor de resterende tijd komt deze warmte van de 'warme kant' van het koudebuffer. Ze is eerder bij de actieve productie van koude middels de WP/KM geproduceerd. Uit de rode lijn (W-laden aquifer) kan worden afgeleid dat de warmteoogst geconcentreerd is in circa 1800 uur. Het laadvermogen ligt grotendeels op of onder de 3.4 MW. Kortstondig kan hij echter oplopen tot 7.4 MW voor 2 ha. In dit geval zal de warmte met een meer dan dubbel temperatuurverschil (dan de nominale waarde van 8°C) worden geïnjecteerd in de warmte put van de aquifer.

Ad 3: *koudevraag*. De JBDK van de koudevraag laat zien dat (zoals ook in paragraaf 3.2.2 beschreven) deze op drie manieren wordt ingevuld: circa 1800 uur wordt er koude onttrokken aan de aquifer (3.4 MW_{th}). De EWP produceert gedurende circa 3500 uur koude en de koudebuffer levert gedurende ongeveer 2500 uur een directe bijdrage aan de koudevraag. De buffer wordt gedurende circa 2100 uur geladen (zie magenta curve rechts).

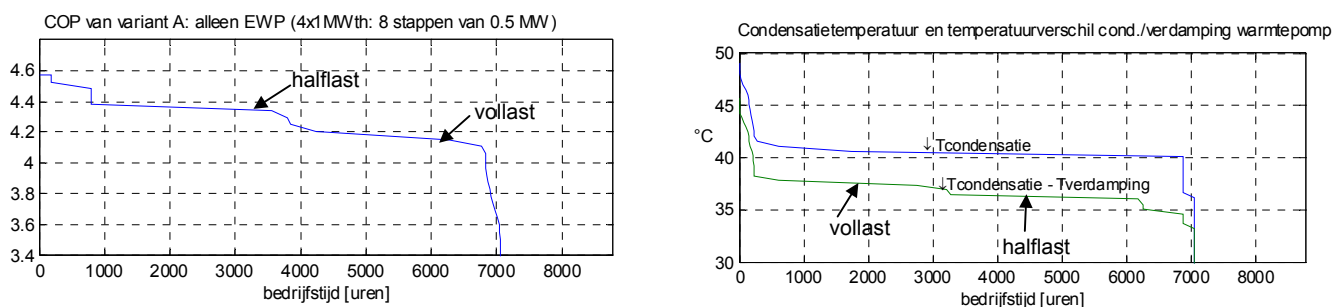
Ad 4: *CO₂-vraag*. Er is in dit geval geen CO₂-productie. Alle CO₂ wordt in deze situatie ingekocht.

Ad 6: *elektriciteitsverbruik pompen*: van de pompen gebruikt de pomp van de koudebron het meeste elektriciteit. Deze wordt met maximaal debiet bedreven, terwijl bij warmte-onttrekking met een veel kleiner debiet kan worden volstaan. Het elektriciteitsverbruik van de warme pomp is derhalve veel lager. De pomp naar de koudebatterij van de luchtbehandelingskasten heeft ook een veel lager verbruik. De pomp heeft echter een hoog piekverbruik in het geval dat het maximale koelvermogen (11.7 MW_{th}) wordt gevraagd.

Ad 8: *elektriciteitsverbruik fan*: ook de fans in de luchtbehandelingskasten hebben een hoog piekverbruik (circa 657 kW) wat optreedt bij het maximale luchtdebiet van 1000000 m³/h). Dit piekverbruik wordt echter maar zeer kortstondig gebruikt en treedt op bij de maximale koudebehoefte. Het lijkt op voorhand economisch niet zinvol het systeem op een dergelijk manier te gaan bedienen (in variant C en D wordt daarom met een gereduceerd koelvermogen gewerkt). Het totale jaarverbruik van de fan bedraagt circa 495000 kWh.

Ad 7: *elektriciteitsvraag/inkoop*. De blauwe vraagcurve en inkoopcurve liggen op elkaar daar er in deze situatie geen eigen opwekking is. De inkoop ligt typisch circa 80 à 130 kW boven het elektriciteitsverbruik van de EWP (totaal jaarverbruik EWP: 2.6 miljoen kWh) en wordt gebruikt voor de fan en de diverse pompen. Het piekelektriciteitsverbruik ligt bij deze variant zeer hoog: 1.75 MW en treedt op als zowel de EWP (als koelmachine) en de fan van de luchtbehandelingskasten op maximale belasting draaien. De belastingsduur boven de 700 kW is echter beperkt (circa 400 uur). De benodigde (grote) aansluitcapaciteit wordt derhalve bij deze variant slecht gebruikt.

Figuur 4.3 toont de JBDK van de COP van de warmtepomp en van de condensatietemperatuur en temperatuurverschil tussen condensatie en verdamping. In de linker figuur is te zien, dat door het schakelen naar halflast de COP verbetert. Dit komt doordat er bij halflast in de condensor- en verdamperwarmtewisselaar per kW over te dragen vermogen 2x zoveel oppervlak beschikbaar is als bij vollast. Daardoor kan het temperatuurverschil tussen water en koelmedium kleiner zijn, waardoor de condensatie- en verdampertemperatuur in principe dichter bij elkaar kunnen liggen, wat weer gunstig is voor de COP. De hoogste COP wordt gehaald in de situatie met koelen, zonder herverwarmingsbehoefte. In dit geval kan de warmwatertemperatuur lager liggen, dan wanneer de minimum verwarmingstemperatuur (van 40 °C) nodig is. De gemiddelde COP over het jaar bedroeg circa 4.22.



Figuur 4.3 Jaarbelastingduurkromme van COP en van condensatietemperatuur en temperatuurverschil tussen condensatie en verdamping van variant A

4.3 Jaarrondverbruik gas en elektriciteit van variant B (EWP+GM)

De tweede variant, verschilt in vergelijking met de vorige vooral in het feit, dat de benodigde elektriciteit voor de elektrische warmtepomp in deze case met een gasmotor wordt opgewekt (met een elektrisch vermogen van 960 kW_e). De daarbij vrijkomende warmte en CO₂ wordt ingezet ter dekking of gedeeltelijke dekking van de warmte- en CO₂-vraag. Voor de dimensionering van de verschillende componenten wordt verwezen naar de tabel in bijlage G.

In tabel 4.3 zijn de jaarrondverbruiken en producties gegeven van warmte, elektriciteit en gas. Figuur 4.4. geeft verder de jaarbelastingduurkrommen van de meest interessante thermische en elektrische vermogensstromen en van het gasdebiet. De verschillende lijnen in de JBDK's zijn kort besproken in de vorige paragraaf. De financiële consequenties van de afnameprofielen van gas- en elektriciteit van deze variant voor de hoogte van de energierekening en voor de impact op de totale rentabiliteit van de variant komen in hoofdstuk 6 aan de orde.

Tabel 4.3 Jaarrond-energiecijfers variant B: gesloten kas met EWP (4X0.8 MW_{th} 8 stappen van 0.4 MW_{th}; GM: 960 kW_e)

Energiekengetal	waarde per 2 ha	waarde per m ²	waarde per m ² referentie	eenheid	proc. verschil tov referentie	Opmerking
jaarwarmtevraag	36 620	1.83	1.60	GJ	14%	
jaarelektriciteitsvraag	2 834 301	141.7	9.8	kWh	1346%	dit komt overeen met 12 672 GJ/2ha
jaargasverbruik	861 109	43.1	62.5	Nm ³	-31%	= jaargasinkoop
jaarelektriciteitsinkoop	205 978	10.3	9.8	kWh	5%	64.8% in plateau-uren; 35.2% in dal-uren
jaarelektriciteitsverkoop	318 400	15.9	0	kWh		
jaarelektriciteitsproductie	2 946 723	147.3	0	kWh		
warmteproductie WK	13 253	0.66	0	GJ		
warmteproductie EWP	30 626	1.53	0	GJ		jaargemiddelde COP-verwarmen 4.62
warmteproductie ketel	0	0	1.94	GJ		
netto geogoste warmte	29 114	1.46	0	GJ		= warmte geladen in aquifer
overschot LT-warmte	18 387	0.9	0	GJ		63.2% van geogoste warmte
CO ₂ -vraag	334 122	16.7	50.5	kg	-67%	CO ₂ -prod.WK: 1 524 162 kg/a
CO ₂ -tekort	37 097	1.9	0	kg		circa 11% van vraag; wellicht niet erg omdat op andere uren meer beschikbaar is
piekgasverbruik	281	0.014	0.0232	Nm ³ /h	-40%	
piekelektriciteitsafname	564	0.028	0.0015	kW	1767%	tbv EWP+fan+pompen systeem
aantal draaiuren EWP		5933	0	uur		2658 equivalente vollast uren
aantal draaiuren WK		6692	0	uur		3069 equivalente vollast uren
aantal draaiuren ketel		0	6725	uur		

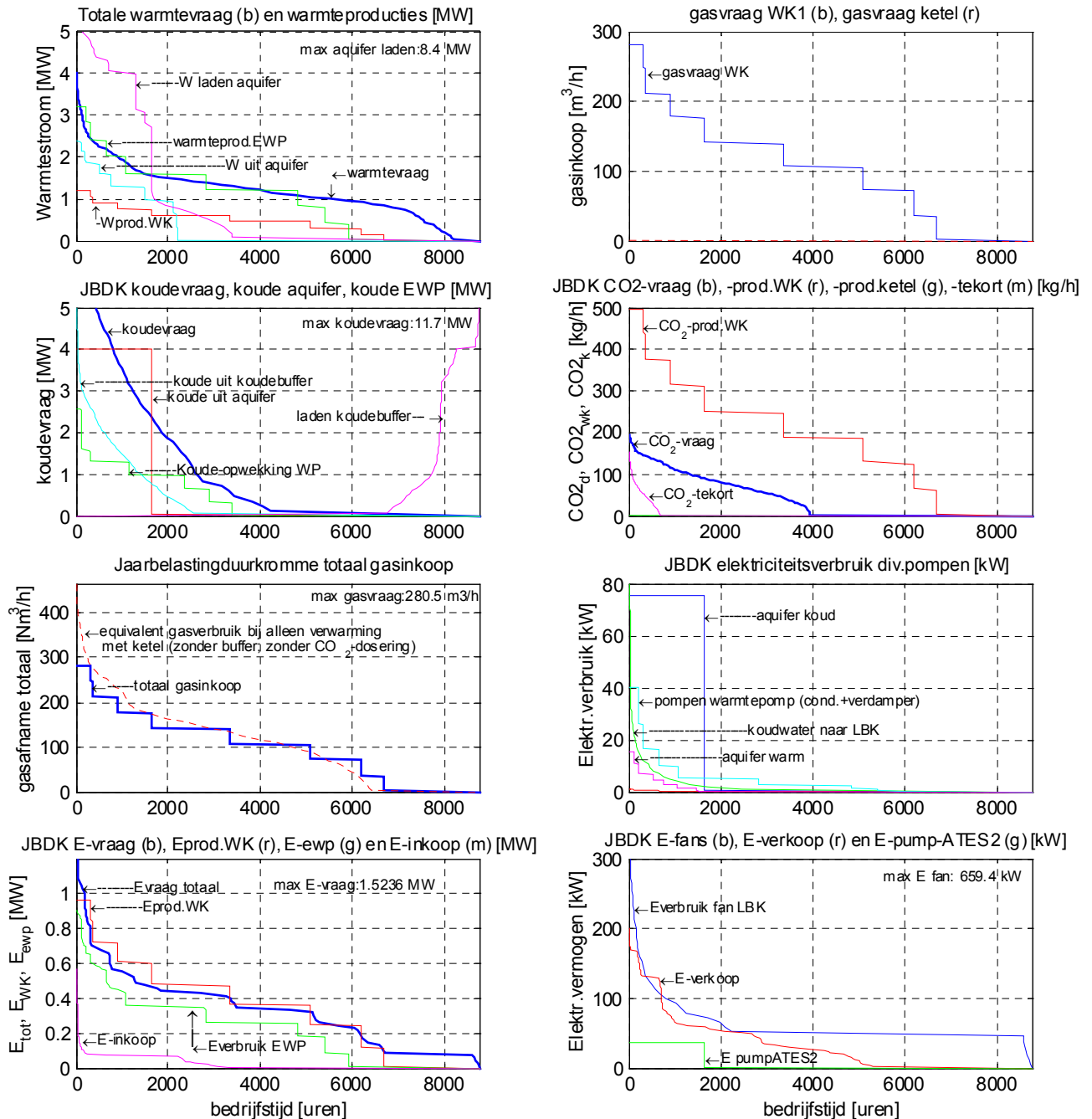
Uit de tabel blijkt dat bij deze variant een aardgasbesparing van circa 31 % kan worden gerealiseerd, terwijl de afname van elektriciteit nauwelijks hoger is (+5 %). Als naar het saldo van elektriciteitsinkoop en -teruglevering gekeken wordt, dan wordt er netto zelfs teruggeleverd (circa 112422 kWh). Deze cijfers illustreren de energiebesparing die met een gesloten kas (bij de tomatenteelt) mogelijk is. In paragraaf 4.6 wordt de besparing op primair brandstof behandeld.

Uit de jaarbelastingduurkrommen van de CO₂-vraag, blijkt dat de gasmotoren ruim voldoende CO₂ kunnen leveren om de CO₂-vraag van de gesloten kas te kunnen dekken. Toch is er een klein en relatief kortdurend CO₂-tekort. Dit zijn momenten waarop de gasmotor tijdelijk niet draaide (bijvoorbeeld omdat de koudebuffer voldoende gevuld was). Door op momenten dat de gasmotor wel draait wat meer CO₂ te doseren dan nodig is voor het op setpoint houden, kan het tekort op momenten dat hij niet draait vermoedelijk worden gecompenseerd. Desnoods kan ook een ander inzetstrategie worden gehanteerd met een modulerende inzet van de gasmotor/EWP-combinatie in plaats van bedrijfsvoering met discrete vermogensstappen, zoals hier gehanteerd.

De JBDK van de gasinkoop (en tabel 4.3) laten zien dat de gasinkooppiek met circa 40% is gedaald ten opzichte van de referentiesituatie (281 m³/h versus 464 m³/h).

De maximale elektriciteitsvraag is bij deze variant circa 1.52 MW (circa 0.27 MW lager dan bij variant A). De benodigde elektriciteitsinkoop (en dus minimale elektriciteitsaansluitcapaciteit) is gedaald van 1.79 naar 0.56 MW (waarbij de bedrijfstijd van het vermogen boven 150 kW zeer laag is, circa 150 uur). In dit geval is het hoge piekverbruik van de fans, dat optreedt bij de maximale koude vraag (waarvoor een maximaal luchtdebiet nodig is), de veroorzaker van deze hoge inkooppiek. Een gelijktijdig hoog elektriciteitsverbruik van de EWP wordt in dit geval opgevangen door een verhoogde inzet van de gasmotor.

Jaarbelastingduurkrommen warmtevraag/koudevraag, W/K-productie, Evraag/productie/gebruik variant B: EWP+GM
 EWP: $8 \times 0.4 = 3.2 \text{ MW}_{th}$ GM: $8 \times 120 = 960 \text{ kW}$



Figuur 4.4 Jaarbelastingduurkrommen van systeemvariant B: gesloten kas met elektrische warmtepomp/koelmachine en gasmotor met koude- en warmtebuffer (4 x EWP à 0.8 MW_{th} ; 8 belastingsstappen van 0.4 MW_{th} ; EWP: 960 kW_e (8 stappen van 120 kW_e).

4.4 Jaarrondverbruik gas en elektriciteit van variant C (300 W/m² koude)

In deze paragraaf wordt het energieverbruik geanalyseerd van de eerste variant waarbij de piek koudevraag niet meer geheel wordt ingevuld. Het maximaal leverbare koudevermogen is in dit geval 300 W/m² (= 6 MW per 2 ha). Bij extreem warme weerscondities kunnen de setpoints van temperatuur en luchtvochtigheid niet meer worden gerealiseerd. In die situatie zal er dan worden geventileerd (we spreken daarom van een “bijna gesloten kas”). De 2 warmtepompen in deze variant hebben elk een thermisch verwarmingsvermogen van circa 1.03 MW en een koelvermogen van 0.8 MW. De ATES kan maximaal 2.4 MW koude leveren. De gasmotor heeft een vermogen van 600 kW_e. De maximale luchthoeveelheid door de LBK is in dit geval circa de helft van die bij de vorige twee varianten (260 000 versus 500 000 m³/h.ha). Voor de verdere dimensionering van de verschillende componenten wordt verwezen naar de tabel in bijlage G (zie ook paragraaf 3.2.2). Voor deze variant zijn in bijlage I ter illustratie van de berekeningsmethodiek een aantal tussenresultaten gegeven (tijdplots van de invulling van de warmte- en koudevraag door de verschillende beschikbare productiemiddelen in het energievoorzieningsconcept, en verder het verloop van de warmte/koude-inhoud van buffers en ATES).

In tabel 4.4 zijn de jaarrondverbruiken en -producties gegeven van warmte, elektriciteit en gas. Figuur 4.5 geeft verder de jaarbelastingduurkrommen van de meest interessante thermische en elektrische vermogensstromen en van het gasdebiet. De verschillende lijnen in de JBDK's zijn reeds kort besproken in paragraaf 4.2. De financiële consequenties van de afnameprofielen van gas- en elektriciteit van deze variant voor de hoogte van de energierekening en voor de impact op de totale rentabiliteit van de variant komen in hoofdstuk 6 aan de orde.

Tabel 4.4 Jaarrond-energiecijfers variant C: bijna gesloten kas met EWP (2x1.03 MW_{th}; 8 stappen van 257 kW_{th}) en GM: 605 kW_e

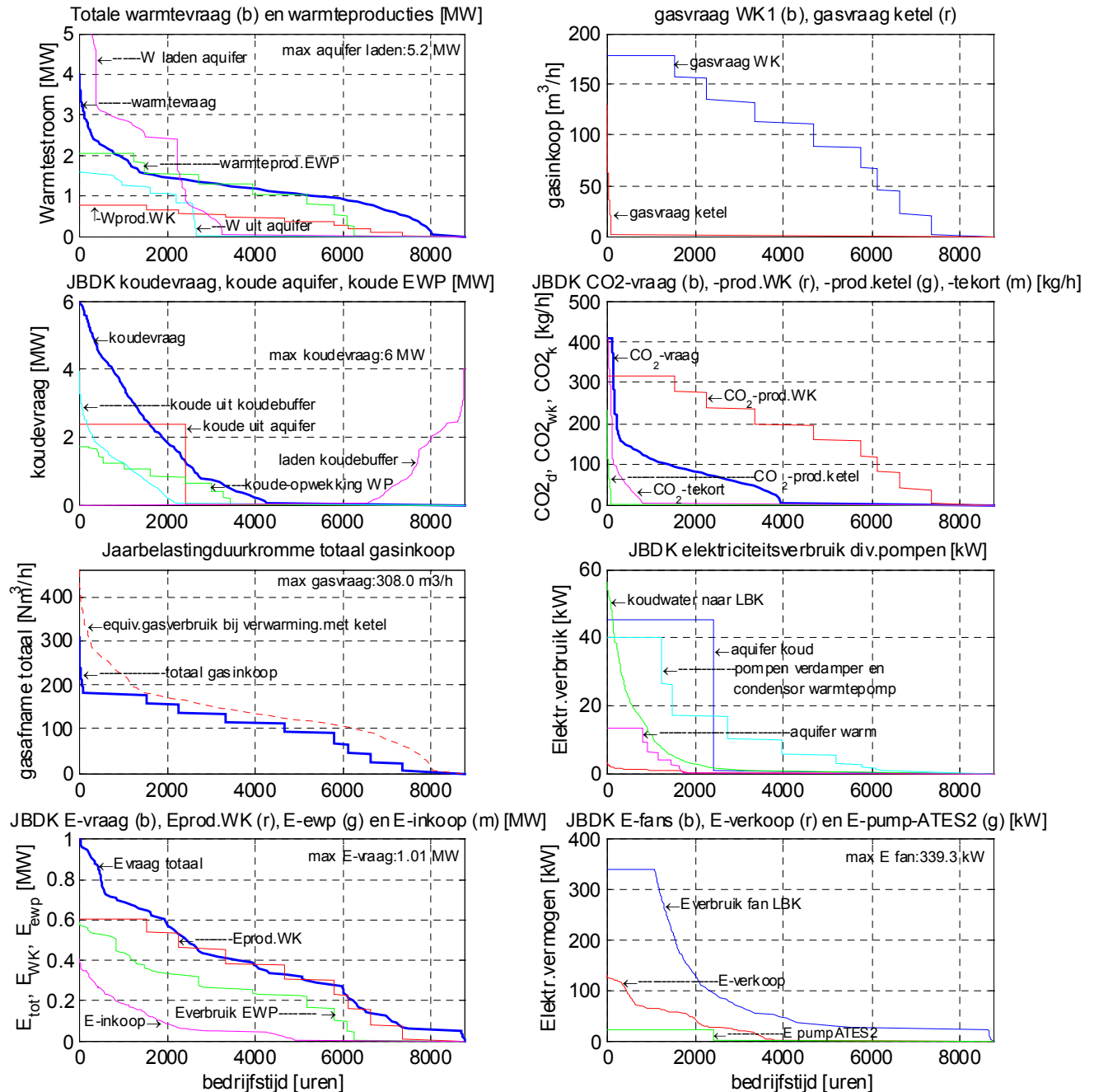
Energiekengetal	waarde per 2 ha	waarde per m ²	waarde per m ² referentie	eenheid	proc. verschil tov referentie	Opmerking
jaarwarmtevraag	35 492	1.77	1.60	GJ	11%	maximaal 300 W/m ² koudeproductie
jaarelektriciteitsvraag	3 196 763	159.8	9.8	kWh	1531%	dit komt overeen met 11 508 GJ/2ha = jaargasinkoop
jaargasverbruik	841 887	42.1	62.5	Nm ³	-33%	
jaarelektriciteitsinkoop	531 798	26.6	9.8	kWh	171%	87.1% in plateau-uren; 12.9% in daluren 42.1% in plateau-uren; 57.9% in daluren
jaarelektriciteitsverkoop	185 067	9.3	0	kWh		
jaarelektriciteitsproductie	2 850 032	142.5	0	kWh		
warmteproductie WK	12 884	0.64	0	GJ		
warmteproductie EWP	30 339	1.52	0	GJ		jaargemiddelde COP-verwarmen 4.61
warmteproductie ketel	147	0.01	1.94	GJ	-99%	
netto geogste warmte	27 327	1.37	0	GJ		= warmte geladen in aquifer
overschot LT-warmte	15 746	0.79	0	GJ		57.6% van geogste warmte
CO ₂ -vraag	378 740	18.9	50.5	kg	-63%	CO ₂ -prod.WK: 1 524 162 kg/a
CO ₂ -tekort	72 757	3.6	0	kg		circa 19.2% van vraag; alleen op heel warme dagen is productie onvoldoende
piekgasverbruik	308	0.015	0.0232	Nm ³ /h	-35%	piek WK: 178 m ³ /h
piekelektriciteitsafname	383	0.019	0.0015	kW	1167%	tbv EWP+fan+pompen systeem
aantal draaiuren EWP		6250	0	uur		4086 equivalente vollast uren
aantal draaiuren WK		7360	0	uur		4709 equivalente vollast uren
aantal draaiuren ketel		95	6725	uur		

In tabel 4.4 kan worden afgelezen, dat het jaarrondgasverbruik circa 33% lager ligt dan bij de referentie. De netto elektriciteitsinkoop (op een totale elektriciteitsvraag van 3 196 763 kWh) bedraagt 346 731 kWh. Dit is circa 76% meer dan bij de referentie. In paragraaf 4.6 is aangegeven wat dit betekent voor het primaire brandstofverbruik.

Het piekgasverbruik is ten opzichte van de referentie gedaald met 35%. De piek van de elektriciteitsinkoop is ten opzichte van variant A gedaald met 78% (1757→383 kW) en ten opzichte van variant B met 32% (564→383 kW)

Jaarbelastingduurkrommen warmte vraag/koude vraag, W/K-productie, E-vraag/-productie/-gebruik variant C

(bijna gesloten kas: 300 W/m^2 , koelvermogen: EWP: $2 \times 800 \text{ kWth}$ koude, $2 \times 1030 \text{ kWth}$ warmte (8 stappen); WK 600 kW_e)



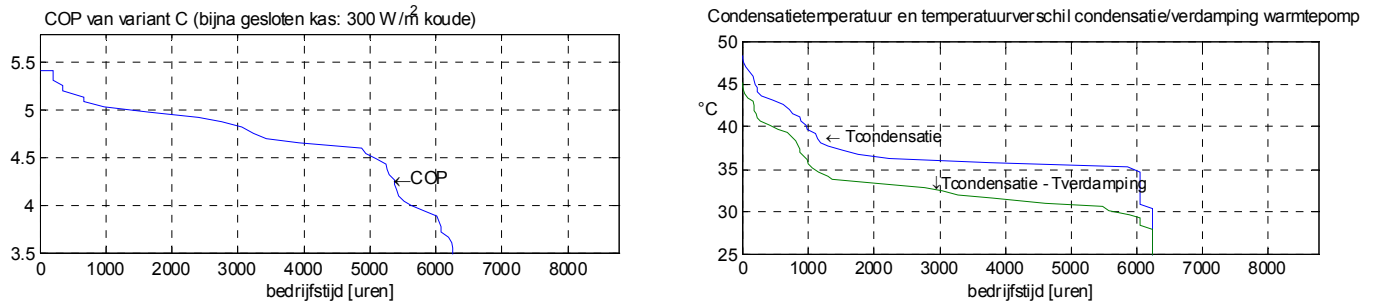
Figuur 4.5 Jaarbelastingduurkrommen van systeemvariant C: gesloten kas met elektrische warmtepomp/koelmachine en gasmotor met koude- en warmtebuffer (2 x EWP à $1.03 \text{ MW}_{\text{th}}$; 8 belastingsstappen van $258 \text{ kW}_{\text{th}}$; EWP: 600 kW_e (8 stappen van 75 kW_e).

De jaarbelastingduurkromme van de CO₂-vraag laat zien dat er in het overgrote deel van de tijd veel meer CO₂ geproduceerd wordt door de WK-installatie dan er nodig is voor het op peil houden van de CO₂-concentratie. De paarse lijn laat zien dat met name als de ramen open moeten – als het koelvermogen onvoldoende is – er een relatief groot CO₂-tekort is.

Gedurende circa 500 uur is er een kleiner tekort. Zoals ook in de vorige paragraaf aangegeven kan dit optreden, als de WK-installatie tijdelijk uitgeschakeld is omdat de buffers vol zijn. Desgewenst kan in die situatie besloten worden de WK-installatie op deellast verder te laten draaien, zodat juist voldoende CO₂ wordt geproduceerd voor het op peil houden van de concentratie. Als de elektriciteit niet volledig nodig is voor aandrijving van pompen en ventilatoren, kan deze worden teruggeleverd aan het net.

Als de jaarbelastingduurkromme van het elektriciteitsverbruik van de fans in de LBK's wordt vergeleken met die van varianten A en B, dan valt op dat het piekverbruik aanzienlijk lager ligt (339 kW versus 659 kW), maar dat het maximum elektriciteitsverbruik veel langer optreedt. Dit komt omdat het maximum luchtdebiet ten opzichte van variant A en B is gehalveerd. Daardoor is het bij de onderhavige variant wel veel vaker nodig om het (lagere) maximale luchtdebiet te gebruiken voor het transport van de benodigde warmte en koude. De totale elektriciteitsconsumptie van de fans in de LBK's bedragen in dit geval 831 000 kWh per jaar. Dit is circa 68% meer dan bij variant A (495 000 kWh). Dit komt omdat bij het maximale luchtdebiet er een veel groter drukverschil moet worden overwonnen. Dit drukverschil over het luchtcircuit neemt ruwweg kwadratisch af met het toerental van de ventilator. Vanuit dat perspectief gezien is het dus gunstig om de installatie zoveel mogelijk in deellast te bedienen (zie ook paragraaf 3.3). Halvering van het maximale luchtdebiet van de luchtbehandelingskasten betekent een forse besparing op de investeringskosten (zie hoofdstuk 5), maar betekent wel een hoger elektriciteitsverbruik. Het verder reduceren van het actuele luchtdebiet bij deze variant zou wel kunnen, maar betekent dan wel dat een hoger temperatuurverschil tussen aanvoer en retour van de te recirculeren lucht nodig is, wat echter ten koste gaat van de COP van de WP (die voor deze variant jaargemiddeld 4.61 bedraagt) en dus ten koste van het elektriciteitsverbruik van deze component.

De JBDK's van de COP en de condensatietemperatuur respectievelijk het temperatuurverschil tussen condenseren en verdampen zijn weergegeven in figuur 4.6. De gemiddelde COP bedraagt 4.61 met uitschieters tot 5.4, optredend als het verwarmingswater niet heter hoeft te zijn dan circa 31°C (in het geval dat geen/nauwelijks herverwarming nodig is).



Figuur 4.6 Jaarbelastingduurkromme van de COP van de warmtepomp en de condensatietemperatuur respectievelijk het temperatuurverschil tussen condenseren en verdampen bij variant C.

4.5 Jaarrondverbruik gas en elektriciteit van variant D (200 W/m² koude)

Tot slot wordt in deze paragraaf het gas- en elektriciteitsverbruik van variant D geanalyseerd. Variant D lijkt op C maar het totale koelvermogen is kleiner (max. 200 W/m²). Daarom zijn ook de elektrische warmtepomp en de gasmotor kleiner gedimensioneerd (zie ook bijlage G en paragraaf 3.2.2).

Tabel 4.5 geeft een overzicht van de belangrijkste 'jaarrondcijfers' van variant D.

Tabel 4.5 Jaarrondenergiecijfers variant D: bijna gesloten kas met EWP (2x770 kW_{th}; 8 stappen van 192 kW_{th}) en GM: 480 kW_e

Energiekengetal	waarde per 2 ha	waarde per m ²	waarde per m ² referentie	eenheid	procent. verschil tov referentie	Opmerking
jaarwarmtevraag	35 211	1.76	1.60	GJ	10%	maximaal 200 W/m ² koudeproductie
jaarelektriciteitsvraag	3 263 144	163.2	9.8	kWh	1565%	dit komt overeen met 11 669 GJ/2ha
jaargasverbruik	891 092	44.6	62.5	Nm ³	-29%	= jaargasinkoop
jaarelektriciteitsinkoop	519 947	26.0	9.8	kWh	165%	88% in plateau-uren; 12% in daluren
jaarelektriciteitsverkoop	185 045	9.3	0	kWh		39.7% in plateau-uren; 60.3% in daluren
jaarelektriciteitsproductie	2 928 242	146.4	0	kWh		
warmteproductie WK	13 238	0.66	0	GJ		
warmteproductie EWP	29 770	1.49	0	GJ		jaargemiddelde COP-verwarmen 4.55
warmteproductie ketel	961	0.05	1.94	GJ	-97%	
netto geogoste warmte	24 522	1.23	0	GJ		= warmte geladen in aquifer
overschot LT-warmte	13 922	0.70	0	GJ		56.7% van geogoste warmte
CO ₂ -vraag	451 057	22.6	50.5	kg	-55%	CO ₂ -prod.WK: 1 514 128 kg/a
CO ₂ -tekort	90 775	4.5	0	kg		circa 20.5% van vraag; alleen op heel warme dagen is productie onvoldoende
piekgasverbruik	356	0.0178	0.0232	Nm ³ /h	-23%	piek WK: 141 m ³ /h (piek vooral veroorzaakt door ketel: 215 m ³ /h); door andere W-bufferstrategie wellicht reductie mogelijk
piekelektriciteitsafname	366	0.0183	0.0015	kW	1120%	t.b.v. EWP+fan+pompen systeem
aantal draaiuren EWP		6513	0	uur		5362 equivalente vollast uren
aantal draaiuren WK		7569	0	uur		6087 equivalente vollast uren
aantal draaiuren ketel		546	6725	uur		

In tabel 4.5 kan worden afgelezen dat het jaarrondgasverbruik circa 29% lager ligt dan bij de referentie. De netto elektriciteitsinkoop (op een totale elektriciteitsvraag van 3 263 144 kWh) bedraagt 334 902 kWh. Dit is circa 70% meer dan het verbruik bij de referentie. In paragraaf 4.6 is aangegeven wat dit betekent voor het primaire brandstofverbruik.

Uit een vergelijking van de cijfers in deze tabel met die van variant B en C blijkt, dat de Inzet van de EWP en GM sterk verbeterd is (meer draaiuren en veel meer equivalente vollast-draaiuren, zie ook de JBDK's in figuur 4.7).

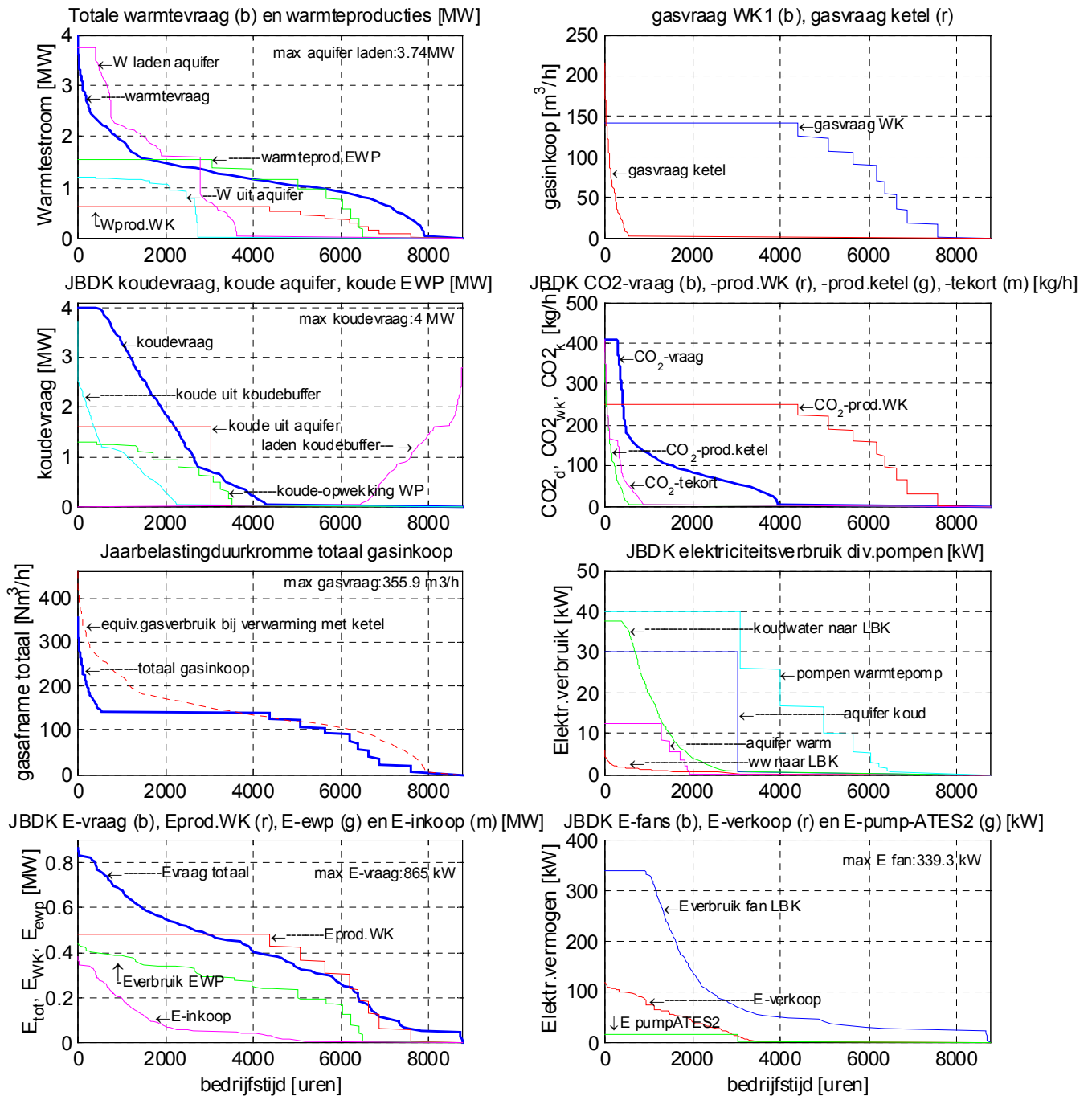
De gaspiek is iets groter dan bij variant C. Deze wordt vooral veroorzaakt door de wat grotere ketel dan bij C. Door een specifieke warmtebufferstrategie in de winter te hanteren, kan de piek waarschijnlijk nog wel worden gereduceerd.

Figuur 4.7 geeft verder de jaarbelastingduurkrommen van de meest interessante thermische en elektrische vermogensstromen en van het gasdebiet. De verschillende lijnen in de JBDK's zijn reeds kort besproken in paragraaf 4.2. De financiële consequenties van de afnameprofielen van gas- en elektriciteit van deze variant voor de hoogte van de energierekening en voor de impact op de totale rentabiliteit van de variant komen in hoofdstuk 6 aan de orde.

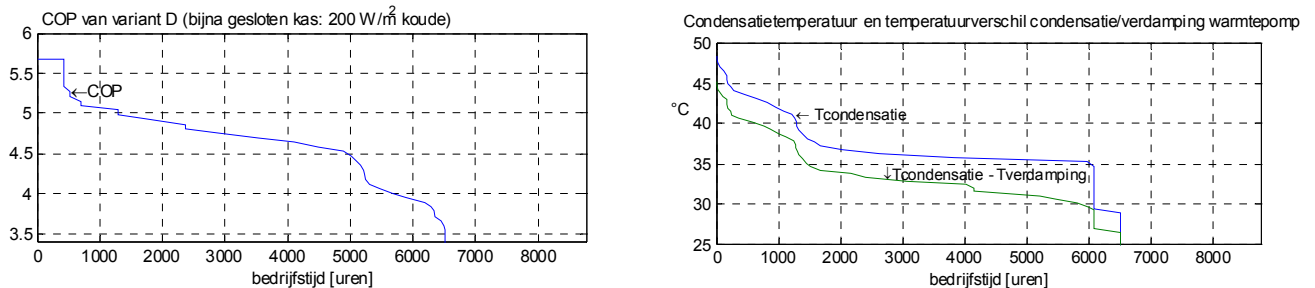
Uit de breedte van de piek in de CO₂-vraagcurve (zie CO₂-JBDK) is duidelijk te zien, dat in deze situatie de ramen wat meer open zullen zijn dan bij variant C (circa 500 uur). Het CO₂-tekort is voor deze variant dan ook iets groter. Overigens is de CO₂-productie van de gasmotor ook bij deze variant – zolang de kas gesloten blijft – ruim voldoende om in de CO₂-vraag te kunnen voorzien. Het is naar verwachting niet nodig om additionele CO₂-productiecapaciteit op te stellen voor de dagen dat de kasramen wat open moeten. Hierbij moet overigens worden bedacht dat ook bij de referentiesituatie, de CO₂-hoeveelheid onvoldoende is om de CO₂-concentratie bij geopende ramen op het gewenste setpoint te houden (vergelijk de JBDK's van de CO₂-concentratie in figuur 2.6 respectievelijk figuur 2.9).

Figuur 4.8 toont de JBDK's van de COP van de warmtepomp (voor verwarmen) en de condensatietemperatuur respectievelijk het temperatuurverschil tussen condenseren en verdampen. De gemiddelde COP bedraagt voor deze case 4.60 met uitschieters tot 5.7 indien het geproduceerde warme water niet heter hoeft te zijn dan circa 27 °C (in de situatie dat geen of nauwelijks herverwarming nodig is). In de winter – bij de maximale warmtevraag – daalt de COP tot circa 3.7. (de condensatietemperatuur loopt dan op tot circa 48 °C).

Jaarbelastingduurkrommen warmtevraag/koudevraag, W/K-productie, E-vraag/-productie/gebruik variant D
(bijna gesloten kas: 200 W/m², koelvermogen: EWP: 2x600 kW_{th} koude, 2x770 kW_{th} warmte (8 stappen); WK 480 kW_e)



Figuur 4.7 Jaarbelastingduurkrommen van systeemvariant D: gesloten kas met elektrische warmtepomp/koelmachine en gasmotor met koude- en warmtebuffer (2 x EWP à 771 kW_{th}; 8 belastingstappen van 193 kW_{th}; EWP: 480 kW_e (8 stappen van 60 kW_e)).



Figuur 4.8 Jaarbelastingduurkromme van de COP van de warmtepomp en de condensatietemperatuur respectievelijk het temperatuurverschil tussen condenseren en verdampen bij variant D. De jaargemiddelde COP voor verwarmen is circa 4.60.

4.6 Besparing op primair energieverbruik en CO₂-emissiereductie

In deze paragraaf worden de verschillende systeemvarianten qua energieverbruik, primair brandstofverbruik en CO₂-emissies onderling vergeleken.

De verschillende ingekochte energievormen worden omgerekend naar primair energieverbruik. Dit kan worden uitgedrukt in "m³ aardgasequivalent". We maken daarvoor de volgende aannamen:

- Bij elke kubieke meter ingekocht aardgas hoort één kubieke meter primair energie (in de vorm van één kuub "aardgas equivalent"). Impliciet betekent dit een aardgasproductie- en -transportrendement van 100%.
- Het aangenomen gemiddelde centralerendement (van het Nederlandse elektriciteitsproductiepark) bedraagt 43.9% (betrokken op de onderste verbrandingswaarde of stookwaarde van de brandstof). Het gemiddelde elektriciteitstransport- en distributierendement wordt gesteld op 95.4% [9]. Het gemiddelde centralerendement inclusief transport- en distributieverliezen is dan 41.88%. Uitgaande van dit rendement is voor 1 kWh ingekochte elektriciteit 2.388 maal zoveel primaire energie nodig.
- 1 kWh = 3.6 MJ; dit komt overeen met de energie-inhoud van 0.11368 Nm³ (Slochteren) aardgas (betrokken op de stookwaarde van het aardgas, i.c. 31.7 MJ/Nm³).

Daarnaast wordt ook een primaire energieberekening gemaakt volgens de methode zoals gebruikt in het Besluit Glastuinbouw dat per 1 april 2002 van kracht geworden is. Deze hanteert een "eenheidsfactor" van 0.03517 voor de omrekening van (normaal) kubieke meters (Slochteren) gas naar GJ. Voor elektriciteit wordt met een "eenheidsfactor" van 0.009 gerekend (hetgeen neerkomt op een centralerendement (zonder transport- en distributieverliezen) van 40%, betrokken op de bovenwaarde van de brandstof).

Ter vergelijking: het hiervoor genoemde gemiddelde centralerendement van 43.9% op onderwaarde komt overeen met een rendement van 39.53% op bovenwaarde. Inclusief transport- en distributieverliezen is dit 37.71% op bovenwaarde. (Het Besluit rekent dus relatief minder primaire energie toe aan ingekochte - en teruggeleverde - elektriciteit).

Tabel 4.6 geeft van de referentie en elk van de varianten het gasverbruik, de elektriciteitsin- en -verkoop en het -inkoopsaldo en verder de op basis van bovengenoemde uitgangspunten berekende primaire energieën. (Voor de kenmerken van de varianten A tot en met D wordt verwezen naar tabel 3.2 in paragraaf 3.2.2). Het genoemde primaire energieverbruik in “normaal kuub aardgasequivalent” (Nm^3_{ae} , kolom 6) is gebaseerd op de eerst genoemde Sep-rendementscijfers. De in kolom 7 van de tabel genoemde (equivalente) CO_2 -productie is op het equivalente aardgasverbruik van kolom 6 gebaseerd.

Tabel 4.6 Vergelijking gasinkoop, elektriciteitsin- en -verkoop, CO_2 -productie en primair energieverbruik van referentiesysteem en alternatieve systeemvarianten

Variant	gasinkoop	elektriciteits- inkoop	elektriciteits- verkoop	netto elektriciteits- inkoop	primair energie- verbruik	CO_2 - productie	primair E- verbruik o.b.v. onderwaarde + $\eta_{centr+T\&D}$	primair E- verbruik volgens Besluit Glastuinbouw
	Nm^3	kWh	kWh	kWh	Nm^3_{ae}	ton	GJ/m ²	GJ/m ²
referentie	1 249 543	196 893	0	196 893	1 302 985	2 306	2.063	2.286
A	0	3 526 329	0	3 526 329	957 146	1 694	1.516	1.587
B	861 109	205 978	318 400	-112 422	830 594	1 470	1.315	1.464
C	841 887	531 797	185 067	346 731	936 000	1 657	1.482	1.636
D	891 092	519 946	185 044	334 902	981 994	1 738	1.555	1.718

Tabel 4.7 geeft de besparingen op primaire brandstof (in equivalente aardgas kuubs) en op de (equivalente) CO_2 -productie (volgens de Sep-cijfers). De (equivalente) CO_2 -emissie van de energievoorzieningsconcepten is gelijk aan de CO_2 -productie na aftrek van de CO_2 -hoeveelheid die in het gewas wordt vastgelegd (deze cijfers zijn hier niet bepaald).

In de primaire energieverbruikscijfers (en equivalente CO_2 -productie) is nog geen rekening gehouden met:

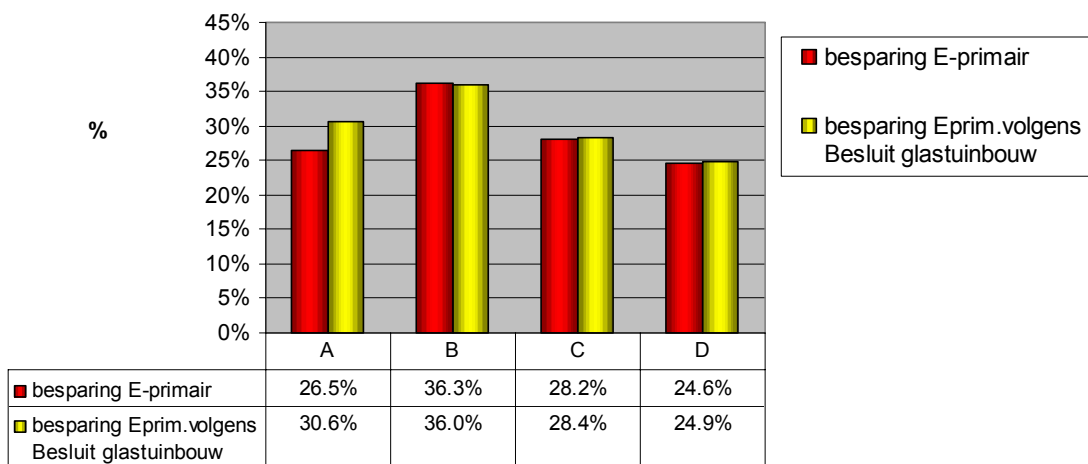
- het eventueel leveren van overtollige lage-temperatuurwarmte (overschot in ATES) aan bijvoorbeeld een belendend tuinbouwbedrijf
- eventuele energie nodig voor het produceren van de extern ingekochte CO_2 (in variant A).

Tabel 4.8 Besparing op primair energieverbruik (in kuub aardgas equivalent) en reductie van CO₂-productie van de verschillende alternatieve energiesysteemvarianten

Variant	besparing E-primair (2 ha)	besparing E-primair	CO ₂ -reductie (2 ha)	CO ₂ -reductie	primair E-verbruik o.b.v. onderwaarde + $\eta_{\text{centr+T\&D}}$	primair E-verbruik volgens Besluit Glastuinbouw
	cijfers per jaar					
	Nm ³ _{ae}	Nm ³ _{ae} /m ²	ton	kg/m ²	GJ/m ²	GJ/m ²
A	345 840	17.3	612	30.6	0.548	0.699
B	472 391	23.6	836	41.8	0.748	0.822
C	366 986	18.3	650	32.5	0.581	0.649
D	320 992	16.0	568	28.4	0.508	0.568

Figuur 4.9 toont op grafische wijze de procentuele besparing op primair energieverbruik volgens beiden methoden. Het valt op dat variant A er bij de methode volgens het Besluit Glastuinbouw wat beter uitkomt. Dit komt omdat (zoals eerder opgemerkt) het veronderstelde centralerendement iets hoger is en er geen transport- en distributieverliezen zijn toegerekend aan ingekochte elektriciteit.

Procentuele besparing op het primaire energieverbruik

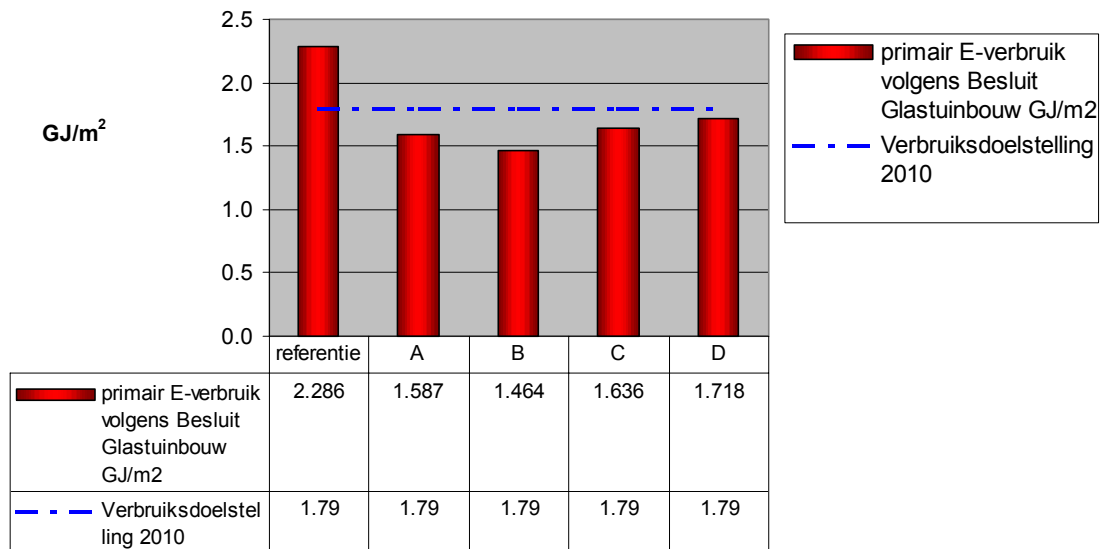


Figuur 4.9 Procentuele besparing op het primaire energieverbruik van de verschillende energiesysteemvarianten voor gesloten of bijna gesloten kassen (de rode balken zijn gebaseerd op rendementcijfers uit [9], de gele op de methode uit het Besluit Glastuinbouw).

Daar de berekening van de equivalente CO₂-productie één-op-één gekoppeld is aan het equivalente aardgasverbruik, mag in bovenstaande grafiek in plaats van “primaire energieverbruik” ook “CO₂-productie” worden ingevuld.

Tot slot zijn in figuur 4.10 op grafische wijze de absolute primaire energieverbruiken volgens de Besluit-Glastuinbouw-methode weergegeven. Tevens is aangegeven wat de verbruiksdoelstelling voor energie voor tomaten is in 2010 (nog zonder de zogenaamde ‘energietoepassing’ koeling). We zien dat bij alle 4 systeemvarianten aan de doelstelling kan worden voldaan³.

Primair energieverbruik volgens Besluit glastuinbouw



Figuur 4.10 Primair energieverbruik van referentie en alternatieve systeemconcepten volgens de methode uit het Besluit glastuinbouw.

Overigens voldoet de referentiesituatie niet aan de Verbruiksdoelstelling voor energie uit het Besluit Glastuinbouw. (Hierin is voor een tomaat - zonder ‘energietoepassing’, zoals assimilatiebelichting, koeling e.d. - vastgelegd: jaar 2000: 2.0271 GJ/m² 2002: 1.9798 GJ/m²; 2010: 1.7909 GJ/m²). In de praktijk zal de 2000/2002 doelstelling wellicht wel kunnen worden gehaald, mits de gemiddelde jaartemperatuur hoger uitkomt dan de veronderstelde in het referentiejaar (zie ook bijlage A). Verder zou er meer kunnen worden geschermd dan hier aangenomen, en een lagere CO₂-concentratie en/of dosering kunnen worden aangehouden dan hier verondersteld (zie teeltcondities in paragraaf 2.2).

³ Hierbij is nog geen rekening gehouden met levering van overtollige LT-warmte aan een derde. Volgens het Besluit Glastuinbouw mag warmte geleverd aan derden van het eigen primair verbruik worden afgetrokken (zie voorschrift 3.1.4, bijlage 1). Het Besluit gaat daarbij niet in op de kwaliteit van de geleverde warmte. Er van uitgaande dat de beschikbare overtollige aquiferwarmte van de varianten aan derden zou kunnen worden geleverd en voor 100% in mindering zou mogen worden gebracht op het primaire energieverbruik, dan zou het primair verbruik voor variant A tot en met D dalen naar respectievelijk 1.18, 0.54, 0.85 en 1.02 GJ/m². Het niet-duurzame deel van de geleverde aquifer-warmte zal de koper echter bij zijn verbruik moeten optellen.

5 **BEDRIJFSECONOMISCHE ANALYSE (RENTABILITEIT)**

In dit hoofdstuk zal de investeringsaantrekkelijkheid van de verschillende varianten worden onderzocht. Uitgaande van de in paragraaf 5.1 geformuleerde bedrijfseconomische uitgangspunten, de ramingen van de investeringskosten (paragraaf 5.2) en de te verwachten kasstromen uit het project (paragraaf 5.3) zullen in paragraaf 5.4 de rentabiliteitskentallen voor de verschillende varianten worden bepaald. In paragraaf 5.5 wordt de gevoeligheid van de rentabiliteitscijfers voor onzekerheden/onnauwkeurigheden in de diverse parameters en kostenkentallen geanalyseerd, waarmee inzicht wordt verkregen in de risico's van de investeringen.

5.1 **Bedrijfseconomische uitgangspunten**

Bij de berekening van de rentabiliteit worden de volgende uitgangspunten gehanteerd:

1. De (fictieve) tuinder is qua gas- en elektriciteitsinkoop een vrije klant, die zijn energiecontracten op de vrije markt afsluit. In de praktijk kunnen de contracten van klant tot klant, afhankelijk van zijn feitelijke situatie en inkoopkracht, verschillen. In deze studie is getracht een realistische inschatting te maken van de marktprijzen van gas en elektriciteit (prijsniveau voorjaar 2002).
2. Voor de inkoop van gas wordt uitgegaan van gasinkoop volgens het "Prijsstelsel Gasverkoop" van de Gasunie Trade & Supply voor vrije afnemers [13]. Hierin wordt onderscheid gemaakt tussen een "commodity-component" en een "dienstcomponent" in de gasprijs.
3. Voor de commodity-prijs wordt de volgende prijsformule gehanteerd [13]:
$$\text{Commod_prijs} = (37.4/500) * P - 0.36302 \text{ (EURcnt/Nm}^3\text{)}$$
Hierin is P gelijk aan de waarde - gemiddeld over de drie maanden direct voorafgaande aan het kwartaal waarvoor de gasprijs geldt - van stookolie met een zwavelgehalte van 1 gewichtsprocent, uitgedrukt in euro per ton. (De factoren gelden bij een verbrandingswaarde van het aardgas (bovenwaarde) van 35.17 MJ/Nm³). De gehanteerde P-waarde bedraagt: 149.52 (prijsniveau april 2002, [14]). Dit resulteert in een 'kale' commodity-prijs van 10.82 Eurocent/Nm³.
4. Bij de commodity dient de afnemer diensten te bestellen. De in rekening te brengen diensten zijn op te delen in een capaciteits- en een transportcomponent. In de capaciteitscomponent speelt de verdeling van de maximale uurhoeveelheid (Contractcapaciteit) in Basislastcapaciteit en Additionele Capaciteit een belangrijke rol.

De Basislastcapaciteit is gelijk aan het jaarvolume gedeeld door 8000 uur. Het verschil tussen de Contractcapaciteit en de Basislastcapaciteit wordt de Additionele Capaciteit genoemd. Voor de beschikbaarstelling van Additionele Capaciteit moet separaat worden betaald, voor de Basislastcapaciteit niet.

5. Als prijsbepalende factoren voor de dienstentarieven van de gasprijs [13] zijn gehanteerd (uitgangspunt locatie tuinbouwbedrijf: midden Zuid-Holland):
 - $D_b = 75$ km (afstand tot dichtstbijzijnde 'entry-point', i.c. Maasvlakte, t.b.v. transportkosten van de Basislastcapaciteit):
 - $D_a = 200$ km (afstand tot Noordbroek, t.b.v. transportkosten Additionele Capaciteit; maximaal 200 km)
 - $D_r = 1$ (vermenigvuldigingsfactor in de term in de 'transport-fee' die de toeslag voor het regionale gastransportnet (RTL) representeert)
 - $I_1 = 112.2$ (consumentenprijsindex 2001 in transporttarieven gas)
 - DTE-korting op tarieven transport: 6.5%
 - toeslag voor diensten van het regionale energiebedrijf: hier ingeschat of 1.36 Eurocent/ Nm^3 [14].

6. Belastingen aardgas: BSB (brandstoffenbelasting): 1.06 Eurocent/ Nm^3 (voor gasverbruiken $> 5000 \text{ m}^3$ en $< 10 \text{ mln m}^3$ per jaar).
 REB (regulerende energiebelasting): tuinbouwtarief: 0-5000 Nm^3 : 0.165 Eurocent/ Nm^3 ; 5000-170000 Nm^3 : 0.077 Eurocent/ Nm^3 ; 170000-1mln Nm^3 : 0.014 Eurocent/ Nm^3 ; $> 1 \text{ mln Nm}^3$: 0.0 Eurocent/ Nm^3

7. Stimuleringsmaatregelen WK 2002: voor aardgas gebruikt in een WK-installatie (met een elektrisch rendement $> 30\%$ en een minimale capaciteit van 60 kW_e) geldt een vrijstelling (of teruggaverecht) van BSB en REB. Verder geldt, voor zover van toepassing, een REB-afrachtskorting (0.57 Eurocent/kWh) voor teruggeleverde elektriciteit, zie ook punt 11.

8. Elektriciteitsprijzen: er wordt onderscheid gemaakt tussen plateau- en daluren (plateau-uren zijn de uren op maandag tot en met vrijdag van 7:00 uur 's ochtends tot 23:00 uur 's avonds; de overige uren zijn daluren). De volgende 'volumeprijzen' worden voor elektriciteitsinkoop gehanteerd (marktprijzen voorjaar 2002, exclusief REB, zie punt 11):
 - plateautarief: 5.0 Eurocent/kWh
 - daltarief: 2.0 Eurocent/kWh.

9. Transporttarieven elektriciteit:

- vastrecht transportdienst: 500 EUR/jr (trafo MS/LS)
- kWgecontracteerd: 25 EUR/kW
- kW max per maand: 1.5 EUR/kWmax per maand

10. Systeemdienstentarium: 0.007 EUR/kWh

11. REB elektriciteit: 0-10000 kWh: 6.01 Eurocent/kWh (exclusief BTW)

10000-50000 kWh: 2.00 Eurocent/kWh

50000-10 mln.kWh: 0.61 Eurocent/kWh

> 10 mln.kWh: 0.00 Eurocent/kWh

12. Terugleverprijzen elektriciteit:

- plateautarief: 2.9 Eurocent/kWh
- daltarief: 1.5 Eurocent/kWh
- prijzen inclusief afdrachtskorting REB van 0.57 Eurocent/kWh

13. gemiddelde verkoopprijs (ronde) tomaten in periode waarin meeropbrengst verwacht wordt: 0.643 Euro/kg, [1], gemiddelde over periode 5 t/m10

14. projectevaluatieperiode: 15 jaar (periode waarover de kasstromen worden geanalyseerd)

15. (technische) afschrijvingstermijn kapitaalgoederen: 15 jaar

16. verdisconteringsrente: 6%

17. bouw- en financieringsrente: 6%

18. verzekeringspercentage: 0%

19. Er wordt geen rekening gehouden met inflatie.

5.2 Investeringskosten

Voor een goede rentabiliteitsberekening is het essentieel te kunnen beschikken over een goede raming van de investeringskosten. Deze dient afhankelijk van de fase waarin het project verkeert, een bepaalde nauwkeurigheid te hebben. Een project begint meestal met een globale haalbaarheidsstudie, waarbij een zogenaamde 'orde-van-grootte-raming' (met een onnauwkeurigheid van circa $\pm 40\%$) wordt gehanteerd. Bij een daaropvolgende gedetailleerde haalbaarheidsstudie, waarin onder meer een procesevaluatie plaats vindt, wordt vaak een 'evaluatieraming' opgesteld, die is bedoeld om te komen tot een meer gedetailleerde economische beoordeling van de geselecteerde alternatieven. In een dergelijke raming wordt vaak een onnauwkeurigheid nagestreefd van $\pm 25\%$ [10]. Nog een stap verder gaat een 'investeringsraming' die in veel gevallen ten behoeve van een projectevaluatiestudie wordt opgesteld. Bij bijvoorbeeld Akzo is de nagestreefde onnauwkeurigheid in dit laatste geval -10% tot $+20\%$. In de onderhavige *verkennende* haalbaarheidsstudie wordt een maximale onnauwkeurigheid nagestreefd van $\pm 40\%$.

De investeringskosten kunnen grofweg worden onderverdeeld in twee categorieën te weten directe kosten (apparaatkosten en andere directe kosten) en indirecte kosten (ook wel additionele kosten genoemd). Tabel 5.1 hieronder geeft de belangrijkste items die onder elk van de categorieën vallen. In deze vroege projectfase zijn veel van de details nog niet bekend. De in deze studie gehanteerde raming is primair gebaseerd op kentallen voor apparaten, waarin 'ervaringsgemiddelde' directe kosten voor montage, elektrische installatie, apparaatbesturing/regeling, 'piping', en civiele werkzaamheden zijn verdisconteerd. Als indirecte kosten zijn alleen (orde-van-grootte) ramingen van de 'Aanvraag vergunning Grondwaterwet' en de lozingsvergunning meegenomen en van engineeringkosten (hier gesteld op circa 8% van kosten apparaten en installatie). De gebruikte kentallen (inclusief de bronvermelding) zijn weergegeven in tabel 5.2. De kentallen zijn genormeerd op de grootte (vermogen, inhoud e.d.) van het apparaat of systeem. Vaak is het resulterende kental dan toch nog enigszins afhankelijk van die grootte. Waar beschikbaar is gebruik gemaakt van informatie op basis van offertes. (Bij meerdere offertes of informatiebronnen is de laagste prijs genomen. Bij een enkelvoudige offerte is soms een prijs gehanteerd die naar verwachting bij scherper onderhandelen haalbaar zou moeten zijn). Voor een integrale overkoepelende procesregeling en -besturing van alle apparaten is een aparte post begroot (zie kolom directe kosten tabel 5.1)

Tabel 5.1 Indeling investeringskosten in directe en indirecte kosten

<i>Directe kosten</i> (apparaatkosten en andere directe kosten: hoofditens, 'packages', installatie en provisorica)	<i>Indirecte kosten</i> (additionele kosten)
<ul style="list-style-type: none"> - warmtepomp - warmtebuffers (voor opslag van warmte en koude) - aquifer gebaseerd warmteopslag systeem (met pompen en scheidingswarmtewisselaar) - warmtekrachtinstallatie (gasmotor) met rookgasreiniging - ketelinstallatie - hulpsystemen (bijvoorbeeld smeeroliesysteem) - elektrische installatie - procesregeling (modificaties in en aanvullingen op bestaande regeling) - piping - civiele werkzaamheden - HVAC (heating ventilation air conditioning; indien nodig) - (eventueel) reserve onderdelen voor x jaar 	<ul style="list-style-type: none"> - aanpassingen bestaande installaties - bouwrijp maken bouwperceel - tijdelijke voorzieningen - aannemerskosten - vergunningen - verzekeringen - engineering - supervisie bouw - inbedrijfstelling en start-up assistentie

Tabel 5.2 Investeringskentallen en schatting onderhoudspercentages

Apparaat	investeringentallen	range	onderhoud / additieven % van investering per jaar	bron, opmerking
ketel	1.75 MW _{th} 2.4 MW _{th} 4.4 MW _{th}	38 EUR/kW _{th} 29.5 EUR/kW _{th} 20 EUR/kW _{th}		incl. brander, schoorsteen, condensor, elektrisch gedeelte, verdeelstuk, isolatie [1]
Warmtebuffer	200-300 m ³ 800 à 1000 m ³	227 EUR/m ³ 90 EUR/m ³	136-317 80-155	2% 1% incl. aansluiting, regeling, expansiesysteemuitbreiding [1]
Elektrische warmtepompen (> 1.4 MW _{th})	116 EUR/kW _{th}	100-200	2%	WP circa EUR 66 + EUR 50 installatiekosten per kW _{th} [12]
WK-installatie	1000 kW _e 600 kW _e 480 kW _e	408 EUR/kW _e 519 EUR/kW _e 562 EUR/kW _e	326-675	0.006126 EUR/kW _h gasmotor [17]
Rookgasreiniging	1000 kW _e 600 kW _e 480 kW _e	142 EUR/kW _e 158 EUR/kW _e 176 EUR/kW _e	110-211	3% + 0.00136 EUR/kW _h type SCR [17] ureumverbruik [18]

Apparaat	investeringenkental	range	onderhoud / additieven % van inves- tering per jaar	bron, opmerking
ATES ¹⁾ (> 1 MW _{th})	1680 ²⁾ EUR/m ³ /h 180 EUR/kW _{th} .bron	120-280	2% [11] ³⁾	Bij ΔT=8 °C: 100 m ³ /h ≈ 933 kW _{th}
Luchtbehandelingskasten totaal debiet > 250000 m ³ /h	0.7 EUR/ m ³ /h	0.5-1.2	3% ⁴⁾	kasten met filter, koel-/ontvochtigingssectie, verwarmingssectie en frequentieregelde fan.
Luchttransportsysteem >500000m ³ /h/ha 260000m ³ /h/ha	1.0 EUR/m ³ /h 1.2 EUR/m ³ /h	0.7-1.2	1%	aanvoer en retour van/naar LBK; kanalen dienen te zijn geïsoleerd in verband met condensatiegevaar ⁵⁾ ; de retourkanalen naar de LBK's zijn voorzien van inlaatroosters verdeeld over de breedte van de kasgevel [19]
Luchtdistributiesysteem mid- dels slangen	0.66 EUR/m ³ /h	0.5-1.1	1%	geperforeerde gecoat polyester slang met gaatjespatroon opgehangen onder teeltgoten [19] ⁶⁾
Aanvraag Vergunning Grond- waterwet	9075 EUR			inclusief effectenstudie, zie [5]; [15] geeft een richtpercentage van totale investering in ATES: circa 3%
Lozingsvergunning Zuivere CO ₂ -inkoop/toediening	4545 EUR		0.114 EUR/kg 300 EUR/mnd	Prijs van zuiver CO ₂ [1] Huur CO ₂ - tank 6000 l (incl. regelpa- neel en leidingen tot aan kas)

¹⁾ ATES: aquifer thermal energy storage: de raming omvat de kosten van het volledige grondwatersysteem tot en met de warmtewisselaar die het grondwatercircuit scheidt van de WP-circuits In het ketelhuis (bronnen, putbehuizingen, pompkamers, bronkoppens bronpompen, frequentieregelaars, leidingwerk (inclusief graafwerk), warmtewisselaar, appendages, regeling, bekabeling)

²⁾ in [11] wordt als indicatie gehanteerd: Investering=2000*maxdebiet+55000 (Investering in EUR en maxdebiet in m³/h). De correlatie is gebaseerd op projecten in utiliteitsbouw. In tuinbouw kan dit naar verwachting iets goedkoper, o.a. omdat eisen aan afwerking lager zijn. In deze studie is uitgegaan van een circa 16% lager prijsniveau van EUR 1680 per m³/h broncapaciteit. Bij een temperatuurverschil tussen warme en koude bron van 8° C komt dit neer op EUR180 / kW_{th}

³⁾ in [5] is gerekend met 3% onderhoudskosten (dit is een ervaringscijfer over meerdere projecten; hierin zitten echter ook de kosten van revisies van bronnen, waarvan de aanleg achteraf gezien niet goed/optimaal is gebeurd [20]

⁴⁾ onderhoudskosten betreffen inspectie en schoonmaken en met name ook de vervanging van filterpakketten (1x per jaar). Indien filterpakketten vaker dienen te worden vervangen zullen de onderhoudskosten dienovereenkomstig oplopen (kunnen mogelijk verdubbelen)

⁵⁾ alternatief is een geheel aluminium uitvoering, maar hiervan liggen de kosten volgens de leverancier nog hoger.

⁶⁾ uitvoering brandklasse M1 (vlamdovend materiaal); opgehangen aan aluminium rail; prijs is inclusief montage; indien de tuinder zelf de montage zou doen, is naar verwachting nog een forse besparing haalbaar.

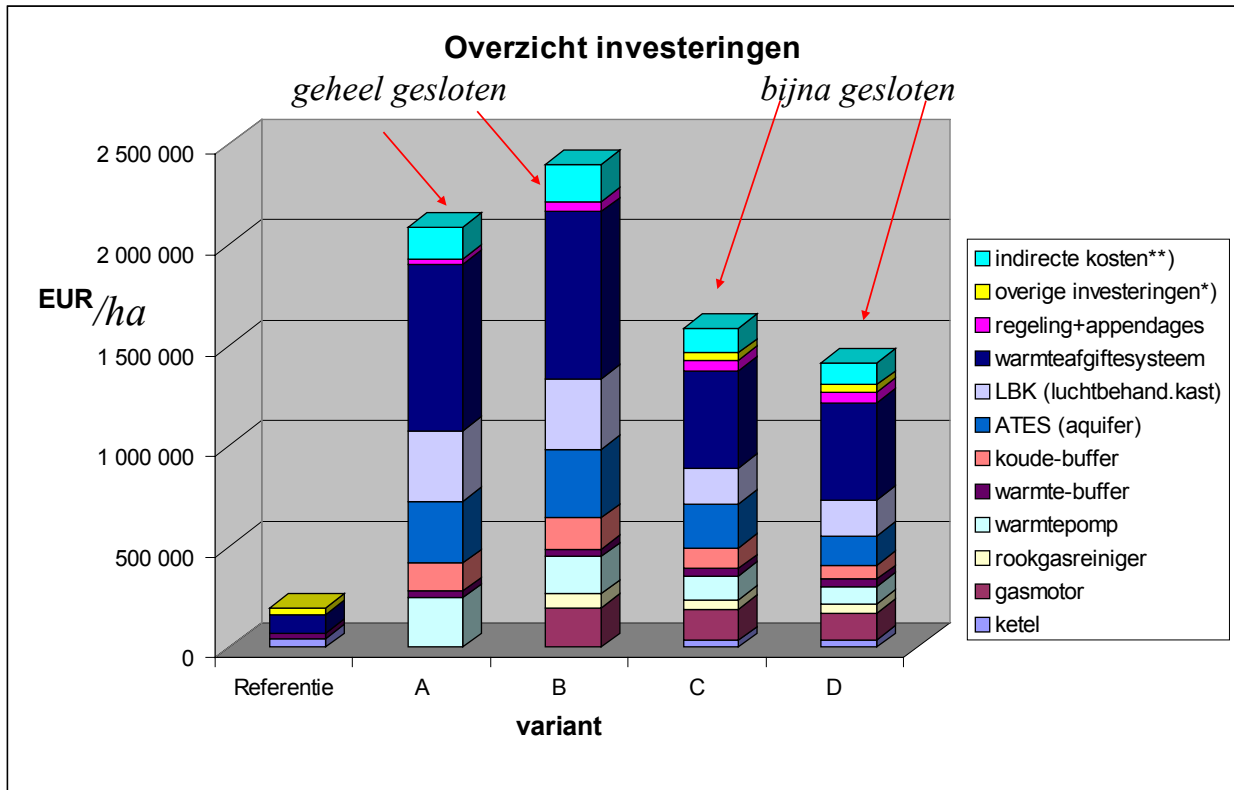
De benodigde investeringen voor het referentiesysteem en de vier varianten zijn geraamd op basis van de kentallen genoemd in tabel 5.2 en de benodigde capaciteiten/vermogens van de verschillende componenten (deze kunnen uit de tabel in appendix G worden gehaald en/of uit de jaarbelastingduurkrommen gegeven in hoofdstuk 4). De resultaten van de kostenraming per ha kas zijn samengevat in tabel 5.3 en grafisch weergegeven in figuur 5.0.

Tabel 5.3 Raming investeringskosten van referentiesysteem en systeemvarianten (per ha kas)

	Referentiesituatie: conventionele energievoorziening (ketel + warmtebuffer)	Systeemvariant A: EWP- only+KOV+LTwarmte++LTKoude-buffer	Systeemvariant B: EWP+GM+KOV+MTwarmte++LTKoude-buffer	Systeemvariant C: EWP (2x1.03MWth)+GM+ketel+KOV (300W/m ²)+MTwarmte++LTKoude-buffer	Systeemvariant D: EWP (2x0.77MWth)+GM+ketel+KOV (200W/m ²)+MTwarmte++LTKoude-buffer	eenheid
onderdeel	Referentie	A	B	C	D	per ha
ketel	2 200	0	0	870	1 200	kW
	44 278	0	0	32 899	35 473	EUR
gasmotor		0	480	300	240	kWe
		0	196 036	155 698	134 903	EUR
rookgasreiniger		0	480	300	240	kWe
		0	68 086	47 429	42 267	EUR
warmtepomp		2 100	1 600	1 030	771	kWth
		243 600	185 600	119 480	89 436	EUR
warmte-buffer	100	150	150	150	150	m ³
	22 700	34 050	34 050	34 050	34 050	EUR
koude buffer		1 550	1 750	1 150	780	m ³
		139 500	157 500	103 500	70 200	EUR
ATES (aquifer)		1 700	1 900	1 200	800	kWth
		306 000	342 000	216 000	144 000	EUR
LBK (luchtbehand.kast)		500 000	500 000	260 000	260 000	m ³ /h
		350 000	350 000	182 000	182 000	EUR
warmteafgiftesysteem	10 000	500 000	500 000	260 000	260 000	m ² / m ³ /h
	93 600	830 000	830 000	483 600	483 600	EUR
regeling+appendages		500	1 000	1 000	1 000	units
		25 000	50 000	50 000	50 000	EUR
overige investeringen ^{*)}	10 000	0	0	10 000	10 000	m ²
	36 302	0	0	36 302	36 302	EUR
indirecte kosten ^{**)}		161 059	183 868	123 683	110 985	EUR
Totaal (EUR)	196 881	2 089 209	2 397 140	1 584 642	1 413 217	EUR

*) o.a. luchtramen bij normaal geventileerde kas en bijna-gesloten kas;

***) o.a. kosten voor engineering (ca 8%) + vergunning grondwaterwet + lozingsvergunning



Figuur 5.0 Overzicht van de benodigde investeringen per systeemvariant per ha kas. De warmteafgiftesystemen (transport- en distributiekanaal en -slangen) en de luchtbehandelingskasten zijn samen verantwoordelijk voor 42-56% van de totale investering.

*) , **) zie voetnoten onder tabel 5.3

5.3 Kasstromen

Om de rentabiliteit te kunnen beoordelen is het nodig de verwachte jaarlijkse kasstromen ('cashflows') over de evaluatieperiode (hier 15 jaar) af te schatten. De kasstromen die relevant zijn bij het bepalen van de economische rentabiliteit, zijn de *marginale (of differentiële) kasstromen*, dat wil zeggen de inkomende ('cash-in-flow') en uitgaande ('cash-out-flow') kasstromen die uitsluitend toe te schrijven zijn aan het project. Een kasstroom is marginaal indien deze niet zou bestaan zonder het project. De netto kasstroom per jaar bestaat uit de som van alle marginale kasstromen (projectgerelateerde besparingen/inkomsten/uitgaven) per jaar. Hierbij dient nog opgemerkt te worden dat alleen de *operationele* marginale kasstromen meetellen. Financieringskosten worden niet meegerekend (behalve eventueel bouwrente, zie hierna). De interest die betaald zal worden op eventueel nieuw aan te trekken kapitaal wordt niet opgenomen, omdat reeds impliciet rekening gehouden wordt met de financieringskosten bij het verdisconteren van de toekomstige kasstromen (zie paragraaf 5.4). De belangrijkste kasstromen zijn:

Tabel 5.4 Overzicht cashflows

<i>Cash-out flows</i>		<i>Cash-in flows</i>
uitgaven aanpassingen 'ketelhuis' en kas (eventueel) bouwrente (eventueel) huur provisorisch	} (meer- } investering }	besparing op energiekosten van alternatieve energie- voorzieningssysteem ten opzichte van referentie
extra kosten onderhoud (en eventueel bediening) meerkosten additieven (ureum, CO ₂ , eventueel water) (eventueel) kosten afvoer afval, grond e.d. extra verzekeringen		(eventueel) extra verkoop van elektriciteit en/of warmte extra opbrengst ten gevolge van hogere productie (eventueel) vermeden investeringen of kosten minder waterinkoop door waterterugwinning in LBK

We zullen de relevante cash-in en -out stromen (afzonderlijk of in combinatie) hieronder bespreken.

Cash-out flow 'investering'

De investeringsraming voor elk van de varianten is in de vorige paragraaf aan de orde geweest. Bouwrente is met name bij grote projecten met een lange bouwtijd van belang. Voor alle systeemvarianten wordt er van uitgegaan dat de bouwtijd een half jaar of korter is. Voor de volledigheid is bouwrente in de rentabiliteitsberekeningen meegenomen (de bouwrente bedraagt 6% en wordt berekend over een half jaar).

De investeringsuitgaven zullen (inclusief bouwrente) worden verdisconteerd tot een negatieve cash-flow die wordt 'toegewezen' aan het eerste jaar van de evaluatieperiode waarover de rentabiliteit zal worden berekend.

Netto cash-in flow 'besparing energiekosten'

Een van de belangrijkste jaarlijkse (netto) cash-in flows is de besparing op de energiekosten, d.w.z. het verschil van de energiekosten die zouden zijn opgetreden in het geval van de referentiekas met de referentie-energievoorziening en die in het geval van een (bijna) gesloten kas met alternatieve energievoorziening en bijbehorende inzetstrategie.

De berekening van de besparing op energiekosten gebeurt in een aantal stappen, die in principe voor elk jaar in de evaluatieperiode dienen te worden uitgevoerd. In deze studie wordt echter verondersteld dat de jaarlijkse besparing voor elk jaar hetzelfde is (aannamen: geen inflatie, voor elk jaar dezelfde energievraag en dezelfde energietarieven en tariefsystemen, zie paragraaf 5.1). Omdat de *besparing* op de energiekosten moet worden bepaald, dient de berekening van de jaarenergiekosten te gebeuren voor zowel alle systeemvarianten als ook voor de referentiesituatie. Globaal zijn de stappen voor de bepaling als volgt:

1. Bepaal de jaarlijkse gas- en elektriciteitsinkoop die nodig is om in de warmte-, koude-, en elektriciteits- en (eventueel) CO₂-vraag te kunnen voorzien.
2. Bepaal voor de elektriciteitsinkoop de verdeling over plateau- en daluren
3. Bepaal voor zowel gas- als elektriciteitsinkoop de piekafname(s) (capaciteit).

De berekeningen van punt 1, 2 en 3 zijn in het vorige hoofdstuk toegelicht en tevens zijn daar de belangrijkste resultaten getabelleerd.

4. Bereken aan de hand van de karakteristieken bepaald onder 1, 2 en 3 en de tarieven/tariefstructuren vermeld in paragraaf 5.1, de jaarkosten van de elektriciteitsinkoop: deze bestaat ruwweg uit twee delen:
 - de kosten van de 'commodity' elektriciteit (volumekosten voor plateau- en daluren)
 - de kosten voor transport en distributie (inclusief eventuele systeemdiensten).
5. Bereken de jaarkosten van de gasinkoop. Hiervoor is gerekend met de methodiek van het Prijssysteem Gasverkoop (zie ook paragraaf 5.1). Net als bij elektriciteit onderscheiden we ook hier 2 deelposten:
 - de kosten van de 'commodity' aardgas (volumekosten)
 - de kosten voor capaciteit, transport en distributie van gas.

Een overzicht van de energiekosten is gegeven in tabel 5.5.

6. De netto cash-in flow 'beparing op energiekosten' is nu het verschil van de energiekosten (8-de kolom, tweede deel van tabel) van de referentie minus die in alternatieve situatie.

De verbruiksberendingen zelf zijn geïmplementeerd en uitgevoerd in een complex Matlab-Simulink rekenprogramma (FuElCalc, zie ook paragraaf 3.7). Voor elk kwartier uit het verkorte referentiejaar wordt één berekening uitgevoerd. De kwartierverbruiken worden geaccumuleerd en geschaald naar een vol jaar. Het resultaat is een 'jaarrondberekening' over 8760 uur.

Extra verkoop van elektriciteit of warmte

- een eventueel elektriciteitsproductieoverschot wordt teruggeleverd aan het net
- er wordt verder verondersteld, dat overtollige laagwaardige warmte in de aquifer wordt verkocht aan een belendend bedrijf, dat deze warmte gebruikt als bronwarmte voor een eigen warmtepomp. Er is een verkoopprijs van 1 EUR/GJ aangenomen.

Tabel 5.5 Overzicht jaarlijkse elektriciteits-, aardgaskosten en totale netto energiekosten per variant. De kosten zijn opgesplitst in de verschillende kostencomponenten. Tevens zijn de gemiddelde kWh-prijs en Nm³ gasprijs vermeld. T&D = transport en distributie, BSB = brandstoffenbelasting, REB = regulerende energiebelasting. De cijfers gelden voor 1 m² kas.

Variant	elektriciteit ink.volume plateau+dal kWh/m ²	elektriciteit vol.kosten plateau EUR/m ²	elektriciteit volumekos- ten dal EUR/m ²	elektriciteit T&D EUR/m ²	elektriciteit REB EUR/m ²	elektriciteit volume totaal EUR/m ²	elektriciteit gemiddelde kWh-prijs EUR/kWh	elektriciteit verkoop totaal EUR/m ²	elektriciteit netto inkoop totaal EUR/m ²
per jaar									
referentie	9.8	0.27	0.14	0.15	0.11	0.68	0.0688	0.00	0.68
variant A	176.3	6.54	1.66	3.07	1.13	12.40	0.0704	0.00	12.40
variant B	10.3	0.41	0.08	0.81	0.12	1.42	0.1381	0.36	1.06
variant C	26.6	1.32	0.09	0.75	0.22	2.38	0.0895	0.19	2.19
variant D	26.0	1.31	0.08	0.71	0.21	2.32	0.0891	0.19	2.12

Variant	aardgas volume Nm ³ /m ²	aardgasvo- lumekosten EUR/m ²	aardgas T&D+BSB +REB EUR/m ²	totaal aard- gasinkoop EUR/m ²	gasprijs per m ³ EUR/Nm ³	LT-warmte verkoop EUR/m ²	netto ener- giekosten totaal EUR/m ²	besparing energiekos- ten totaal EUR/m ²	besparing energie- kosten %
per jaar									
referentie	62.5	6.76	4.38	11.14	0.1782	0.00	11.81	0.00	
variant A	0.0	0.00	0.00	0.00	-	0.40	12.00	-0.19	-1.6%
variant B	43.1	4.66	2.22	6.88	0.1597	0.92	7.02	4.79	40.6%
variant C	42.1	4.56	2.44	7.00	0.1663	0.79	8.40	3.42	28.9%
variant D	44.6	4.82	2.85	7.67	0.1721	0.70	9.09	2.72	23.0%

Meeropbrengst product

Naast besparing op energiekosten is een andere belangrijke “cash-in flow” de verwachte meeropbrengst van de gewasproductie. De meerproductie is door PPO geschat met het programma ECP (zie ook paragraaf 2.3 en bijlage D). Er wordt een gemiddelde verkoopprijs van de meerproductie aangenomen van 0.643 Euro/kg (uitgangspunt 13, paragraaf 5.1). De meerproductie en –opbrengst van de 4 vier systeemvarianten is weergegeven in tabel 5.6.

Tabel 5.6 Meerproductie en meeropbrengst als gevolg van hogere CO₂-concentratie in kas (per m² kas)

Variant	verwachte productie	meer-productie	meer-productie procentueel	gemiddelde verkoopprijs	Meer-opbrengst per jaar
per jaar	kg/m ²	kg/m ²	%	EUR/kg	EUR/m ²
variant A	61.4	6.04	10.9%	0.64	3.88
variant B	61.4	6.04	10.9%	0.64	3.88
variant C	60.4	5.04	9.1%	0.64	3.24
variant D	59.4	4.04	7.3%	0.64	2.60

Kosten voor extra onderhoud & bediening (O&B)

De specifieke onderhoudskosten voor de extra apparaten/installaties zijn gegeven in tabel 5.2, veelal als een percentage van de investeringen. Voor de gasmotoren en voor de rookgasreinigers (RGR) ten aanzien van het ureumverbruik, zijn de onderhoudskosten gebaseerd op het verwachte aantal draaiuren van deze deelinstallaties. De WK- en RGR-draaiuren zijn voor elke systeemvariant bepaald (zie hoofdstuk 4). Met de kentallen voor òf de onderhoudskosten per draaiuur òf het percentage van de investering kunnen nu de totale onderhoudskosten voor elk van de systeemvarianten en het referentiesysteem worden afgeschat.

We nemen aan dat de bedieningskosten niet toenemen, daar naar verwachting de nieuwe installaties grotendeels automatisch zullen functioneren. De totale (meer)kosten voor onderhoud per variant zijn vermeld in kolom 4 van tabel 5.7.

Kosten voor additieven en afvoer van afval

Hieronder vallen de kosten voor CO₂-inkoop (bij variant A), en ureumverbruik van de rookgasreiniger. De totale jaarkosten voor additieven zijn voor elk van de varianten aangegeven in kolom 5 van tabel 5.7.

Extra verzekeringen

- Zijn in deze studie niet meegenomen (zie uitgangspunt 18 in paragraaf 5.1).

Vermeden investeringen

- Vermeden investeringen zijn in dit project niet aan de orde.

Minder waterinkoop

- Minder waterinkoop: in de tabellen in bijlage 3 is de hoeveelheid water aangegeven die in de ontvochtigers wordt teruggewonnen uit de kaslucht. Deze is in deze studie financieel verder niet gewaardeerd, omdat het niet duidelijk is wat de waarde is bij een tuinder die over een voldoende groot regenwaterbassin beschikt. De omvang van deze post zal sowieso beperkt zijn.

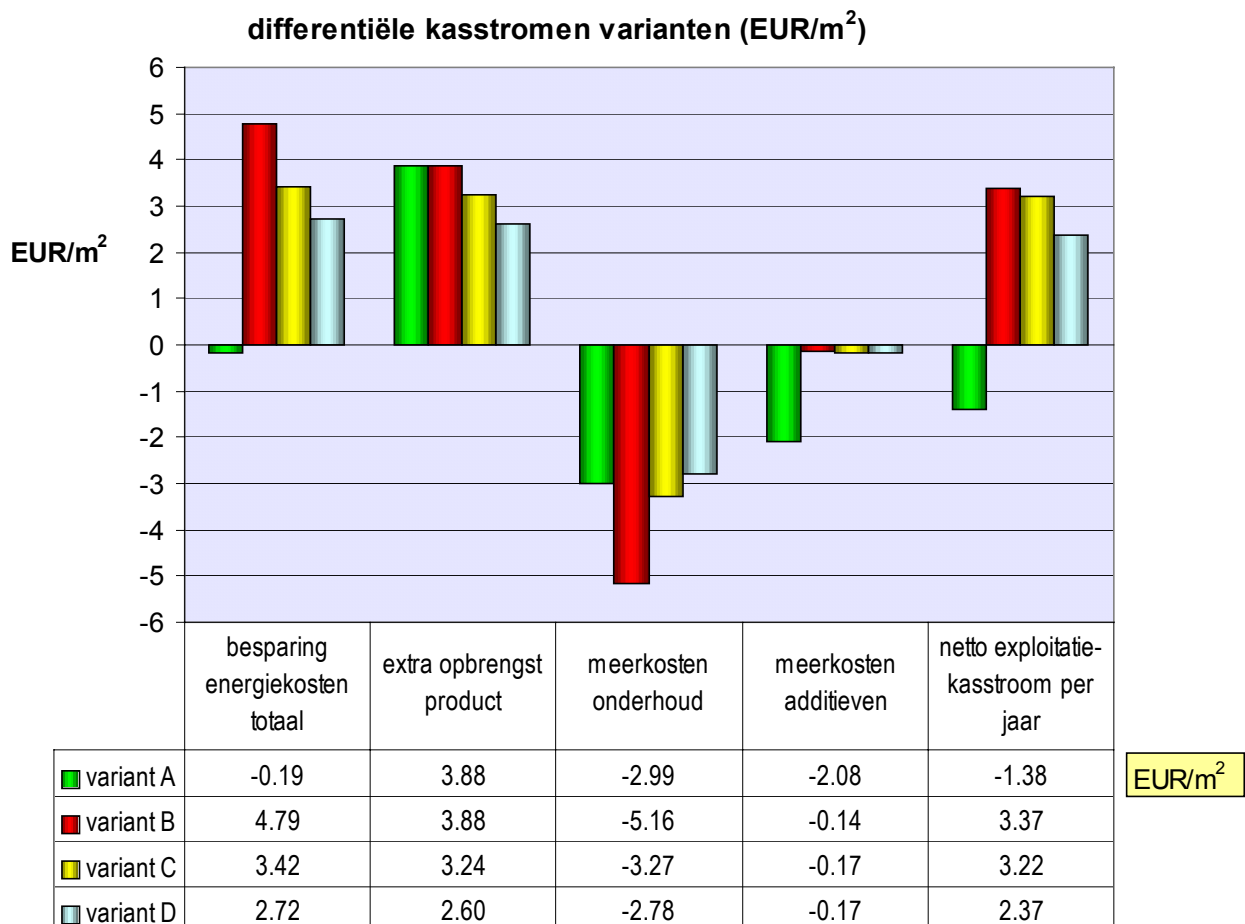
De laatste kolom van tabel 5.7 bevat de resulterende *netto marginale (of differentiële) kasstroom* per jaar voor elk van de onderzochte varianten, dat wil zeggen de som van minderuitgaven voor energie en de extra inkomsten als gevolg van hogere productie minus de extra uitgaven voor onderhoud en additieven. In het vervolg wordt dit ook wel de “netto exploitatiekasstroom” genoemd. Voor een goede interpretatie dient nog het volgende te worden opgemerkt:

- Dit is de kasstroom vóór belastingen. Hierin is het effect van verminderde belastingbetaling door extra afschrijvingen niet verwerkt. Het effect daarvan hangt af van de rechtsvorm en de gehele fiscale positie van de investeerder. Deze is situatiespecifiek. In deze studie is gepoogd de rentabiliteit in eerste instantie zo generiek mogelijk in kaart te brengen. Daarom zijn specifieke fiscale consequenties niet meegenomen.
- In het eerste jaar van de projectevaluatieperiode is er uiteraard nog een grote negatieve kasstroom: de meerinvestering van het alternatieve energiesysteem. Deze moet door de (exploitatiedeel van de) marginale kasstromen in projectevaluatieperiode worden terugverdiend.
- Er is een inflatiepercentage van 0% genomen. Bij een hoger percentage zouden de onderhoudskosten jaarlijks wat toenemen. Aan de andere kant stijgt de gemiddelde verkoopprijs van het product wellicht ook. Beide effecten zullen elkaar dan enigszins compenseren. Het exacte effect blijft op voorhand moeilijk in te schatten. Daarom is er hier gekozen voor een inflatiepercentage van 0.

Figuur 5.1 toont in een balkendiagram per variant de besparing op de jaarlijkse netto energiekosten, de meeropbrengst van de hogere oogst, de extra onderhoudskosten en extra additievenkosten, en de netto marginale kasstroom per jaar (= totale netto exploitatieinkosten) per m² kasoppervlak.

Tabel 5.7 Marginale (differentiële) kasstromen besparing energiekosten, extra productopbrengst, meerkosten onderhoud en meerkosten additieven per variant per jaar. De laatste kolom geeft de totale netto exploitatiekasstroom per jaar (voor 1 ha kas, vóór belastingen).

Variant per ha	besparing energiekosten totaal EUR/a	extra opbrengst product EUR/a	meerkosten onderhoud EUR/a	meerkosten additieven EUR/a	Netto exploit. kasstroom per jaar EUR/a
variant A	-1 895	38 828	-29 922	-20 845	-13 834
variant B	47 923	38 828	-51 632	-1 405	33 714
variant C	34 158	32 416	-32 667	-1 673	32 234
variant D	27 184	26 004	-27 766	-1 750	23 673



Figuur 5.1 Besparing op jaarlijkse uitgaven voor energie (gas en elektriciteit), meerinkomsten extra productie, meeruitgaven voor onderhoud en voor additieven en netto exploitatiekasstroom per jaar (in EUR per m² kas).

Uit tabel 5.7 en figuur 5.1 blijkt duidelijk dat variant A (de “all-electric” kas met alleen een elektrische warmtepomp voor de energievoorziening en CO₂-inkoop) zichzelf niet kan terugverdienen, daar de netto exploitatiekasstroom negatief is. De terugverdientijd van de overige varianten zal in de volgende paragraaf worden behandeld.

5.4 Rentabiliteit en investeringsbeoordeling

Om de rentabiliteit van de verschillende varianten te kunnen beoordelen en onderling vergelijken, worden de volgende investeringsbeoordelingskentallen bepaald (voor zover mogelijk):

- *Netto-contante-waarde NCW* (engels: Net Present Value (NPV)): dit is de som van alle verdisconteerde (d.w.z. naar het begin van de projectevaluatieperiode ‘contant gemaakte’) uitgaande en inkomende cashflows van het project. De interestvoet (verdisconteringsrente) is in principe gelijk aan het minimum rendement dat vereist wordt voor de investering. Een NCW groter dan 0 betekent een hoger rendement, een negatieve NCW juist een lager rendement. Hoe groter de NCW, hoe aantrekkelijker financieel gezien de optie is. De NCW zegt weinig over het risico van de investering. Daarvoor dienen meerdere aspecten te worden bekeken (zie ook de gevoeligheidsanalyse in paragraaf 5.5).
- *Interne rendementsgraad* van project (engels: Internal Rate of Return, IRR): dit is de verdisconteringsrente waarbij de netto-contante-waarde van de cashflows over de beschouwde periode juist 0 is. De IRR wordt ook wel het “*projectrendement*” genoemd.
- *(Eenvoudige) terugverdientijd (TVT) = investering / netto jaarlijkse financiële besparing*
Dit kental wordt vaak gebruikt als eerste indicatie om de rentabiliteit te beoordelen. Voor een evenwichtige, complete beoordeling is ze echter onvoldoende omdat er van wordt uitgegaan dat in alle perioden dezelfde besparing zal optreden, wat niet het geval hoeft te zijn, en omdat er geen rekening wordt gehouden met de tijds waarde van de kasstromen.
- *Verbeterde terugverdientijd* (afgekort VTVT, ook wel genoemd ‘Discounted Payback Period’): dit is de periode waarin de verdisconteerde opbrengsten juist de initiële investering zullen hebben terugbetaald. Deze ‘pay-back indicator’ houdt rekening met de tijds waarde van de kasstromen. Alhoewel de (verbeterde) terugverdientijd op zich zelf geen voldoende criterium is om investeringsprojecten te beoordelen, geeft ze wel een indicatie omtrent het risico van het project: het is relatief eenvoudiger om kasstromen in de nabije toekomst in te schatten dan die in de verre toekomst. Een project met een korte pay-back periode heeft dus een lager risico dan een project met een lange pay-back periode.

De berekeningen van de investeringsbeoordelingskentallen kunnen (zodra de kasstromen bekend zijn) relatief gemakkelijk worden uitgevoerd. Alle cash-flows worden voor elk jaar in de evaluatieperiode opgeteld tot netto cash-flows per jaar. De uitgaven voor de bouw wordt uitgegeven in jaar “0” maar worden rekentechnisch met de bouwrente herrekend naar een cash-out flow in het jaar 1. De IRR en NCW worden vervolgens berekend uit de resulterende cashflows per jaar over de evaluatieperiode van jaar 1 tot en met jaar n (waarin n het laatste jaar van de evaluatieperiode is). De resultaten van de berekeningen zijn in onderstaande tabel samengevat. (Details over de berekening voor variant C vindt u in bijlage H).

Tabel 5.8 Rentabiliteitskentallen van verschillende systeemvarianten (per m² kas)

Rentabiliteitskentallen	TVT	VTVT	NCW	IRR	evaluatie- periode	fiscale / financiële instrumenten	CO ₂ -kosten- effectiviteit
Systeemvariant	jaar	jaar	EUR/m ²	%	jaar		EUR/ton
A: EWP-only (205 W/m ²)+ATES (170 W _k /m ²); E+CO ₂ -inkoop	-	-	-197.3	neg.	15	geen	637
B: EWP (160 W/m ²)+GM (48 W _g /m ²)+ATES (190 W _k /m ²)	65	>50	-181.1	-16.1	15	geen	542
C: KO (300 W/m ²)+EWP (103 W/m ²)+GM (30 W _g /m ²)+ATES (120 W _k /m ²)	43	>50	-103.5	-12.4	15	geen	440
D: KO (200 W/m ²)+EWP (77 W/m ²)+GM (24 W _g /m ²)+ATES (80 W _k /m ²)	51	>50	-95.2	-14.0	15	geen	441

Uit tabel 5.8 blijkt duidelijk dat geen van varianten op zichzelf (zonder fiscale instrumenten of subsidies) bedrijfseconomisch aantrekkelijk is. Varianten B, C, D verdienen zich weliswaar terug maar de terugverdientijd (TVT) is onacceptabel lang. De netto contante waarde is (bij de aangenomen verdisconteringsrente van 6%) in alle gevallen negatief. Per m² kas loopt de netto contante waarde van variant A naar D op van -197 Euro/m² tot -95 Euro/m². Variant A verdient zich zelf zoals eerder opgemerkt niet terug.

In de laatste kolom is de *CO₂-kosteneffectiviteit* gegeven. Deze is gedefinieerd als de jaarlijkse annuïteit van een lening ter grootte van de investering (bij het aangenomen rentepercentage - hier 6% - en bij een looptijd ter grootte van de projectevaluatieperiode, hier 15 jaar) gedeeld door de jaarlijkse CO₂-reductie

Fiscale instrumenten

De overheid wil projecten die energie besparen stimuleren. Hiertoe heeft zij verschillende fiscale instrumenten in het leven geroepen. De belangrijkste zijn de EIA- en VAMIL-regeling. We zullen ze hieronder kort bespreken:

- A. *EIA: energie-investeringsaftrek*: op 1 januari 1997 is de energie-investeringsaftrek-regeling EIA ingevoerd. Investerings in energiebesparende maatregelen en duurzame energietechnieken mogen - voor zover ze op een kwalificerende lijst voorkomen - voor een bepaald percentage van het investeringsbedrag van de fiscale winst worden afgetrokken, waardoor het bedrijf netto minder belasting hoeft te betalen.

Ook warmte- en koudeopslag in de bodem, warmte- en koudebuffersystemen en WK-systemen zijn op deze lijst opgenomen. Het percentage EIA bedraagt momenteel 55%. Effectief betekent dit voor een bedrijf dat 34.5% vennootschapsbelasting betaalt, circa 19% besparing op de investering, mits er voldoende winst gemaakt wordt. In een kalenderjaar wordt per fiscale eenheid/ondernemer over ten hoogste EUR 99 miljoen aan EIA verleend. Vervangingsinvesteringen komen niet in aanmerking voor subsidie evenals gebruikte onderdelen in nieuwe installaties. Bij warmtepompen moet de $COP \geq 3$ zijn en de warmtepomp dient in de winter voornamelijk op de warmtevraag te worden geregeld (hetgeen bij de onderzochte varianten het geval is). Tot de installatie mag ook worden gerekend: warmtewisselaar, bronsysteem bestaande uit grondwaterbron of een bodem-warmtewisselaar, en een lage-temperatuurverwarmingsnet, waarbij alle op de WP aangesloten verwarmingsnetten een ontwerptoevoertemperatuur hebben van maximaal 55°C, en (eventueel) een restwarmteopslagvat. De luchtbehandelingskasten met luchttransport- en distributiesysteem bij de systeemalternatieven worden in deze studie beschouwd als lage-temperatuurverwarmingsnetten.

- B. *VAMIL: willekeurige afschrijving milieu-investeringen*. Op bedrijfsmiddelen uit de VAMIL-lijst kan de ondernemer vrij afschrijven. Afhankelijk van de normale afschrijvingstermijn kan de maatregel een voordeel op de investeringskosten opleveren tussen circa 4% (bij een normale afschrijving in 5 jaar) tot circa 11% (bij een normale afschrijving in 15 jaar).

De bovengenoemde fiscale maatregelen kunnen alleen worden gebruikt als de investeerder belasting betaalt (en winst maakt). We gaan hier in de navolgende berekening vanuit. Desnoods kan op indirecte wijze van bovengenoemde regelingen gebruik worden gemaakt middels financiële (lease-)constructies met banken. De bank koopt in deze situatie de bedrijfsmiddelen en geniet het EIA- en VAMIL-voordeel. De tuinder least de productiemiddelen van de bank. De bank zal (een deel) van het EIA/VAMIL-voordeel weer doorgeven aan de klant, waardoor deze indirect toch van de regelingen kan profiteren. Tabel 5.9 geeft de rentabiliteitscijfers uitgaande van 55% EIA op de investeringen in warmtepomp, WK-installatie, ATES, luchtbehandelingskasten en luchttransport- en distributiesysteem (effectief 19% lagere investering in deze installaties) en VAMIL over deze zelfde productiemiddelen (aannee: afschrijving in het eerste jaar versus normale afschrijving in 10 jaar → effectief 7.6% lagere investering). Voor variant B loopt de terugverdientijd van 65 naar 49 jaar, voor C van 43 naar 33 en voor D van 51 naar 39 jaar. De netto contante waarden blijft in alle gevallen nog steeds flink negatief (tussen -151 EUR/m² bij A en -68 EUR/m² bij D). Dus ook met gebruikmaking van de fiscale instrumenten EIA en VAMIL blijven alle energiesysteemalternatieven bedrijfseconomisch onaantrekkelijk. In de volgende paragraaf zal het effect van onzekerheden in de diverse relevante parameters op de rentabiliteitscijfers worden onderzocht.

Tabel 5.9 Rentabiliteitskentallen van systeemvarianten in het geval dat EIA en VAMIL wordt verkregen

Rentabiliteitskentallen	TVT	VTVT	NCW	IRR	evaluatie- periode	fiscale / financiële instrumenten	CO ₂ -kosten- effectiviteit
Systeemvariant	jaar	jaar	EUR/m ²	%	jaar		EUR/ton
A: EWP-only (205 W/m ²)+ATES (170 W _k /m ²); E+CO ₂ -inkoop	-	-	-151.2	-	15	EIA+VAMIL	637
B: EWP (160 W/m ²)+GM (48 W _g /m ²)+ATES (190 W _k /m ²)	49	>50	-128.2	-13.6	15	EIA+VAMIL	542
C: KO (300 W/m ²)+EWP (103 W/m ²)+GM (30 W _g /m ²)+ATES (120 W _k /m ²)	33	>50	-71.9	-9.8	15	EIA+VAMIL	440
D: KO (200 W/m ²)+EWP (77 W/m ²)+GM (24 W _g /m ²)+ATES (80 W _k /m ²)	39	>50	-67.7	-11.6	15	EIA+VAMIL	441

5.5 Gevoeligheidsanalyse rentabiliteitscijfers

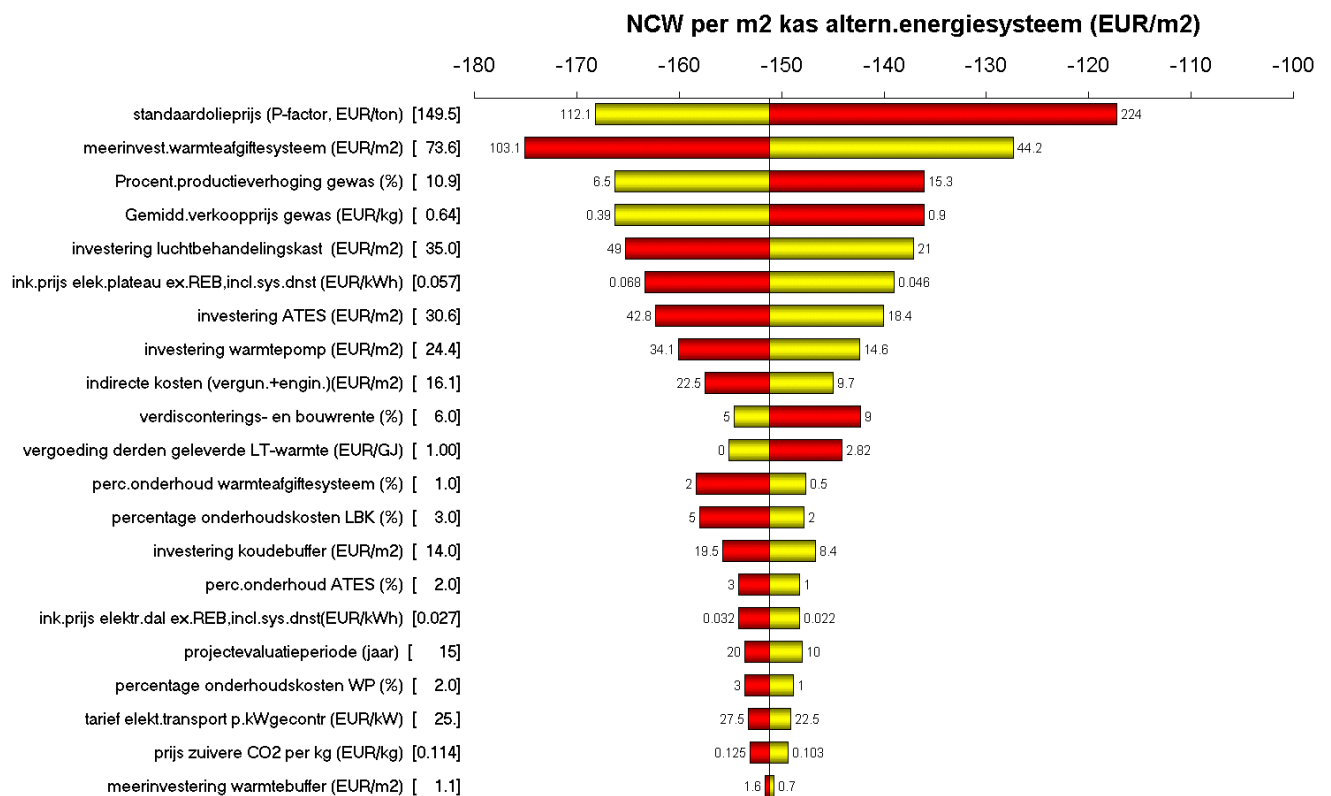
In deze paragraaf zal worden nagegaan hoe gevoelig de rentabiliteitscijfers zijn voor onzekerheden in de belangrijkste bepalende parameters. Daartoe wordt voor elk van die parameters een onzekerheidsgebied geschat. Vervolgens wordt voor elke parameter het effect op de rentabiliteitskentallen berekend, wanneer die parameter tussen de uiterste waarden van het onzekerheidsgebied varieert. De verschillende effecten kunnen worden uitgezet in een zogenaamd ‘**Tornado-diagram**’. Hierin worden in volgorde van afnemende gevoeligheid middels balken de verschillende gevoeligheden uitgezet ten opzichte van de ‘middenwaarde’ (verwachte waarde). Het resulterende diagram heeft een vorm die enigszins lijkt op de trechtersvorm van een tornado, vandaar de benaming.

Figuur 5.2 toont het tornadodiagram voor de netto contante waarde (NCW) van systeemvariant A (all-electric kas met alleen een elektrische warmtepomp als warmte- en koudeproductiemiddel). De verwachte waarde van de NCW bedraagt -151.2 EUR/m² (in de situatie met EIA+VAMIL). De parameters die invloed hebben op de NCW staan links in de figuur. Tussen rechte haken achter de parameterbeschrijving staat de aangenomen ‘middenwaarde’ van de betreffende parameter. De bovenste rode balk geeft aan hoeveel de NCW toeneemt indien de olieprijs (en de daaraan gekoppelde gasprijs) 50% hoger zou zijn. (De olieprijs wordt gekenmerkt door de zogenaamde “*P-factor*”, waarmee ook de gasprijs evenredig is, zie punt 3 paragraaf 5.1.) In termen van de gasprijs betekent de middenwaarde van de P-factor van 149.5 EUR/ton een commodity-prijs van aardgas van 10.82 EURct/m³. De P-waarde rechts bij de rode balk (224 EUR/ton = +50%) betekent een commodityprijs van 16.40 EURct/Nm³. In dit geval zou de NCW oplopen van -151.2 EUR/m² naar -117.3 EUR/m². Een P-waarde van 112.1 EUR/ton (-25%, gele balk) representeert een commodityprijs van 8.02 EURct/Nm³. In dit geval zou de NCW dalen tot -168 EUR/m². De tweede balkenset representeert de onzekerheden in de (meer)investering in het *warmteafgiftesysteem* (transportkanalen en warmtedistributieslangen). Hierin is een onzekerheid van +40% en -40% aangenomen.

Deze onzekerheden kunnen een flink effect op de netto contante waarde hebben (+40% → -175 EUR/m², -40% → -127 EUR/m²). Uit het tornadodiagram kunnen in volgorde van afnemende gevoeligheid de overige invloedsfactoren worden afgelezen. Het *percentage productieverhoging* en de *gemiddelde verkoopprijs van het gewas* hebben ongeveer een zelfde effect op onzekerheid in de NCW (circa +/-15 EUR/m² bij +/- 40% variatie in de betreffende parameter). De investering in de *luchtbehandelingskasten* heeft een bijna even groot maar tegengesteld effect. Daarna volgen respectievelijk:

- de inkoop prijs van een kWh elektriciteit tijdens plateauuren
- de investering in het ATES (aquifer thermal energy storage)
- de investering in de warmtepomp
- de indirecte kosten (vergunningen + engineeringkosten)
- de investerings- en bouwrente
- de vergoeding van aan derden geleverde LT-warmte.

A: EWP-only_4MW+KOV+MT-warmte-+koudebuffer; met EIA en VAMIL; NCW/m2=-151.2



Figuur 5.2 Tornadodiagram van de netto contante waarde van systeemvariant A (met EIA + VAMIL). De kWh-prijzen van elektriciteit en de gasprijs (die is gekoppeld aan de P-factor) zijn hier als onafhankelijke invloeden beschouwd. (Vergelijk dit diagram met dat van figuur 5.3).

- percentage onderhoud van het warmte-afgiftesysteem
- percentage onderhoud van de luchtbehandelingskasten
- de investering in het koudebuffer
- percentage onderhoud van het ATES
- de inkoop prijs van een kWh elektriciteit tijdens daluren
- de duur van de projectevaluatieperiode
- percentage onderhoudskosten van WP
- het transporttarief voor elektriciteit per kW gecontracteerd vermogen
- de prijs van zuivere CO₂ (ten behoeve van bemesting)

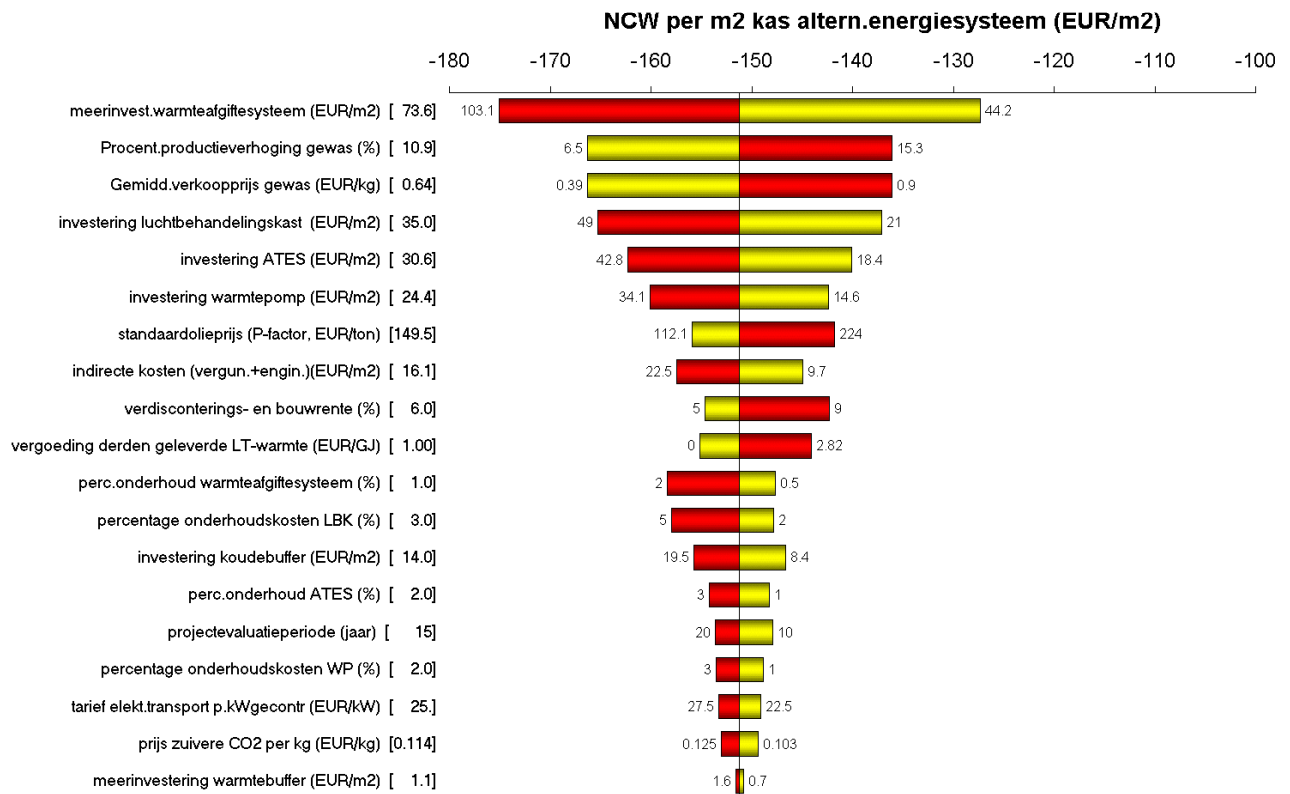
Het effect van de overige invloedsfactoren is verwaarloosbaar. Uit de figuur valt op dat geen van de individuele onzekerheden leidt tot een NCW die ook maar in de buurt komt van een positieve netto contante waarde. Zelfs als de 8 grootste invloedsfactoren tegelijkertijd allemaal de gunstigste waarde zouden hebben, dan nog blijft de NCW negatief.

Koppeling elektriciteitsprijs en gasprijs

In het voorgaande zijn de variaties in de gasprijs en elektriciteitsprijs als onafhankelijk aangenomen. Hoewel de elektriciteitsprijs tot stand komt op een markt waar behalve elektriciteit uit gasgestookte centrales ook elektriciteit van andere oorsprong wordt aangeboden (uit kolen, bruinkool, kernsplijting, biomassa, wind en dergelijke), is het grootste deel van het verbruik in Nederland op dit moment nog gebaseerd op aardgas als primaire energiedrager. De producenten hiervan zullen proberen stijging in de brandstofkosten door te berekenen in de elektriciteitsprijzen zodat de marges gehandhaafd blijven. In het tornadodiagram van figuur 5.3 is er van uitgegaan dat, als de standaardolieprijs (P-waarde) stijgt - en daarmee de commodity-gasprijs - tevens de volumeprijs van elektriciteit voor zowel plateau-uren als daluren stijgt, en wel zoveel dat extra brandstofkosten juist worden gecompenseerd (uitgaande van een gemiddeld centralerendement inclusief transport- en distributieverliezen van 41.9%).

Het valt op dat het effect van de eerder beschreven verandering in de P-factor qua gevoeligheid nu daalt van de eerste plaats naar de zevende plaats. Een 50% hogere P-factor betekent in dit geval nog maar een verbetering van de NCW van circa 9.4 EUR/m² tegen circa 34 EUR/m² in de situatie waarin de elektriciteitsprijs los staat van de standaardolieprijs. De onzekerheid in de meerinvestering in het warmteafgiftesysteem heeft nu de meeste invloed op de NCW. Bij de tornadodiagrammen voor de varianten B tot en met D, die hierna worden gepresenteerd en besproken, wordt verder uitgegaan van volumeprijzen voor elektriciteit die afhangen van de P-factor op de wijze als hiervoor besproken.

A: EWP-only_4MW+KOV+MT-warmte+koudebuffer; met EIA en VAMIL; NCW/m²=-151.2

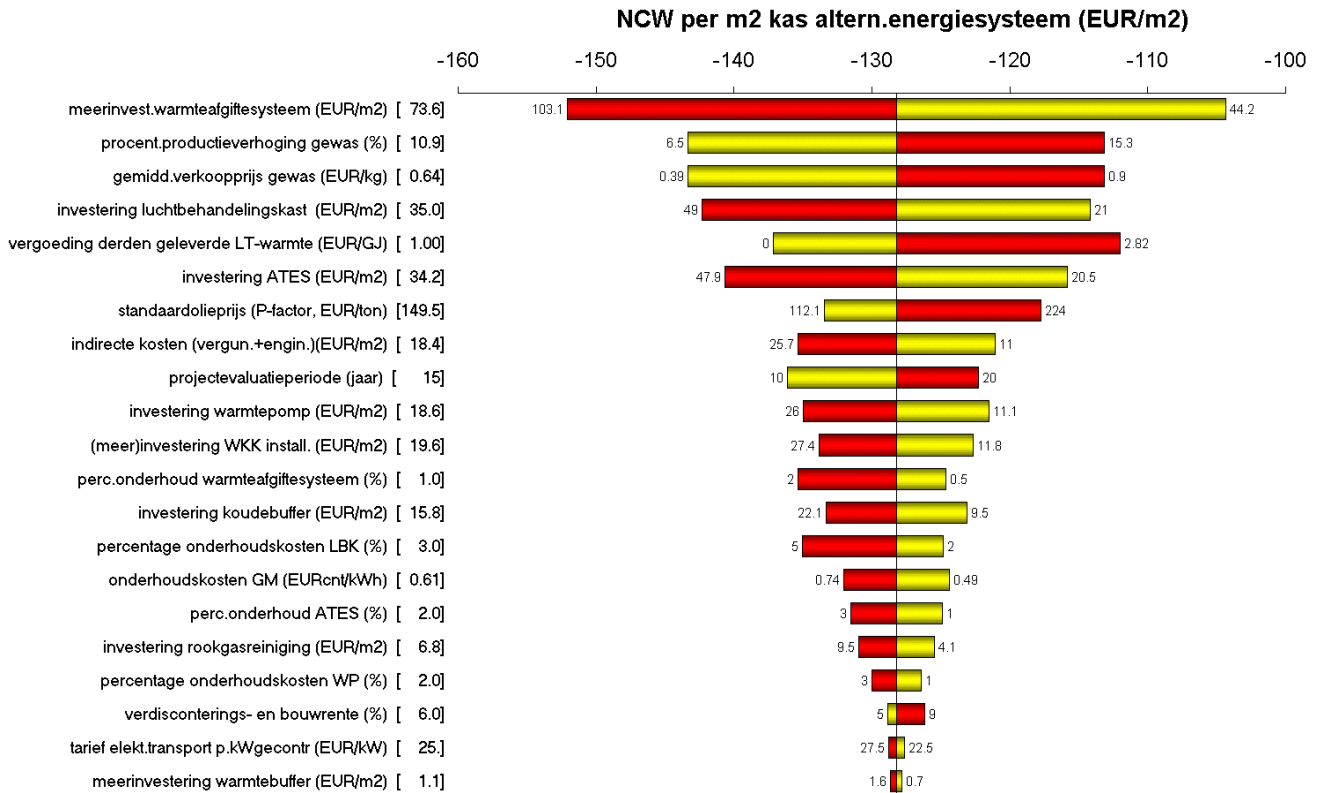


Figuur 5.3 Tornado diagram van de netto contante waarde van systeemvariant A (met EIA + VAMIL). In vergelijking met figuur 5.2, is hier aangenomen, dat een variatie in de P-factor (standaardolieprijs), behalve effect op de gasprijs, ook invloed heeft op de volumeprijs van elektriciteit (voor zowel plateau-uren als daluren)

Figuur 5.4 toont het tornado diagram van de netto contante waarde van variant B in de situatie met EIA en VAMIL. De verwachte waarde van de NCW bedraagt -128.2 EUR/m². Ook bij deze variant is de gevoeligheid van de NCW het grootst voor de onzekerheid in de (meer)investering van het warmteafgiftesysteem (transportkanalen en distributieslangen). Mocht het lukken deze investering 40% goedkoper te realiseren dan de op basis van de huidige informatie verwachte waarde, dan stijgt de NCW met 24 EUR/m².

Uit figuur 5.4 kunnen verder van boven naar beneden in volgorde van afnemende gevoeligheid de andere invloedsfactoren van variant B worden afgelezen. De procentuele productieverbodging en gemiddelde verkoopprijs van het gewas komen ook hier op de tweede en derde plaats, gevolgd door de (meer)investering in luchtbehandelingskasten. Ook bij deze variant valt op, dat de standaardolieprijs (P-factor) pas op de zevende plaats komt qua effect op de NCW.

B: EWP_3.2MW+GM_960kWe+KOV+MT-warmte+koudebuffer; met EIA en VAMIL; NCW/m2=-128.2



Figuur 5.4 Tornadodiagram van de netto contante waarde van systeemvariant B (met EIA+VAMIL). Zowel de commodity gasprijs als de kWh-prijs van elektriciteit zijn gekoppeld aan de P-factor

Verder valt de relatief grote invloed op van de *verkoop van overtollige lage-temperatuur-warmte*. Er is hiervoor een ‘middenwaarde’ aangenomen van 1 EUR/GJ. Als bovenwaarde is er gerekend met een waarde van 2.82 EUR/GJ. Dit bedrag is tot stand gekomen door bij de middenwaarde 1.82 EUR/GJ op te tellen. Dit is momenteel het (REB-)bedrag dat aan de producent van ‘groene warmte’ afkomstig van een biomassawarmtekrachtinstallatie dient te worden vergoed (‘doorgesluisd’) bij levering aan een warmtenet van een energiebedrijf (conform artikel 36o en 36r van de Wbm, Wet belastingen op milieugrondslag).

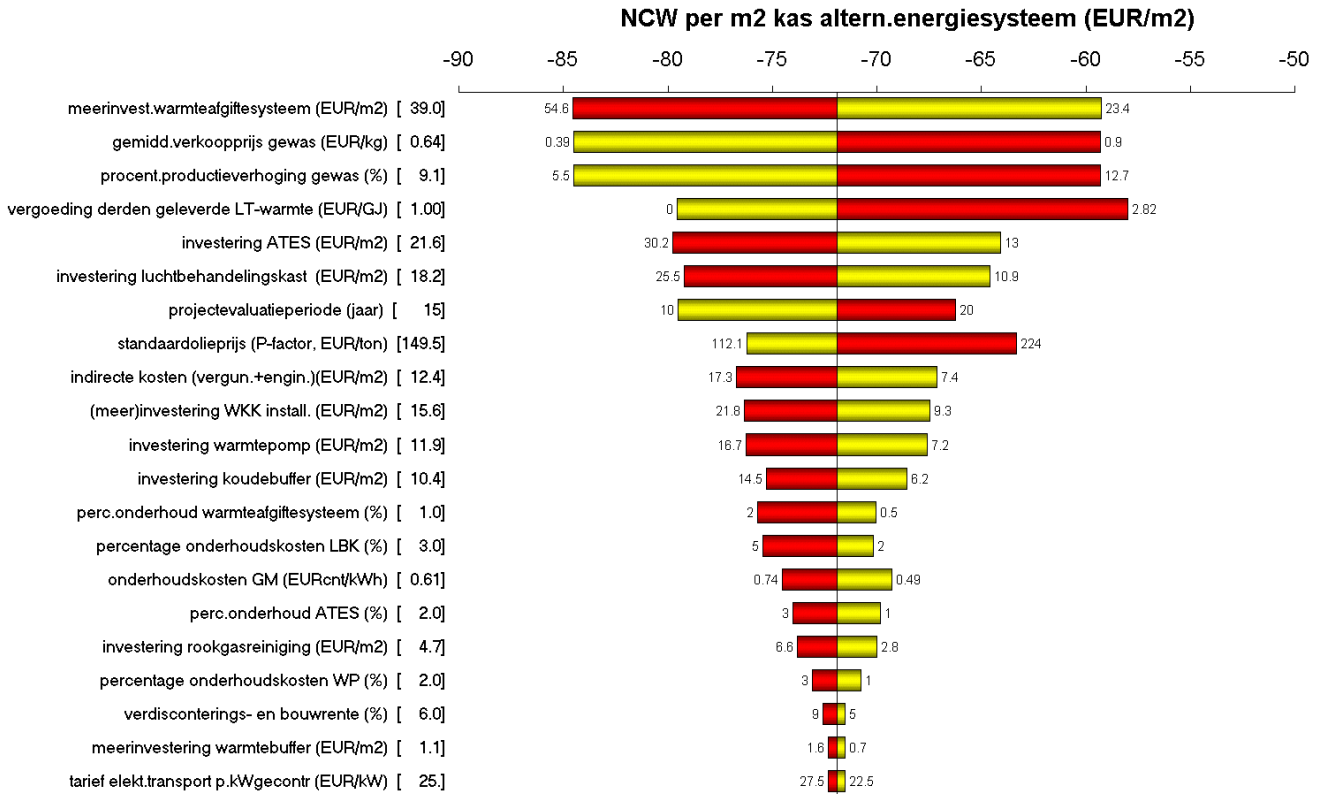
We stellen hier dat het verdedigbaar is, dat ook de in de aquifer van de systeemvarianten A tot en met D opgeslagen warmte (grotendeels) *groene warmte* is, daar deze (merendeels) uit - in het warme deel van het jaar - ingestraalde zonnewarmte is teruggewonnen. Daarom zou het redelijk zijn, dat bij doorlevering van deze warmte aan een derde die deze warmte nuttig gebruikt, ook een ‘REB-doorsluisvergoeding’ wordt verkregen.

Het effect van die (nu nog hypothetische) REB-doorsluizing - die voor de eenvoud is aangenomen voor alle overtollige warmte in de aquifer - is gegeven door de rode balk in het 5-de balkenduo van boven (circa 16 EUR/m²). Een overheidsbesluit om deze REB-doorsluizing mogelijk te maken, heeft dus een significante invloed op de NCW van de variant (alhoewel de totale rentabiliteit van dit concept ook dan nog diep onvoldoende blijft). Overigens kan in de figuur ook worden afgelezen, wat het effect is, indien de overtollige LT-warmte überhaupt niet kan worden verkocht (dat wil zeggen: prijs = 0).

Uit de figuur kan verder worden geconcludeerd dat een procentpunt meer onderhoudskosten op het warmte-afgiftesysteem (van 1 naar 2 %) of bij de luchtbehandelingskasten van 3% naar 5% ook een relatief forse invloed heeft op de netto-contante-waarde (circa -7 EUR/m²). Met name bij de LBK's zijn hogere onderhoudskosten dan in eerste instantie aangenomen te verwachten, als mocht blijken dat de filters frequenter moeten worden vervangen dan 1x per jaar.

Figuur 5.5 toont het tornadodiagram van de netto contante waarde van variant C in de situatie met EIA en VAMIL. De verwachte waarde van de NCW bedraagt -71.9 EUR/m². Ook bij deze variant is de gevoeligheid van de NCW het grootst voor de onzekerheid in de (meer)investering van het warmteafgiftesysteem (transportkanalen en distributieslangen), alhoewel de gevoeligheid in dit geval nagenoeg even groot is, als die voor onzekerheden in de meerproductie en de gemiddelde verkoopprijs van het product. De gevoeligheid voor de onzekerheid in de meerinvestering van de luchtbehandelingskasten is in deze variant ten opzichte van die bij B gezakt van de 4-de plaats naar de 6-de plaats. Dit komt omdat in dit geval het maximale luchtdebiet is gereduceerd van 500 000 naar 260 000 m³/h per ha.

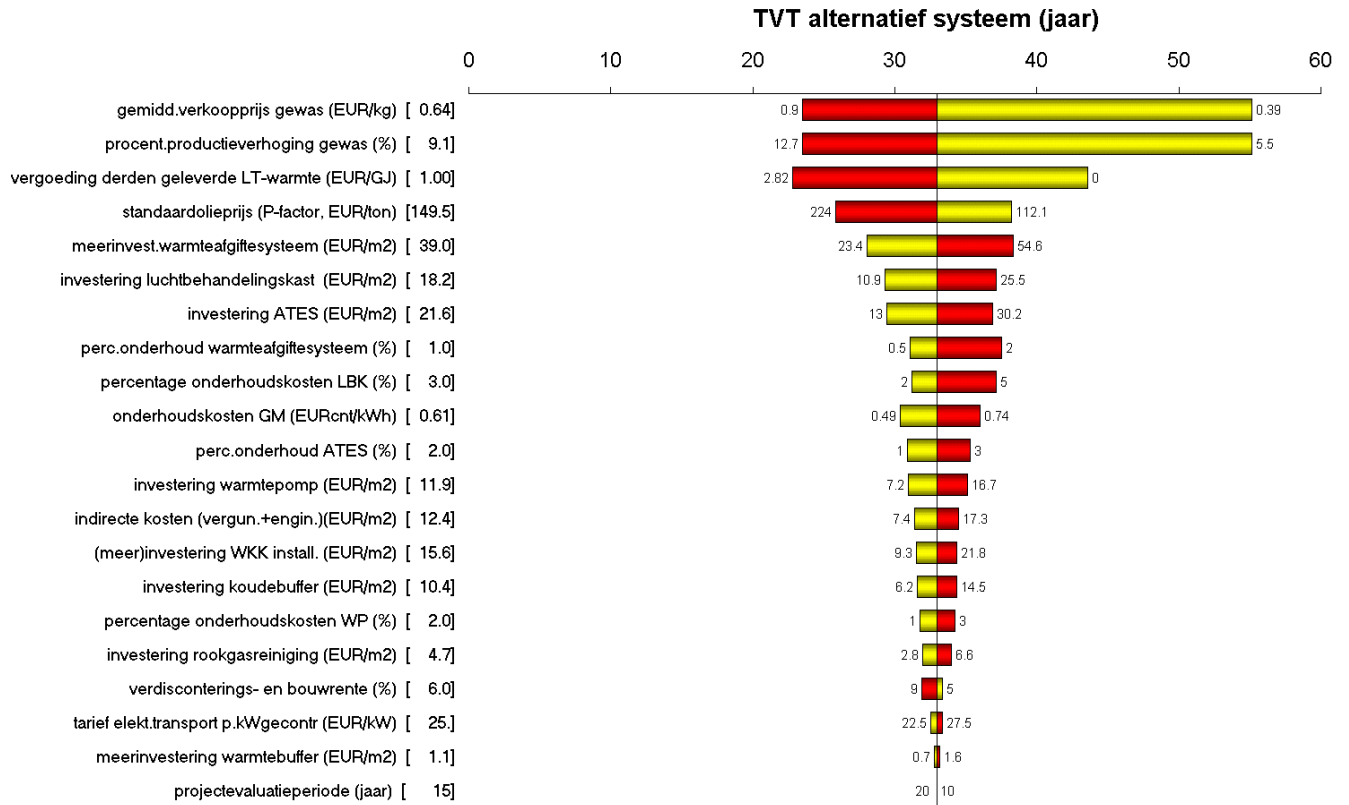
C: KOV_300W/m2+EWP_2MW+GM_600kWe+ketel+W+K-buffer; met EIA en VAMIL; NCW/m2=-71.9



Figuur 5.5 Tornado diagram van de netto contante waarde van systeemvariant C (met EIA+VAMIL). Zowel de commodity gasprijs als de kWh-prijs van elektriciteit zijn gekoppeld aan de P-factor

Variant C had de kortste terugverdientijd (TVT=33 jaar met EIA/VAMIL, zie tabel 5.9). Als extra diagram is voor deze variant in figuur 5.6 het tornado diagram van de (eenvoudige) terugverdientijd gegeven (ook voor de situatie met EIA en VAMIL). De volgorde van de verschillende invloedsfactoren is hier wat anders dan bij de NCW. In dit geval hebben de beide 'gewasfactoren' de grootste invloed. Mocht de gemiddelde prijs van de meerproductie 40% lager uitvallen dan de hier aangenomen middenprijs van 0.64 EUR/kg dan stijgt de TVT naar circa 54 jaar. Een 40% hogere prijs verkort deze naar circa 23.5 jaar. Een 40% hogere productie heeft hetzelfde effect. Het grootste positieve effect op de terugverdientijd heeft de REB-terugsluizing van 1.82 EUR/GJ als extra vergoeding op de aangenomen middenprijs van overtollige bronwarmte. De TVT verkort dan met circa 10 jaar tot 22.8 jaar. De (meer)investeringen in respectievelijk warmteafgiftesysteem, luchtbehandelingskast en ondergronds warmteopslagsysteem (ATES) volgen in dit geval pas op plaats 5 tot en met 7.

C: KOV_300W/m2+EWP_2MW+GM_600kWe+ketel+W-+K-buffer; met EIA en VAMIL; TVT=33.

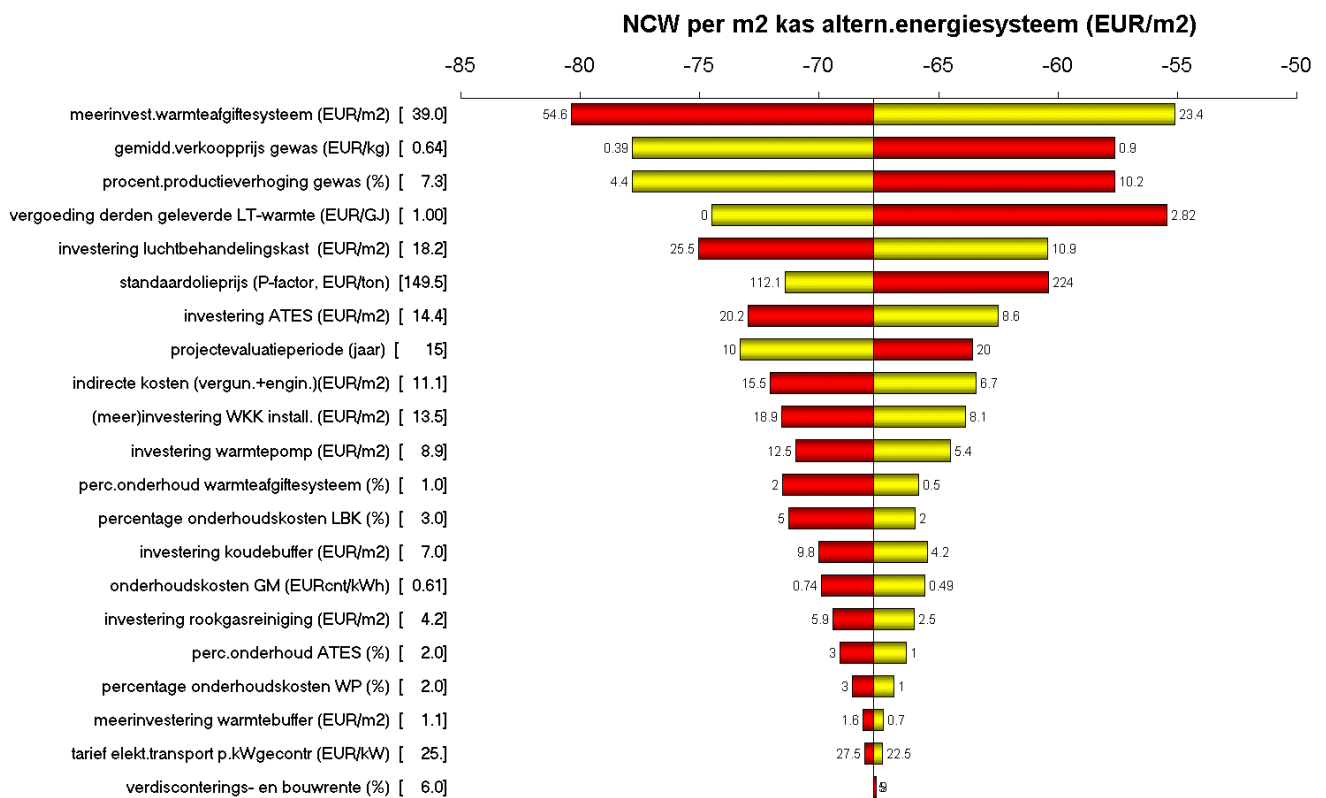


Figuur 5.6 Tornado diagram van de terugverdientijd van systeemvariant C (met EIA+VAMIL)

Als extra gevoeligheidsberekening is nog nagegaan wat er met de TVT gebeurt, indien er in het geheel *geen onderhoudskosten* zouden zijn. Dit is *geen realistische situatie* maar is gedaan, omdat in eerdere studies naar de bedrijfseconomische aantrekkelijkheid [21] de onderhoudskosten zijn verwaarloosd. We willen hier de impact van die verwaarlozing laten zien. De eenvoudige terugverdientijd zou dan halveren dan van circa 33 jaar naar 16.4 jaar en zou dan in de regionen van een enigszins acceptabele “pay-back” komen.

Figuur 5.7 toont het tornadodiagram van de netto contante waarde van variant D in de situatie met EIA en VAMIL. De verwachte waarde van de NCW bedraagt -67.7 EUR/m². Ook bij deze variant is de gevoeligheid van de NCW het grootste voor de onzekerheid in de meerinvestering van het warmteafgiftesysteem (transportkanalen en distributieslangen), gevolgd door de gevoeligheid voor de onzekerheden in de meerproductie en de gemiddelde verkoopprijs van het product. De investering van de luchtbehandelingskasten drukt hier weer iets zwaarder op de NCW dan bij variant C. Verder lijkt het diagram sterk op dat van C.

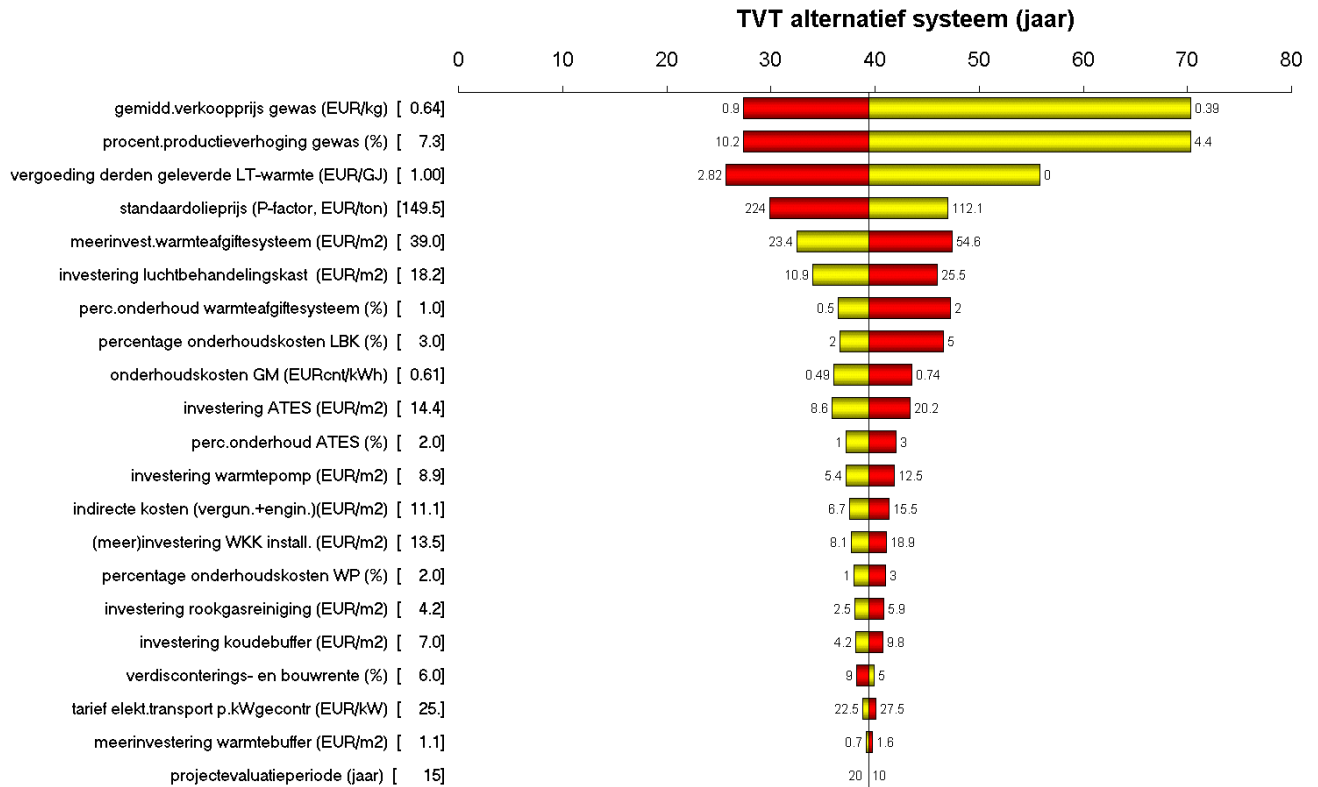
D: KOV_200W/m2+EWP_1.4MW+GM_480kWe+ketel+buffers; met EIA en VAMIL; NCW/m2=-67.7



Figuur 5.7 Tornadodiagram van de netto contante waarde van systeemvariant D (met EIA+VAMIL). Zowel de commodity gasprijs als de kWh-prijs van elektriciteit zijn gekoppeld aan de P-factor.

Figuur 5.8 toont het tornadodiagram van de terugverdientijd van variant D (in de situatie met EIA+VAMIL). De verwachte waarde ligt op circa 39 jaar. Het diagram lijkt veel op dat van variant C (figuur 5.5). Ook hier heeft de extra "REB-terugsluisvergoeding" van 1.82 EUR/GJ op de aan derden geleverde overtollige warmte het grootste positieve effect op de terugverdientijd. De investering blijft echter in alle gevallen ook qua terugverdientijd onaantrekkelijk.

D: KOV_200W/m2+EWP_1.4MW+GM_480kWe+ketel+buffers; met EIA en VAMIL; TVT=39.4

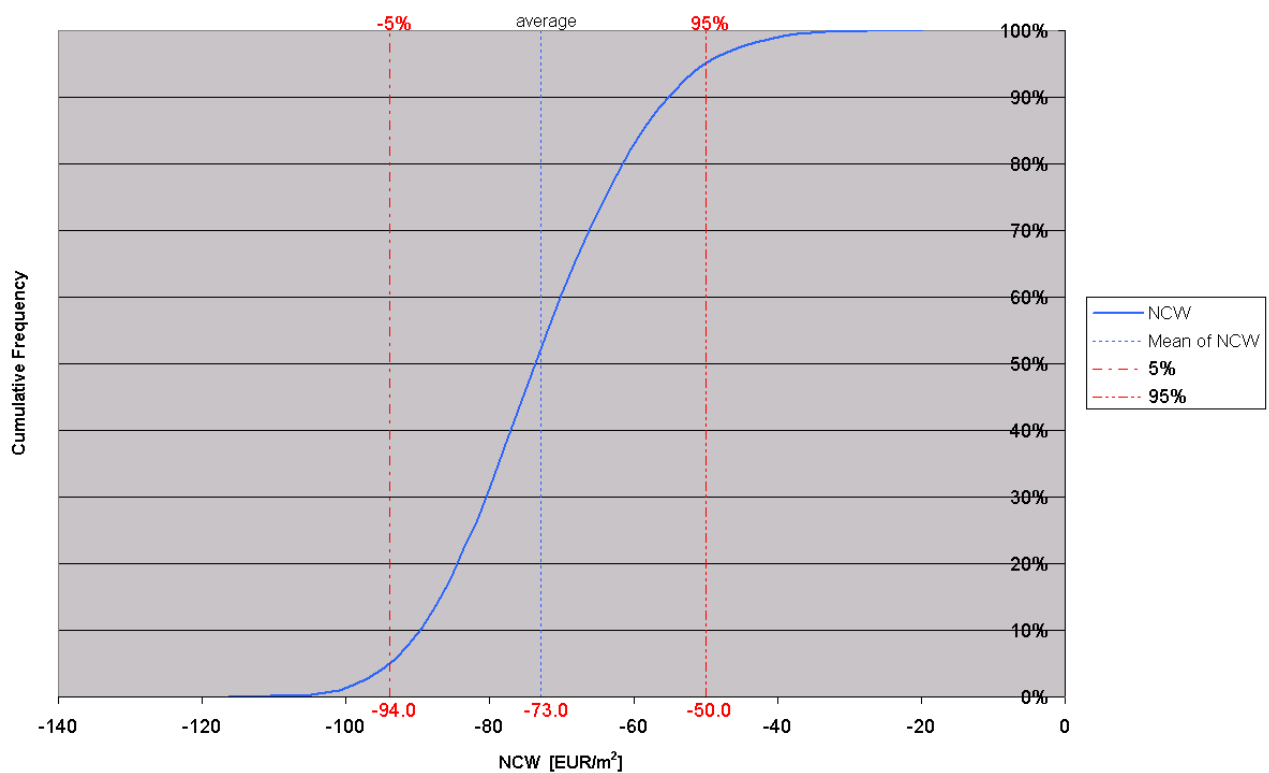


Figuur 5.8 Tornado diagram terugverdientijd van variant D (met EIA+VAMIL)

Verder is nog geanalyseerd of de netto contante waarde van de meest aantrekkelijke (of liever gezegd minst onaantrekkelijke variant) een positieve waarde kan krijgen als een aantal invloedsfactoren tegelijkertijd gunstig uitpakken. Dit is gedaan met behulp van een zogenaamde Monte-Carlo-simulatie. Hierbij kunnen de verschillende invloedsgrootheden willekeurig volgens een bepaalde kansverdeling variëren tussen een minimum en maximum waarde. Bij die set van toevallige waarden wordt vervolgens het rentabiliteitskental in kwestie bepaald. Door deze berekeningen een groot aantal maal (bijvoorbeeld 10000x) te herhalen ontstaat een waarschijnlijkheidsverdeling van het betreffende kental. Deze berekeningen zijn uitgevoerd voor variant C. Ook hier is er weer van uitgegaan, dat de volumeprijzen van elektriciteit (zowel voor plateau- als daluren) niet onafhankelijk variëren maar gekoppeld zijn aan de commodityprijs van aardgas, die op zichzelf weer afhangt van de P-factor ('standaardolieprijs).

Als minimum en maximumwaarden van de verschillende invloedsfactoren zijn de waarden genomen die ook bij de tornado diagrammen zijn gehanteerd. Er is een driehoekvormige kansverdeling gekozen waarbij de kans op de middenwaarde het grootste is, en de kans op een grotere respectievelijk kleinere waarde lineair afneemt tot 0 voor de maximum respectievelijk minimumwaarde.

De resultaten zijn uitgezet in een cumulatieve kansverdelingsfunctie (zie figuur 5.9), die aangeeft hoe groot bij een bepaalde NCW-waarde de kans is dat de feitelijke NCW kleiner dan of gelijk aan die waarde is. Het snijpunt van rode 95%-lijn met de blauwe cumulatieve verdelingsfunctie geeft bijvoorbeeld aan, dat de kans dat de NCW kleiner is dan -50 EUR/m^2 95% is. De kans dat de NCW groter zal zijn is dus slechts 5%! De kans dat de NCW positief is zelfs 0! Er is ook nog een Monte-Carlo-simulatie voor de eenvoudige terugverdientijd (TVT) uitgevoerd. Hieruit volgde dat er 5% kans is dat de terugverdientijd korter zal zijn dan circa 19.3 jaar!



Figuur 5.9 Cumulatieve kansverdelingscurve van de netto contante waarde (NCW) van variant C bij toevallige variaties in de belangrijkste invloedsgrootheden zoals aangegeven in figuur 5.4. De toevallige variaties hebben een driehoekig kansdichtheidsprofiel. Er zijn 10000 berekeningen uitgevoerd. 90% van de berekende NCW's ligt tussen de 5% en 95% lijn, dat wil zeggen tussen -94.0 en -50.0 EUR/m^2 . De kans dat de NCW groter is dan -50 EUR/m^2 is slechts 5%.

Uit de Monte-Carlo-simulaties blijkt duidelijk dat (zelfs) bij deze (qua terugverdientijd) meest gunstige variant - en met optimale gebruikmaking van EIA+VAMIL - onder geen enkele omstandigheid (binnen de gedefinieerde onzekerheidsgrenzen van de relevante invloedsgrootheden) een bedrijfseconomisch aantrekkelijk systeem te verwachten is.

6 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

In paragraaf 6.1 worden de conclusies van het onderzoek gegeven. Deze zijn onderverdeeld in technische, energetische en bedrijfseconomische conclusies. Paragraaf 6.2 geeft enkele aanbevelingen voor verder onderzoek.

6.1 Conclusies

Technisch

1. Bij een energie-intensieve, sterk transpirerende groenteteelt zoals de tomaat is een energievoorzieningssysteem met de functies koelen, ontvochtigen en verwarmen (KOV) van kaslucht ter realisatie van een gesloten of bijna gesloten kas technisch haalbaar. Aan de basis van zo'n systeem staat een koelmachine/warmtepomp (KM/WP) voor warmte-onttrekking respectievelijk warmtelevering. De KM/WP wordt gecombineerd met een systeem voor seizoensopslag van tijdelijk overtollige warmte c.q. koude in een aquifer in de bodem. Desgewenst kan een gasmotor worden toegevoegd voor de levering van de benodigde aandrijfenergie. De hierbij vrijkomende warmte kan in de warmtevoorziening worden gebruikt en zonodig deels in de aquifer worden opgeslagen.
2. Een (per kasafdeling) centraal, lage-temperatuur luchtbehandelingssysteem kan worden gebruikt voor het transport van warmte, vocht en koude van of naar de kas en het overdragen van de warmte of koude tussen de lucht en het verwarmings- respectievelijk koelmedium. Middels een systeem van luchtkanalen langs de gevels en geperforeerde luchtslangen onder de teeltgoten, kan de bewerkte lucht gelijkmatig in de kas worden gebracht. Door de bevestiging onder de teeltgoten wordt in het gewas geen lichtverlies verwacht. Wel dient aan de gevels te worden opgelet dat de aan- en afvoerkanalen en de luchtbehandelingskasten zo min mogelijk boven het niveau van de teeltgoten uitkomen.
3. De jaarlijkse warmtebehoefte van de gesloten of bijna gesloten kas, die middels een uitkoelproces ("koud oppervlak") wordt ontvochtigd, is hoger dan die van een conventioneel geventileerde kas (circa 10 à 15 %). Dit komt omdat in een aantal weersomstandigheden ten behoeve van ontvochtiging meer lucht moet worden gekoeld, dan voor koeling van de kas nodig is. In dit geval moet de lucht na ontvochtiging weer gedeeltelijk worden herverwarmd.
4. De koude piek is veel hoger dan de warmtepiek (circa een factor 3). De koude piek komt echter slechts zeer kortstondig voor, zodat het economisch niet aantrekkelijk is om de capaciteit van de koudeproductie hierop te baseren.
5. Bij een geheel gesloten kas (met een ronde tomatenteelt) wordt een fysieke meerproductie (in kg) van circa 11% verwacht. Bij een bijna gesloten kas met een koelinstallatie met een begrensd koelvermogen van 300 W/m² is dit circa 9%; bij 200 W/m² circa 7%.

6. De aansturing van de diverse productiemiddelen in de energievoorzieningsconcepten (KM/WP, gasmotor, eventueel ketel, ventilatoren in de luchtbehandelingskasten, warmte- en koudebuffer, ATES) is een complex maar ook zeer belangrijk aspect van het energiesysteem. Indien dit niet goed gebeurt, kan veel van de potentiële energiebesparing verloren gaan. Een integrale “inzetstrategie” is noodzakelijk.

Energetisch

7. De gesloten kas of bijna gesloten kas met bijbehorend energiesysteem is qua primair energieverbruik aantrekkelijk. Ten opzichte van de referentiekas is een *besparing op primaire energie* mogelijk tussen circa 24 en 36%, een en ander afhankelijk van de systeemkeuze en componentdimensionering (en nog afgezien van verrekening van eventueel aan derden geleverde overtollige aquiferwarmte).
8. Hierbij treedt een reductie in de productie van CO₂ op van circa 28 à 42 kg/m² kasoppervlak.
9. De grootste besparing op het primaire energieverbruik treedt op bij variant B (geheel gesloten kas met elektrische warmtepomp en WK-installatie), circa 36%. Het energetisch voordeel ten opzichte van variant A (ook een geheel gesloten kas, maar met alleen een elektrische warmtepomp en inkoop van benodigde elektriciteit; besparing op primaire energieverbruik circa 26.5%), wordt vooral veroorzaakt door de opwekking van elektriciteit met een warmtekrachtinstallatie, waarbij de vrijkomende warmte nuttig wordt gebruikt.
10. De *energie-efficiëntie* (energieverbruik per eenheid product) neemt met circa 30 - 43% toe (de hoogste waarde geldt voor variant B, de laagste voor variant D).
11. In de ontvochtigingsinstallatie wordt circa 0.31 à 0.36 m³ water per m² (optredend bij variant D respectievelijk B) teruggewonnen. Dit is ca 35 à 40 % van de gietwaterbehoefte.
12. Voor het transport van de lucht is circa 25 à 42 kWh per m² per jaar nodig, een en ander afhankelijk van het maximale luchtdebiet en de pneumatische weerstanden in het luchtcircuit. Een lager luchtdebiet betekent een lager elektriciteitsverbruik voor het transport, maar ook een groter benodigd temperatuurverschil tussen aanvoer en retour. Dit laatste betekent een hogere temperatuurlift in de koelmachine/warmtepomp en daarmee een lagere COP en dus een hoger elektriciteitsverbruik van dit apparaat.
13. Bij alle systeemvarianten treedt op jaarbasis een overschot aan warmte in de aquifer op (of anders gezegd, is er een koudetekort). Dit overschot is het kleinste bij variant A (met alleen een elektrische warmtepomp) – circa 34 % van geoogste warmte – en circa 56 à 63% bij de varianten met een extra gasmotor. Het warmteoverschot zou bijvoorbeeld aan een belendend tuinbouwbedrijf kunnen worden geleverd. Indien dit niet gebeurt, zal in de winter op een andere wijze additioneel koude moeten worden geproduceerd (bijvoorbeeld koudewinning uit buitenlucht), om het ATES op jaarbasis thermisch in balans te houden. Vanuit energetisch (en financieel) oogpunt wordt dit echter niet aanbevolen.

Bedrijfseconomisch

14. De rentabiliteit van alle onderzochte varianten is veel te laag. Variant A verdient zich in het geheel niet terug. Variant B, C en D hebben een (eenvoudige) terugverdientijd (TVT) van respectievelijk 65, 43 en 51 jaar.
15. De netto contante waarde, bij een aangenomen verdisconteringsrente van 6% en een projectevaluatieperiode van 15 jaar, is in alle gevallen sterk negatief: -197 EUR/m² bij variant A, -181 EUR/m² bij B, -104 EUR/m² bij C en -95 EUR/m² bij variant D.
16. De toepassing van de fiscale instrumenten EIA en VAMIL verbeteren de terugverdientijden van variant B, C respectievelijk D tot 49, 33 en 39 jaar
17. De toepassing van de fiscale instrumenten EIA en VAMIL verbeteren de netto contante waarden tot -151 EUR/m² bij variant A, -128 EUR/m² bij B, -72 EUR/m² bij C en -68 EUR/m² bij variant D.
18. Variant C en D zijn het minst ongunstig. Variant C heeft de kortste terugverdientijd: 33 jaar. Met een Monte-Carlo-simulatie is aangetoond dat de kans dat door toevallige, gunstigere waarden van de relevante rentabiliteitbepalende invloedsfactoren de terugverdientijd (met EIA + VAMIL) korter wordt dan circa 19.3 jaar slechts 5% is. Op soortgelijke wijze is ook bepaald dat er slechts een kans van 5% is dat de netto contante waarde groter (dat wil zeggen beter) zal worden dan -50 EUR/m².
19. De slechte rentabiliteit wordt met name veroorzaakt door de in verhouding tot de jaarlijkse netto inkomsten (besparing op energiekosten en meeropbrengst gewas) benodigde zeer hoge investeringen. Hiervoor zijn in het bijzonder het luchttransport- en distributiesysteem, de luchtbehandelingskasten en in mindere mate het aquifergebaseerde warmteopslagsysteem verantwoordelijk.
20. De jaarlijkse onderhoudskosten drukken zwaar op de jaarlijkse baten. Bij variant B tot en met D zijn de onderhoudskosten nagenoeg even groot (bij B zelfs wat groter) als de jaarlijkse besparing op de energiekosten. Daardoor resteert alleen (een deel van) de extra gewasopbrengst als positieve kasstroom die de investering moet terugbetalen.
21. Bij variant A ("all electric kas") zijn de energiekosten zelfs wat hoger dan die van het referentiesysteem. Verder heeft deze variant relatief hoge kosten voor "additieven", i.c. CO₂-inkoop voor bemesting. De netto jaarlijkse exploitatiekastroom (extra inkomsten minus extra uitgaven) is voor deze variant negatief. Hij zal dus nooit worden terugverdiend.
22. Door het systeem niet op de piekkoudebehoefte te dimensioneren, maar op een fractie ervan, kon het benodigde investeringsniveau met circa 41% worden gereduceerd (variant D versus B). De netto besparing op primaire energie (ten opzicht van de referentie) daalde hierbij van 36% (bij B) naar 25% (bij D) en de productieverhoging van 10.9% naar 7.3%. De netto contante waarde steeg met circa 48% van -181 EUR/m² bij variant B tot -95 EUR/m² bij variant D (zonder EIA en VAMIL). De besparing op de investering is echter nog steeds onvoldoende voor een rendabel systeem.

23. Behalve een reductie in het absolute aardgasverbruik betekenen de concepten met warmtepomp en WK-installatie ook een besparing op de gemiddelde prijs van een kuub aardgas. Het voordeel ligt tussen 0.61 (bij variant D) en 1,85 Eurocent/Nm³ (bij variant B).
24. Voor een doorbraak van het - energetisch en teeltechnisch aantrekkelijke - gesloten of bijna-gesloten kasconcept is het nodig, dat de benodigde investeringen fors worden verlaagd. De KOV-techniek op basis van centrale luchtbehandeling met bijbehorende transport- en distributiekkanalen, biedt hiertoe naar verwachting onvoldoende perspectief.

6.2 Aanbevelingen

Het warmteoverschot in de aquifer kan worden aangewend om een hogere kastemperatuur in het koude seizoen te realiseren. Daardoor ontstaat er een relatief goedkope stuurmogelijkheid om het oogstmoment te sturen naar de periode waarin de hoogste prijzen worden verwacht

1. In paragraaf 4.1 tot en met 4.5 is aangegeven, dat er over een jaar gezien minder warmte aan de aquifer wordt onttrokken, dan er aan wordt toegevoerd. Er is - zonder additionele koudeoogst in de winter - een netto koudetekort, of wel een (lage-temperatuur) warmteoverschot. Dit overschot kan bijvoorbeeld aan een naburig bedrijf worden geleverd, mits dit bedrijf ook over een warmtepomp beschikt. Als alternatief zou het overschot eventueel (deels) ook kunnen worden aangewend om bijvoorbeeld in de winter de eigen kas op een hogere temperatuur te bedrijven dan met een conventioneel energievoorzieningssysteem economisch verantwoord zou zijn. Dit biedt naar verwachting mogelijkheden om de productie gedurende winter meer te sturen, zodat er meer productie is in perioden waarin er naar verwachting een hogere prijs dan gemiddeld haalbaar is. Hiermee kan de post extra productie(waarde) waarschijnlijk nog extra worden vergroot.

Hogere CO₂-concentratie en daarmee hogere fysieke opbrengst mogelijk

2. Bij toepassing van een WK-installatie (varianten B, C en D) is er, als de WK draait en de ramen gesloten zijn, een flink overschot aan CO₂ (zie jaarbelastingduurkrommen 4.4, 4.5, en 4.6). Dit betekent, dat bij een (bijna) gesloten kas voor de CO₂-concentratie een hoger setpoint kan worden gehanteerd dan dat van het referentiesysteem (zoals in deze studie is gebeurd). Door de hogere CO₂-concentratie is naar verwachting een hogere meeropbrengst haalbaar dan die in deze studie is bepaald, waardoor de rentabiliteit van de (WK-gebaseerde) energieconcepten verbetert.

Investeringskosten moeten omlaag.

3. Om tot een rendabel systeem te komen is het nodig met name de investeringen in het warmteafgiftesysteem (transportkanalen en distributieslangen) en van de luchtbehandelingskosten te verminderen. Er wordt aanbevolen om samen met leveranciers te zoeken naar mogelijkheden om op de investeringskosten hiervan te besparen (bijvoorbeeld vervanging van plaatstaal met isolatie door goedkopere alternatieven, optimalisering van de kanalen-layout, toepassing van andere, goedkopere slangmaterialen en slangperforatietechnieken, montage gedeeltelijk door 'eigen' mensen van het tuinbouwbedrijf en dergelijke), en de grenzen van de investeringskosten in kaart te brengen..
4. Gezien het hoge prijsniveau van het luchtbehandelingssysteem met luchttransport- en distributiesysteem wordt aanbevolen ook naar andere koel-/ontvochtigingstechnieken te kijken: de uitdaging is een KOV-systeem te vinden met veel lagere investeringskosten, maar dat toch zowel een goede "koudedichtheid" heeft, geen of nauwelijks lichtonderschepping kent, alsmede een goede verdeling van zowel warmte als koude in horizontale en verticale richting heeft. Een potentieel interessant systeem bestaat uit compacte, decentrale KOV-units die verspreid in de kas worden opgehangen. Een belangrijk onderzoekspunt hierbij is de genoemde egale verdeling van de koude en warmte. Met CFD-berekeningen (computer fluid dynamics) kan hierin meer inzicht worden verkregen.

Condenswater

5. Het water dat in de ontvochtigingsunits condenseert, is gedemineraliseerd water (circa 3000 à 3500 m³ per ha per jaar). In principe heeft dit water een hogere waarde dan normaal kraan- of regenwater. Deze waarde is in deze studie nog niet optimaal aangewend. Hiervoor zijn een aantal mogelijke toepassingen denkbaar, die al dan niet op het eigen bedrijf liggen. Het water zou bijvoorbeeld - na thermische ontgassing – kunnen worden gebruikt voor stomen, waarvoor een hoge waterkwaliteit is vereist. Ook kan worden gedacht aan toepassing in luchtbevochtigers waarvoor gedemineraliseerd water wordt aanbevolen. Verder kan het worden gebruikt in verwarmingssystemen met een grote waterinhoud (systemen met warmtebuffer), waarin - zonder waterbehandeling - de kans op ketelsteen in de ketel door de grote waterhoeveelheid toeneemt. Ook de in deze studie onderzochte energievoorzieningsconcepten hebben met name door de grote koudeopslagtank een zeer grote waterinhoud, waarin het condenswater – deels - zou kunnen worden gebruikt. Het gebruik van het condenswater bespaart op alternatieven voor waterbehandeling en daarom kan er – zowel bij eigen gebruik als bij verkoop - een extra positieve kasstroom aan worden toegerekend, die de economische aantrekkelijkheid van de (bijna) gesloten kasconcepten verhoogt.

CO₂-overschot

6. De varianten met WK-installatie hebben een CO₂-overschot. Dit zou kunnen worden geleverd aan een belendend bedrijf, waardoor extra inkomsten kunnen worden verkregen. Hiermee kan de rentabiliteit van deze varianten worden verbeterd. Ook zou kunnen worden besloten, de rookgasreiniger uit te leggen voor een kleiner rookgasdebiet door een deel van de rookgassen niet voor CO₂-dosering te gebruiken. Zo kan een besparing op de investeringskosten van de rookgasreiniging worden verkregen en daarmee ook een verbetering van de rentabiliteit.

Clustering met bedrijf met bijpassend energie- en CO₂-profiel

7. Qua energieverbruik is het zinvol een cluster te vormen met een nabijgelegen glastuinbouwbedrijf dat in het koude seizoen wél een behoorlijke warmtevraag heeft, maar dat in het warme seizoen slechts een geringe ontvochtigings- (en koel-)vraag heeft. Dit bedrijf zou dan zijn warmtebehoefte kunnen dekken met een warmtepomp, waarbij de benodigde lage-temperatuur bronwarmte geleverd wordt uit het overschot, dat in de aquifer op het bedrijf met de (bijna-)gesloten kas voorhanden is. Ook zou - zoals al in het vorige punt aangegeven - levering van (overschot) CO₂ en eventueel water aan het buurbedrijf kunnen plaatsvinden. Hiermee worden de beschikbare warmte-, CO₂- en wateroverschotten van het (bijna-)geslotenkasbedrijf beter benut, hetgeen goed is voor het milieu en de energieprestatie van het cluster. Tevens wordt het probleem van het koudetekort in de aquifer aangepakt. Een goede match van beide bedrijven is belangrijk. Ook qua regelgeving moet worden gekeken of er geen belemmeringen zijn, onder andere ten aanzien van de doorlevering en verrekening van warmtestromen (in verband met de toerekening aan het primair energieverbruik). Bij problemen zouden de beide bedrijven desnoods juridisch in één bedrijf kunnen worden ondergebracht, hoewel dit in eerste instantie niet gewenst lijkt. Voor het perspectief van de gesloten kas lijkt clustering een belangrijk item. Er wordt voorgesteld deze "symbiotische" clustering van gesloten en niet-gesloten kassen in een projectvervolg nader te onderzoeken en de technische, energetische, bedrijfsceconomische en juridische consequenties ervan nader in kaart te brengen.

7 LITERATUUR

- [1] PPO, "Kwantitatieve informatie voor de glastuinbouw", 2001-2002
- [2] NEN 5060: "Verkort referentiejaar voor buitencondities", 1987
- [3] Bot, G.P.A., "Greenhouse climate: from physical process to a dynamic model", Ph.D. Thesis, Wageningen UR, 1983.
- [4] Boer, W.W. de, E. Tazelaar, "Verwarmingssystemen in de glastuinbouw: dynamisch model van kas en ketelhuis", KEMA 1998.
- [5] Aarssen, M.M. van, "Kansen voor lage-temperatuurwarmte in combinatie met warmtepompen en ondergrondse energieopslag bij (bijna) gesloten kassen – Deelrapport: ondergrondse energieopslag", IF Technology / KEMA, 2002.
- [6] Swinkels, G.L.A.M., H.F. de Zwart. "Standaard teelten", IMAG, 2000
- [7] Gerwen, R.J.F. van, "Kansen voor lage-temperatuurwarmte in combinatie met warmtepompen en ondergrondse energieopslag bij (bijna) gesloten kassen. Deelrapport: opties voor koelen en ontvochtigen", KEMA-rapport 50060657-KPS/SEN 02-3020, 2002.
- [8] Stanghellini, C. "Transpiration of Greenhouse Crops", IMAG, 1987.
- [9] Sep, EnergieNed, "Elektriciteit in Nederland 1997", juni 1998.
- [10] DACE (Dutch Association of Cost Engineers), "Onvoorzien in relatie tot de risicobepaling bij investeringsbegrotingen", G-1-011, rev. 0, april 1984.
- [11] Zwart, H.F. de, "Kostenberekeningsschema voor warmte- en koudeopslagssystemen ten behoeve van de inzet van warmtepompen in de Nederlandse glastuinbouw", IMAG, juni 2002 (concept).
- [12] Boot, "Handboek industriële Warmtepompen", Kluwer, 1998.
- [13] "Prijsstelsel Gasverkoop", www.gasunie.nl
- [14] Berekening gasprijs CDS-systeem, www.tuinbouw.nl/energiebureau
- [15] ISSO, "Langetermijnkoudeopslag in de bodem", publ. 39, 1997.
- [16] ISSO, "Handboek warmtepompen", publ. 38, 1997
- [17] Correspondentie met Jenbacher, 2001
- [18] CoGen Projects, "CO₂-bemesting met rookgassen van W/K-gasmotoren", nov. 1999.
- [19] Budgetofferte leverancier luchtbehandeling, april 2002.
- [20] Correspondentie met NVOE (Nederlandse Vereniging voor Ondergrondse Energieopslagssystemen), mei 2002.
- [21] Raaphorst, M.G.M. (PPO), H.F. de Zwart (IMAG), G.G. Schoonderbeek (Ecofys), e.a., "Evaluatie systeemontwerpen voor ontvochtigen en energievoorziening", 2001.
- [22] Breuer, J.J.G., N.J. van de Braak, "Reference year for dutch greenhouses", Acta Horticulturae 248, 1989.

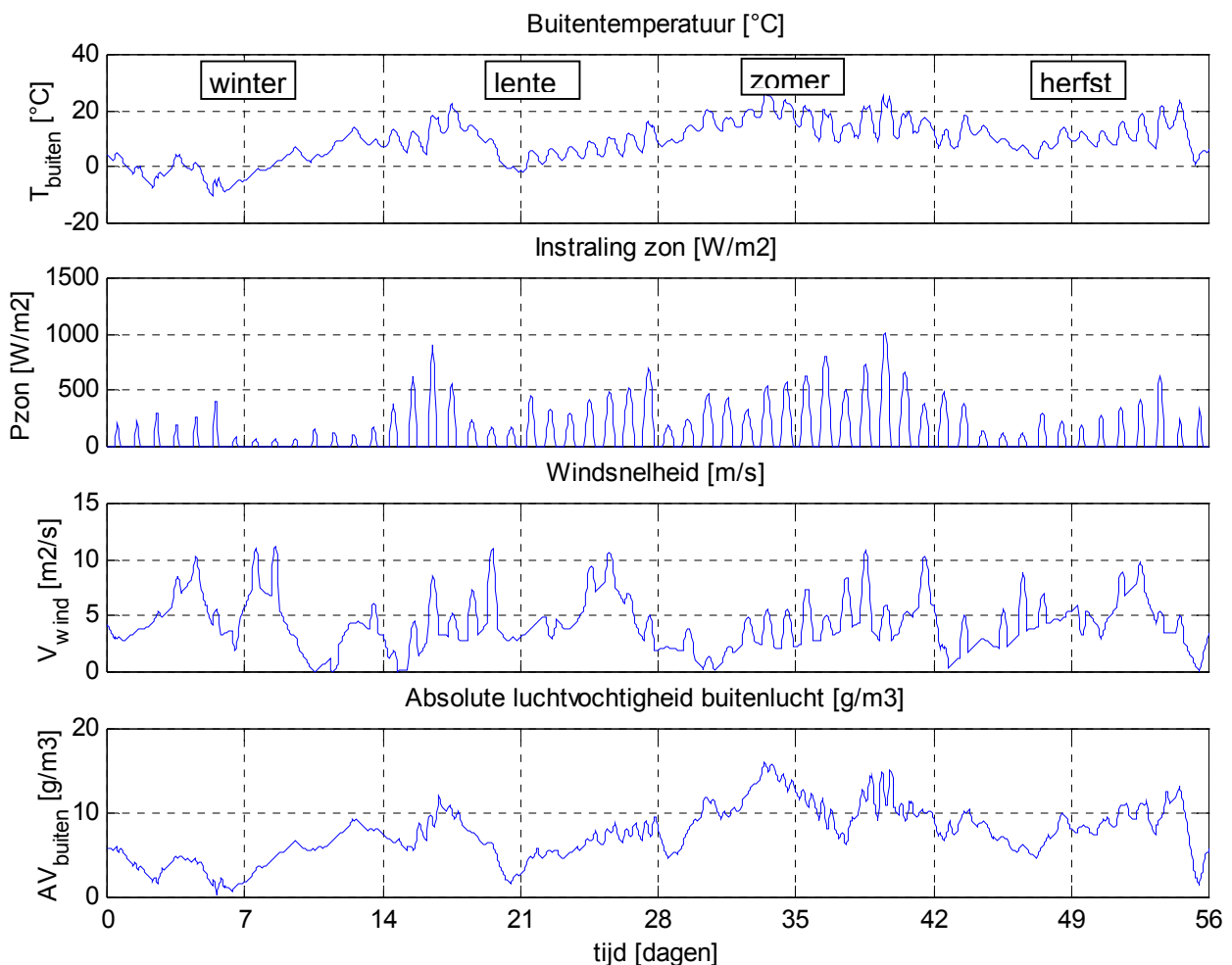
BIJLAGE A KLIMAATREFERENTIEJAAR

Voor jaarrondenergievraagberekeningen aan gebouwen dient voor de buitencondities (weerdeata) een zogenaamd “referentiejaar” te worden genomen dat in voldoende mate zowel dag-/nachtvariaties laat zien, als ook kenmerkende lange-termijn variaties over een jaar. Uiteraard zijn exacte voorspellingen van het weer in een bepaald jaar onmogelijk. In het algemeen zal een representatieve schatting van de energievraag kunnen worden verkregen door uit te gaan van historische weerdata van een meerdere opeenvolgende jaren (bijvoorbeeld 10). Dit betekent echter een zeer groot gegevensbestand en een dito aantal berekeningen. Teneinde het rekenwerk te beperken zijn zogenaamde referentie jaren ontwikkeld (o.a. door de Technische Universiteit Eindhoven en door de Technisch Physische Dienst TNO-TPD). Deze referentie jaren hebben de lengte van één jaar en zijn opgebouwd uit aangeschakelde reeksen uurlijkse waarnemingen van het werkelijke klimaat gedurende maanden van verschillende jaren. Deze delen zijn uit de 10 jaren waarvan de waarnemingen beschikbaar zijn zo gekozen, dat de berekende warmte- en koudebehoefte over deze periode van 10 jaar gemiddeld en over dat gekozen samengestelde jaar zo goed mogelijk met elkaar overeenstemmen. Om de berekeningen verder te versnellen is door de TU Delft het zogenaamd “Verkort referentiejaar” ontwikkeld, dat werkt met representatieve dagen voor de verschillende seizoenen. Het is gebaseerd op een statistische analyse van de werkelijke uurlijkse klimaatgegevens van het KNMI, over een periode van 10 jaar (1961-1970), voor De Bilt. Het resulterende klimaatmodel bestaat uit een beknopt bestand van klimaatgegevens waarin de karakteristieke eigenschappen van het klimaat gehandhaafd zijn, voor zover deze van belang zijn bij de bepaling van het energieverbruik in gebouwen, en bij het berekenen van de gemiddelde opbrengst van zonneboilersystemen. In het “Verkort referentiejaar voor buitencondities” (dat als NEN-norm is aanvaard door de normcommissie 35174 “Klimaatbeheersing in gebouwen [2]) zijn de gegevens van een heel jaar geconcentreerd in 4 seizoenen van 14 dagen.

In dit voorbeeld zal gebruik gemaakt worden van het “Verkort referentiejaar” (volgens NEN 5060). Doordat maar 56 dagen hoeven te worden doorgerekend, kan de simulatie veel sneller worden uitgevoerd (bij een tijdstap van 15 minuten hoeven nu “slechts” 5376 situaties te worden doorgerekend versus 35 040 bij een heel jaar of 350 400 bij 10 opeenvolgende jaren). De cumulatieve verbruiken berekend over het Verkort referentiejaar (VRJ) worden teruggerekend naar een vol jaar.

Figuur A.1 toont het verloop van buitentemperatuur, zonne-instraling, windsnelheid en absolute luchtvochtigheid van het “Verkort referentiejaar”.

De Bilt kan als representatief voor het geografisch gemiddelde van Nederland worden beschouwd. Voor specifieke geografische locaties verdient het aanbeveling de data-set van het



Figuur A.1 Verloop van buitencondities verkort referentiejaar

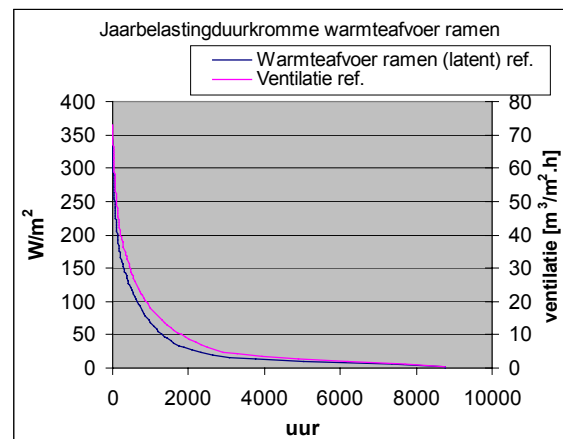
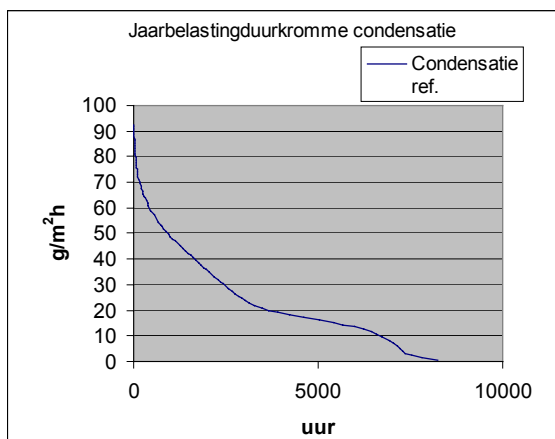
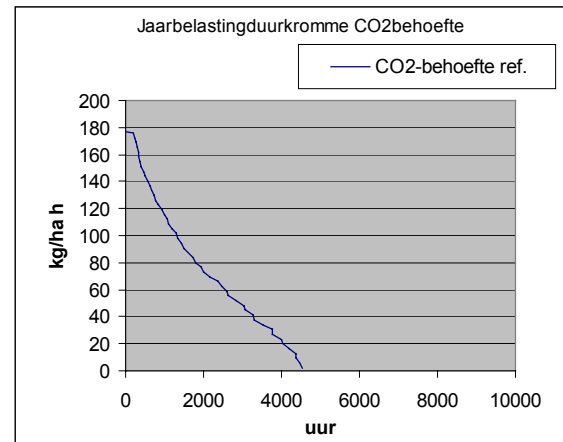
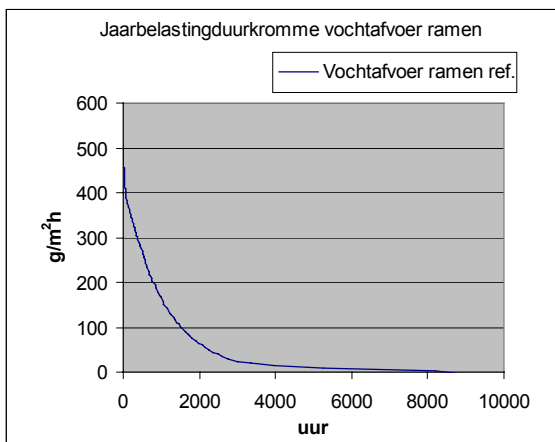
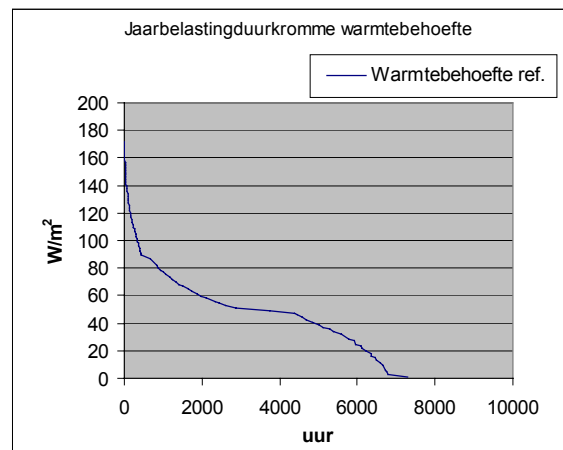
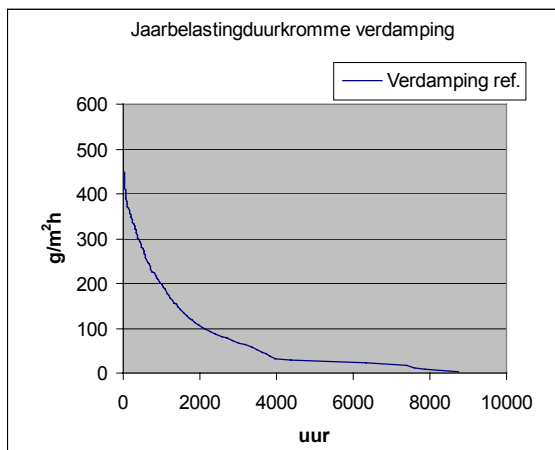
Verkort referentiejaar te corrigeren. Desgewenst kunnen ook andere datasets worden gehanteerd mits deze maar voldoende representatief zijn (bijvoorbeeld “SEL-referentiejaar”, [22]).

Het verkort referentiejaar is gebaseerd op gegevens van 1961-1970. Eind 2001 heeft het KNMI bekend gemaakt, dat de jaren negentig van de vorige eeuw in Nederland 0.8 graden warmer waren dan de voorgaande periode van 30 jaar. Ook werd aangegeven dat er een verband bestaat tussen de wereldwijde temperatuurstijging en de recente warme periode in Nederland. Het KNMI verwacht ook dat de eerste 10 jaar van de 21-ste eeuw duidelijk warmer worden dan het gemiddelde over 1961-1990, maar ongeveer net zo warm als de zeer warme jaren negentig. Met deze jongste inzichten in de klimaatontwikkeling is in deze studie nog geen rekening gehouden.

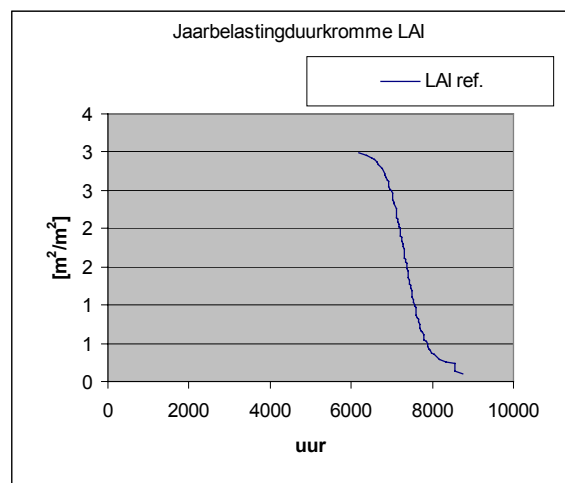
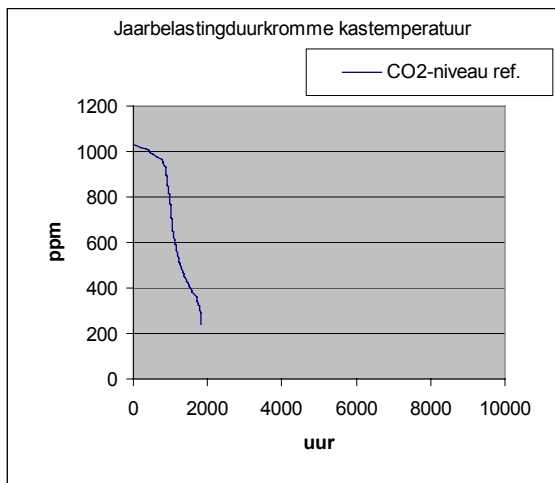
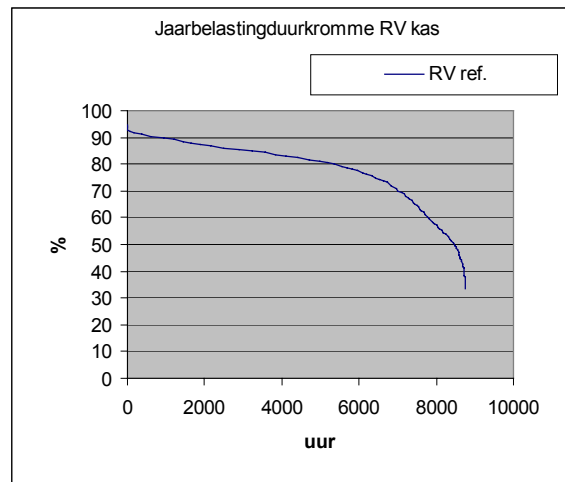
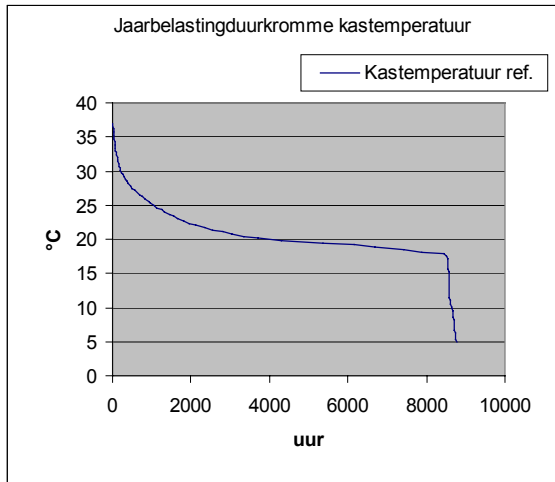
Een berekende absolute warmtebehoefte voor een kas op basis van het VRJ zal derhalve in vergelijking met die zou behoren bij het gemiddelde klimaat van de negentiger jaren wat hoger zijn. Echter, omdat het in deze studie gaat om verschillen in energieverbruik tussen een alternatief en een referentie-energiesystemen, waarbij voor beiden van hetzelfde buitenklimaat wordt uitgegaan, is dit geen probleem. In het verschil van de verbruiken valt het effect van een gemiddeld iets lagere buitentemperatuur grotendeels weg.

BIJLAGE B BEREKENINGEN REFERENTIEKAS/-TEELT MET KASPRO

Hieronder zijn voor de referentiekas met referentieteelte de jaarbelastingduurkrommen gegeven van de verdamping, vochttafvoer via de ramen, condensatie, warmte- en CO₂-behoefte, latente warmteafvoer door ramen met het ventilatiedebiet, zoals berekend door KASPRO



JDBK's van kasttemperatuur, relatieve luchtvochtigheid (RV), CO₂-concentratie en de LAI (leaf-area-index) van de referentiekas met referentieteeelt en condities. De eerste drie zijn berekend met KASPRO. De vierde was hiervoor een ingangsgegeven. (Opmerking: de JDBK van CO₂ lijkt te smal; deze moet naar verwachting circa 2x breder zijn).



BIJLAGE C SCHADEDREMPELS VOOR TOMAAT

(PPO, 12 april 2001)

Hieronder worden de tolerantiegrenzen voor temperatuur aangegeven bij tomaat voor de korte (1 uur) en de lange termijn (1 week). Het tomatengewas is behoorlijk temperatuurtolerant. Wel mag de planttemperatuur niet te veel afwijken van de worteltemperatuur (in verband met verdroging van de cellen)

De gegevens zijn grove richtlijnen die in de praktijk kunnen worden gehanteerd. Nauwkeuriger richtlijnen vergen meer onderzoek. Veel van de drempels zijn ook onderling afhankelijk.

	Minimumgrens 1 uur	Minimumgrens 1 week	Maximumgrens 1 week	Maximumgrens 1 uur
temperatuur kop	5°C	13°C	30°C	35°C
temperatuur voet	13°C	13°C	25°C	25°C

Naar schade door luchtsnelheden is geen onderzoek gedaan. Hierbij zou mogelijk schade kunnen worden verwacht tijdens hoge luchtsnelheden, een lage RV en een lage worteltemperatuur.

De RV mag niet te laag zijn om verdroging te voorkomen. Hierbij is tijdelijk 30% en voor de langere termijn 50% nog geen probleem. Een te hoge RV (>93%) wordt al jaren gezien als klimaat waarin een schimmelziekte als Botrytis gedijt. Toch geeft recent onderzoek aan dat een hoge RV nauwelijks meer Botrytis geeft, terwijl de productiederving door Botrytis juist erger wordt bij een droog klimaat. Wel blijft de voorkeur bestaan om het gewas niet nat te laten slaan (stengel- en vruchttemperatuur mogen niet beneden het dauwpunt komen).

Voor CO₂ geldt: hoe meer CO₂ hoe meer productie. Als stelregel geldt dat indien het niveau daalt onder de buitenwaarde, dat de productie dan wel zeer snel daalt. Bij langdurige omstandigheden boven de 1000-1200 ppm en boven de 700 ppm bij somber weer kan dik blad ontstaan, wat ook tot productiederving kan leiden.

BIJLAGE D DETAILS BEREKENINGEN GESLOTEN EN BIJNA GESLOTEN KASSEN

In deze bijlage zijn een aantal details van de berekeningen van de actief gekoelde gesloten en bijna gesloten kassen gegeven.

Geheel gesloten kas	Extra lichtverhoging 2°C bij globale instraling tussen 500-1000 W/m ²						LAI max 4 (profiel lang plateau); Tcond 12 °C			
	Per	20000 m ²		rel. verandering	mean		Per m ²	rel. verandering		
		normaal	ideale KOV		mean	max		normaal	ideale KOV	dering
Warmtevraag	GJ/jr	31999	28462	-11.1%	45.1	199.8	GJ/m ² jr	1.60	1.42	-11.1%
Herverwarmingsvraag	GJ/jr		8163		9.9	91.5	GJ/m ² jr		0.41	
Totale warmtevraag	GJ/jr		36625	14.5%	55.0	199.8 W/m ²	warmte		1.83	
CO ₂ -vraag	ton/jr	1010.3	334.1	-66.9%	19.1	97.23 kg/ha.h	kg/m ² jr	50.5	16.7	-66.9%
Elektriciteitsvraag	kWh/jr	196918	187691 ^{*)}	-4.7%			kWh/m ² jr	9.85	9.38 ^{*)}	-4.7%
Verdamping gewas	m ³ /jr	12665	11796	-6.9%			m ³ /m ² jr	0.63	0.59	-6.9%
Actieve ontvocht.vraag	kg/jr	0	7224222		41.2	295 g/m ² h	kg/m ² jr	0	361.21	
Teruggewonnen water ontvochtiger	m ³ /jr	0	7224				m ³ /m ² jr	0	0.36	
Actieve ontvocht.vraag (latente warmte)	GJ/jr	0	16685		28.1	201 W/m ²	GJ/m ² jr	0	0.83	
Actief weg te koelen voelbare warmte kaslucht	GJ/jr	0	6322		10.0	219 W/m ²	GJ/m ² jr	0	0.32	
Teveel voelbare warmteonttrekking tgv ontvochtiging			8163				GJ/m ² jr	0	0.41	
Extra koude agv verder koelen dan gepaard m.ontvocht.	GJ/jr		2622				GJ/m ² jr	0	0.13	
Tot. benodigde koude condens.ontvochtiger	GJ/jr		33792		53.6	584.5 W/m ²	koude		1.69	
max netto winbare warmte kaslucht=cond.koude-reheat	GJ/jr		25629				GJ/m ² jr		1.28	
aantal uren CO ₂ overdag = 800 ppm	uren	2500	3950	58%			uren	2500	3950	58%
Benodigde hoeveelheid gietw.	m ³ /jr	18996.8	17694				m ³ /m ² jr	0.9498405	0.88469	
Perc. teruggewonnen water		0	40.8%					0	40.8%	

^{*)} N.B. deze hoeveelheid is nog exclusief hulpelektrictiteit voor de benodigde nieuwe installaties (warmtepomp/koelmachine, pompen ATES, fans LBK's e.d.). Deze wordt separaat bepaald bij de 'inzetberekeningen'

Bijna gesloten kas:	Pcoolmax = 300 W/m ² Extra lichtverhoging 2°C bij globale instraling tussen 500-1000 W/m ²						LAI max 4 (profiel lang plateau); Tcond 12 °C			
	Per	20000 m ²		rel. verandering	mean		Per m ²	rel. verandering		
		normaal	ideale KOV		mean	max		normaal	ideale KOV	dering
Warmtevraag	GJ/jr	31999	35498	10.9%	56.3	199.8 W/m ²	GJ/m ² jr	1.60	1.77	10.9%
Herverwarmingsvraag	GJ/jr		niet apart bepaald		0.0	0.0 W/m ²	GJ/m ² jr			
Totale warmtevraag	GJ/jr		35498	10.9%	56.3	199.8 W/m ²	warmte		1.77	
CO ₂ -vraag	ton/jr	1010.3	378.7	-62.5%	21.6	205.00 kg/ha.h	kg/m ² jr	50.5	18.9	-62.5%
Elektr.vraag	kWh/jr	196918	212068 ^{*)}	7.7%			kWh/m ² jr	9.85	10.60 ^{*)}	7.7%
Verdamping gewas	m ³ /jr	12665	11348	-10.4%			m ³ /m ² jr	0.63	0.57	-10.4%
Actieve ontvocht.vraag	kg/jr	0	6846967		39.1	298 g/m ² h	kg/m ² jr	0	342.35	
Teruggewonnen water ontvochtiger	m ³ /jr	0	6847				m ³ /m ² jr	0	0.34	
Actieve koelvraag (voelbaar)	GJ/jr	0	14816		23.5	227 W/m ²	GJ/m ² jr	0	0.74	
Actieve ontvochtigingsvraag (latente warmte)	GJ/jr	0	16647		26.6	202 W/m ²	GJ/m ² jr	0	0.83	
Extra koude agv verder koelen dan gepaard m.ontvocht.	GJ/jr		niet apart bepaald				GJ/m ² jr	0		
Tot. benodigde koude condens.ontvochtiger	GJ/jr		31463		49.9	300.0 W/m ²	koude		1.57	
aantal uren CO ₂ overdag = 800 ppm	uren	2500	3825	53%			uren	2500	3825	53%
Benodigde hoeveelheid gietw.	m ³ /jr	18996.8	17022				m ³ /m ² jr	0.9498405	0.8511	
Perc. teruggewonnen water van benodigde hoeveelheid		0	40.2%					0	40.2%	

^{*)} N.B. deze hoeveelheid is nog exclusief hulpelektrictiteit voor de benodigde nieuwe installaties (warmtepomp/koelmachine, pompen ATES, fans LBK's e.d.). Deze wordt separaat bepaald bij de 'inzetberekeningen'

Bijna gesloten kas:	Pcoolmax = 200 W/m ² Extra lichtverhoging 2°C bij globale instraling tussen 500-10	Per 20000 m ² rel. veran-				LAI max 4 (profiel lang plateau); Tcond 12 °C			
		normaal	ideale KOV	dering	mean	max	normaal	ideale KOV	dering
Warmtevraag	GJ/jr	31999	35217	10.1%	55.8	199.8	1.60	1.76	10.1%
Herverwarmingsvraag	GJ/jr		0		0.0	0.0		0.00	
Totale warmtevraag	GJ/jr		35217	10.1%	55.8	199.8		1.76	
CO ₂ -vraag	ton/jr	1010.3	451.1	-55.4%	25.7	205.00	50.5	22.6	-55.4%
Elektr.-vraag	kWh/jr	196918	209349 ^{*)}	6.3%			9.85	10.47 ^{*)}	6.3%
Verdamping gewas	m ³ /jr	12665	11428	-9.8%			0.63	0.57	-9.8%
Actieve ontvocht.vraag	kg/jr	0	6301155		36.0	193	0	315.06	
Teruggewonnen water ontvochtiger	m ³ /jr	0	6301				0	0.32	
Actieve koelvraag (voelbaar)	GJ/jr	0	13534		21.5	139	0	0.68	
Actieve ontvocht.vraag (latente warmte)	GJ/jr	0	15297		24.5	132	0	0.76	
Extra koude agv verder koelen dan gepaard m.ontvocht.	GJ/jr		niet apart bepaald						
Tot. benodigde koude condens.ontvochtiger	GJ/jr		28831		45.7	200.0		1.44	
aantal uren CO ₂ overdag = 800 ppm	uren	2500	3750	50%			2500	3750	50%
Benodigde hoeveelheid gietw.	m ³ /jr	18996.8	17142				0.9498405	0.8571	
Perc. teruggewonnen water van benodigde hoeveelheid		0	36.8%				0	36.8%	

^{*)} N.B. deze hoeveelheid is nog exclusief hulpelektriciteit voor de benodigde nieuwe installaties (warmtepomp/koelmachine, pompen ATES, fans LBK's e.d.). Deze wordt separaat bepaald bij de 'inzetberekeningen'

Resultaten koudevraagberekeningen KASPRO en opbrengstberekening ECP

Standaard = referentiekas met referentiecondities

K800 = maximaal koelvermogen 800 W/m² → geheel gesloten kas

K300 = maximaal koelvermogen 300 W/m² → bijna gesloten kas

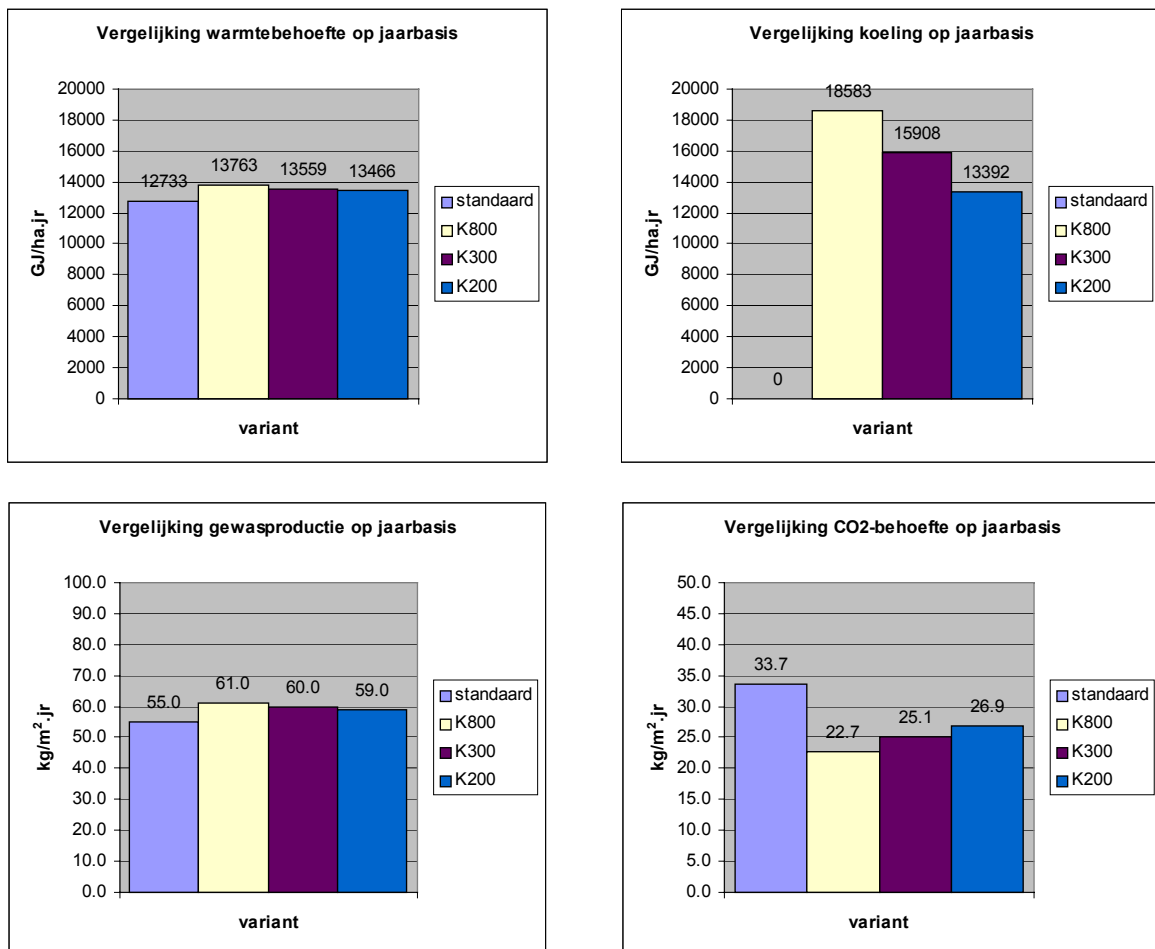
K200 = maximaal koelvermogen 200 W/m² → bijna gesloten kas

Totalen/gemiddelden	eenheid	standaard		K800 gesloten		K300 300 W/m ²		K200 200 W/m ²	
		Kaspro	ECP	Kaspro	ECP	Kaspro	ECP	Kaspro	ECP
Verdamping	mm/jr	638.4		587		593.3		600	
Vochtafvoer ramen	mm/jr	450		65.6		117.4		172.5	
Warmteafvoer ramen	GJ/ha.jr	6351		1141		1688		2342	
Condensatie	mm/jr	197		144		153		159	
Warmtebehoefte	GJ/ha.jr	12733	13948	13763		13559		13466	
CO ₂ -behoefte	kg/m ² .jr	33.7	34.0	22.7	15.0	25.1	34.0	26.9	20
Ventilatie-debiet	m ³ /m ² .jr	61176		14904		20148		25901	
Kastemperatuur	°C	20.6	20.2	19.2	19.0	19.6	19.0	19.8	19
RV	%	78		78		78		78	
CO ₂ -niveau	ppm	745	750	944	970	905	916	872	867
LAI	m ² /m ²	2.5		2.5		2.5		2.5	
Koeling	GJ/ha.jr	0		18583	14319	15908	13967	13392	12710
Ontvochtiging	mm/jr	0		393		326		272	
CO ₂ -ventilatie	kg/m ² .jr		24		4		6		9
CO ₂ -dosering	kg/m ² .jr		34.0		15		17		20
CO ₂ -fotosynthese	kg/m ² .jr		10		11		11		11
Gasverbruik	m ³ .m ² .jr		44.0		46.0		46.0		46.0
Productie	kg/m ² .jr		55.0	10.9%	61.0	9.1%	60.0	7.3%	59.0
Koeling	GJ/ha.jr		0		14319		13967		12710
Luchtuitwisseling dag	m ³ /m ² .jr		108554		6919		16702		32131
Luchtuitwisseling nacht	m ³ /m ² .jr		132960		4778		4778		4778

De belangrijkste grootheden zijn voor een snelle visuele vergelijking uitgezet in de figuren hieronder. De volgende zaken vallen op:

- De warmtebehoefte is bij gesloten en bijna gesloten kassen hoger dan bij een conventionele kas. Dit komt omdat een gedeelte van de gekoelde lucht weer moet worden herverwarmd.
- De totale koudebehoefte is bij de geheel gesloten kas het hoogste en neemt bij de bijna gesloten versies significant af.
- De jaarproductie ligt bij een geheel gesloten kas circa 10.9% hoger dan bij een conventionele kas. Bij een koelvermogen van 300 resp. 200 W/m² daalt dit naar 9.1 resp. 7.3%.
- De CO₂-behoefte van een geheel gesloten kas is circa 67% van die van een conventioneel geventileerde kas.

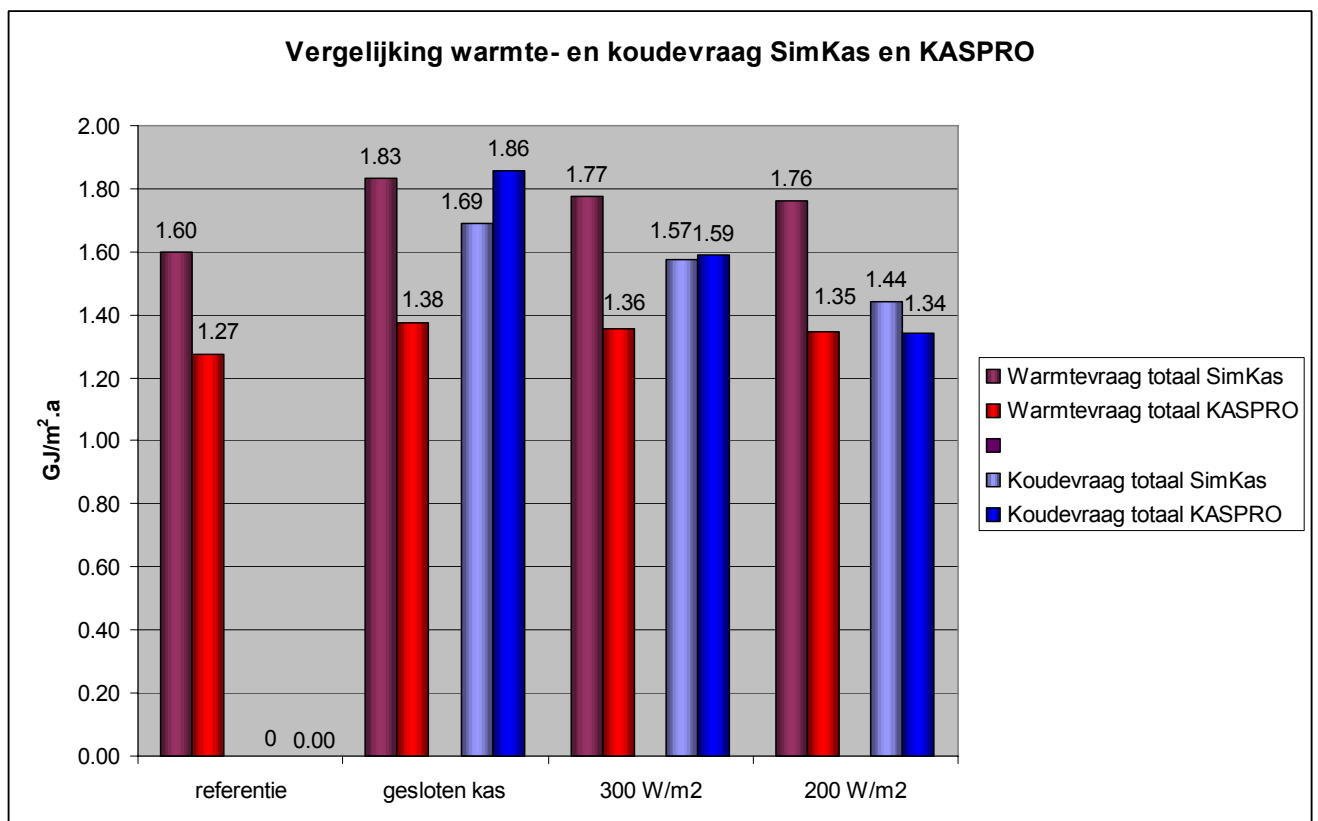
Een discussie van de verschillen tussen de KASPRO- en SimKas-berekeningen is gegeven in bijlage E.



Figuur D.1 Vergelijking warmte-, koude- en CO₂-behoefte en productie tussen verschillende systeemvarianten (berekend met KASPRO/ECP).

BIJLAGE E VERGELIJKING WARMTE- EN KOUDEVRAAG REKENPROGRAMMA'S

In de grafieken hieronder zijn de verschillen tussen de warmte- en koudevraag tussen SimKas en KASPRO gegeven:

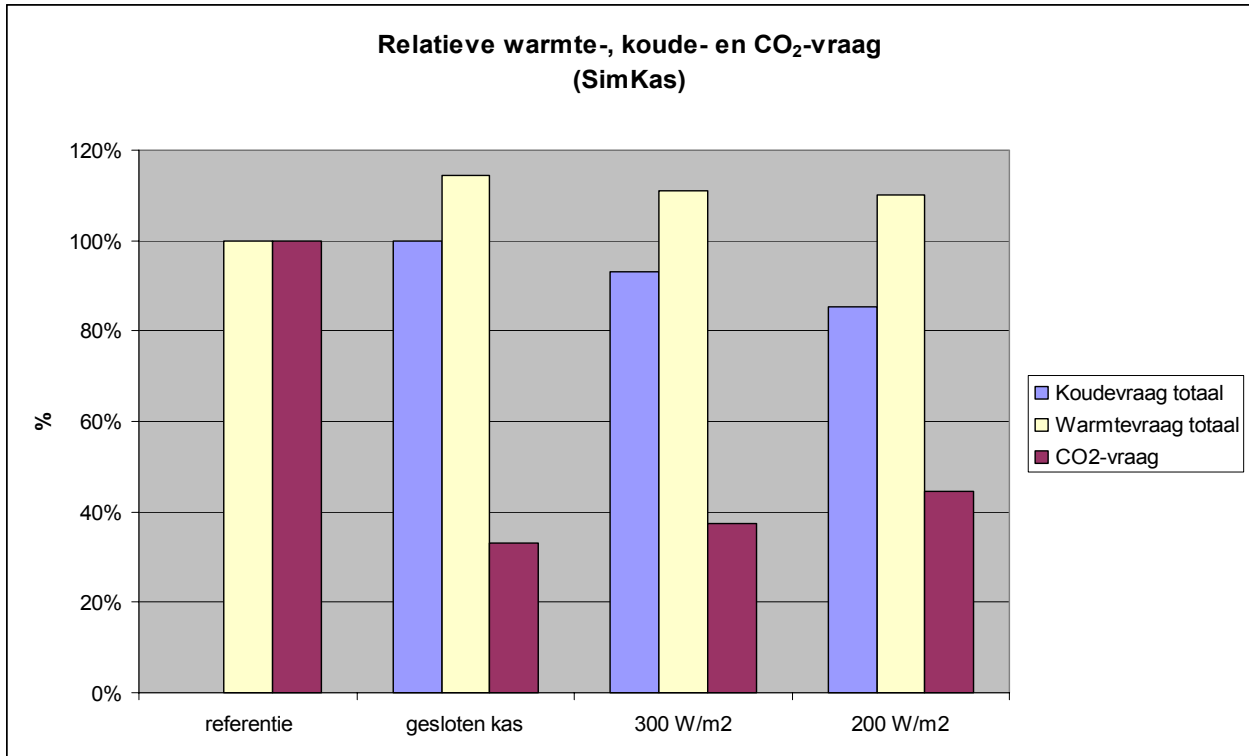


Figuur E.1 Vergelijking van koude- en warmtevraag tussen Simkas en KASPRO.

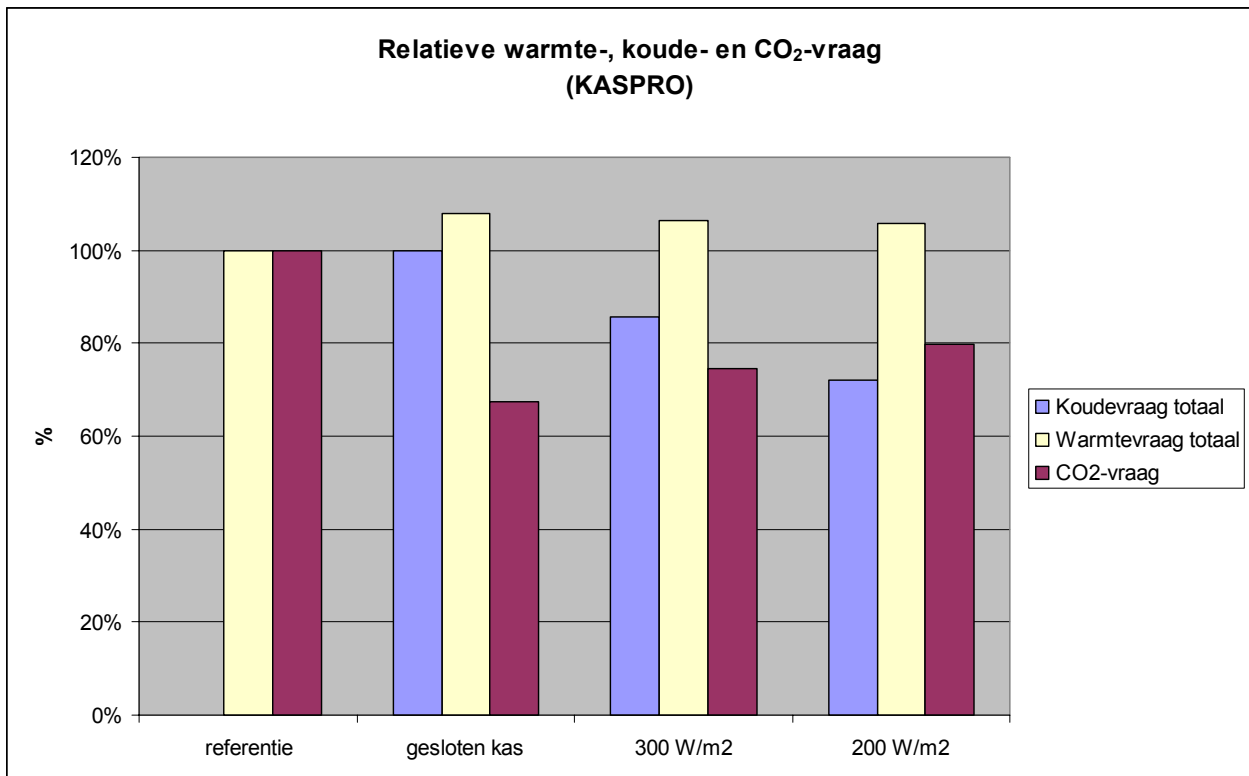
Verder tonen grafieken E.2 en E.3 de relatieve verschillen tussen de verschillende varianten voor respectievelijk SimKas en KASPRO.

Uit figuur E.1 is af te leiden dat de koudevragen berekend door SimKas en KASPRO redelijk goed overeenstemmen. De absolute warmtevragen van KASPRO liggen echter circa 20% lager dan bij SimKas. Daarentegen komen de relatieve verschillen tussen de warmtevragen van de verschillende varianten voor SimKas respectievelijk KASPRO, zoals ook figuur E.2 en E.3 te zien is, wel weer redelijk overeen.

De verschillen kunnen grotendeels worden *verklaard* door iets andere bedrijfsinstellingen van de klimaatregelingen/-besturingen, de regel-/stuurstrategie zelf, en een ander klimaatreferentiejaar voor de buitencondities.



Figuur E.2 Procentuele warmte-, koude- en CO₂-vraag, zoals berekend met SimKas. Voor de warmte- en de CO₂-vraag is de referentie op 100% gesteld, voor de koude de hoeveelheid van de geheel gesloten kas.



Figuur E.3 Procentuele warmte-, koude- en CO₂-vraag, zoals berekend met KASPRO. Voor de warmte- en de CO₂-vraag is de referentie op 100% gesteld, voor de koude de hoeveelheid van de geheel gesloten kas.

Verder is het zo dat in beide simulatiemodellen naast de setpoints, een groot aantal modelparameters kan worden ingesteld (denk bijvoorbeeld aan warmteoverdrachts- en warmte-doorgangscoefficienten van bijvoorbeeld kasdek en energiescherm, de verhouding oppervlak ventilatieramen tot kasoppervlak, lengte/breedte-verhouding van de ventilatieramen, de regelaarparameters en dergelijke). Daar we geen toegang hadden tot de parameters van KASPRO hebben we de laatstgenoemde potentiële verschillen niet eenduidig kunnen vaststellen.

Naar verwachting spelen de volgende zaken/verschijnselen een rol:

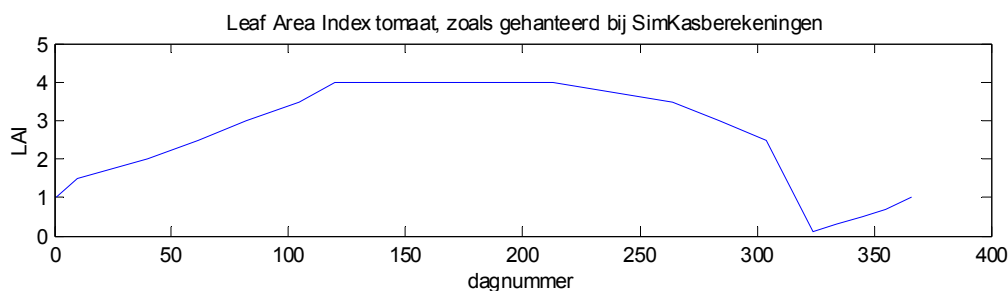
- De gemiddelde temperatuur van het door SimKas gehanteerde Verkorte Referentiejaar (VRJ) ligt iets lager dan dat van het SEL-referentiejaar gebruikt door IMAG (9.1 versus 9.4°C). (Dit verklaart circa $0.05 \text{ GJ/m}^2 \approx 3\%$ van de 20%)
- De schermstrategie is anders: KASPRO schermt bij de uitgevoerde simulaties indien de buitentemperatuur lager is dan 8 °C. SimKas schermt indien er een temperatuurverschil tussen binnen- en buitentemperatuur van 10 °C of meer, mits er minder dan 50 W/m² zonne-instraling is. Dit betekent dat bij de KASPRO simulaties het energiescherm veel meer gesloten zal zijn (naar verwachting circa 1100 uur meer dan bij SimKas (2267 schermuren)). Dit verklaart een verschil van circa $0.17 \text{ GJ/m}^2 \approx 11\%$ van de 20%.
- De berekeningswijze van de warmtevraag (en ook de koude- en CO₂-vraag) is bij SimKas fundamenteel anders, dan bij KASPRO. Een verschil tussen SimKas enerzijds ECP/KASPRO anderzijds is, dat SimKas de behoefte aan warmte, koude en CO₂ berekent op basis van "ideale regelingen". Voor verwarming betekent dit bijvoorbeeld dat de warmtebehoefte is gedefinieerd als de hoeveelheid warmte die moet worden toegevoerd om de temperatuur van de kas exact op het gewenste temperatuursetpoint te houden (mits die hoeveelheid binnen de maximum warmteproductiecapaciteit valt). Bij KASPRO (en ECP) zijn voor de warmte- (en koude)bepaling temperatuurregelingen geïmplementeerd met een proportionele band (de zogenaamde P-band). Hierbij hangt de inzet van het warmteproductiemiddel (bijvoorbeeld ketel) en de daarvan afgeleide warmtebehoefte af van de regelfout (= gewenste kastemperatuur – feitelijke kastemperatuur) en van de instelling van de regelaar (de P-waarde). Afhankelijk van de P-waarde zullen er grotere of kleinere verschillen tussen de werkelijke en gewenste waarden ontstaan. Bij SimKas blijven de gewenste setpoints door de ideale regeling langer gehandhaafd. Hierdoor zullen er naar verwachting ook kleine verschillen kunnen ontstaan tussen de berekende warmte- en koudebehoefte van beide categorieën programma's.
- Iets dergelijks geldt ook voor de bepaling van de ontvochtigingsbehoefte. Simkas bepaalt de ontvochtigingsbehoefte aan de hand van de feitelijke RV in de kas. Er is een ideale vochtregeling die is geïmplementeerd als een grenswaarderegeling.

Zou de RV in de kas door de op de kas/gewas inwerkende klimatologische omstandigheden boven het maximum-setpoint stijgen, dan worden de ramen zover geopend (of de ontvochtigingsinstallatie zover ingeschakeld) dat de RV op de toegestane maximumwaarde blijft. Zou de temperatuur daarbij dalen onder de verwarmingstemperatuur, dan wordt de hoeveelheid warmte bepaald die nodig is om de luchttemperatuur weer op het niveau van de verwarmingstemperatuur te brengen. KASPRO regelt het vochtgehalte middels een proportionele regeling die of op de raamstand inwerkt, of (bij gesloten kas) op de belasting van een ontvochtigingsmachine.

De ideale regeling van SimKas houdt de kas beter op de gewenste setpoints. Een gevolg is wel dat de ventilatie feller zal reageren, dan bij een proportioneel geregeld systeem. Dit zal gemiddeld tot meer ventilatie leiden en daardoor tot meer natuurlijke koeling en ontvochtiging van de kas, maar dit betekent ook meer CO₂-verlies en meer (her)verwarmingsbehoefte. De grotere ventilatiehoeveelheid van SimKas leidt bij dit rekenprogramma ook een groter verschil in CO₂-behoefte tussen de gesloten en de conventioneel geventileerde kas, dan bij KASPRO het geval is.

Ook een verschil in gehanteerde leaf-area-index (LAI) over het jaar kan tot verschillen in ontvochtigingsbehoefte en een daarmee eventueel gepaard gaande herverwarmingsbehoefte leiden. (KASPRO heeft een vlakkere LAI gebruikt dan SimKas; vergelijk JDBK LAI uit bijlage B met LAI gebruikt bij SimKas, zie figuur E.4).

Bij deze haalbaarheidsstudie gaat het in eerste instantie om de *verschillen in (energie)behoeften* tussen de verschillende varianten. Deze verschillen komen voor SimKas en KASPRO redelijk overeen. Het is belangrijk dat bij het onderling vergelijken van systeemvarianten, gebruikt gemaakt wordt van dezelfde basis, dus of van de vraagdata van SimKas of van KASPRO, maar niet door elkaar. In deze studie zijn voor de verdere bepaling van de gas- en elektriciteitsvraag de vraagpatronen van SimKas gebruikt (daar de uurwaarden van KASPRO niet beschikbaar werden gesteld).

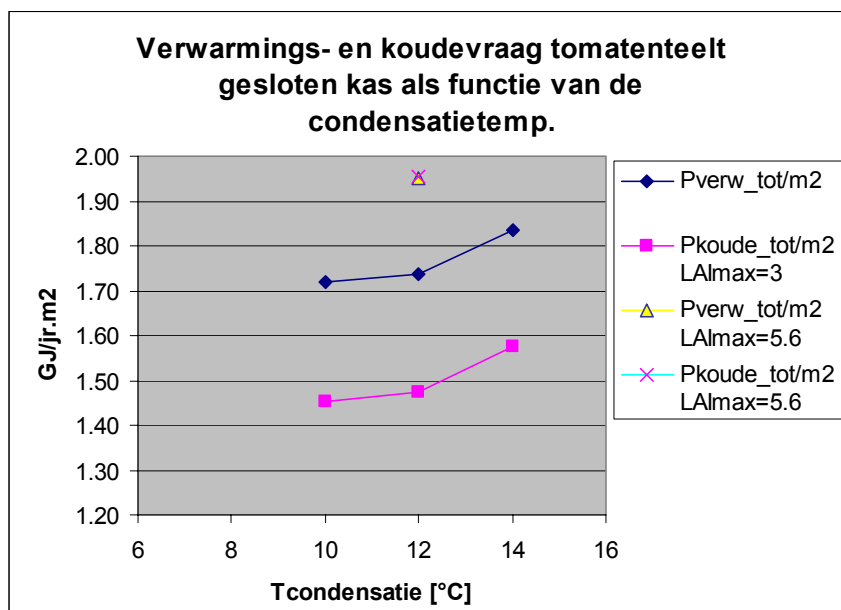


Figuur E.4 Leaf area index van tomaat zoals gebruikt bij SimKasberekeningen

Bepaling van koudebehoefte

Bij de bepaling van de koude behoefte door KASPRO is een stukgewijs lineaire benadering genomen voor de fractie voelbare warmte van de totale af te voeren warmte. Die fractie hangt alleen af van de RV van de kaslucht. Dit is echter een oversimplificatie. Zoals uit figuur 2.7 blijkt, hangt de fractie voelbare warmte (of de daarmee samenhangende verhouding latente en voelbare warmte) met name af van de temperatuur van de te ontvochtigen kaslucht (de RV is bij de berekening in principe een vaste waarde omdat ontvochtigen pas hoeft, als een bepaalde kritische waarde bereikt, bijv. 85 %, bereikt is). Verder hangt de fractie voelbare warmte (of de verhouding) ook enigszins af van de condensatietemperatuur. In SimKas is het volledige fysische verband, dat de afhankelijkheid beschrijft tussen de verhouding latente en voelbare warmte en de intredetemperatuur, de intredevochtigheid en condensatietemperatuur geïmplementeerd, waardoor de hierop gebaseerde koudebehoefte naar verwachting wat beter is.

Nadere bestudering van de ontvochtiging en koeling middels het hiervoor genoemd verband, leert trouwens dat de koude-behoefte (en daaraan gekoppeld de herverwarmings- en daarmee totale warmtebehoefte) afhangt van de condensatietemperatuur. Dit verband is in figuur E.5 gegeven voor 3 condensatietemperaturen. Het blijkt dat de totale koudebehoefte groter is naarmate de condensatietemperatuur hoger is, en daarmee ook de verwarmingsbehoefte. Het verschil in behoefte tussen die bij een condensatietemperatuur van 10 respectievelijk 12 °C is echter niet groot meer. Vandaar dat in deze studie gekozen is voor 12 °C. Hiervoor kan de benodigde koude op een iets hogere temperatuur worden aangeleverd, wat energetisch voordelen biedt.



BIJLAGE F INZETSTRATEGIE

Voor het bepalen van het elektriciteits- en gasverbruik van een energievoorzieningsconcept moeten de inzetniveau's (ook wel belastingsfracties of loadfracties) genoemd worden bepaald. Bij de (bijna) gesloten kasconcepten gaat het om de volgende loadfracties.

- If_EWP = belastingsfractie warmtepomp (deel van nominaal thermisch vermogen van EWP)
- If_WK = belastingsfractie van WK (deel van nominaal thermische vermogen WK)
- If_K = belastingsfractie van ketel
- If_fan = (thermische) belastingsfractie van fan LBK
- If_Pump_cw = (thermische) belastingsfractie van koudwaterpomp (naar koelbatterij LBK)
- If_Pump_ww = (thermische) belastingsfractie van warmwaterpomp (naar koelbatterij LBK, die indien er niet gekoeld wordt, wordt gebruikt als verwarmingsbatterij,)
- If_Pump_WPc = (thermische) belastingsfractie pomp achter condensor
- If_Pump_WPv = (thermische) belastingsfractie pomp naar verdamp(er)
- If_Pump_aqc = (thermische) belastingsfractie aquiferpomp koude bron
- If_Pump_aqw = (thermische) belastingsfractie aquiferpomp warme bron
- If_Pump_ATES2 = (thermische) belastingsfractie transportpomp achter de scheidingswarmtewisselaar (WP-zijde)
- If_valve2rh = deel van warmte afkomstig van EWP (+ WK), die naar de herverwarmer (reheater) wordt gepompt. (Het resterende deel gaat naar de warmtebuffer, of indien deze vol is naar de warme bron van de aquifer.

Op de volgende pagina is ter indicatie een deel van het inzetalgoritme van variant A gegeven in een (Nassi-Schneidermann) structuurdiagram. (Achter "If" is een _w gevoegd, die aangeeft dat het hier gaat om het geleverd of getransporteerd *thermisch* vermogen; dit kan bij pompen en ventilatoren verschillen van de massastroomfractie afhankelijk van de gehanteerde deltaT over de warmtewisselaar in het circuit). Behalve de loadfractie-variabelen worden in het algoritme de volgende variabelen gebruikt:

- W_d = warmtevraag [W]
- W_{gm} = warmteproductie gasmotor [W]
- W_{wp} = warmteproductie warmtepomp [W]
- C_d = koudevraag [W]
- C_{aq} = koudelevering uit koude bron aquifer [W]
- C_{wp} = koude geleverd door WP [W]
- C_{rd} = restvraag (remaining demand) [W].

BIJLAGE G SPECIFICATIES COMPONENTEN

Dimensionering en kenmerken energievoorziening referentie + varianten							
	Referentiesituatie: conventionele energievoorziening (ketel + warmtebuffer)	Systeemvariant A: EWP-only+KOV+LTwarmte-+LTkoude-buffer	Systeemvariant B: EWP+GM+KOV+MTwarmte-+LTkoude-buffer	Systeemvariant C: EWP (2x1.03MWth)+GM+ketel+KOV (300W/m ²)+MTwarmte-+LTkoude-buffer	Systeemvariant D: EWP (2x0.77MWth)+GM+ketel+KOV (200W/m ²)+MTwarmte-+LTkoude-buffer	eenheid	opmerkingen
onderdeel	V1	A (V3)	B (V4)	C (V5)	D (V6)	per ha	
Ketel							
ketelcapaciteit	2 200	0	0	870	1 200	kW	
ketelrendement (b.w.)	98%	-	-	1	98%	%	incl rookgascondensor
Gasmotor GM							
GM elektrisch vermogen		0	480	300	240	kWe	
GM elektr.rendement			38.9%	38.7%	38.7%	%	
GM thermisch rendement			48.6%	48.6%	48.6%	%	
Rookgasreiniger							
dimens.rookgasreiniger		0	480	300	240	kWe	
Elektrische wampomp							
warmtepomp		2 100	1 600	1 030	771	kWth	Koelmedium: R134a
WP camotrendement ¹⁾		52%	52%	52%	52%	%	actuele COP wordt berekend
Warmtebuffer							
volume	100	150	150	150	150	m ³	
ΔT	40	15	15	15	15	°C	
Koude buffer							
volume		1 550	1 750	1 150	780	m ³	
ΔT		8	8	8	8	°C	
ATES (aquifer)							
vermogen ATES (aquifer)		1 700	1 900	1 200	800	kWth	
ΔT		8	8	8	8	°C	
Luchtbehandelingskast							
LBK (luchtbehand.kast)		500 000	500 000	260 000	2 000	kWth	
LBK max. luchtdebiet		500 000	500 000	260 000	260 000	m ³ /h	
ΔPextern bij max luchtdebiet		1 440	1 440	1 440	1 440	Pa	
isentr.fanrendem.LBK ^{**})		73%	73%	73%	73%	%	
nominaal motor rendement ^{**})		89%	89%	89%	89%	%	(inclusief freq.controller)
Warmte-afgiftesysteem							
warmteafgiftesysteem	buisrail	65	65	32	32	stuks slangen/100 m diam. 500/315	
Pompen^{***})							
pomp ^{rendement^{**})}		75%	75%	75%	75%		
nominaal motor rendement ^{**})		89%	89%	89%	89%	%	(inclusief freq.controller)

¹⁾ gedefinieerd als COP/COPtheoretisch = COP*(Tcond-Tverd)/Tcond; hieruit wordt m.b.v. de actuele condensatie- en verdampingstemperatuur de actuele COP berekend. (grädigheid condensor bij nominale belasting = 3 °C); Motorrendement: 95% (zonder freq.contr.)

^{**}) het actuele fan- of pomp^{rendement} is belastingafhankelijk

^{***}) nominale opvoerdrukken (ontwerp): Pump_cw: 200 kPa; Pump_ww: 200 kPa; Pumps_WP: 200 kPa; Pump_ATES2: 200 kPa;

Pump_aqw: 400 kPa; Pump_aqc: 400 kPa

BIJLAGE I INZETBEREKENINGEN MET FUEL CALC

In deze bijlage worden ter illustratie enkele tussenresultaten gegeven van de inzetberekeningen uitgevoerd met FuelCalc. De resultaten horen bij variant C (met maximaal 300 W/m² koelvermogen) en betreffen de invulling van de warmte- respectievelijk koudevraag.

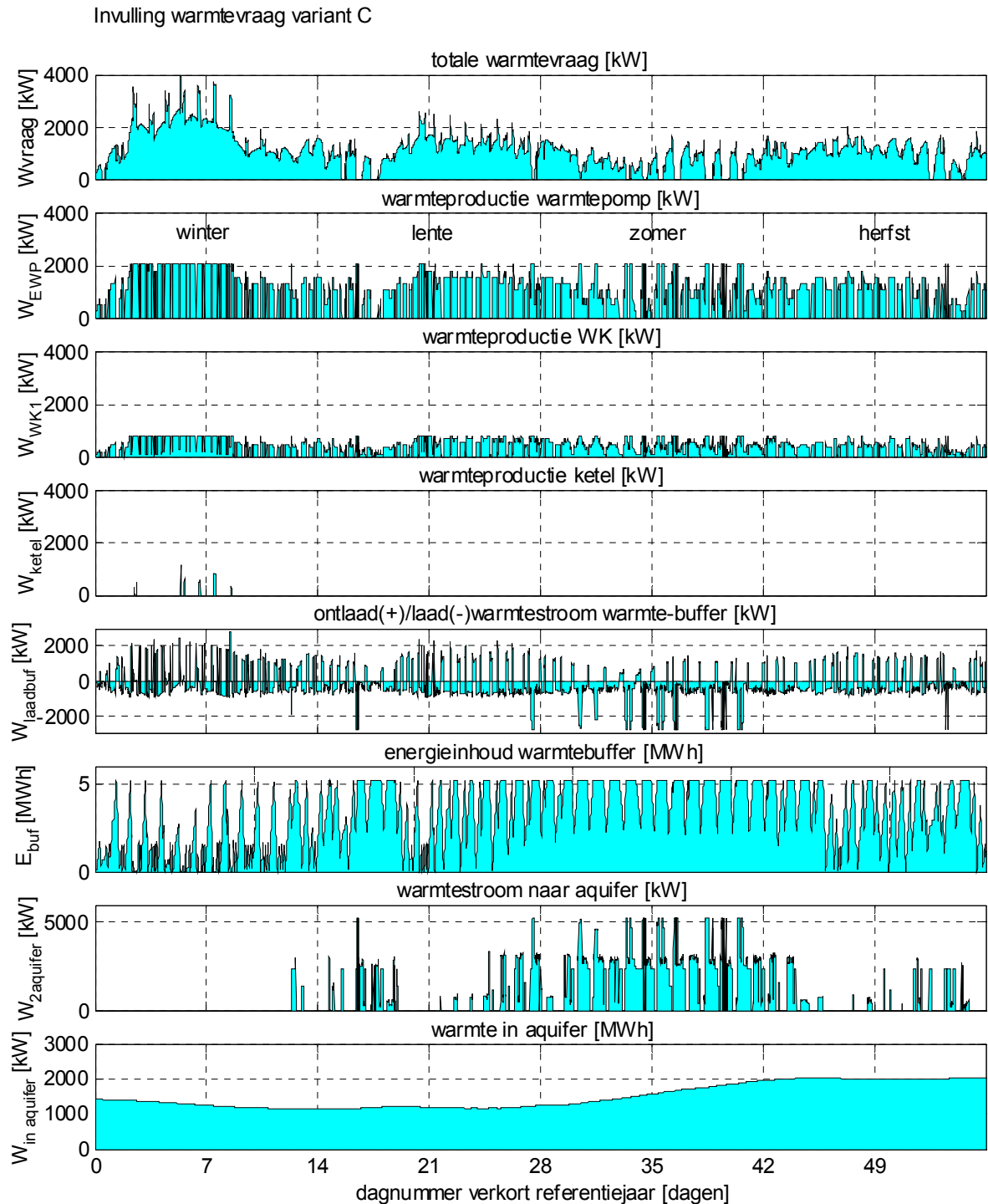
Figuur I.1 geeft de tijdplots van de invulling van de warmtevraag (bepaald over het verkort referentiejaar). In de stripplots zijn de volgende signalen uitgezet:

1. totale warmtevraag (inclusief herverwarming) [kW]
2. warmteproductie door warmtepomp [kW]
3. warmteproductie door WK-installatie [kW]
4. warmteproductie door ketel [kW]
5. warmtestroom uit warmtebuffer (indien positief), of warmtestroom naar warmtebuffer (indien negatief)
6. energie-inhoud warmtebuffer [MWh]
7. warmtestroom naar de aquifer [kW] (= koudeonttrekking aquifer + warmteoverschot warmtebuffer)
8. energie-inhoud aquifer [MWh].

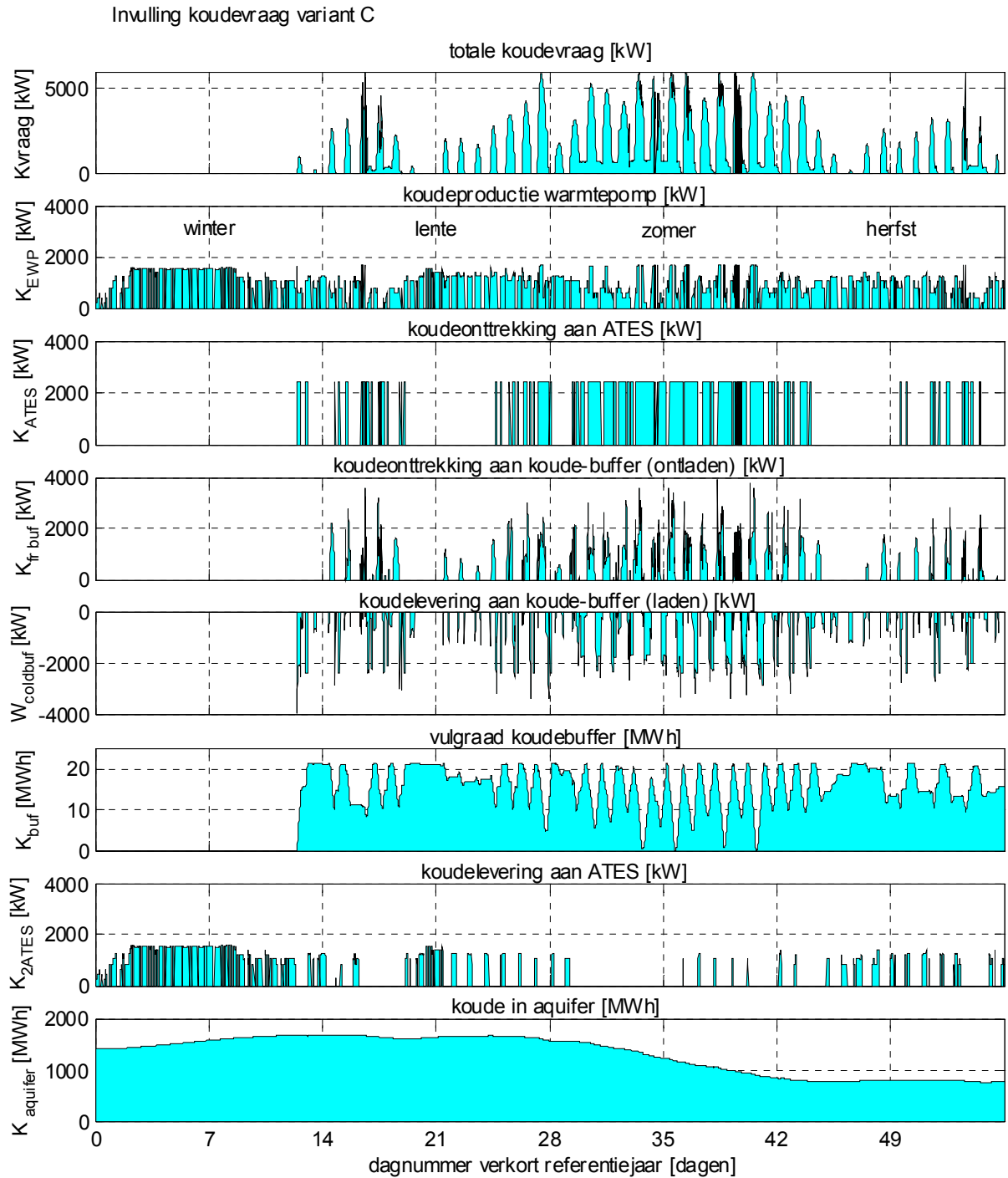
Figuur I.2 toont de invulling van de koudevraag over het verkorte referentiejaar

1. totale koudevraag (voor koelen en ontvochtigen) [kW]
2. koudeproductie door warmtepomp [kW]
3. koudeonttrekking aan ATES [kW]
4. koudeonttrekking aan koudebuffer (ontladen) [kW]
5. koudelevering aan koudebuffer (koude laden) [kW]
6. koude-inhoud bovengronds koudebuffer [MWh]
7. koudelevering aan ATES (koude put aquifer) [kW] (= overschot koude geproduceerd aan verdamperzijde van warmtepomp)
8. koude-inhoud aquifer [MWh].

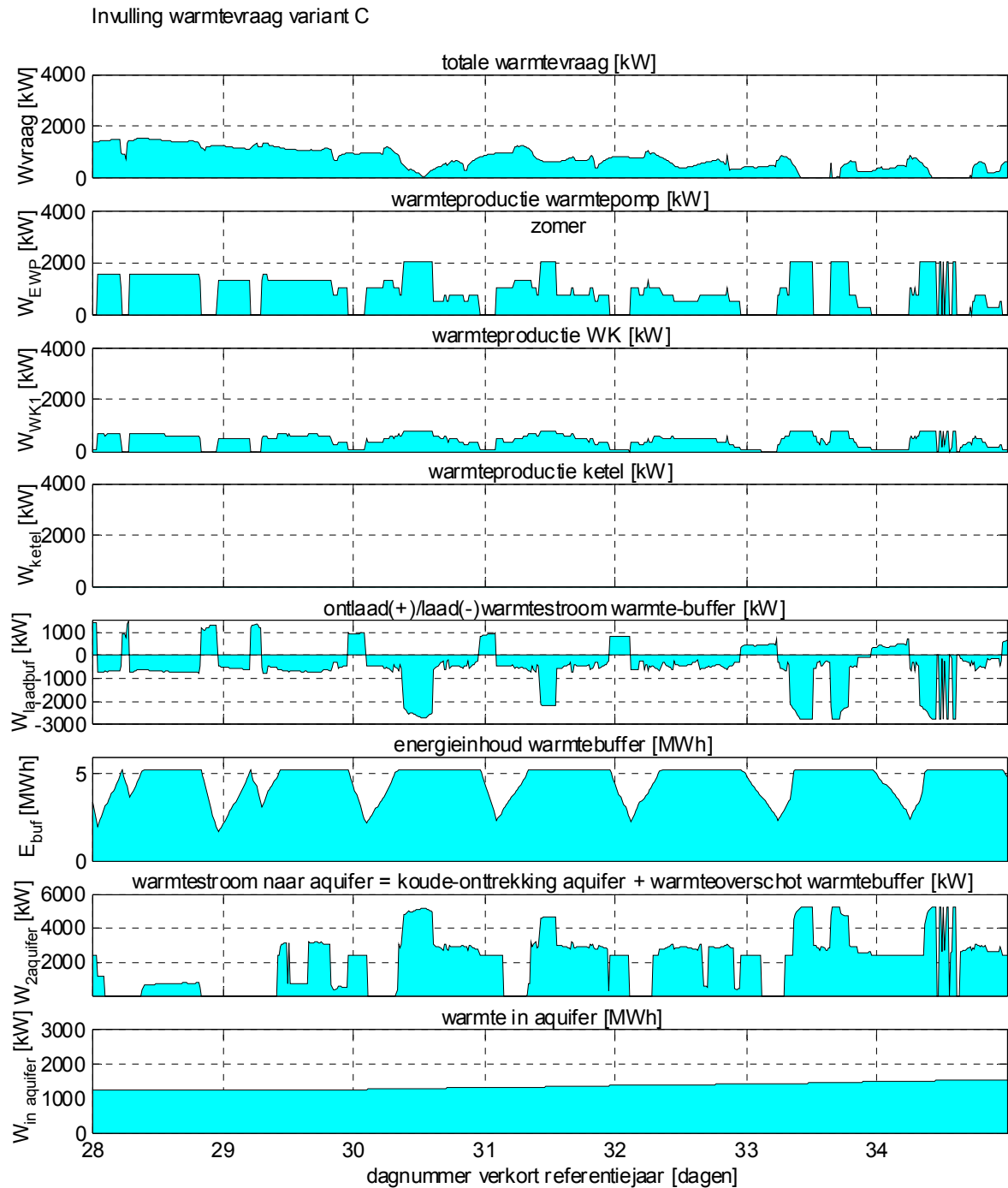
In figuur I.3 en I.4 zijn details van de invulling van de warmte- respectievelijk koudevraag gegeven in een deel van de zomer (dag 28-35 van verkort referentiejaar). De figuren tonen duidelijk de verschillende warmte- en koudestromen en het verloop van de inhoud van de warmte- en koudebuffers en van het ondergrondse opslagsysteem. Uit de laatste stripplot in de jaarrondsituatie van figuur I.2 blijkt, dat er over een jaar gezien meer koude aan de aquifer wordt onttrokken dan er wordt ingestopt. Voor een thermisch neutraal bedrijf is dus additionele koudeproductie nodig.



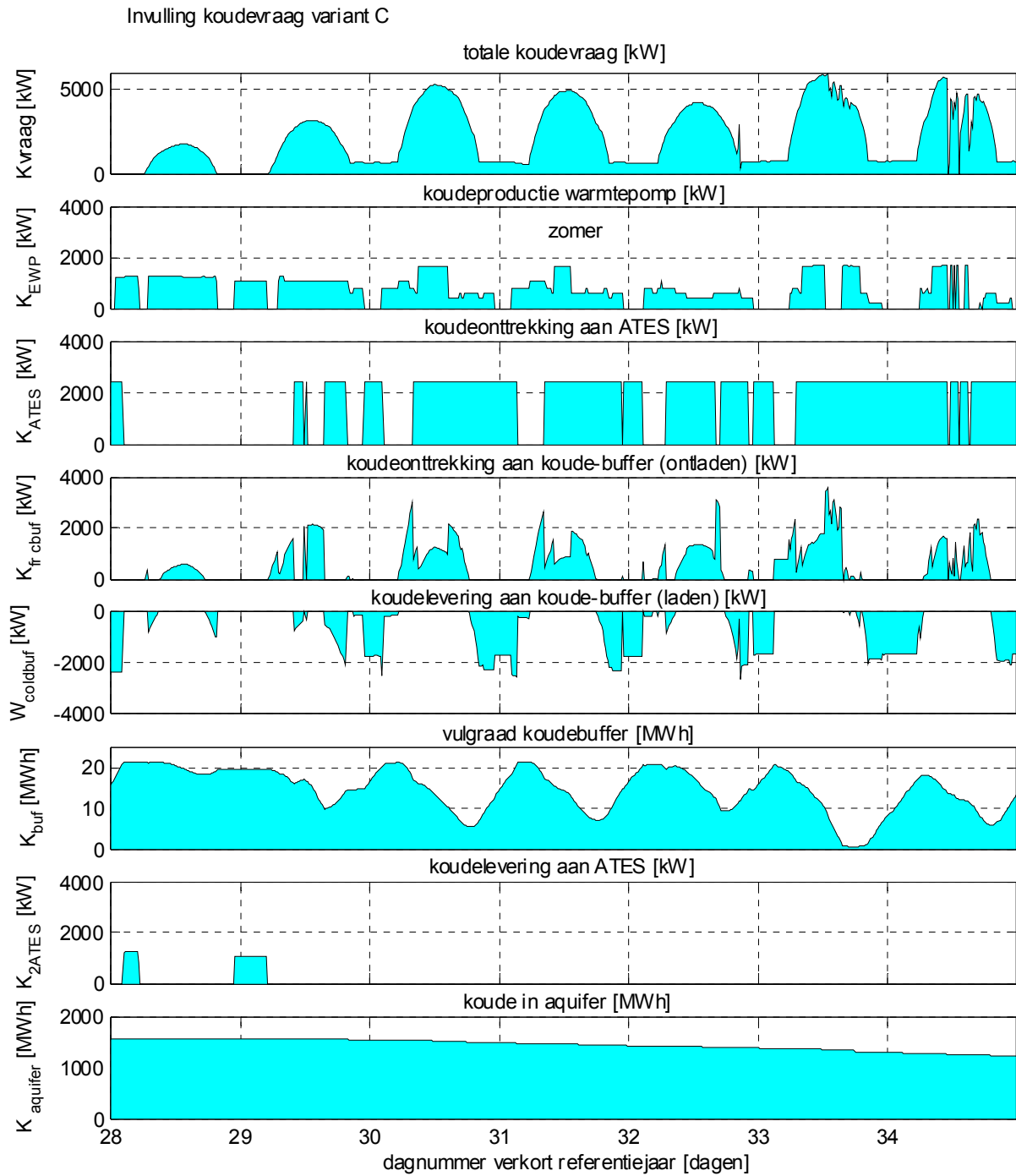
Figuur I.1 Invulling warmtevraag bij variant C (jaarrondberekening met FuEiCalc over (verkort) referentiejaar).



Figuur I.2 Invulling koudevraag bij variant C (jaarrondberekening met FuEICalc over (verkort) referentiejaar).



Figuur I.3 Invulling warmtevraag bij variant C (details van zomersituatie, dag 28 tot 35 van (verkort) referentiejaar, berekend met jaarrondinzetcalculatieprogramma FuEiCalc).



Figuur I.4 Invulling koudevraag bij variant C (details van zomersituatie, dag 28 tot 35 van (verkort) referentiejaar, berekend met jaarrondinzetcalculatieprogramma FuEiCalc). Zie ook figuur I.3.