



# Haalbaarheidsonderzoek van restwarmte terugwinning in de glasindustrie

## Openbaar Rapport

DOCUMENTAUTORISATIE & REVISIEOVERZICHT						
		Naam	Datum		Handtekening	
Auteur:		DELT & EETS	17-03-2026			
Vrijgave:		BSKG	17-03-2026			
Rev	Datum	Auteur	Check	Vrijgave	Sectie / Paragraaf	Omschrijving
A	30-01-2026	DELT & EETS	CNKL	CNKL	Alle	For Review
B	05-02-2026	DELT & EETS	CNKL & BSKG	BSKG	Alle	For Review
C	17-03-2026	DELT & EETS	CNKL	BSKG	Zoals vermeld	Definitief



## Samenvatting

Voor de container-glasindustrie zijn potentiële warmteterugwinningsopties geëvalueerd. De belangrijkste warmtebronnen in de productielijn zijn in kaart gebracht. Per eenheid zijn de bronnen beoordeeld en twee hoofdopties onderzocht: rookgas van de oven (ca. 450 °C) en hete lucht uit de feeders en werkoven (ca. 700 °C). De feeder is de sectie tussen de werkoven en de vormmachines. De haalbaarheid van elektriciteitsopwekking en een WKK-systeem is beoordeeld voor zowel een Organisch Rankine Cyclus (ORC) als een Stoom Rankine Cyclus (SRC).

Tabel 1 geeft de belangrijkste resultaten weer van deze studie voor een representatieve containerglasfabriek met twee ovens en een productie van circa 600 ton glas per dag. Daarbij zijn de beschikbare subsidies meegenomen. Uit de haalbaarheidsstudie volgt dat de toepassing van rookgas in een ORC-unit met een gecombineerd warmtekrachtkoppeling-systeem de kortste terugverdientijd heeft, namelijk 4 jaar. Wanneer wordt gekozen voor de toepassing van hete lucht in een ORC-unit met een gecombineerd warmtekrachtkoppelingssysteem, resulteert dit in een terugverdientijd van 24 jaar bij gebruik van een subsidie.

Tabel 1. Samenvatting van de resultaten van mogelijke warmteterugwinning

	Rookgas uit oven		Hete lucht uit kap boven de feeders en de werkoven	
	SRC	ORC	SRC	ORC
<b>Elektriciteit (GWh/ jaar)</b>	2,91	3,91	1,17	1,25
<b>85 °C Warm water (GWh/ jaar)</b>	19,39	21,64	11,65	6,91
<b>€ CAPEX</b>	5.735.000	4.900.000	6.230.000	5.400.000
<b>€ Opbrengst/jaar</b>	980.000	1.205.000	495.000	305.000
<b>Terugverdientijd</b>	6 jaar	4 jaar	>30 jaar	24 jaar

De resultaten van dit rapport zijn situatieafhankelijk en kunnen voor andere fabrieken of industrieën anders uitvallen. Daarnaast kan het SRC-ontwerp verder worden geoptimaliseerd voor hogere temperaturen. Het is niet uitgesloten dat de hier weergegeven terugverdientijden voor andere industrieën gunstiger uitvallen, mogelijk zelfs tot de helft. Daarom wordt aanbevolen om dit per situatie te berekenen.



## Inhoudsopgave

<b>Samenvatting</b> .....	<b>2</b>
<b>1 Introductie</b> .....	<b>4</b>
<b>2 Warmtebronnen</b> .....	<b>4</b>
2.1 Oven.....	7
2.2 Rookgas uit de oven .....	7
2.3 Werkoven en feeders.....	7
2.4 Vormmachines en transportband tot de koeloven.....	7
2.5 Koeloven .....	8
2.6 Transportband na de koeloven .....	8
2.7 Koelwater en compressorkoeling.....	8
<b>3 Omzetting naar elektriciteit (en warmte)</b> .....	<b>9</b>
3.1 Toepassingen voor geproduceerd warm water.....	9
3.2 Organisch-Rankinecyclus (ORC).....	10
3.3 Stoom-Rankinecyclus (SRC).....	11
3.4 Vergelijking van SRC vs ORC Opties.....	12
<b>4 Business Case/Haalbaarheidsevaluatie</b> .....	<b>14</b>
4.1 Terugwinningsopties .....	14
4.2 Kostenraming .....	16
4.2.1 CAPEX .....	16
4.2.2 OPEX .....	17
4.2.3 Resultaten .....	19
4.3 CO <sub>2</sub> reductie .....	20
4.4 Subsidies.....	20
4.5 Haalbaarheidsevaluatie.....	24
4.5.1 Berekening .....	24
4.5.2 Resultaten .....	24
<b>5 Conclusie</b> .....	<b>28</b>
<b>6 Referenties</b> .....	<b>29</b>

## 1 Introductie

De glasindustrie is zeer energie-intensief, waarbij een aanzienlijk deel van de energie-invoer als verlies wegvalt en niet wordt teruggewonnen. Hierdoor bestaan er diverse mogelijkheden voor warmteterugwinning. In deze studie is de haalbaarheid van potentiële terugwinningsopties voor een containerglasfabriek onderzocht.

De potentiële warmtebronnen in het hoofdproces worden geëvalueerd op mogelijkheden voor warmteterugwinning. Vervolgens worden opties voor elektriciteitsopwekking uit de teruggewonnen warmte beoordeeld, zowel voor uitsluitend stroomproductie als voor een warmtekrachtkoppeling (WKK)-configuratie. Tot slot wordt een haalbaarheids- en businesscaseanalyse gepresenteerd om de potentiële opties te beoordelen.

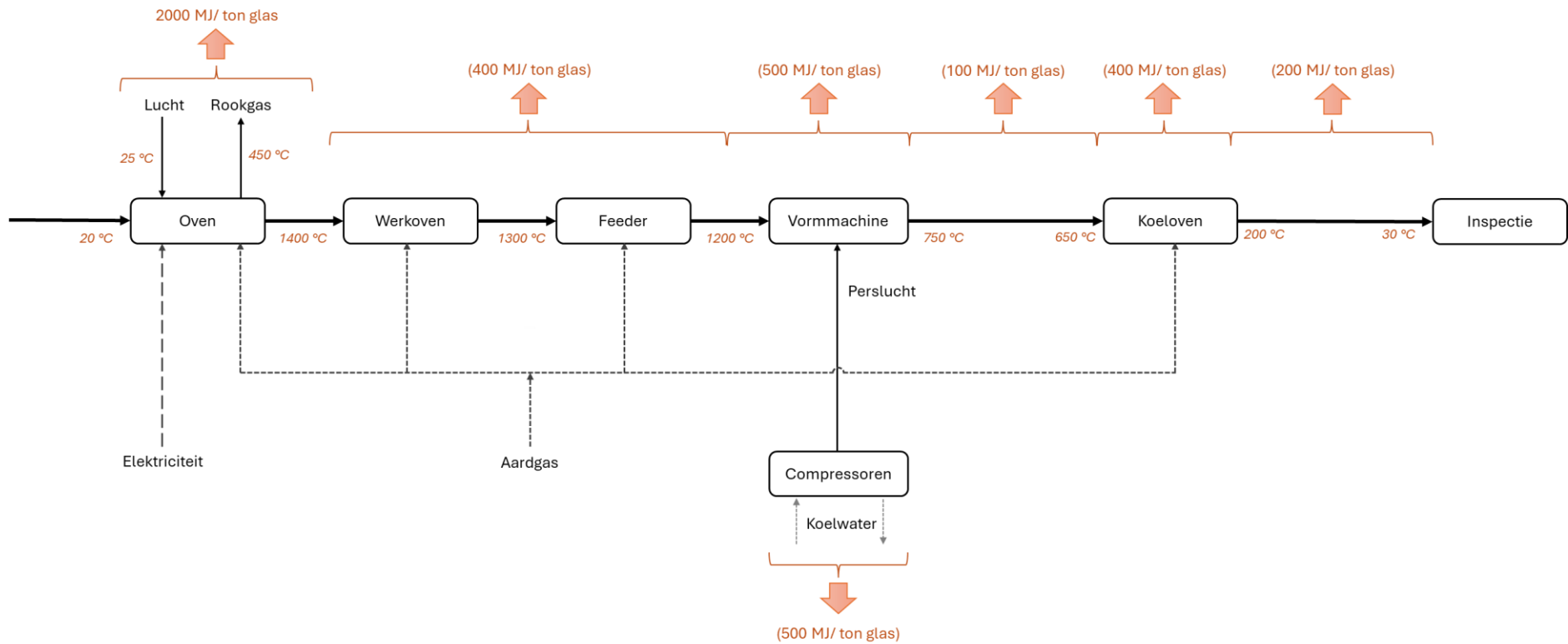
*Disclaimer: De waarden gebruikt in dit rapport zijn gebaseerd op een generieke fabriek die representatief is voor de containerglasindustrie. Voor elke afzonderlijke fabriek dient een gedetailleerde massabalans te worden opgesteld, rekening houdend met oventype en -leeftijd, fabrieksindeling, producttype, glaskleur, enzovoort.*

## 2 Warmtebronnen

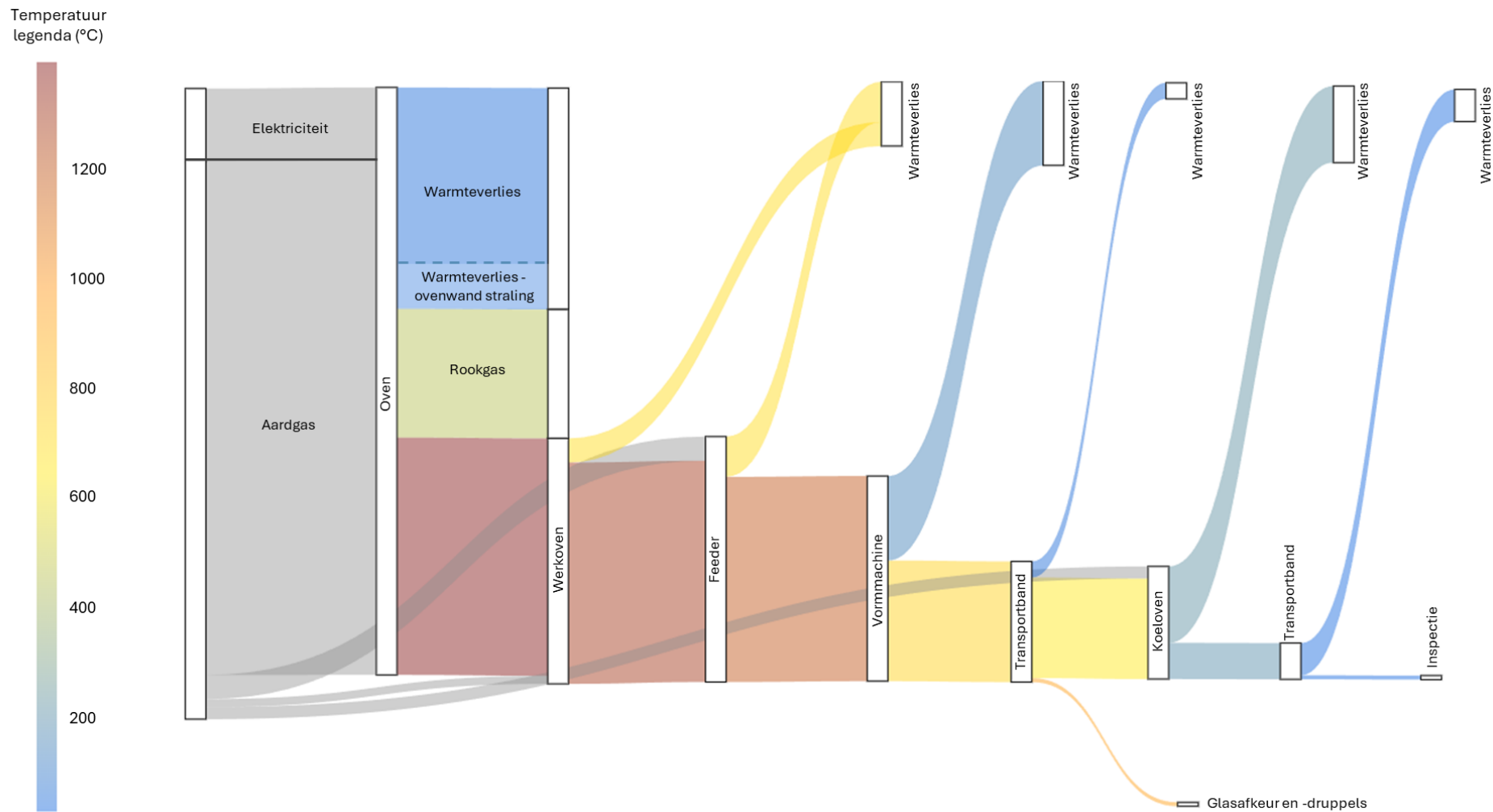
Het eerste deel van deze studie bestaat uit het in kaart brengen van de belangrijkste energiestromen binnen het proces. De gebruikte waarden zijn afkomstig van een representatieve containerglasfabriek. De waarden dienen daarom als voorbeelden te worden beschouwd en kunnen worden geïnterpreteerd met een bandbreedte van  $\pm 25\%$ , met verdere variatie afhankelijk van onder meer de ovenleeftijd, het geproduceerde product, kleur van het glas en de glassamenstelling, de fabrieksindeling en de procesparameters. Het containerglasproces is in Figuur 1 weergegeven, inclusief representatieve stroomtemperaturen. De aangegeven energiewaarden vertegenwoordigen de energie, die door de glasstroom wordt verloren en worden toegevoegd door aardgas en elektriciteit.

De totale energiestromen van het hoofdproces worden weergegeven in een Sankey-diagram in Figuur 2. De kleuren van de stromen geven de temperatuur aan en de breedte van de stromen geeft de grootte van de stroom. De energie van de rookgasstroom is bepaald ten opzichte van een referentietemperatuur van 20 °C. De verdeling tussen stralings- en convectieverlies is informatief en hangt sterk af van de configuratie van het proces. Elektriciteit die voor andere doeleinden dan procesverwarming wordt gebruikt is niet in het rapport opgenomen.

Elke warmtebron voor potentiële energierugwinning wordt in de volgende paragrafen kort besproken.



Figuur 1. Weergave van een containerglasproces met representatieve stroomtemperaturen en aangegeven energiepotentieel.



Figuur 2. Sankey diagram, waarbij de dikte van de pijlen het thermisch vermogen laat zien, en de kleur een temperatuurbereik geeft.

## 2.1 Oven

Warmteterugwinning uit de ovenwanden is niet aanbevolen, vanwege neiging tot wandcorrosie en het verkorten van de levensduur van de oven [1] [2].

Het aandeel van het warmteverlies via straling van de wanden varieert sterk per ontwerp. Dit kan bijvoorbeeld tussen ca. 5% en 40% liggen. Dit is afhankelijk van de wandtemperatuur, die bij goed geïsoleerde ovens tussen 50 en 100 °C ligt [1], of kan oplopen tot circa 300 °C bij een hoge aanname. Bovendien hangt het ook af of het van natuurlijke of geforceerde externe convectie is.

## 2.2 Rookgas uit de oven

Het rookgas van de oven vormt een nuttige warmtestroom van hoge kwaliteit en staat centraal in meerdere studies. Het rookgas wordt eerst benut in de regenerator van de oven om de inkomende verbrandingslucht voor te verwarmen. Daarna kan het worden ingezet voor stoomproductie of in de batch voorverwarmer (BVW). Een BVW kan leiden tot een brandstofbesparing van de oven van 12–18 % [3].

In deze studie wordt de rookgasstroom geëvalueerd als een waardevolle warmtebron voor fabrieken zonder batch-voorverwarmer. De minimale afkoeltemperatuur van deze stroom wordt bepaald door: (1) de hoge SO<sub>x</sub>-concentratie, waardoor de temperatuur niet te ver mag worden verlaagd om zuurcorrosie te vermijden (ca. 200 °C) en (2) de benodigde temperatuur voor de rookgasreinigingsstap (bijv. 250 °C voor een kalkreactor). Deze warmtebron wordt in hoofdstuk 3 verder geëvalueerd voor elektriciteitsopwekking.

## 2.3 Werkoven en feeders

Een aanzienlijk deel van het warmteverlies vindt plaats bij de werkoven en de feeders. Een mogelijke optie voor warmteterugwinning is rondom de werkoven en feeders om de warmtestraling van het glas op te nemen en de hete lucht af te voeren. In dit rapport wordt aangenomen dat de teruggewonnen lucht circa 700 °C bedraagt en dat ongeveer 50% van het warmteverlies kan worden teruggewonnen. Deze warmtebron wordt in hoofdstuk 3 verder geëvalueerd voor elektriciteitsopwekking.

## 2.4 Vormmachines en transportband tot de koeloven

Warmteverlies rond de vormmachines is significant. Vanwege de hoge temperatuur van het glas is een groot deel hiervan stralingswarmte. Het toepassen van een apparaat voor het opvangen van stralingswarmte op deze locatie kent echter praktische beperkingen, waaronder:

1. Bewegende onderdelen;
2. Vereiste toegang voor operators;
3. Het gebruik van olie in de machines, die verdampt en het apparaat kan vervuilen en/of een potentieel veiligheidsrisico kan vormen.

In de literatuur wordt vermeld dat warmtebenutting van de transportbanden mogelijk is door middel van het opvangen van stralingswarmte van glazen containers [4]. Deze optie is niet verder geëvalueerd vanwege de kleinere hoeveelheid warmte die hier vrijkomt in vergelijking met andere bronnen, zie Figuur 2. Het moet echter worden opgemerkt dat de hoeveelheid vrijgekomen energie in andere fabrieken hoger kan zijn, waar het glas verder afkoelt voordat het de koeloven binnengaat.

## 2.5 Koeloven

De hete lucht uit de schoorstenen van de koeloven vormt een andere potentiële waardevolle bron voor warmteterugwinning. Temperaturen en volumestromen variëren en zijn sterk afhankelijk van bedrijfsmodus, tijdstip en geproduceerd product. De temperatuur neemt af langs de lengte van de koeloven. Aanvullend onderzoek naar deze bron wordt aanbevolen, voor de productie van warm water voor interne/externe toepassingen (hoofdstuk 3.1) en voor gebruik van de heteluchtstroom binnen de fabriek. Een voorbeeld is het gebruik voor ruimteverwarming of als voorverwarmer van een volgende processtap.

## 2.6 Transportband na de koeloven

De hier vrijgekomen energie vormt een groter aandeel dan de transportband voor de koeloven, echter het betreft een warmte van lagere kwaliteit (200 → 30 °C) en varieert aanzienlijk afhankelijk van het geproduceerde product. Deze optie is niet verder geëvalueerd in deze studie.

## 2.7 Koelwater en compressorkoeling

Het koelwater uit de compressorhal vormt een waardevolle bron van laagwaardige warmte (ca. 25 tot 35 °C). Dit water kan, in combinatie met een warmtepomp, worden benut voor de productie van warm water voor diverse toepassingen, waaronder centrale verwarming of levering aan gemeentelijke warmtenetten. Aangezien deze studie de hoofdfocus heeft op het hoofdproces van glasproductie, is dit niet verder onderzocht.

## 3 Omzetting naar elektriciteit (en warmte)

Er zijn twee hoofdopties beschikbaar voor elektriciteit opwekking van teruggewonnen hitte: het stoom-Rankineproces (SRC) of het organisch Rankineproces (ORC). Beide maken gebruik van de klassieke Rankine-cyclus, maar met een verschillend werkmedium, namelijk water/stoom en respectievelijk koelmiddel/koolwaterstof. De voor- en nadelen van de verschillende opties worden kort besproken in hoofdstuk 3.4.

Een warmtekrachtkoppelingssysteem (WKK) produceert elektriciteit en een warmtebron, bijvoorbeeld in de vorm van warm water. In dergelijke systemen wordt doorgaans minder elektriciteit opgewekt dan bij conventionele elektriciteitsproductie, echter wanneer de warmtestroom nuttig kan worden ingezet of verkocht, behalen WKK-systemen een aanzienlijk hoger totaalrendement.

Twee warmtebronnen worden geëvalueerd:

1. Het rookgas dat de oven verlaat (ca. 450 °C), zoals beschreven in hoofdstuk 2.2.
2. Hete lucht (ca. 700 °C), zoals beschreven in hoofdstuk 2.3.

Voor beide systemen wordt de overgedragen warmte van de warme lucht- of rookgasstroom naar het ORC-/SRC-systeem berekend op basis van de vereiste temperatuur van het werkmedium, evenals de opgewekte elektrische energie en de geproduceerde hoeveelheid warm water. De resultaten van deze studie zijn gebaseerd op een representatieve containerglasfabriek met twee ovens en een productie van circa 600 ton glas per dag.

### 3.1 Toepassingen voor geproduceerd warm water

Er zijn diverse toepassingsmogelijkheden voor de geproduceerde warmte, enkele voorbeelden worden hieronder gegeven. In deze studie wordt warm water van 85 °C geproduceerd als representatieve optie voor verschillende toepassingen. Deze temperatuur kan worden aangepast en het ontwerp kan worden geoptimaliseerd afhankelijk van de gekozen toepassing.

Het warme water kan worden ingezet voor centrale verwarming ter vervanging van of als aanvulling op een gasgestookte cv-ketel. Dit leidt tot lagere aardgaskosten en een reductie van de CO<sub>2</sub>-uitstoot.

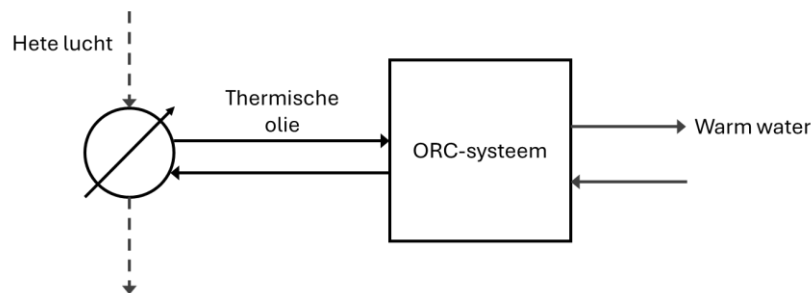
Het benutten van teruggewonnen warmte met absorptiekoelmachines om een koude koelmiddelstroom ( $\leq 10$  °C) te produceren is een optie om bestaande koelinstallaties te vervangen en mogelijk ook te integreren in een koelnetwerk.

Als alternatief kan het warme water worden verkocht aan externe partijen, zoals nabijgelegen bedrijven of warmtenetten van gemeenten.



### 3.2 Organisch-Rankinecyclus (ORC)

De aangenomen uitgangspunten voor het ORC-systeem zijn gebaseerd op overleg met een internationale leverancier van ORC-installaties, waaronder voor glasfabrieken. De warmte wordt eerst overgedragen van de hete lucht naar thermische olie (180 °C) en vervolgens naar de ORC-package-unit. Water kan ook worden toegepast als alternatief voor thermische olie. De elektrische efficiëntie bedraagt 15 % voor een WKK-cyclus die warm water produceert, of 21 % wanneer elektriciteitsproductie zonder warmtekrachtkoppeling wordt gekozen. Het schema van de ORC-koppeling en systeem is opgenomen in Figuur 3. Indien wordt gekozen voor elektriciteitsproductie in plaats van WKK, wordt de weergegeven warmwaterstroom vervangen door koelwater en is een aanvullend koelsysteem vereist.



Figuur 3. Schematisch overzicht van de ORC-systeem

Tabel 2 geeft een samenvatting van de resultaten, gebaseerd op glasproductie van 600 ton/dag (twee ovens).

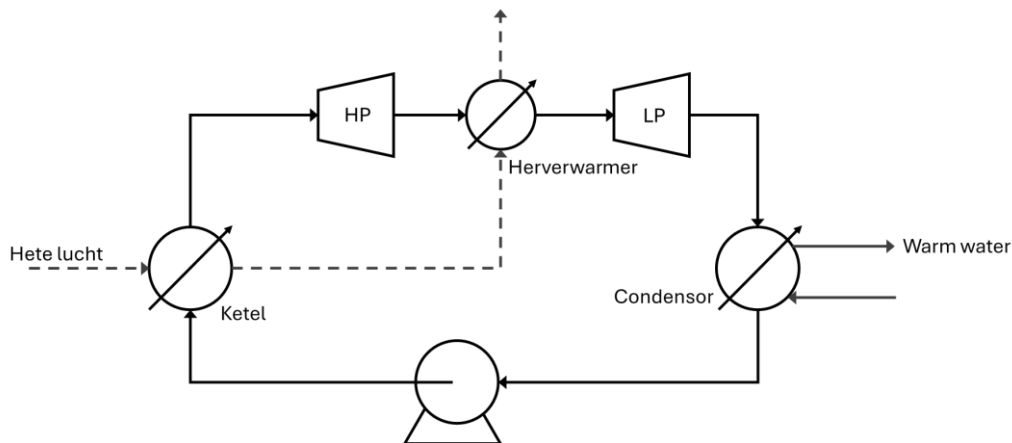
Tabel 2. Resultaten van de ORC-unit, 600 ton glas productie/ dag

		Rookgas uit oven		Hete lucht van werkoven en feeders	
		Elektriciteit alleen	WKK	Elektriciteit alleen	WKK
<b>Temperatuur</b>	°C	450		700	
<b>Overgedragen warmte aan ORC</b>	kW	3100	3100	980	980
<b>Elektrisch rendement</b>	%	21	15	21	15
<b>Elektriciteit opgewekt</b>	kW	650	470	200	150
<b>Warm water opgewekt bij 85°C</b>	kW	-	2600	-	830



### 3.3 Stoom-Rankinecyclus (SRC)

De beoordeelde stoom-Rankinecyclus is gebaseerd op een aantal aannames. Het bereik van isentropische efficiëntie hangt af van de grootte van de turbine en varieert van 50% (500 kW) tot 80% (15 MW) [5]. Om te kunnen extrapoleren naar andere projecten is een aanname van 70% efficiëntie gebruikt. De stoom-reheat-(WKK)-systeem is gesimuleerd in de COFE/COCO-processimulatiesoftware. De exacte procesparameters dienen in een gedetailleerde gevoeligheidsanalyse te worden geoptimaliseerd; dit valt buiten de scope van dit werk. De verkregen resultaten worden beschouwd als representatief. Het schema van de gebruikte stoomcyclus is opgenomen in Figuur 4. Aanvullende procesapparatuur dat deel uitmaakt van een SRC-systeem, bijvoorbeeld een vacuümpomp/ejector, ontgasser en stoomconditioneringssysteem is niet weergegeven in Figuur 4, echter is dit wel meegenomen in de kostenraming.



Figuur 4. Schematisch overzicht van de toegepaste stoom-reheatcyclus

De resultaten van de evaluatie zijn weergegeven in Tabel 3, gebaseerd op glasproductie van 600 ton/dag (twee ovens).

Tabel 3. Resultaten van de SRC-unit, 600 ton glas productie/ dag

		Rookgas uit oven		Hete lucht van werkoven en feeders	
		Elektriciteit alleen	WKK	Elektriciteit alleen	WKK
Temperatuur	°C		450		700
HP stoom druk	bara	10	10	20	20
LP stoom druk	bara	0,1	0,7	0,1	0,7
Overgedragen warmte aan SRC	kW	2680	2680	840	840
Elektrisch rendement	%	20	13	22	17
Elektriciteit opgewekt	kW	540	350	180	140
Warm water opgewekt bij 85°C	kW	-	2330	-	700



### 3.4 Vergelijking van SRC vs ORC Opties

De voor- en nadelen van de SRC en ORC worden hieronder op hoofdlijnen weergegeven.

Tabel 4. Samenvatting van de voordelen (+) en nadelen (-) van het Organisch Rankineproces versus het Stoom-Rankineproces.

Criterion	ORC	SRC
<b>Ontwerpcomplexiteit/ Gemak</b>	+	-
<b>Flexibiliteit voor ontwerp optimalisatie</b>	-	+
<b>Algemeen theoretisch elektrisch rendement</b>	-	+
<b>Werkelijk elektrisch rendement: rookgasstroom</b>	Elektriciteit alleen: 21 % WKK: 15 %	Elektriciteit alleen: 20 % WKK: 13 %
<b>Werkelijk elektrisch rendement: hete lucht van werkoven en feeders</b>	Elektriciteit alleen: 21 % WKK: 15 %	Elektriciteit alleen: 22 % WKK: 17 %
<b>Operationele eenvoud</b>	+	-
<b>Operationele kosten</b>	+	-
	Onderhoud laag, Onderhoudscontract van leverancier	Onderhoud hoog door stoomconditionering
<b>Investeringsen</b>	+	-
	Lagere investeringskost in vergelijking met SRC	Hogere investeringskost in vergelijking met ORC door vereiste stoomconditionering en beschikbaarheid van ORC als package unit

De in dit rapport gehanteerde rendementen zijn gebaseerd op situatie-afhankelijke uitgangspunten voor de glasindustrie (o.a. 10 bar stoom voor SRC en een maximale thermische olietemperatuur van 180 °C voor de ORC), die de benutting van de beschikbare exergie mogelijk beperken. Deze aannames zijn thermodynamisch consistent, maar deze is niet noodzakelijk het meest geoptimaliseerde cyclus voor maximale elektriciteitsopwekking. Bij een volledig condenserende stoomcyclus (met hogere druk, sterke oververhitting, re-heat en lage condensortemperatuur) kan, binnen realistische ontwerpgrenzen voor grote turbinesystemen in andere fabrieken, een elektrisch rendement in de orde van 35% bij 400 °C stoomtemperatuur en 45% bij 600 °C stoomtemperatuur misschien haalbaar zijn.

Tenslotte, er is een afweging tussen hogere rendementen (bij hoge stoomtemperaturen) en totaal warmte overgedragen aan het systeem (meer warmteoverdracht van de hete lucht/rookgas bij lagere stoomtemperaturen). Dit is uiteindelijk situatieafhankelijk en zal per situatie bekeken moeten worden. Dit kan eveneens invloed hebben op de vergelijking tussen WKK en alleen elektriciteitsopwekking.

## 4 Business Case/Haalbaarheidsevaluatie

De operationele kosten binnen deze haalbaarheidsanalyse worden in belangrijke mate beïnvloed door de gehanteerde elektriciteitsprijs. Voor de uitgevoerde berekeningen is uitgegaan van een vaste elektriciteitsprijs van € 0,11/kWh. Hierbij dient te worden benadrukt dat energieprijzen onderhevig zijn aan aanzienlijke marktfluctuaties. Afwijkingen ten opzichte van de aangenomen elektriciteitsprijs kunnen een significante invloed hebben op de operationele kosten en daarmee op de economische haalbaarheid van de in dit rapport onderzochte projecten.

In een volgende fase dient de actualiteit en toepasbaarheid van de subsidies opnieuw te worden beoordeeld. Daarnaast moeten ook de gehanteerde aannames en waarden voor de energietarieven worden geactualiseerd, aangezien deze onderhevig zijn aan snelle en cyclische veranderingen binnen de sector.

### 4.1 Terugwinningsopties

In hoofdstukken 2 en 3 worden de warmtebronnen en terugwinningsopties uitgebreid geëvalueerd. De haalbaarheidsevaluatie zal worden uitgevoerd voor twee warmtebronnen: enerzijds het rookgas dat de oven verlaat voor de batchvoorverwarmer en anderzijds de hete lucht die wordt afgezogen boven de feeders en de werkoven.

De haalbaarheidsstudie voor de business case worden uitgewerkt voor de toepassing van de bovenvermelde warmtebronnen met een ORC en SRC-unit. Voor beide units zal de haalbaarheidsstudie worden uitgevoerd voor elektriciteitsproductie met warmtekrachtkoppeling en elektriciteitsproductie zonder warmtekrachtkoppeling. Deze scenario's zijn omschreven in Tabel 5.

De volgende businesscase-evaluaties zijn gebaseerd op de ontwerpen zoals beschreven in hoofdstuk 3. Voor andere industrieën kunnen de resultaten voor sommige opties gunstiger zijn. Dit geldt vooral voor industrieën met verder geoptimaliseerde systemen en warmtestromen van hogere temperatuur en grotere omvang. Met name de opties waarbij elektriciteit uitsluitend met het SRC-systeem wordt opgewekt, kunnen dan beter uitvallen. Het is niet uitgesloten dat bij een geoptimaliseerd ontwerp met een nauwkeurigere kostenraming en een hogere opbrengst de terugverdiendtijd gunstiger uitvalt. De onderstaande resultaten zijn wel representatief voor de glasindustrie in het kader van dit project.

Tabel 5. Scenario's terugwinningsopties.

Scenario	Omschrijving
<b>Optie 1</b>	Medium: Rookgas Techniek: ORC Opbrengst: elektriciteit
<b>Optie 2</b>	Medium: Rookgas Techniek: ORC Opbrengst: elektriciteit + warme stroom
<b>Optie 3</b>	Medium: Hete lucht Techniek: ORC Opbrengst: elektriciteit
<b>Optie 4</b>	Medium: Hete lucht Techniek: ORC Opbrengst: elektriciteit + warme stroom
<b>Optie 5</b>	Medium: Rookgas Techniek: SRC Opbrengst: elektriciteit
<b>Optie 6</b>	Medium: Rookgas Techniek: SRC Opbrengst: elektriciteit + warme stroom
<b>Optie 7</b>	Medium: Hete lucht Techniek: SRC Opbrengst: elektriciteit
<b>Optie 8</b>	Medium: Hete lucht Techniek: SRC Opbrengst: elektriciteit + warme stroom

## 4.2 Kostenraming

### 4.2.1 CAPEX

De CAPEX-kosten zijn geraamd met behulp van de Lang-factor methode. Deze methode wordt veel toegepast in de vroege ontwerpfase van projecten om een voorlopige investeringsraming op te stellen wanneer gedetailleerde kosteninformatie nog niet beschikbaar is. Hierbij worden de kosten van de hoofdapparatuur vermenigvuldigd met een Lang-factor om de totale kapitaalinvestering te schatten. De Lang factoren uit de theorie zijn aangepast naar de te verwachten situatie voor deze concepten ten aanzien van de omvang van de scope per onderdeel. De gebruikte Lang factoren zijn weergegeven in Tabel 6.

Tabel 6. Lang factoren.

Omschrijving	Lang Factor	Toelichting
Grote apparatuur (Purchase Cost of Equipment of PCE)	PCE	ORC/SRC-unit, thermisch oliesysteem, koelsysteem, kappen en ventilator
Installatie van apparatuur ( $f_1$ )	0	Opgenomen in de investeringskosten van de leverancier van de ORC-unit.
Leidingen ( $f_2$ )	0,30	Beperkte hoeveelheid leidingen naar unit.
Instrumentatie ( $f_3$ )	0,10	Integratie van instrumentatie en automatisering.
Elektrisch ( $f_4$ )	0,10	
Utilities ( $f_5$ )	0,025	Beperkt gebruik.
<b>Totale kosten van de fysieke installaties (Physical Plant Cost of PPC)</b>	<b><math>PPC = (1 + f_1 + f_2 + f_3 + f_4 + f_5) \times PCE</math></b>	
Ontwerp en engineering ( $f_6$ )	0,12	
Aannemerskosten ( $f_7$ )	0,05	
Onvoorspelbare kosten ( $f_8$ )	0,10	
<b>Totaal CAPEX</b>	<b><math>CAPEX = (1 + f_6 + f_7 + f_8) \times PPC</math></b>	

### ORC-unit

Zoals vermeld in paragraaf 4.1, worden rookgas en hete lucht gebruikt als warmtebron om de thermische olie te verhitten en vervolgens te worden gebruikt in de ORC-unit. Voor beide bronnen zijn de investeringskosten voor de ORC-unit gebaseerd op informatie die is verkregen van een internationale leverancier die wereldwijd 460 ORC-units heeft uitgevoerd en ervaring heeft met ORC-systemen binnen de glasindustrie [6].

De ORC package unit kan worden onderverdeeld in drie hoofdcomponenten:

1. Het thermische-oliesysteem
2. De ORC-unit
3. Het koelsysteem

De investeringskosten voor uitsluitend de ORC-unit bedragen circa €1,65 miljoen voor een Heat Recovery System (HRS)-configuratie met een elektrisch vermogen van 500–700 kWe, en circa €1,6 miljoen voor een Combined Heat and Power (CHP)-configuratie binnen hetzelfde vermogensbereik [6].

De ORC-unit kan op twee verschillende manieren worden ingezet. In de eerste configuratie wordt de unit toegepast met als hoofddoel het opwekken van elektriciteit. In deze configuratie is de elektrische efficiëntie hoger. Voor deze toepassing zijn alle drie hoofdcomponenten van de ORC package unit vereist. De totale investeringskosten voor deze drie componenten worden geschat op €3,6 tot €4,0 miljoen. Aangezien de investeringskosten voor de ORC-unit bekend zijn, kan worden aangenomen dat de investeringskosten voor het thermische olie systeem en het koelsysteem ongeveer €2,01 tot 2,35 miljoen bedragen [6].

In de tweede configuratie wordt de ORC-unit ingezet als onderdeel van een warmtekrachtkoppelingscyclus (WKK). In dit geval is de elektrische efficiëntie lager, daarnaast wordt echter ook een bruikbare warmtestroom geproduceerd. Hierdoor is het koelgedeelte van de installatie niet benodigd. Voor deze configuratie is aangenomen dat de investeringskosten van de unit €1,6 miljoen bedraagt. Er is aangenomen dat het thermische-oliesysteem circa 40% van het resterende investeringsbedrag (€2,01 tot 2,35 miljoen) vertegenwoordigt, overeenkomend met ongeveer €940.000.

### **ORC-unit met hete lucht**

In het specifieke geval dat de ORC-unit wordt ingezet met hete lucht als warmtebron voor de thermische olie, zijn naast de ORC package unit een aantal aanvullende installaties vereist. Deze bestaan uit een kapconstructie voor de afzuiging van hete lucht uit de schoorstenen boven de feeders en de werkoven, evenals één of meerdere ventilatoren om de hete lucht naar de ORC-unit te transporteren.

In totaal zijn er 20 schoorstenen aanwezig voor de twee ovens: vier per werkoven en twee per feeder, waarbij drie feeders in gebruik zijn per oven. Voor deze kappen is een kosteninschatting gemaakt op basis van de benodigde materialen, waaronder koolstofstaal en thermische isolatie. De totale investeringskosten voor de 20 kappen worden geraamd op €60.000.

De ventilatorprijs is geschat op €100.000. De ventilator moet geschikt zijn voor hoge temperaturen en hoge luchtdebieten. Er wordt aangenomen dat elke oven is uitgerust met een ventilator die de hete lucht verplaatst met een debiet van circa 14.800 m<sup>3</sup>/h.

### **SRC-unit**

De investeringskosten voor de SRC-unit zijn geraamd op basis van de investeringskosten van de ORC-unit. Er is aangenomen dat de SRC-unit duurder is, omdat er momenteel nog geen kleinschalige package SRC-units op de markt beschikbaar zijn, zoals dat wel het geval is voor ORC-units. Om deze reden zijn de investeringskosten voor de SRC-unit gesteld op 1,25 keer de investeringskosten van de ORC-unit.

## **4.2.2 OPEX**

De operationele kosten zijn onderverdeeld in verbruikskosten, onderhoudskosten en opbrengsten, en worden op jaarbasis bepaald. De verbruikskosten zijn gebaseerd op het energieverbruik van de geïnstalleerde apparatuur, zoals het vermogen van de ORC of SRC-unit en van de ventilatoren. Volgens de leverancier kan er worden aangenomen dat de unit een verbruik heeft van ongeveer 10% van het opgewekte vermogen [6]. Het motorvermogen van de ventilator is geschat op 5,2 kW [7].

De units zijn ontworpen voor continu bedrijf gedurende het hele jaar. Hierbij is uitgegaan van een beschikbaarheid van 95%, rekening houdend met geplande en ongeplande fabrieksshutdowns. Dit resulteert in een jaarlijkse bedrijfstijd van 8.322 uur. De elektriciteitsprijs bedraagt €0,11 per kWh en wordt als constant aangenomen voor de volledige haalbaarheidsstudie.

De leverancier is verantwoordelijk voor het onderhoud van de ORC-unit, waarvoor jaarlijks €50.000 wordt voorzien. Daarnaast is een wekelijkse routinematige visuele inspectie van de unit noodzakelijk, met een tijdsbesteding van circa 4 tot 5 uur per week, die door eigen personeel wordt uitgevoerd [6]. Als aanvullende aanneme is een post voor overig onderhoud voor de installaties buiten de unit meegenomen, waarvan de kosten gelijk zijn gesteld aan de som van het leveranciersonderhoud en de visuele inspecties door het personeel.

Voor de SRC-unit is extra onderhoud meegenomen, omdat het stoomconditioneringssysteem meer onderhoud en personeelsuren vereist. De extra kosten zijn daarom meegenomen als 25% van de totale onderhoudskosten van de ORC-unit.

### **Elektriciteitsopwekking**

De jaarlijkse elektriciteitsopbrengst is berekend op basis van een beschikbaarheid van 95%, wat overeenkomt met 8.322 bedrijfsuren per jaar. De geproduceerde elektriciteit wordt berekend op basis van een elektriciteitsprijs van €0,11 per kWh.

### **Warmte toepassingen**

Voor toepassingen waarbij de ORC- en SRC-units worden ingezet voor elektriciteitsproductie met warmteterugkoppeling, zijn verschillende opties beschikbaar voor het benutten van de geproduceerde bruikbare warmtestroom. In de berekeningen wordt uitgegaan van een aardgasprijs van €0,55 per m<sup>3</sup> (€0,063 per kWh).

#### **1. Intern gebruik in de centrale verwarming (CV)**

De opgewekte warmtestroom kan intern worden toegepast voor de verwarming van de fabriek. Hierdoor kunnen de bestaande cv-ketels (aardgasgestookt) worden vervangen door een warm-water gestookt systeem. Er wordt aangenomen dat de fabriek 50.000 m<sup>3</sup>/jaar aan aardgas verbruikt voor de centrale verwarming dan kan dit resulteren in een jaarlijkse kostenbesparing van circa €27.500 en een CO<sub>2</sub>-reductie van ongeveer 107 ton per jaar.

#### **2. Extern verkopen**

De resterende warmtestroom kan extern worden verkocht aan derden. In deze studie is aangenomen dat de warmte kan worden verkocht tegen 70% van de aardgasprijs, overeenkomend met €0,063 per kWh warm water.

#### **3. Absorptiekoeling**

Daarnaast kan de warmtestroom worden benut voor absorptiekoeling, waarbij warmte wordt omgezet in een koude koelmiddelstroom. Deze optie wordt in deze studie niet verder uitgewerkt, echter kan in een afzonderlijke vervolgstudie worden onderzocht om de technische en economische haalbaarheid te bepalen.

In de business case wordt een gedeelte van de geproduceerde warmtestroom ingezet voor de centrale verwarming, waardoor er jaarlijks circa €27.500 bespaard kan worden aan aardgas. De resterende warmtestroom wordt extern verkocht, zoals hierboven vermeld, aan 70% van de aardgasprijs overeenkomend met €0,063 per kWh warm water.

### 4.2.3 Resultaten

De resultaten van de CAPEX en OPEX berekeningen voor de ORC-unit zijn weergegeven in Tabel 7. De resultaten van de CAPEX en OPEX berekeningen voor de SRC-unit zijn weergegeven Tabel 8. De haalbaarheid van iedere optie wordt geëvalueerd in sectie 4.5.

Tabel 7. Resultaat kostenraming ORC-unit.

	Optie 1	Optie 2	Optie 3	Optie 4
<b>CAPEX</b>				
Apparatuur	€ 4.000.000	€ 2.530.000	€ 4.255.000	€ 2.785.000
Leidingswerk, Instrumentatie, Elektrisch & Nutsvoorzieningen	€ 2.100.000	€ 1.330.000	€ 2.235.000	€ 1.465.000
Ontwerp, Engineering, Aannemer & Contingency	€ 1.650.000	€ 1.040.000	€ 1.755.000	€ 1.150.000
<b>Totaal CAPEX</b>	<b>€ 7.750.000</b>	<b>€ 4.900.000</b>	<b>€ 8.245.000</b>	<b>€ 5.400.000</b>
<b>OPEX</b>				
Verbruikskosten	€ 60.000	€ 60.000	€ 20.000	€ 20.000
Onderhoudskosten	€ 125.000	€ 125.000	€ 125.000	€ 125.000
Opbrengst	€ 595.000	€ 1.390.000	€ 185.000	€ 450.000
<b>Totaal OPEX</b>	<b>€ -410.000</b>	<b>€ -1.205.000</b>	<b>€ -40.000</b>	<b>€ -305.000</b>

Tabel 8. Resultaat kostenraming SRC-unit.

	Optie 5	Optie 6	Optie 7	Optie 8
<b>CAPEX</b>				
Apparatuur	€ 4.485.000	€ 2.960.000	€ 4.740.000	€ 3.215.000
Leidingswerk, Instrumentatie, Elektrisch & Nutsvoorzieningen	€ 2.355.000	€ 1.555.000	€ 2.490.000	€ 1.690.000
Ontwerp, Engineering, Aannemer & Contingency	€ 1.850.000	€ 1.220.000	€ 1.955.000	€ 1.325.000
<b>Totaal CAPEX</b>	<b>€ 8.690.000</b>	<b>€ 5.735.000</b>	<b>€ 9.185.000</b>	<b>€ 6.230.000</b>
<b>OPEX</b>				
Verbruikskosten	€ 50.000	€ 50.000	€ 15.000	€ 15.000
Onderhoudskosten	€ 125.000	€ 125.000	€ 125.000	€ 125.000
Opbrengst	€ 485.000	€ 1.150.000	€ 160.000	€ 630.000
<b>Totaal OPEX</b>	<b>€ -310.000</b>	<b>€ -975.000</b>	<b>€ -20.000</b>	<b>€ -490.000</b>

### 4.3 CO<sub>2</sub> reductie

Door de toepassing van innovatieve technieken, zoals ORC- en SRC-units, kan enerzijds elektriciteit en anderzijds een bruikbare warmtestroom worden opgewekt. Deze energiestromen kunnen binnen de fabriek worden hergebruikt of worden geleverd aan externe afnemers. In beide gevallen dragen zij bij aan de totale CO<sub>2</sub>-reductie.

Volgens de Milieubarometer bedraagt de emissiefactor voor ingekochte elektriciteit 0,497 kg CO<sub>2</sub> per kWh. Voor aardgas geldt een emissiefactor van 2,13 kg CO<sub>2</sub> per m<sup>3</sup>. Op basis van deze kengetallen kan de hoeveelheid vermeden CO<sub>2</sub>-emissie worden bepaald [8].

### 4.4 Subsidies

De investeringen die vereist zijn voor het terugwinnen van restwarmte binnen de fabriek kunnen substantieel zijn, hetgeen kan leiden tot een langere terugverdientijd en daarmee een verminderde financiële aantrekkelijkheid van het project. Om dit te ondervangen biedt de Nederlandse overheid ondersteuningsmogelijkheden. Projecten die investeren in milieuvriendelijke technologieën en aantoonbaar bijdragen aan CO<sub>2</sub>-reductie komen in aanmerking voor subsidies en fiscale faciliteiten. In deze sectie wordt een beknopte toelichting gegeven op de relevante subsidieregelingen die voor dit project van toepassing kunnen zijn.

Voor een aantal subsidies is het noodzakelijk om een referentiesituatie vast te stellen waarmee de meerkosten kunnen worden vergeleken. Aangezien de nieuwe installatie een deel van de restwarmte terugwint en omzet in elektriciteit en een warmtestroom, wordt hiervoor een specifieke referentiesituatie gehanteerd. Deze referentiesituatie bestaat uit de elektriciteitskosten en de aardgaskosten die door de nieuwe installatie worden vermeden. De meerkosten van de nieuwe installatie worden bepaald door de kosten van de referentiesituatie af te trekken van de jaarlijkse CAPEX-kosten van de nieuwe installatie. Afhankelijk van de subsidie kan vervolgens een bepaald percentage van deze meerkosten worden gesubsidieerd.

### **Versnelde klimaatinvesteringen industrie (VEKI)**

Deze subsidie kan worden toegepast op projecten die investeren in maatregelen die leiden tot een vermindering van de CO<sub>2</sub>-uitstoot in Nederland. Aan deze subsidie zijn enkele voorwaarden verbonden:

- Maximaal €80,- subsidie per ton vermeden CO<sub>2</sub>
- Een terugverdiëntijd (TVT) van minimaal 5 jaar
- Geen gasgestookte installaties

De hoogte van de subsidie wordt bepaald op basis van de gerealiseerde CO<sub>2</sub>-besparing en de meerkosten ten opzichte van de referentiesituatie. Binnen de VEKI-regeling wordt 30% van de meerkosten gesubsidieerd. Door dit subsidiebedrag te delen door de jaarlijkse CO<sub>2</sub>-besparing ontstaat een subsidiebedrag van €XX per ton vermeden CO<sub>2</sub>. Indien dit bedrag hoger uitkomt dan €80 per ton vermeden CO<sub>2</sub>, wordt de subsidie beperkt tot €80 per ton vermeden CO<sub>2</sub>.

### **DEI+: Energie- en klimaatinnovaties**

Deze subsidie is toepasbaar op pilotprojecten, waarin een nieuwe technologie wordt getest in een omgeving die representatief is voor de praktijk, met als doel de technologie verder te optimaliseren. Daarnaast kan de subsidie worden ingezet voor demonstratieprojecten, waarin de technologie in de praktijk wordt gedemonstreerd. Aan deze subsidie zijn de volgende voorwaarden verbonden:

- Het betreft een innovatieve technologie
- De technologie heeft een Technology Readiness Level (TRL) van 8 tot 9
- Er is sprake van een acceptabele terugverdiëntijd
- Geen gasgestookte installaties

De berekening van de subsidie verloopt op een vergelijkbare manier als bij de VEKI-regeling, met als verschil dat het subsidiepercentage van DEI steeds 10% hoger is t.o.v. VEKI. Dit wil zeggen dat de DEI gebruik maakt van een subsidie van 40%.

### **Energie-investeringsaftrek (EIA) voor ondernemers**

Deze subsidie is van toepassing op bedrijven die investeren in bedrijfsmiddelen die leiden tot een lagere CO<sub>2</sub>-uitstoot, een hoger energie-efficiëntieniveau of de opwekking van duurzame energie. Met behulp van de EIA kan 40% van de investeringskosten in mindering worden gebracht op de fiscale winst. Hierdoor daalt de belastbare winst, wat gemiddeld resulteert in een fiscaal voordeel van circa 10%.

Indien binnen het project gebruik wordt gemaakt van een andere subsidie, worden voor de EIA uitsluitend de netto investeringskosten meegenomen, dat wil zeggen de kosten die door het bedrijf zelf worden gedragen, exclusief het ontvangen subsidiebedrag.

## **Stimulering Duurzame Energieproductie en Klimaattransitie (SDE++)**

Deze regeling is van toepassing op bedrijven die investeren in bedrijfsmiddelen die bijdragen aan een lagere CO<sub>2</sub>-uitstoot, een hogere energie-efficiëntie of de opwekking van duurzame energie. Indien de operationele kosten voor het zelf opwekken van elektriciteit hoger zijn dan de inkooprij van elektriciteit, wordt het verschil gesubsidieerd.

Hierbij geldt wel het risico dat de energieprijzen jaarlijks kan fluctueren. Daarom wordt elk jaar een nieuwe referentie-energieprijs vastgesteld, gebaseerd op de gemiddelde energieprijzen over de voorgaande vijf jaar.

### **Resultaten**

De subsidies zijn berekend door per optie de jaarlijkse meerkosten te bepalen. Voor de verschillende opties zijn de VEKI- en DEI-subsidies toegepast. Per optie is ófwel de VEKI-subsidie ófwel de DEI-subsidie toegepast, aangezien deze subsidies niet cumulatief zijn en niet gelijktijdig kunnen worden ingezet. De resultaten hiervan zijn weergegeven in Tabel 9. De bijbehorende CO<sub>2</sub>-reducties zijn in

Tabel 10 opgenomen. Op basis van de CO<sub>2</sub>-reductiewaarden kan de maximale VEKI-subsidie worden vastgesteld, aangezien voor deze regeling geldt dat de subsidie is gemaximeerd op €80 per vermeden ton CO<sub>2</sub>.

Tabel 9. Meerkosten en subsidies [€/jaar].

€	Optie 1	Optie 2	Optie 3	Optie 4	Optie 5	Optie 6	Optie 7	Optie 8
<b>Nieuwe installatie</b>	789.000	500.000	840.000	550.000	885.000	583.000	935.000	634.000
<b>Referentie situatie</b>	536.000	398.000	165.000	147.000	437.000	315.000	146.000	159.000
<b>Meerkosten</b>	253.000	102.000	675.000	403.000	448.000	268.000	789.000	475.000
<b>Subsidies</b>								
<b>VEKI</b>	76.000	31.000	53.000	45.000	134.338	80.425	47.647	50.089
<b>DEI</b>	101.000	41.000	270.000	161.000	179.000	107.000	316.000	190.000

Tabel 10. CO2 reductie t.o.v. referentie situatie [ton CO<sub>2</sub>/jaar].

[ton CO <sub>2</sub> /jaar]	Optie 1	Optie 2	Optie 3	Optie 4	Optie 5	Optie 6	Optie 7	Optie 8
<b>Nieuwe installatie</b>								
CO <sub>2</sub> emissie elektriciteit	269	269	83	83	223	223	74	74
<b>Referentie situatie</b>								
CO <sub>2</sub> emissie elektriciteit	2420	1675	744	538	2010	1224	670	505
CO <sub>2</sub> emissie aardgas		107		107		107		107
<b>CO<sub>2</sub> reductie</b>	<b>2151</b>	<b>1513</b>	<b>662</b>	<b>561</b>	<b>1787</b>	<b>1107</b>	<b>596</b>	<b>537</b>



## 4.5 Haalbaarheidsevaluatie

De haalbaarheid van de verschillende opties wordt bepaald met behulp van de netto contante waarde (NCW). De NCW is een financiële beoordelingsmethode waarmee de economische haalbaarheid van een investering wordt bepaald. De methode vergelijkt de initiële investering met de contant gemaakte toekomstige kasstromen (opbrengsten en kosten) over de levensduur van het project [9]. De NCW wordt als volgt gedefinieerd:

$$NCW = \sum_{t=0}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t}$$

Met  $CF_t$  de kasstroom in jaar  $t$ ,  $r$  de discontovoet en  $n$  de projectlevensduur. De discontovoet is 8%.

### 4.5.1 Berekening

De jaarlijkse investeringskost van de nieuwe installatie wordt berekend a.d.h.v. de capital recovery factor (CRF).

$$CRF = \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1}$$

Met  $r$  de discontovoet en  $n$  de levensduur van de installatie [10]. De discontovoet is 8 % en voor de levensduur van de installatie wordt 20 jaar aangenomen. De levensduur van de installatie kan worden bepaald aan de hand van de netto contante waarde. Hierbij wordt voor opeenvolgende jaren de NCW berekend op basis van de jaarlijkse kasstromen en de discontovoet (8%). De levensduur wordt vastgesteld als de periode waarin de cumulatieve NCW nul wordt of positief blijft. Het jaar waarin de NCW voor het eerst nul bereikt, wordt geïnterpreteerd als de economische levensduur van de installatie.

In de volgende secties wordt de haalbaarheid van de verschillende opties besproken aan de hand de terugverdientijd en de NCW-curve. Bij elke optie is er gekeken naar de situaties met en zonder subsidies.

### 4.5.2 Resultaten

#### Rookgas – Elektriciteit (Optie 1 & 5)

Optie 1 beschouwt de toepassing van een ORC-unit waarbij rookgas wordt ingezet als warmtebron voor uitsluitend elektriciteitsopwekking. Optie 5 betreft de toepassing van een SRC-unit met rookgas als warmtebron, eveneens voor uitsluitend elektriciteitsopwekking. Tabel 11 geeft een overzicht van de verschillende terugverdientijden voor de verschillende situaties. Hieruit volgt deze investering economisch niet haalbaar is, aangezien de terugverdientijd voor beide opties meer dan 30 jaar bedraagt. In deze gevallen zijn de investeringskosten te hoog ten opzichte van de jaarlijkse opbrengsten, waardoor binnen de beschouwde periode geen positieve netto contante waarde wordt gerealiseerd.

Tabel 11. Terugverdientijd optie 1 & 5.

TVT	Optie 1: ORC	Optie 5: SRC
Zonder subsidie	>30 jaar	>30 jaar
Met VEKI subsidie	>30 jaar	>30 jaar
Met DEI subsidie	>30 jaar	>30 jaar

## Rookgas – WKK (Optie 2 & 6)

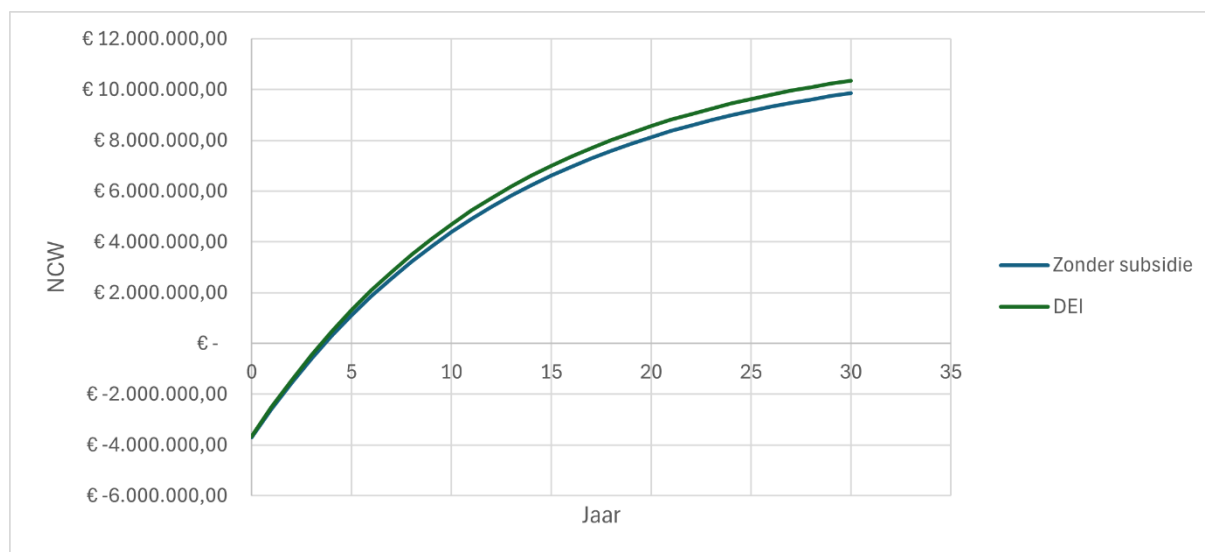
Optie 2 beschouwt de toepassing van een ORC-unit waarbij rookgas wordt ingezet als warmtebron voor warmtekrachtkoppeling. Optie 6 betreft de toepassing van een SRC-unit met rookgas als warmtebron, eveneens voor warmtekrachtkoppeling. Tabel 12 geeft een overzicht van de terugverdientijden voor de verschillende beschouwde situaties.

Uit de resultaten blijkt dat het benutten van rookgas met een ORC-unit de meest economisch haalbare optie is, met een terugverdientijd van 4 jaar. Voor deze situatie leidt de toepassing van de DEI-subsidie niet tot een wijziging van de terugverdientijd. De VEKI-subsidie is niet van toepassing, aangezien de terugverdientijd minder dan 5 jaar bedraagt. De bijbehorende netto contante waarde-curves (NCW-curves) zijn weergegeven in Figuur 5. In Figuur 6 is de NCW-curve opgenomen voor de investering zonder subsidie, waarbij een onzekerheidsmarge van 50% is meegenomen. Op basis hiervan kan worden geconcludeerd dat de terugverdientijd varieert binnen een bandbreedte van circa 2 tot 11 jaar.

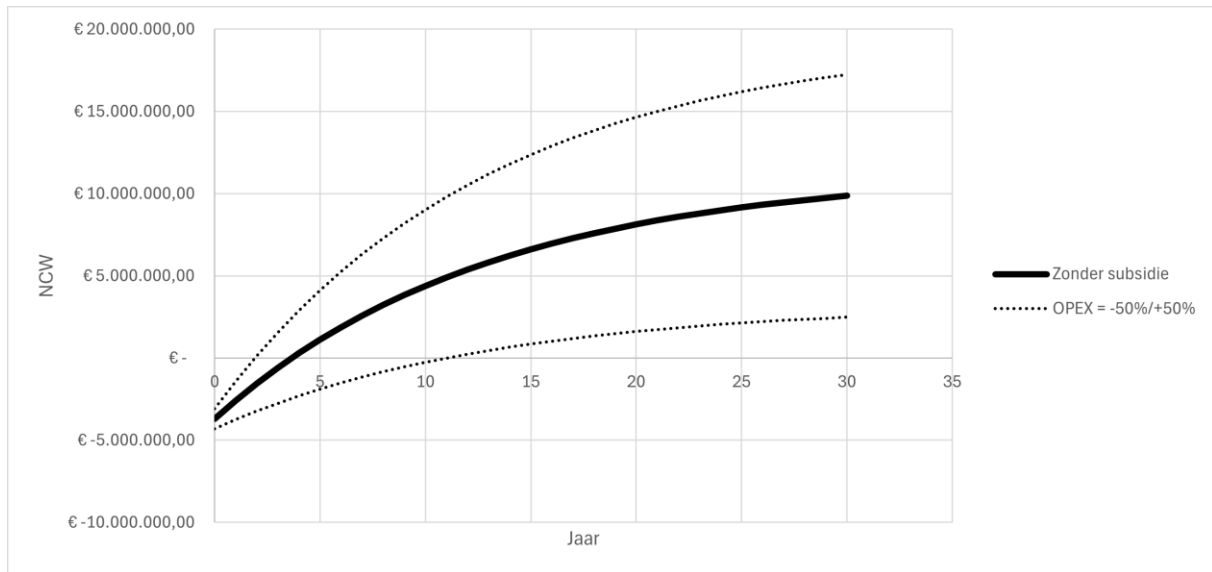
Indien er gekozen wordt voor de toepassing van een SRC-unit zal de investering terugbetaald zijn na 7 jaar zonder subsidie. Indien de VEKI subsidie wordt toegepast kan de terugverdientijd worden gereduceerd naar 6 jaar en voor de DEI subsidie ook naar 6 jaar. De bijbehorende netto contante waarde-curves (NCW-curves) zijn weergegeven in Figuur 7. In deze figuur is tevens een onzekerheidsmarge van 50% opgenomen, zowel voor de situatie zonder subsidie als voor de scenario's met VEKI- en DEI-subsidies.

Tabel 12. Terugverdientijd optie 2 & 6.

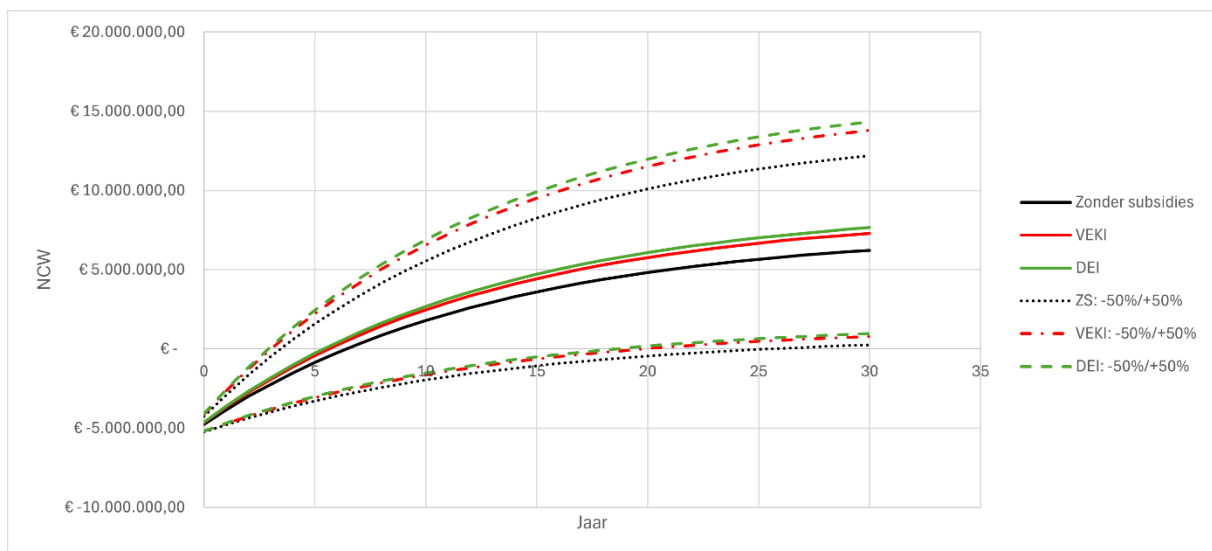
TVT	Optie 2: ORC	Optie 6: SRC
Zonder subsidie	4 jaar	7 jaar
Met VEKI subsidie	N.v.t.	6 jaar
Met DEI subsidie	4 jaar	6 jaar



Figuur 5. NCW-curve van optie 2 met en zonder subsidies.



Figuur 6. NCW-curve van optie 2 met 50% onzekerheidsmarge.



Figuur 7. NCW-curve van optie 6 met en zonder subsidies en met 50% onzekerheidsmarge.

### Hete lucht via kap – Elektriciteit (Optie 3 & 7)

Optie 3 beschouwt de toepassing van een ORC-unit waarbij hete lucht, afgezogen via de kap, wordt ingezet als warmtebron voor uitsluitend elektriciteitsopwekking. Optie 5 betreft de toepassing van een SRC-unit waarbij eveneens hete lucht als warmtebron wordt benut, uitsluitend voor elektriciteitsopwekking.

Tabel 13 is een overzicht van de terugverdientijden voor de verschillende beschouwde situaties. Hieruit volgt deze investering economisch niet haalbaar is, aangezien de terugverdientijd voor beide opties meer dan 30 jaar bedraagt. In deze gevallen zijn de investeringskosten te hoog ten opzichte van de jaarlijkse opbrengsten, waardoor binnen de beschouwde periode geen positieve netto contante waarde wordt gerealiseerd.

Tabel 13. Terugverdientijd optie 3 & 7.

TVT	Optie 3: ORC	Optie 7: SRC
Zonder subsidie	>30 jaar	>30 jaar
Met VEKI subsidie	>30 jaar	>30 jaar
Met DEI subsidie	>30 jaar	>30 jaar

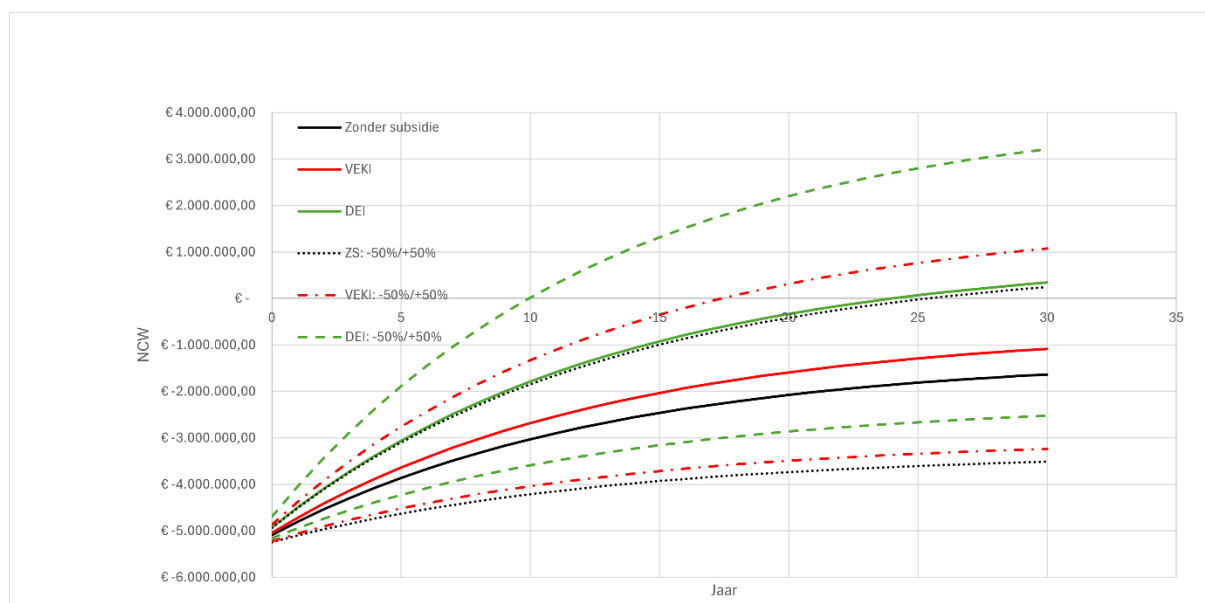
### Hete lucht via kap – WKK (Optie 4 & 8)

Optie 4 beschouwt de toepassing van een ORC-unit waarbij hete lucht, afgezogen via de kap, wordt ingezet als warmtebron voor warmtekrachtkoppeling. Optie 8 betreft de toepassing van een SRC-unit waarbij eveneens hete lucht als warmtebron wordt benut voor warmtekrachtkoppeling.

Tabel 14 geeft een overzicht van de terugverdientijden voor de verschillende beschouwde situaties. De netto contante waarde-curves (NCW-curves) van optie 4 zijn weergegeven in Figuur 8. In deze figuur is tevens een onzekerheidsmarge van 50% opgenomen, zowel voor de situatie zonder subsidie als voor de scenario's met VEKI- en DEI-subsidies. Voor de overige situaties geldt dat de investering economisch niet haalbaar is. De investeringskosten zijn in deze gevallen te hoog ten opzichte van de jaarlijkse opbrengsten, waardoor geen positieve netto contante waarde wordt gerealiseerd.

Tabel 14. Terugverdientijd optie 4 & 8.

TVT	Optie 4: ORC	Optie 8: SRC
Zonder subsidie	>30 jaar	>30 jaar
Met VEKI subsidie	>30 jaar	>30 jaar
Met DEI subsidie	24 jaar	>30 jaar



Figuur 8: NCW-curve van optie 4 met twee ovens met en zonder subsidies met 50% onzekerheidsmarge.



## 5 Conclusie

De haalbaarheidsstudie is gebaseerd op twee verschillende warmtebronnen. Enerzijds is gekeken naar het rookgas dat de oven verlaat vóór de batchvoorverwarmer. Anderzijds is de hete lucht beschouwd die wordt afgezogen boven de feeders en de werkoven. Voor beide warmtebronnen is onderzocht of de installatie van een ORC- of SRC-unit zowel technisch als economisch haalbaar is.

Uit de haalbaarheidsstudie blijkt dat de optie waarbij rookgas wordt benut in combinatie met een ORC-unit en warmtekrachtkoppeling de kortste terugverdiëntijd kent. Deze optie resulteert in een terugverdiëntijd van circa 4 jaar, zowel met als zonder toepassing van de VEKI- of DEI-subsidie.

De op één na meest gunstige optie betreft de optie waarbij rookgas wordt benut in combinatie met een SRC-unit en warmtekrachtkoppeling. Deze configuratie leidt tot een terugverdiëntijd van 7 jaar zonder subsidie. Met toepassing van de VEKI-subsidie en de DEI-subsidie kan de terugverdiëntijd worden verkort tot 6 jaar.

In een volgende fase dient de actualiteit en toepasbaarheid van de subsidies opnieuw te worden beoordeeld. Daarnaast moeten ook de gehanteerde aannames en waarden voor de energietarieven worden geactualiseerd, aangezien deze onderhevig zijn aan snelle en cyclische veranderingen binnen de sector.

De resultaten van dit rapport zijn gebaseerd op de aannames die gelden voor deze specifieke fabriek en toepassingen. Het is niet uitgesloten dat voor andere SRC-ontwerpen en voor andere industrieën en fabrieken hogere rendementen voor elektriciteitsopwekking mogelijk zijn, en daarmee ook hogere opbrengsten en een kortere terugverdiëntijd, mogelijk zelfs een halvering daarvan. Ter illustratie: het elektrische rendement van het SRC-ontwerp voor deze fabriek bedroeg ca. 20%, maar kan voor andere ontwerpen en toepassingen hoger uitvallen, ca. 30-45%. Dit dient per geval te worden onderzocht.

## 6 Referenties

- [1] Nationaal Comité van de Nederlandse Glasindustrie, NCNG Handboek voor de Glasfabricage 1997, Eindhoven, 1997.
- [2] P. Egizabal, „Waste Heat Recovery for Power Valorisation with Organic Rankine Cycle Technology in Energy Intensive Industries,” *Horizon* 2020, 2019.
- [3] M. Zier, P. Stenzel, L. Kotzur en D. Stolten, „A review of decarbonization options for the glass industry,” *Energy Conversion and Management*, vol. 10, p. 100083, 2021.
- [4] J. Iturralde, M. Gómez de Arteche, P. Aguirre, J. Bárcena, S. López, E. Ubieta, P. Fernandez Arroiabe, M. M. Bou-Ali en I. Unamuno, „Radiant waste heat recovery from steelmaking and glass industry,” *E3S Web of Conferences*, 2019.
- [5] U.S. Environmental Protection Agency Combined Heat and Power Partnership, „Catalog of CHP Technologies. Section 4. Technology Characterization - Steam Turbines,” 2015.
- [6] Turboden, *E-mailcorrespondentie met sales & Business Development Manager voor Waste Heat to Power en Gas Expanders van turboden, 1 januari 2026, betreffende investeringskosten voor ORC-installaties*, 2026.
- [7] Naaykens, „Ventilatoren voor hoge temperaturen,” Naaykens, 2026. [Online]. Available: <https://naaykens.com/nl/ventilatoren/ventilatoren-voor-toepassingen-met-hoge-temperaturen/>.
- [8] Milieubarometer, „Openbare footprints - CO2 footprint,” 2025.
- [9] F. E. e. B. KULeuven, „6 Investeringsbeslissingen: netto contante waarde en interne rentabiliteit”.
- [10] A. Chauhan, „Techno-economic feasibility study on Integrated Renewable Energy System for an isolated community of India,” *Elsevier*, vol. 59, pp. 388-405, 2016.