



## Ketenanalyse Bouw CO2 Prestatieladder

Scope 3 – Gebruik verkochte producten en diensten

Antea Group

Understanding today.  
Improving tomorrow.

projectnummer 214791  
20 juni 2025

# Ketenanalyse Bouw

## CO<sub>2</sub>-Prestatieladder

projectnummer 214791  
20 juni 2025

### Auteurs


Etienne Hoekstra  
Fons van de Laar

### Opdrachtgever

Kernteam CO<sub>2</sub>-Prestatieladder

datum  
20 juni 2025

beschrijving  
definitief

vrijgave  
T. Lesscher 

## Inhoudsopgave

<b>1.</b>	<b>Inleiding</b>	<b>5</b>
1.1	Aanleiding	5
1.2	Doelstellingen Ketenganalyse	6
<b>2.</b>	<b>Ketenganalyse energieadvies</b>	<b>7</b>
2.1	Achtergrond	7
2.1.1	Levenscyclus emissies	7
2.1.2	Energiebesparende maatregelen	8
2.2	LCA voor energiebesparende maatregelen in de bouwsector	9
<b>3.</b>	<b>Methode en afbakening</b>	<b>10</b>
3.1	Onderzoeksmethode	10
3.2	Afbakening projecten en gebouwen, en identificatie maatregelen en producten	11
3.3	Uitvoering levenscyclusanalyse	12
3.4	Interviews en brainstormsessie	16
<b>4.</b>	<b>Ketenpartners</b>	<b>17</b>
<b>5.</b>	<b>LCA resultaten voor energiebesparende maatregelen</b>	<b>18</b>
5.1	Meest geadviseerde maatregelen	18
5.2	Conventionele en alternatieve producten	19
5.2.1	Thermische isolatie	19
5.2.2	Warmtepompen	19
5.2.3	Beglazing	19
5.2.4	PV-panelen	20
5.2.5	Verlichtingssysteem	20
5.2.6	Mechanische ventilatie	20
5.3	Levenscyclusanalyse van GWP en CED per product	21
5.4	Sensitiviteitsanalyse van de levenscyclus gebaseerde CED- en GWP-waarden	24
5.5	Op levenscyclus gebaseerde GWP en CED, financiële kosten en terugverdiertijden van maatregelpakketten	25
5.5.1	GWP, CED en financiële terugverdiertijden per product	25
5.5.2	GWP, CED en financiële kosten per maatregelpakket	28
5.5.3	GWP, CED en financiële terugverdiertijden per maatregelpakket	31
5.6	Integratie van GWP en CED in het energiebesparingsadvies	32
5.7	Het effect van GWP en CED op basis van levenscyclus op geadviseerde en gekozen maatregelen	34
5.7.1	Inzichten uit klantinterviews	34
5.7.2	Reflecties uit de interne brainstormsessie	35
<b>6.</b>	<b>Conclusie</b>	<b>36</b>
<b>7.</b>	<b>Bronnenlijst</b>	<b>37</b>
<b>Bijlagen</b>		<b>40</b>
Bijlage A		41
Bijlage B		42
Bijlage C		44

## Afkortingen

a-Si	Amorf Silicium (type dunnefilm zonnepaneel)
CdTe	Cadmium Telluride (type dunnefilm zonnepaneel)
CED	<i>Cumulative Energy Demand</i> (cumulatieve energieverbruik)
CEN	Europees Comité voor Normalisatie
CH <sub>4</sub>	Methaan
CIGS	<i>Copper Indium Gallium Selenide</i> (type dunnefilm zonnepaneel)
CO <sub>2</sub>	Koolstofdioxide
CO <sub>2</sub> e	CO <sub>2</sub> -equivalenten
EPA-U	Energie Prestatie Advies Utiliteitsbouw
EP	Energie Prestatie
EPD	<i>Environmental Product Declaration</i>
EPS	<i>Expanded Polystyrene</i>
FP	Financiële Prestatie
FU	Functionele Eenheid
GHG	<i>Greenhouse Gas</i> (broeikasgas)
GWP	<i>Global Warming Potential</i> (opwarmingspotentieel)
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
kWh	Kilowattuur
LCA	Levenscyclusanalyse
MME	Meest materiele emissies
MJ	Megajoule
MPG	Milieuprestatie Gebouwen
NMD	Nationale Milieudatabase
PCR	<i>Product Category Rules</i>
PIF	<i>Polyisocyanuraat Foam</i>
PUR	Polyurethaan
Rc-waarde	Warmteweerstandscoefficiënt
RSL	<i>Reference Service Life</i> (referentielevensduur)
RvO	Rijksdienst voor Ondernemend Nederland
R-290	Propaan als koudemiddel in warmtepomp
R-744	CO <sub>2</sub> als koudemiddel in warmtepomp
SKAO	Stichting Klimaatvriendelijk Aanbesteden en Ondernemen
VRF	<i>Variable Refrigerant Flow</i> (type warmtepompsysteem)
WGBC	<i>World Green Building Council</i>

# 1. Inleiding

## 1.1 Aanleiding

Antea Nederland B.V., hierna te noemen Antea Group, heeft als missie een toonaangevende partner te zijn bij het ontwikkelen en toepassen van duurzame en integrale oplossingen in onze leefomgeving. Daarin wil zij haar eigen verantwoordelijkheid nemen door de kennis van de organisatie in te zetten voor een 'volhoudbare' toekomst, maar ook door kritisch naar haar eigen bedrijfsvoering en samenwerkingen te kijken en deze continu te verbeteren. "Vol trots en met plezier".

Deze missie wordt sinds 2009 ook actief gespiegeld op haar eigen interne activiteiten. Met het aansluiten bij de CO<sub>2</sub>-prestatieladder van Stichting Klimaatvriendelijk Aanbesteden en Ondernemen (SKAO) is Antea Group actief met haar duurzaamheidsprofiel aan de slag gegaan en in het bijzonder met de CO<sub>2</sub>-emissie van haar organisatie. Hiermee heeft Antea Group niveau 5 bereikt van de CO<sub>2</sub>-Prestatieladder. Een van de vereisten hiervoor is het schrijven van een ketenanalyse. Het handboek van de CO<sub>2</sub>-Prestatieladder schrijft daarover het volgende (eis 4.A.1):

*"Bij het opstellen van de ketenanalyses dienen de scope 3 emissies wel gekwantificeerd te worden. De volgende nadere (rand)voorwaarden worden gesteld aan de ketenanalyses:*

1. *De ketenanalyses dienen betrekking te hebben op de projectenportefeuille.*
2. *Het bedrijf dient eigen analyses uit te (laten) voeren. Het meeliften bij de uitvoering van een betaalde opdracht van een klant is niet toegestaan.*
3. *Er dient 1 ketenanalyse te worden gemaakt voor een van de twee meest materiële emissies én 1 andere ketenanalyse voor een van de zes meest materiële emissies uit de rangorde.*
4. *A Corporate Accounting and Reporting Standard (Hoofdstuk 4 Setting Operational Boundaries) geeft de herkenbare structuur van elke ketenanalyse:*
  - a. *Beschrijf de betreffende keten*
  - b. *Bepaal welke scope 3 categorieën relevant zijn*
  - c. *Identificeer de partners in de keten*
  - d. *Kwantificeer de scope 3 emissies*
5. *Het resultaat van de analyse dient een aanvulling te zijn op de bestaande (gepubliceerde) kennis en inzichten en dient bij te dragen aan het voortschrijdend maatschappelijk inzicht."*

Volgens bovenstaande richtlijnen is een analyse uitgevoerd omtrent de meest materiële emissies (MME) resulterend uit de activiteiten van Antea Group. Deze zijn gebaseerd op de structuur van het organogram, welke op 1 januari 2024 de businesslijnen definieert zoals weergegeven in tabel 1.

**Tabel 1: Naamswijzigingen Businesslijnen Antea Group**

Businesslijnen (1 januari 2022)	Businesslijnen (1 januari 2024)
Bouw & Installaties	Bebouwde Omgeving
Milieu, Veiligheid & Gezondheid	Energie & Ondergrond
Infrastructuur	Realisatie
Stad & Klimaat	Mobiliteit
Contracten & Vergunningen	Leefomgeving
Data & Realisatie	

De MME-analyse van 2024 concludeerde de onderstaande top 6 meest materiële downstream emissiebronnen. Deze uitgebreide ketenanalyse heeft betrekking op zowel de grootste emissiebron als een van de zes meest materiële emissies uit de rangorde (voorwaarde 3). Deze relevante vakgroepen zijn hieronder geel gearceerd:

1. **Bebouwde Omgeving:** *Bouw, inclusief specials*
2. *Leefomgeving:* *Planologie & Grondzaken*
3. *Mobiliteit:* *Kunstwerken*
4. *Mobiliteit:* *Wegen & Stedelijke Infra*
5. *Energie & Ondergrond:* *Industrie & Pipelinemanagement*
6. **Leefomgeving:** *Vergunningen & Procedures*

## 1.2 Doelstellingen Ketenanalyse

Deze ketenanalyse heeft als doel om inzicht te verkrijgen in de CO<sub>2</sub>-uitstoot over de gehele levenscyclus van de relevante producten van de meest voorkomende energiebesparende maatregelen die Antea Group adviseert voor utiliteitsgebouwen. De CO<sub>2</sub>-uitstoot wordt in deze analyse benaderd via de *Global Warming Potential* (GWP), uitgedrukt in CO<sub>2</sub>-equivalenten (CO<sub>2</sub>e), en aangevuld met het cumulatieve energieverbruik (CED) als aanvullende maat voor milieu-impact. Deze analyse is uitgevoerd op basis van de eigen projectenportefeuille van Antea Group en is gestoeld op deskresearch en kwantificering volgens het GHG Protocol en bestaande LCA-gegevens.

Antea Group wil hiermee weloverwogen beslissingen kunnen nemen over de milieueffecten van de geadviseerde maatregelpakketten. Daarbij wordt onderzocht of andere keuzes gemaakt zouden worden wanneer de milieu-impact van maatregelen expliciet inzichtelijk is. Dit onderzoek draagt ook bij aan het vergroten van bewustwording onder medewerkers en klanten over de invloed van productkeuzes op de CO<sub>2</sub>-uitstoot in de keten. Centraal staan het bepalen van de CO<sub>2</sub>-equivalenten en het cumulatieve energieverbruik (CED) over de levenscyclus van energiebesparende maatregelen, en het achterhalen in hoeverre deze kennis het besluitvormingsproces van klanten en medewerkers beïnvloedt.

De verkregen inzichten worden door Antea Group vertaald naar gerichte actie, waaronder:

- Het betrekken van ketenpartners en opdrachtgevers bij het realiseren van CO<sub>2</sub>-reductiedoelstellingen;
- Het bieden van onderbouwd advies aan opdrachtgevers bij het maken van duurzame maatregelkeuzes;
- Het informeren en toerusten van medewerkers om actief en aantoonbaar opdrachtgevers te adviseren over CO<sub>2</sub>-reductie in de keten.

Deze ketenanalyse sluit aan bij twee concrete duurzaamheidsdoelstellingen van Antea Group:

- Vanaf 2025 wordt in ten minste 75% van de energieadviezen een alternatief met lagere GWP (*Global Warming Potential*) meegenomen en bespreekbaar gemaakt met de opdrachtgever;
- Het nemen van verantwoordelijkheid door structureel en meetbaar bij te dragen aan CO<sub>2</sub>-reductie in de keten, in lijn met de ISO 14001-doelstellingen en de ambitie om toe te werken naar een gebouwenbestand met netto nul emissies over de volledige levenscyclus tegen 2050.

## 2. Ketenganalyse energieadvies

### 2.1 Achtergrond

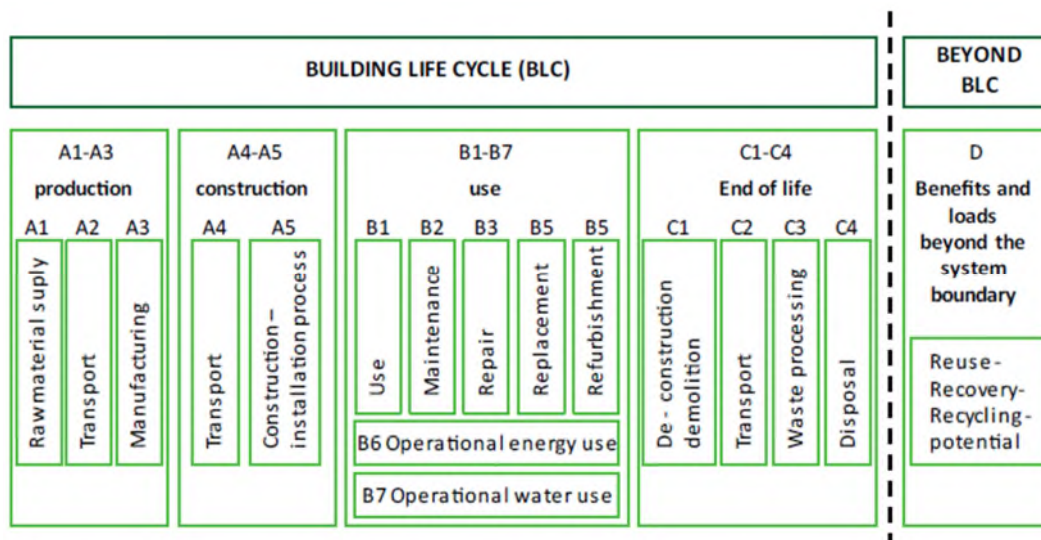
De bouwsector is wereldwijd verantwoordelijk voor een aanzienlijk aandeel in het energieverbruik en de uitstoot van broeikasgassen. In Nederland is circa 38% van de nationale CO<sub>2</sub>-uitstoot afkomstig uit de gebouwde omgeving. Om deze impact te beperken zijn er op nationaal en Europees niveau ambitieuze doelstellingen vastgesteld. Zo moeten alle utiliteitsgebouwen in 2030 minimaal energielabel A hebben en in 2050 energieneutraal zijn (RvO, 2022). Bij het toepassen van energiebesparende maatregelen om het energieverbruik van een gebouw te verminderen wordt alleen gekeken naar de gebruiksfase van het gebouw. De energie en bijbehorende broeikasgassen die over de levensduur van energiebesparende producten worden uitgestoten worden doorgaans buiten beschouwing gelaten.

Om dit te veranderen heeft de Europese Unie bepaald dat alle gebouwen in Europa in 2050 netto nul emissies mogen hebben over de hele levenscyclus (WGBC, 2022). Dit betekent dat de operationele en materiaal gebonden emissies over de hele levenscyclus van een gebouw netto nul moeten zijn. Daarmee worden de broeikasgasemissies en het energiegebruik gedurende de hele levenscyclus van energiebesparende producten van groot belang.

#### 2.1.1 Levenscyclus emissies

Om utiliteitsgebouwen in Nederland te laten voldoen aan de energielabelverplichting en het doel van energieneutraliteit moeten energiebesparende maatregelen worden toegepast. Deze maatregelen verlagen het primaire fossiele energieverbruik tijdens de gebruiksfase en daarmee de bijbehorende broeikasgasemissies. De huidige focus ligt dan ook op het verbeteren van de energieprestatie tijdens deze gebruiksfase, die 80–90% van het totale energieverbruik over de levenscyclus vertegenwoordigt. Toch wordt in alle levensfasen energie verbruikt. De overige 10–20% betreft ‘*embodied energy*’ uit de product- en constructiefase; het aandeel van de end-of-life-fase is verwaarloosbaar.

**Figuur 1:** Levenscyclus van een gebouw. Aangepast van NEN-EN 15978 (CEN, 2011)

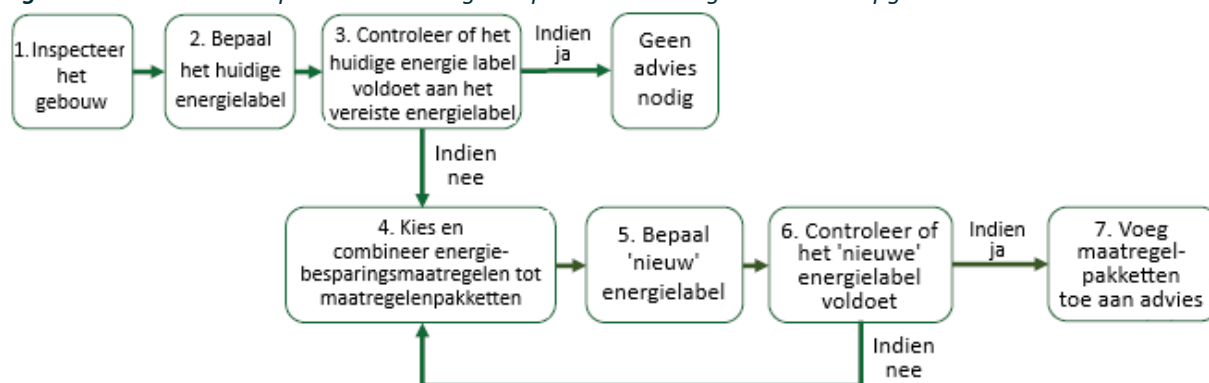


Bij zeer energiezuinige gebouwen, zoals die met energielabel A++++, verschuift de verhouding en wordt de *embodied energy* relatief belangrijker. Hoewel deze een kleiner aandeel vormt, is het essentieel om ook hier reductiekansen te benutten – bijvoorbeeld via materiaalkeuzes met een lage milieu-impact, goede isolerende eigenschappen en lange levensduur. De Europese doelstelling om in 2050 een gebouwvoorraad met netto nul emissies over de volledige levenscyclus te realiseren onderstreept het belang van deze bredere benadering. Om inzicht te krijgen in de uitgestoten broeikasgassen per levenscyclus van bouwproducten kan een LCA-studie worden uitgevoerd.

## 2.1.2 Energiebesparende maatregelen

Als Antea Group dragen wij bij aan het toekomstbestendig maken van de gebouwde omgeving. Binnen de businesslijnen Bebouwde Omgeving en Leefomgeving richten wij ons op het adviseren omtrent toekomstbestendige en energiezuinige gebouwconcepten op basis van expertise in bouwkunde, installaties en bouw fysica. Een van de activiteiten is het bepalen van het energielabel voor utiliteitsgebouwen met potentieel advies omtrent energiebesparende maatregelen. Hierbij wordt de procedure gevolgd zoals weerspiegeld in Figuur 2.

**Figuur 2:** Proces om te bepalen welke energiebesparende maatregelen worden opgenomen in het advies.



Allereerst voert Antea Group een gebouwinspectie uit om het huidige energielabel te bepalen, waarbij het gebruik maakt van de software Vabi EPA-U. Indien het gebouw niet aan het vereiste energielabel voldoet wordt bekeken welke energiebesparende maatregelen kunnen worden toegepast. Voldoet het label niet aan de eisen, dan worden energiebesparende maatregelen geïdentificeerd en gecombineerd tot maatregelenpakketten aan de hand van de *trias energetica* van (Entrop & Brouwers, 2009):

1. Voorkomt energiegebruik
2. Benut hernieuwbare energie zo efficiënt mogelijk, en
3. Gebruikt fossiele energie zo zuinig mogelijk.

Met de geselecteerde maatregelenpakketten wordt het energielabel opnieuw bepaald. Als het nieuwe label voldoet aan de gestelde eisen wordt het pakket opgenomen in het advies. Alleen pakketten die voldoen aan de labeldoelstelling worden geadviseerd. Eén maatregel kan in meerdere pakketten voorkomen. Klanten ontvangen zo meerdere maatregelenpakketten, waaruit zij kunnen kiezen op basis van onder andere terugverdientijd, energiebesparing en CO<sub>2</sub>-reductie.

Hierbij wordt alleen rekening gehouden met de gebruiksfase van het gebouw. Andere levenscyclusfasen van producten worden niet meegenomen. Dit bevestigt de noodzaak om aanvullende instrumenten, zoals een levenscyclusanalyse (LCA), toe te voegen om een vollediger beeld te krijgen van de milieueffecten van energiebesparende maatregelen

Om een vollediger beeld te krijgen van de milieueffecten van energiebesparende maatregelen is een ketenanalyse uitgevoerd waarin de levenscyclusimpact van de meest geadviseerde maatregelen is onderzocht. Als adviesbureau heeft Antea Group met name in de initiatie- en ontwerpfasen invloed op de keuze van producten, installaties en materialen. Hoewel de uiteindelijke keuze bij de opdrachtgever ligt hebben de voorgestelde maatregelen een aanzienlijke invloed op de latere ketenemissies.

Door ook de prestaties over de volledige levenscyclus mee te nemen in ons energieadvies willen wij onze dienstverlening verder verbreden. Zo ondersteunen wij onze klanten niet alleen bij het verbeteren van energieprestaties en het beheersen van kosten, maar ook bij het maken van keuzes met een lagere milieupact. Deze benadering sluit aan bij onze ambitie om integraal en toekomstgericht te adviseren en zo actief bij te dragen aan de transitie naar een klimaat neutrale gebouwde omgeving in 2050.

## 2.2 LCA voor energiebesparende maatregelen in de bouwsector

Een levenscyclusanalyse (LCA) is een waardevol instrument om de milieueffecten van energiebesparende maatregelen in de bouwsector in kaart te brengen. Aangezien de resultaten sterk afhangen van keuzes in doel, scope, functionele eenheid (FU), systeemgrenzen en allocatieprocedures, is een transparante afbakening essentieel. Verschillen hierin kunnen leiden tot moeilijk vergelijkbare of zelfs tegenstrijdige uitkomsten.

Om milieuprestaties van producten op een consistente en transparante manier te kunnen vergelijken, zijn er Product Category Rules (PCR's) ontwikkeld. Dit zijn specifieke rekenregels die voorschrijven hoe een LCA moet worden uitgevoerd voor een bepaalde productgroep. Wanneer een LCA is uitgevoerd volgens een geldige PCR, kunnen de resultaten worden samengevat in een Environmental Product Declaration (EPD) – een gestandaardiseerde en gecontroleerde weergave van de uitkomsten van de LCA. Voor bouwproducten moeten zowel de relevante PCR's als de Europese norm EN 15804:2012+A2:2019 worden gevolgd. Deze norm beschrijft de algemene basisprincipes en eisen voor LCA's in de bouwsector. Voor energiebesparende maatregelen bestaan aanvullende PCR's (c-PCR's), bijvoorbeeld voor isolatiematerialen, ramen, zonnepanelen en ventilatiecomponenten. Als er voor een productgroep geen c-PCR beschikbaar is – zoals bij warmtepompen of verlichting – gelden enkel de algemene richtlijnen uit EN 15804 en eventueel een generieke PCR.

In Nederland wordt aanvullend de Milieuprestatie Gebouwen (MPG) gebruikt die milieueffecten samenvat in één score op basis van schaduwpreizen. Hoewel deze aanpak praktisch kan zijn binnen een regelgevingscontext maskeert zij de onderlinge afwegingen tussen impactcategorieën en voldoet zij niet aan de internationale standaarden voor levenscyclusanalyses (LCA) bij vergelijkende beoordelingen.

Voor energiebesparende maatregelen worden meestal systeemgrenzen gehanteerd die de productie- en installatiefase (A1–A5), de gebruiksfase (B1–B7) en de end-of-life-fase (C1–C4) omvatten. Deze benadering sluit aan bij renovatieprojecten waarin bestaande elementen worden vervangen. Eventuele uitbreidingen kunnen ook de verwijderde materialen of resterende gebouwcomponenten meenemen.

Een betrouwbare ketenanalyse vereist dat per maatregeltipe een aparte LCA wordt uitgevoerd, met een passende FU en consistente toepassing van PCR-richtlijnen. Alleen zo kunnen milieueffecten van alternatieve producten transparant worden vergeleken en onderbouwde keuzes worden gemaakt voor CO<sub>2</sub>-reductie en energiebesparing.

## 3. Methode en afbakening

### 3.1 Onderzoeksmethode

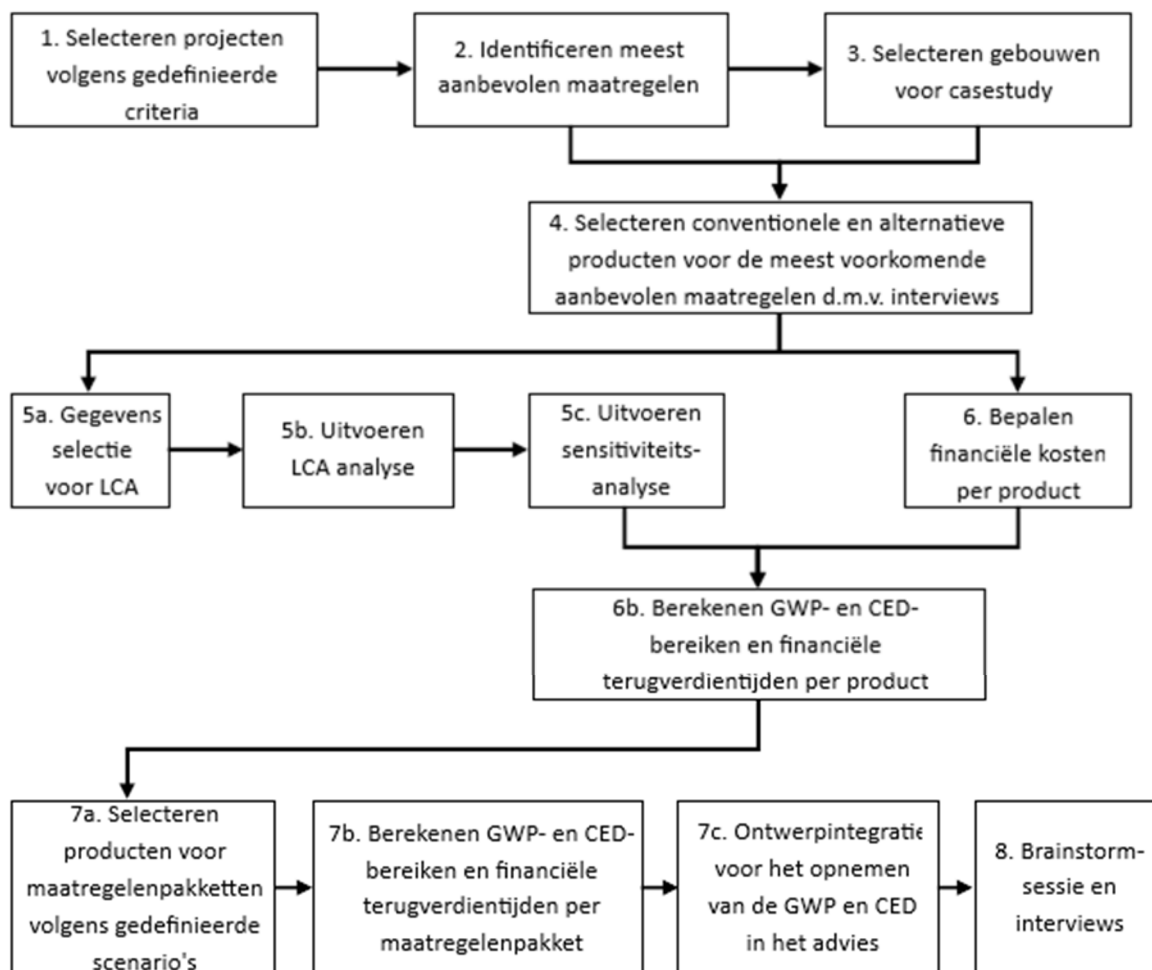
Om de in paragraaf 1.2 benoemde doelstellingen te realiseren, is het essentieel om inzicht te verkrijgen in de klimaat- en energie-impact van materialen en producten die worden toegepast binnen energiebesparende maatregelen. Hierbij ligt de focus op de *Global Warming Potential (GWP)* en de *Cumulative Energy Demand (CED)* over de gehele levenscyclus.

In deze analyse wordt onder meer gekeken naar:

- De GWP- en CED-waarden over de levenscyclus van zowel conventionele als alternatieve producten die momenteel gangbaar zijn binnen de meest geadviseerde maatregelen door Antea Group;
- De mogelijkheden om GWP en CED van een volledig maatregelenpakket mee te nemen in het energiebesparingsadvies;
- De mate waarin de introductie van GWP- en CED-informatie invloed heeft op hoe klanten en medewerkers van Antea Group criteria prioriteren bij het kiezen van maatregelen;
- De wijze waarop deze inzichten kunnen bijdragen aan het verder verduurzamen en optimaliseren van het voorgestelde maatregelenpakket.

Hierbij wordt de onderzoeksmethode toegepast, zoals nader beschreven in Figuur 3.

**Figuur 3:** Flowchart onderzoeksmethode



## 3.2 Afbakening projecten en gebouwen, en identificatie maatregelen en producten

### *Projecten*

Voor deze ketenanalyse zijn vier gemeentelijke projecten geselecteerd in de provincies Overijssel, Limburg, Drenthe en Gelderland waarin Antea Group energiebesparingsadvies heeft opgesteld voor meerdere utiliteitsgebouwen. De selectie is gebaseerd op de beschikbaarheid van gedetailleerde maatregelpakketten, variatie in gebouwtypen en voldoende spreiding in uitgangssituaties en energieprestaties.

De projecten zijn gekozen met het oog op representativiteit binnen de Nederlandse utiliteitsbouw en bieden een geschikte basis om veelvoorkomende maatregelcategorieën te identificeren en verder door te rekenen op ketenimpact. Door meerdere projecten met verschillende contexten te combineren, wordt de betrouwbaarheid van de analyse vergroot.

### *Identificatie meest geadviseerde maatregelen*

Op basis van de vier geselecteerde projecten is onderzocht welke maatregelcategorieën het meest frequent worden toegepast in energiebesparingsadviezen voor utiliteitsgebouwen. De verdeling over meerdere adviestrajecten uit recente jaren toont een consistent beeld met een duidelijke top zes die structureel het grootste aandeel vormt. Deze stabiele verdeling rechtvaardigt het gebruik van deze categorieën als representatieve basis voor de verdere analyse van ketenemissies en terugverdientijden.

### *Selectie gebouwen casestudie*

De vier geselecteerde gemeentelijke projecten omvatten in totaal 72 gebouwen met uiteenlopende energieprestaties. Hierdoor zijn per gebouw verschillende maatregelen vereist om energielabel A of energieneutraliteit te behalen, in lijn met de Nederlandse beleidsdoelstellingen voor respectievelijk 2030 en 2050. Om binnen deze dataset representatieve casestudies te selecteren voor de ketenanalyse, zijn specifieke selectiecriteria opgesteld.

Gebouwen komen in aanmerking wanneer wordt voldaan aan de volgende voorwaarden:

- Alleen gebouwen waarbij de maatregelenpakketten uitsluitend bestaan uit de zes meest geadviseerde maatregelcategorieën zijn meegenomen. Het toevoegen van andere maatregeltypes zou de energiebesparing verhogen zonder dat de bijbehorende GWP- en CED-waarden kunnen worden meegewogen, wat zou leiden tot een vertekende terugverdientijd.
- Elk geselecteerd gebouw bevat minimaal twee pakketten in het advies: één gericht op het behalen van energielabel A, en één op energieneutraliteit.
- Minstens één pakket moet ten minste vier van de zes meest toegepaste maatregelcategorieën bevatten, waarvan er ten minste één betrekking heeft op thermische isolatie.
- Het verschil tussen het huidige en het beoogde energielabel moet minimaal twee labelstappen bedragen. Trajecten van bijvoorbeeld label C naar A worden wel meegenomen, terwijl verbeteringen van B naar A worden uitgesloten. Gebouwen met een initieel label van A++ of hoger worden eveneens uitgesloten vanwege hun reeds hoge energieprestaties.

Op basis van deze selectiecriteria kwamen 21 gebouwen in aanmerking. Voor verdere verdieping is gekozen om alleen gebouwen met het meest voorkomende functieprofiel en gebruiksoppervlak op te nemen. Dit betreft sport- en recreatiegebouwen (SBI-code 93) met een netto bruikbare oppervlakte van circa 400 m<sup>2</sup>. Zes gebouwen voldeden aan deze specifieke kenmerken. De eigenschappen van deze gebouwen zijn opgenomen in onderstaande tabel. De bijbehorende maatregelen en pakketten zijn weergegeven in Bijlage B.

**Tabel 2:** Kenmerken van de geselecteerde casestudygebouwen (EN = energieneutraal)

Gebouw	Netto bruikbare oppervlakte (m <sup>2</sup> )	Oorspronkelijke label	Beoogde label	Aantal van de zes meest aanbevolen soorten maatregelen
Gebouw 1	451	E	C / A / EN	1 / 2 / 6
Gebouw 2	452	E	C / A / EN	1 / 2 / 6
Gebouw 3	438	D	B / A / EN	1 / 2 / 6
Gebouw 4	438	C	A / EN	1 / 5
Gebouw 5	438	C	A / EN	1 / 5
Gebouw 6	438	C	A / EN	1 / 4

#### *Selectie conventionele en alternatieve producten*

Op basis van een literatuurstudie en tien semigestructureerde interviews met interne adviseurs van Antea Group is per maatregelcategorie een representatieve selectie gemaakt van conventionele én alternatieve producten die in de praktijk breed worden toegepast. Binnen elke categorie zijn meerdere materialen of systemen geselecteerd die in aanmerking komen voor vergelijking op levenscyclusniveau. Bij de productselectie is rekening gehouden met toepasbaarheid in bestaande bouw, gangbaarheid op de markt en beschikbaarheid van betrouwbare milieudata. Zowel synthetische als *bio-based* materialen zijn meegenomen, zodat ook alternatieven met potentieel lagere ketenemissies in beeld komen. In totaal zijn er voor de zes gebouwen 26 optionele producten geanalyseerd.

### 3.3 Uitvoering levenscyclusanalyse

Voor elk van de in totaal 26 producten is de milieubelasting geanalyseerd over de volledige levenscyclus. Hierbij is gebruikgemaakt van data uit erkende LCA-bronnen zoals de Nationale Milieudatabase (NMD), waar nodig aangevuld met Europese *Environmental Product Declarations* (EPD's).

Als eerste stap worden de GWP- en CED-waarden berekend voor de geselecteerde conventionele en alternatieve producten. Onderstaand een korte uitleg van deze twee LCA-impactcategorieën:

- *Global Warming Potential* (GWP): Om de bijdrage van verschillende broeikasgassen aan klimaatverandering te vergelijken, worden deze samengevoegd in de indicator GWP, meestal berekend over een periode van 100 jaar. Aangezien elk gas een verschillend effect heeft, worden karakterisatiefactoren toegepast. Zo telt methaan (CH<sub>4</sub>) 21 keer zwaarder mee dan koolstofdioxide (CO<sub>2</sub>). Door emissies uit de levenscyclusinventaris (LCI) te vermenigvuldigen met deze factoren, kunnen alle uitstootgegevens worden uitgedrukt in CO<sub>2</sub>-equivalenten.
- *Cumulative Energy Demand* (CED): Deze categorie omvat het totale energieverbruik over de volledige levensduur van een product, uitgedrukt in megajoules (MJ). Hierbij wordt zowel energie uit hernieuwbare als niet-hernieuwbare bronnen meegenomen.

Om verschillen tussen producten vergelijkbaar te maken zijn de milieuprestaties omgerekend naar een functionele eenheid per maatregeltipe. Hierbij is gekozen voor een functionele eenheid die aansluit bij de toepassing van het product in het energieadvies, zoals MJ bespaarde energie per geïnstalleerde vierkante meter of CO<sub>2</sub>-equivalenten per jaar gebruiksduur.

Deze waarden kunnen op twee manieren worden vergeleken:

- (1) Tussen producten binnen eenzelfde maatregelcategorie (bijvoorbeeld verschillende isolatiematerialen).
- (2) Tussen producten van verschillende categorieën (e.g., isolatie vs. PV-panelen). In deze studie ligt de focus uitsluitend op vergelijkingen binnen maatregelcategorieën.

Om producten binnen een maatregelcategorie eerlijk te kunnen vergelijken is per productcategorie dezelfde functionele unit (FU) gehanteerd (zie Tabel 3). Omdat producten van verschillende maatregelen worden gecombineerd in één maatregelenpakket is daarnaast een tweede FU vastgesteld. Deze tweede beschrijft het totaal aan maatregelen dat nodig is om een gebouw op te waarderen naar een specifiek energielabel – in dit geval energielabel A en energieneutraal, conform de Nederlandse beleidsdoelstellingen voor 2030 en 2050. Om de resultaten van de tweede FU onderling te kunnen vergelijken zijn de doel- en de reikwijdtebepalingen van alle producten zo veel mogelijk gelijk gehouden. Daarom is voor alle producten dezelfde referentielevensduur (RSL) toegepast. Dit is de resterende levensduur van het gebouw na de implementatie van de maatregelen.

De gebouwen in de onderzochte projecten zijn circa 50 jaar oud, vergelijkbaar met de casestudie van Pombo et al (2016), waarin eveneens een resterende levensduur van 50 jaar werd toegepast. De Engelse term hiervoor is *Reference Service Life* (RSL). Beccali et al. (2013) en Günkaya et al. (2021) hanteerde dezelfde RSL en is daarom als uitgangspunt genomen voor deze studie. Voor producten met een kortere levensduur dan 50 jaar zijn meerdere productcycli nodig om de volledige analyseperiode te dekken. Dit is weergegeven als de referentiestroom (RF) in de onderstaande tabel. De referentiestromen voor de tweede FU zijn de verschillende maatregelen en de hoeveelheden die nodig zijn om een bepaald energielabel te behalen. Deze referentiestromen worden per gebouw weergegeven in Bijlage C.

Naast het hanteren van een uniforme RSD is Europa gekozen als geografisch toepassingsgebied. Voor de analyse zijn de hoofd-PCR voor bouwproducten (EN 15804:2012+A2:2019) en bijbehorende c-PCR's gebruikt, om de doel- en reikwijdtebepalingen van de producten zoveel mogelijk te harmoniseren. Uit literatuuronderzoek blijkt dat de vereiste PCR's vergelijkbare doelen en reikwijdtes hanteren. Wel verschillen de systeemgrenzen tussen de PCR-types:

- Type A sluit de gebruiksfase uit,
- Type B maakt gebruik van optionele levenscyclusfasen,
- Type C omvat alle fasen.

Om een zo volledig mogelijk beeld te verkrijgen, is gekozen voor systeemgrenzen volgens type C, welke het meest uitgebreid is. Bij het selecteren van deze systeemgrens moeten echter de afbakeningscriteria en toewijzingsprocedures zorgvuldig worden overwogen. Daarom is de EN 15804:2012+A2:2019 richtlijnen overgenomen, waarbij maximaal 5% van het energieverbruik en de massa buiten beschouwing kan worden gelaten. De toewijzing is gebaseerd op fysische eigenschappen zoals massa of volume.

Daarnaast wordt het principe van vermeden belasting toegepast. In dit principe omvat de eerste levenscyclus processen die verband houden met de terugwinning en recycling van materiaalstromen. Secundaire materialen die de systeemgrens verlaten kunnen door de tweede levenscyclus worden gebruikt om de belasting van grondstoffen te vermijden. De eerste levenscyclus ontvangt een 'credit' voor deze vermeden belasting, wat een stimulans vormt voor recycling (Laurin, 2019).

Op basis van deze criteria is informatie over GWP en CED geselecteerd uit databases. Hoewel secundaire data minder specifiek zijn dan primaire data, volstaan ze voor de adviesrapporten van Antea Group, welke zich in de initiatiefase bevinden waar enige afwijking acceptabel is. Hierdoor kunnen de resultaten van het LCA-onderzoek wel enige afwijking vertonen. Het gebruik van secundaire data bespaart tijd, waardoor meer energiebesparingsmaatregelen meegenomen kunnen worden, wat de mogelijkheid biedt voor een meer uitgebreide analyse en conclusie.

**Tabel 3: Functionele unit (FU) jaarlijkse referentiestromen (RF) & gebruikte bronnen voor onderzochte producten**

Maatregelcategorie	Producttype	FU	Service jaar	RF (y)	Bron
Isolatiemateriaal: Spouwmuurisolatie	Steenswol	1 m <sup>2</sup> isolatiemateriaal met een Rc-waarde van 1 m <sup>2</sup> K/W	50	1.0	(Knauf Insulation, 2023)
	Glaswol		50	1.0	(Knauf Insulation, 2021)
	PIF		50	1.0	(Pepi Rer, 2022; Assan Alüminyum, 2021)
	EPS (parels)		50	1.0	GaBi
Isolatiemateriaal: Dakisolatie	PIR		50	1.0	GaBi
	PUR (schuim)		50	1.0	(Tenapors, 2022)
	Thermoschuim		50	1.0	GaBi
	Houtvezel		50	1.0	GaBi
Isolatiemateriaal: Vloerisolatie	EPS (parels)		50	1.0	(Thünen-Institut für Holzforschung, 2023)
	PIF		50	1.0	(SSC Group, 2022)
	Thermoschuim		50	1.0	Aannames gebaseerd op driedubbel glas (GUBU, z.d.)
	Hennepvezel		50	1.0	GaBi
Isolatiemateriaal: Gevelpanelen	Steenswol		50	1.0	GaBi
	Glaswol		50	1.0	Aannames gebaseerd op lucht-lucht- en lucht-water warmtepompen (Wu et al., 2022)
	Houtvezel		50	1.0	Aannames gebaseerd op lucht-lucht- en lucht-water warmtepompen (Louws, 2019)
Beglazing	HR++ glas		1 m <sup>2</sup> glas- of raamsysteem met een Rc-waarde van 1 m <sup>2</sup> K/W	50	1.0
	Driedubbel glas	50		1.0	Aannames gebaseerd op monokristallijn (Vidal et al., 2021)
	Vacuümglas	50		1.0	(Trilux, 2023)
Warmtepomp	Lucht-lucht warmtepomp	1 warmtepomp met een vermogen van 20–70 kW	15	3.3	Aannames gebaseerd op LED + armatuur (Yavuz et al., 2012)
	Lucht-water warmtepomp		15	3.3	Aannames gebaseerd op LED + armatuur (Kaneko et al., 2013)
	Warmtepomp met koelmiddel: Propan		15	3.3	(Swegon Group, 2021)
	Warmtepomp met koelmiddel: CO <sub>2</sub>		10	5.0	Aannames gebaseerd op warmterugwinning algemeen (Esfehani et al., 2019)
PV-panelen	Monokristallijn	1 kWp	25	2.0	Aannames gebaseerd op warmterugwinning algemeen (Pang et al., 2020)
	Polykristallijn		25	2.0	(Knauf Insulation, 2023)
	Dunne film paneel (CdTe)		20	2.5	(Knauf Insulation, 2021)
	Dunne film paneel (CIGS)		20	2.5	(Pepi Rer, 2022; Assan Alüminyum, 2021)
	Dunne film paneel (A-Si)		20	2.5	GaBi
LED-verlichting	LED + armatuur	1 lamp	14	3.6	GaBi
	LED + daglichtdetectie		15	3.3	(Tenapors, 2022)
	LED + aanwezigheidsdetectie		15	3.3	GaBi
Warmteterugwinning	Warmteterugwinning algemeen	1 ventilatiesysteem met warmteterugwinning en een capaciteit van 1000 m <sup>3</sup> /h	25	2.0	GaBi
	Warmteterugwinning + CO <sub>2</sub> -detectie		25	2.0	(Thünen-Institut für Holzforschung, 2023)
	Warmteterugwinning + aanwezigheidsdetectie		25	2.0	(SSC Group, 2022)

Om te voldoen aan de PCR-regels zijn waar mogelijk gegevens uit EPD's gebruikt, zoals de EPD-bibliotheek van het internationale EPD-systeem (The International EPD System, n.d.), welke vrij beschikbaar is en voldoet aan de EN 15804:2012+A2:2019.

Daarnaast is gebruikgemaakt van Ökobaudat 2021-II dat eveneens voldoet EN 15804:2012+A2:2019. Als in deze databases geen gegevens beschikbaar waren is gebruikgemaakt van de GaBi-database. Aanvullende PCR's zijn toegepast op sommige producten, zoals C-PCR 05 voor rotswol, glaswol en EPS, en C-PCR 016 voor PV-panelen. Voor de andere producten is alleen EN 15804:2012+A2:2019 gebruikt.

Aangezien niet alle levenscyclusfasen in deze datasets zijn opgenomen zijn aanvullende processen toegevoegd op basis van aannames. Deze aannames zijn gebaseerd op andere producten binnen een meetcategorie waarvoor de ontbrekende fase wel beschikbaar is. Waarden voor de fasen A1-A3 zijn beschikbaar voor alle producten. Als we ons richten op isolatiematerialen ontbreekt fase A4 voor thermisch schuim, PIR, PUR, EPS, hennepvezel en houtvezel. Voor de overige vier isolatiematerialen, waar fase A4 wel beschikbaar is, kan het percentage van fase A4 ten opzichte van de fasen A1-A3 worden berekend. Het gemiddelde van deze percentages kan vervolgens worden gebruikt om de ontbrekende waarde voor fase A4 ten opzichte van de fasen A1-A3 te bepalen. De meeste aannames met betrekking tot thermische isolatie worden gedaan voor de fasen A4-A5, C1-C4 en D. De warmtepomp en het ventilatiesysteem hebben ontbrekende waarden voor de fasen A4-A5, B6 (alleen warmtepomp) en C1-C2.

Na berekening van de GWP en CED per product en FU, zoals weergegeven in Tabel 3, is een sensitiviteitsanalyse uitgevoerd om de robuustheid van de resultaten te beoordelen. Vanwege het gebruik van EPD-gegevens zijn er geen LCI-modellen beschikbaar, waardoor de analyse is gebaseerd op producteigenschappen die de GWP en CED beïnvloeden. Voor isolatie- en beglazingssystemen is dit de warmtegeleidingscoëfficiënt. Deze coëfficiënt heeft namelijk invloed op de dikte van het materiaal, wat resulteert in een verandering in de benodigde hoeveelheid materiaal. Dit heeft op zijn beurt weer invloed op de GWP en CED. Voor installaties varieert de levenscyclus van producten binnen een maatregelcategorie. In deze studie wordt uitgegaan van een RSL van 50 jaar. Het aantal levenscycli dat nodig is om deze 50 jaar te bereiken, varieert als een product een langere of kortere levenscyclus heeft dan wordt aangenomen. De sensitiviteitsanalyse resulteert in een bandbreedte voor de GWP en CED per product.

Deze GWP- en CED-bereiken worden gebruikt om de GWP en CED per maatregelenpakket te berekenen dus volgens de tweede FU. Hiervoor moet echter één product per maatregel worden geselecteerd. De optionele producten per maatregel worden gepresenteerd in Bijlage B. De selectie van deze producten is gebaseerd op drie scenario's:

1. Product met de kortste GWP-terugverdientijd
2. Product met de kortste CED-terugverdientijd
3. Product met de kortste financiële terugverdientijd

De terugverdientijden worden voor alle producten berekend aan de hand van de formules in Tabel 4. De jaarlijks bespaarde kg CO<sub>2</sub>eq. en MJ energie per product worden bepaald door de bespaarde MJ gas en kWh elektriciteit van een maatregel, zoals berekend door de Vabi-software. Om deze waarden om te zetten in GWP- en CED-effecten is gebruikgemaakt van de dataset van Ecoinvent 3.8. Bijgevolg is 1 MJ aardgas gelijk aan 0,077 kg CO<sub>2</sub>eq. en 1,291 MJ energie, waarbij 1 m<sup>3</sup> gas gelijk is aan 35,17 MJ gas. Verder is 1 kWh elektriciteit gelijk aan 0,399 kg CO<sub>2</sub>eq. en 6,123 MJ energie.

**Tabel 4: Berekening terugverdientijd (aangepast van Beccali et al., 2013)**

Berekening	Variabelen	Eenheid
$E_{P,T} = \frac{CED}{E_{s,y}} \quad [1]$	$E_{P,T}$ = Energie terugverdientijd	Jaar
	CED = CED-waarde uit de LCA-studie	MJ
	$E_{s,y}$ = Jaarlijkse energiebesparing d.m.v. energiebesparende maatregel	MJ/jaar
$Em_{P,T,GWP} = \frac{GWP}{GWP_{s,y}} \quad [2]$	$Em_{P,T,GWP}$ = Energie terugverdientijd	Jaar
	GWP = GWP-waarde uit de LCA-studie	Kg CO <sub>2</sub> eq
	$GWP_{s,y}$ = jaarlijks vermeden GWP door de energiebesparende maatregel	Kg CO <sub>2</sub> eq/jaar
$F_{P,T} = \frac{Costs}{F_{s,y}} \quad [3]$	$F_{P,T}$ = Energie terugverdientijd	Jaar
	Costs = Financiële kosten voor de implementatie van de energiebesparende maatregel	€
	$F_{s,y}$ = Energie terugverdientijd	€/jaar

De financiële terugverdientijd wordt berekend door de financiële kosten van de producten te delen door de jaarlijkse kostenbesparingen als gevolg van gas- en elektriciteitsbesparingen. Deze jaarlijkse kostenbesparingen worden berekend op basis van een gasprijs van € 1,50/m<sup>3</sup>, een elektriciteitsprijs van € 0,27/kWh en een jaarlijkse inflatie van 3%. Verwacht wordt dat prijsschommelingen geen invloed zullen hebben op de hoeveelheid bespaard gas en elektriciteit als gevolg van de implementatie van energiebesparende maatregelen, en dus ook niet op de bespaarde GWP en CED. Verschillende prijzen kunnen echter wel van invloed zijn op de financiële terugverdientijd, wat op zijn beurt van invloed kan zijn op scenario 3 (i.e., de selectie van producten met de laagste financiële terugverdientijd). Daarom is in paragraaf 5.4 een sensitiviteitsanalyse uitgevoerd voor de prijsschommelingen op de financiële terugverdientijd.

Om de berekende GWP en CED op te nemen in toekomstige energiebesparingsrapporten is een format ontworpen (zie Tabel 10, blz. 33). Dit format is een tabel waarin een overzicht van de GWP en CED afzonderlijk wordt gepresenteerd. Er worden symbolen gebruikt om de GWP en CED van de producten weer te geven, omdat dit het gemakkelijker maakt om verschillen tussen producten te onderscheiden dan met cijfers. De laagste GWP wordt weergegeven door vijf symbolen, terwijl de hoogste wordt aangegeven door een half symbool. De tussenliggende symbolen worden afgeleid door het verschil tussen de minimale en maximale GWP in tien bereiken te verdelen, waarbij elk bereik overeenkomt met een half extra symbool. Een soortgelijke aanpak wordt gebruikt voor de CED. Het doel van dit formaat is om zoveel mogelijk symbolen te verzamelen bij het streven naar de laagste GWP- en CED-impact.

### 3.4 Interviews en brainstormsessie

Voordat het GWP en de CED worden geïntegreerd in het energiebesparingsadvies, is onderzocht in hoeverre klanten en medewerkers van Antea Group zich bewust zijn van de milieu-impact van maatregelen en of zij bereid zijn deze informatie in overweging te nemen bij toekomstige keuzes. Hiervoor zijn interviews gehouden met vijf klanten: twee gemeenten, een overheidsorganisatie, een schoolgemeenschap en een buurthuis — allen eerder door Antea Group geadviseerd over energiebesparing.

In het eerste deel van de interviews is gevraagd welke criteria werden gehanteerd bij het selecteren van energiebesparingspakketten, maatregelen en producten, en hoe deze werden gerangschikt. In dit deel is bewust nog geen informatie gedeeld over de milieueffecten over de gehele levenscyclus. Deze informatie is pas in het tweede deel verstrekt, ondersteund door de berekende GWP- en CED-waarden van de betreffende producten. Vervolgens is aan de respondenten gevraagd om de impact van GWP en CED een plaats te geven in hun bestaande rangorde van selectiecriteria. Het criterium met de hoogste prioriteit kreeg vijf punten toegekend, het laagst gerangschikte criterium één punt; niet genoemde criteria kregen nul punten. De gemiddelde scores per criterium zijn opgenomen in paragraaf 5.7.1. Om inzicht te krijgen in de overwegingen van onze medewerkers bij het ontwikkelen van energiebesparende maatregelen is een enquête uitgevoerd. Hierin werden gevraagd naar de selectiecriteria die zij hanteren en hoe zij deze rangschikken. In een daaropvolgende brainstormsessie zijn de resultaten en reacties besproken met zes medewerkers. Het doel van de sessie was te onderzoeken in hoeverre de gedeelde bevindingen hun inzichten en aanpak bij het adviseren van maatregelen kunnen beïnvloeden.

## 4. Ketenpartners

Er zijn diverse partijen betrokken bij het adviseren en implementeren van energiebesparende maatregelen in de gebouwde omgeving. Binnen deze keten is het mogelijk om via ontwerpkeuzes, materiaalkeuzes en samenwerking met ketenpartners invloed uit te oefenen op de uiteindelijke uitstoot over de gehele levensduur. De volgende ketenpartners zijn geïdentificeerd door Antea Group:

**Tabel 5: Geïdentificeerde ketenpartners**

Ketenpartner	Beschrijving
Opdrachtgevers	De opdrachtgevers zijn gemeentes die eigenaar zijn van de gebouwen waar energiebesparende maatregelen moeten worden geïmplementeerd als de analyse aantoont dat de energie labels van hun gebouwen niet voldoen. De gemeentes zijn verantwoordelijk voor het nemen van investeringsbeslissingen op basis van het advies van Antea Group. Als gebruiker en beheerder zijn zij tevens verantwoordelijk voor het onderhoud van de gebouwen.
Adviseurs	Vanuit Antea Group zijn verschillende businesslijnen en adviesgroepen betrokken bij het adviseren omtrent energiebesparingsonderzoeken, c.q. energiebesparende maatregelen. De onderstaande adviesgroepen zijn daarbij het relevantst. De twee eerstgenoemde adviesgroepen beslaan tevens de vereiste om een ketenanalyse te schrijven over een van de twee meest materiële emissies en een van de zes meest materiële emissies uit de rangorde. <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bebouwde omgeving: Bouw inclusief specials (#1 MME-analyse)</li> <li>• Leefomgeving: Procedures &amp; Vergunningen (#6 MME-analyse)</li> <li>• Energie &amp; Ondergrond: Energietransitie &amp; Duurzaamheid</li> </ul>
Faciliterende partijen	Hieronder vallen de partijen die Antea Group in staat stellen om haar advies uit te brengen. Denk hierbij aan de partijen waar Antea Group de EPA-U software afneemt.
Leveranciers/fabrikanten	Dragen zorg voor het produceren van de benodigde materialen en installaties.
Distributeurs	Verzorgen de levering van deze materialen en installaties op locatie.
Aannemer/installateur	Voert de maatregelen uit.
Afvalverwerkers of recyclers	Nemen het materiaal aan het einde van de levensduur in behandeling.
Overheid	De overheid is als ketenpartner op verschillende terreinen betrokken. Zij stelt eisen aan gebouwen en biedt subsidieregelingen. Vanuit het klimaatakkoord van Parijs en het Nederlands energieakkoord wordt ingezet op emissiereductie. De (Rijks)overheid heeft als taak deze reductie te faciliteren. Daarnaast is de overheid als ketenpartner betrokken bij het verlenen van vergunningen voor gebouwen. In deze casus zijn de desbetreffende gemeentes eveneens opdrachtgever voor Antea Group.

## 5. LCA resultaten voor energiebesparende maatregelen

De resultaten van de LCA-studie worden in dit hoofdstuk gepresenteerd en geanalyseerd. In paragraaf 5.1 worden de meest geadviseerde maatregelen bepaald waarvan de conventionele en alternatieve producten voor deze maatregelen in paragraaf 5.2 worden geïdentificeerd. De resultaten van de LCA-studie die voor deze producten is uitgevoerd worden gepresenteerd en geanalyseerd in paragraaf 5.3. Als onderdeel van de LCA-studie is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd waarvan de resultaten zijn uitgewerkt in paragraaf 5.4. De bandbreedtes van het GWP en de CED die het resultaat zijn van de gevoeligheidsanalyse, evenals de financiële kosten per product, worden gebruikt als input voor de casestudies. Met deze input kunnen het GWP, de CED en de financiële kosten en terugverdientijden worden berekend per maatregelpakket van elk gebouw (zie paragraaf 5.5). In paragraaf 5.6 worden twee opties voorgesteld om deze GWP-, CED- en financiële resultaten op te nemen in toekomstige adviesrapporten. Tot slot worden de resultaten gedeeld met klanten en medewerkers van Antea Group. De uitkomsten van de interviews en de brainstormsessie zijn uitgewerkt in paragraaf 5.7.

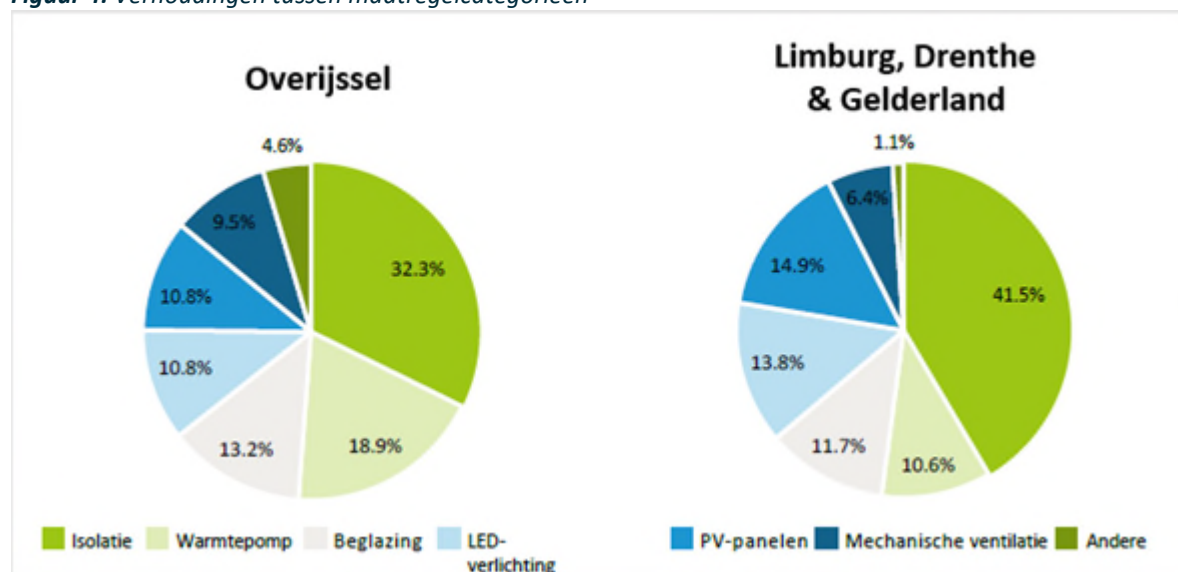
### 5.1 Meest geadviseerde maatregelen

Zoals beschreven in paragraaf 2.3, bestaat een energiebesparingsadvies uit twee typen maatregelen: overwogen maatregelen en geadviseerde maatregelen. Zodra een overwogen maatregel daadwerkelijk wordt opgenomen in een maatregelenpakket, wordt deze aangeduid als geadviseerde maatregel.

In totaal zijn er binnen de vier onderzochte projecten 116 maatregelen overwogen. Hiervan zijn 96 maatregelen daadwerkelijk geadviseerd verdeeld over 162 maatregelpakketten. Dit resulteert in een totaal van 550 geadviseerde maatregelen, verspreid over 72 gebouwen. De 96 unieke geadviseerde maatregelen zijn onderverdeeld in 11 categorieën, zoals toegelicht in Bijlage A. De categorie 'isolatie' omvat bijvoorbeeld gevel-, spouw-, dak- en vloerisolatie.

In Figuur 4 zijn de verhoudingen tussen deze maatregelcategorieën weergegeven voor de projecten in de provincies Overijssel, Limburg, Drenthe en Gelderland. De zes meest voorkomende categorieën worden afzonderlijk getoond, terwijl de overige zeven zijn samengevoegd onder de noemer 'Overige'. Deze restcategorie maakt slechts 4,6% uit in Overijssel en 1,1% in de overige provincies, wat laat zien dat het overgrote deel van de maatregelen tot de zes hoofdgroepen behoort.

**Figuur 4:** Verhoudingen tussen maatregelcategorieën



In alle provincies blijkt isolatie de meest geadviseerde maatregel, terwijl mechanische ventilatie consequent op de zesde plaats eindigt. De tussenliggende categorieën laten vergelijkbare percentages zien. Dit duidt erop dat het project uitgevoerd in een Overijsselse gemeente goed bruikbaar is voor dit onderzoek, ondanks het gebruik van een oudere softwareversie met afwijkende bepalingen. Voor de zes meest geadviseerde

maatregelcategorieën is in de volgende paragraaf onderzocht welke conventionele en alternatieve producten in de praktijk worden toegepast.

## 5.2 Conventionele en alternatieve producten

Zoals toegelicht in paragraaf 3.4 van de Methodologie zijn er tien interviews afgenomen om te achterhalen welke producten in de praktijk gangbaar zijn (conventioneel) en welke alternatieve opties in opkomst zijn. In deze paragraaf worden de antwoorden per maatregelcategorie geanalyseerd. De paragraaf sluit af met een overzicht van de producten die in het vervolg van het onderzoek zijn meegenomen.

### 5.2.1 Thermische isolatie

Thermische isolatiematerialen worden doorgaans onderverdeeld in drie groepen (Füchsl et al., 2022; Dovjak et al., 2017; Schulte et al., 2021):

- Anorganische materialen, zoals steenwol, glaswol en schuimglas
- Organische, niet-hernieuwbare materialen, zoals EPS, XPS, PUR en PIR
- Organische, hernieuwbare materialen, zoals hennep, cellulose, houtvezel, kurk, vlas, stobalen en miscanthus

In de praktijk worden verschillende materialen gebruikt afhankelijk van de toepassing (gevel, dak, vloer). Drie van de vier respondenten noemden glaswol en steenwol als gebruikelijke gevelisolatie. Voor dakisolatie werd voornamelijk PUR genoemd (drie keer), en ook PIR (twee keer). Voor vloerisolatie noemden twee respondenten EPS-parels en PUR-schuim. Deze materialen worden ook veel gebruikt in eerdere LCA-studies en zijn daarom als conventioneel geselecteerd (Füchsl et al., 2022; Dovjak et al., 2017).

Wat betreft alternatieve isolatiematerialen, konden respondenten minder goed specifieke materialen per toepassing benoemen. Er is daarom gekozen voor een algemene benadering. Uit de literatuur blijken cellulose, hennepvezel, houtvezel en miscanthus milieuvriendelijk (Füchsl et al., 2022; Schulte et al., 2021). In de interviews werden hennepvezel (vier keer) en houtvezel (twee keer) genoemd. Cellulose werd één keer genoemd en miscanthus niet. Daarom zijn alleen hennepvezel en houtvezel meegenomen. Ook Thermofoam is geselecteerd; dit is een PUR-schuim op waterbasis dat werd toegepast in het Overijsselse project (ThermoFoam, z.d.).

### 5.2.2 Warmtepompen

Warmtepompen verplaatsen warmte door een koelmiddel dat warmte opneemt bij verdamping (meestal uit buitenlucht, grondwater of oppervlaktewater) en deze afgeeft bij condensatie (bijvoorbeeld aan binnenlucht of tapwater).

Drie respondenten noemden lucht-lucht, lucht-water, water-water en VRF-systemen als veelgebruikte systemen. Omdat in het project uit 2018 lucht-lucht en lucht-water warmtepompen zijn toegepast zijn deze als conventionele opties geselecteerd.

Als alternatief werden andere koudemiddelen genoemd: propaan (R-290) en CO<sub>2</sub> (R-744). Deze hebben een lagere klimaatimpact dan gangbare koudemiddelen (zoals R-410A), maar vragen vanwege hoge druk (CO<sub>2</sub>) of explosiegevaar (propaan) om aangepaste, vaak complexere installaties. Downsizing van de warmtepomp werd ook genoemd, maar dat is te situatieafhankelijk om te verwerken in een LCA. Daarom zijn alleen de koudemiddelen meegenomen als alternatief.

### 5.2.3 Beglazing

Voor beglazing noemden respondenten voornamelijk HR++ glas en driedubbel glas als conventioneel. Alternatieven werden moeilijk te benoemen. Eén respondent noemde alternatieve gasvullingen (zoals krypton of xenon in plaats van argon), maar aangezien argon al de laagste milieu-impact heeft (Asif, 2019), zijn die opties niet meegenomen. Wel werden vacuümglas en gerecycled glas genoemd. Aangezien dit onderzoek zich

richt op grondstoffen, is gerecycled glas buiten beschouwing gelaten. Vacuümglas is wel meegenomen als duurzaam alternatief.

#### 5.2.4 PV-panelen

Zonnepanelen worden doorgaans ingedeeld in vier generaties. De eerste generatie bestaat uit mono- en polykristallijne siliciumcellen die door hun relatief dikke lagen een hoog rendement behalen. De tweede generatie maakt gebruik van een dunnere laag actief materiaal wat de investeringskosten verlaagt. De derde generatie zoekt een evenwicht tussen efficiëntie en kosten door gebruik te maken van modernere chemische verbindingen. De vierde generatie richt zich op het toepassen van Nano-materialen op basis van organische stoffen (Pastuszak en Węgierek, 2022).

Alle respondenten noemden mono- en polykristallijne panelen als conventionele producten. Twee respondenten noemden dunnefilmpanelen als alternatief voor PV-panelen, zoals zonnepanelen van koper-indium-gallium-selenide (CIGS), cadmiumtelluride (CdTe) en amorf silicium (a-Si) zonnepanelen. Beide respondenten vermelden dat deze types een lager rendement hebben. Daarom verwachten ze dat er meer panelen nodig zijn om dezelfde hoeveelheid energie op te wekken als conventionele PV-panelen. Ze vermelden echter ook dat de impact per dunnefilmpaneel lager zou zijn dan die van een conventioneel PV-paneel. Dit komt overeen met de resultaten van Reshedhi en Khanam (2020), die monokristallijn silicium (mono-Si), multikristallijn silicium (multi-Si), a-Si en CdTe hebben vergeleken. Dunnefilmpanelen zullen worden beschouwd als alternatieven voor PV-panelen.

#### 5.2.5 Verlichtingssysteem

Alle respondenten noemden LED-verlichting als standaardproduct. Antea Group adviseert ook uitsluitend LED. Onderzoek toont aan dat LED-lampen een lagere milieubelasting hebben dan bijvoorbeeld spaarlampen, mits ze een levensduur van meer dan 15.000 uur hebben (Bertin et al., 2019; Souza et al., 2019). Er is geen volwaardig alternatief voor LED geïdentificeerd. Wel noemden respondenten aanwezigheidsdetectie en daglichtsensoren als manieren om het systeem efficiënter te maken. Deze uitbreidingen zijn daarom als alternatieven opgenomen.

#### 5.2.6 Mechanische ventilatie

Alle drie respondenten die geïnterviewd zijn over dit onderwerp noemden mechanische ventilatie met warmteterugwinning als standaard. Hiervoor worden doorgaans kruisstroomwisselaars of warmtewielen gebruikt. Twin-coil systemen worden zelden toegepast in utiliteitsbouw.

Een genoemd alternatief voor mechanische ventilatie betreft het gebruik van grotere luchtkanalen. Deze optie is echter sterk afhankelijk van de fysieke mogelijkheden van het gebouw en daarom niet overal toepasbaar. Een breder toepasbare oplossing is vraaggestuurde ventilatie die door alle drie de respondenten werd genoemd. Uit onderzoek van Esfehani et al. (2019) blijkt dat CO<sub>2</sub>-gestuurde ventilatie het jaarlijkse energieverbruik van een sportcentrum met maar liefst 40% kan verlagen. Daarnaast toont Pang et al. (2020) aan dat aanwezigheidsdetectie het energieverbruik van ventilatiesystemen in kantoorgebouwen met 19% tot 44% kan reduceren. Op basis hiervan zijn CO<sub>2</sub>-detectie en aanwezigheidsherkenning geselecteerd als relevante alternatieven voor conventionele mechanische ventilatie.

**Tabel 6: Overzicht van geselecteerde producten per maatregelcategorie**

Maatregel	Conventionele producten	Alternatieve producten
<b>Thermische isolatie</b>	Glaswol Steenwol PUR (schuim) PIR EPS	Hennepvezel Houtvezel Thermofoam (milieuvriendelijk PUR-schuim op waterbasis)
<b>Warmtepompen</b>	Lucht-lucht Lucht-water	Propana als koudemiddel CO <sub>2</sub> als koudemiddel
<b>Beglazing</b>	HR++ glas Driedubbel glas	Vacuümglas
<b>PV-panelen</b>	Monokristallijn Polykristallijn	CIGS, CdTe, a-Si
<b>Verlichtingssysteem</b>	LED	Aanwezigheidsdetectie Daglichtdetectie
<b>Mechanische ventilatie</b>	Warmteterugwinning	CO <sub>2</sub> -detectie Aanwezigheidsdetectie

### 5.3 Levenscyclusanalyse van GWP en CED per product

Voor elk product dat is opgenomen in Tabel 6 zijn de broeikasgasemissies (*Global Warming Potential*, GWP) en het cumulatieve energieverbruik (*Cumulative Energy Demand*, CED) berekend op basis van een levenscyclusanalyse (LCA). Deze berekeningen zijn uitgevoerd met behulp van *Environmental Product Declarations* (EPD's) die voldoen aan de norm EN 15804:2012+A2:2019 en de bijbehorende sectorspecifieke PCR's. De resultaten geven de GWP- en CED-waarden per product weer, gerekend over een functionele units (FU) en een referentielevensduur (*Reference Service Life*, RSL) van 50 jaar. De onderliggende methode is verder toegelicht in paragraaf 3.3. De resultaten voor isolatie en beglazing zijn gevisualiseerd in Figuur 5, en de resultaten voor warmtepompen, zonnepanelen, verlichting en ventilatie in Figuur 6. In beide figuren staat links de GWP en rechts de CED.

Uit de resultaten blijkt dat bij bouwmaterialen vooral de productiefase (fase A) de grootste bijdrage levert aan de totale energiebelasting (CED). Bij installaties is dat juist de gebruiksfase (fase B), vanwege het continue elektriciteitsverbruik tijdens gebruik. Bouwproducten daarentegen verbruiken tijdens hun gebruiksfase nauwelijks energie waardoor hun impact geconcentreerd is bij de productiefase. Aangezien energieverbruik doorgaans gepaard gaat met CO<sub>2</sub>-uitstoot, ligt het voor de hand dat een hoge CED in een bepaalde fase ook leidt tot een hoge GWP in diezelfde fase. Bij bouwmaterialen wordt dit verband duidelijk zichtbaar: de productiefase is zowel bepalend voor CED als voor GWP (zie Figuur 5). Bij installaties is het beeld genuanceerder: bij LED-verlichting is de gebruiksfase dominant voor beide indicatoren, maar bij andere installaties is de impact verdeeld over de productie- en gebruiksfase (zie Figuur 6).

Over het geheel genomen vertonen de GWP- en CED-waarden vergelijkbare trends. Dit wijst op een zekere correlatie: het GWP vormt een percentage van de totale CED. Tabel 7 geeft de minimale, maximale en gemiddelde waarden van dit percentage weer. De hoogste waarde (89%) werd vastgesteld bij PIF-isolatie. Als deze uitschieter buiten beschouwing wordt gelaten, komt het gemiddelde uit op 7% voor alle producten, en 4% voor installaties.

**Tabel 7: Percentages van GWP als onderdeel van de CED voor bouw- en installatieproducten**

Type product	Min	Max	Gemiddelde
Bouwproducten	-1%	89%	14%
Installatieproducten	0%	4%	2%
Alle producten	-1%	89%	7%

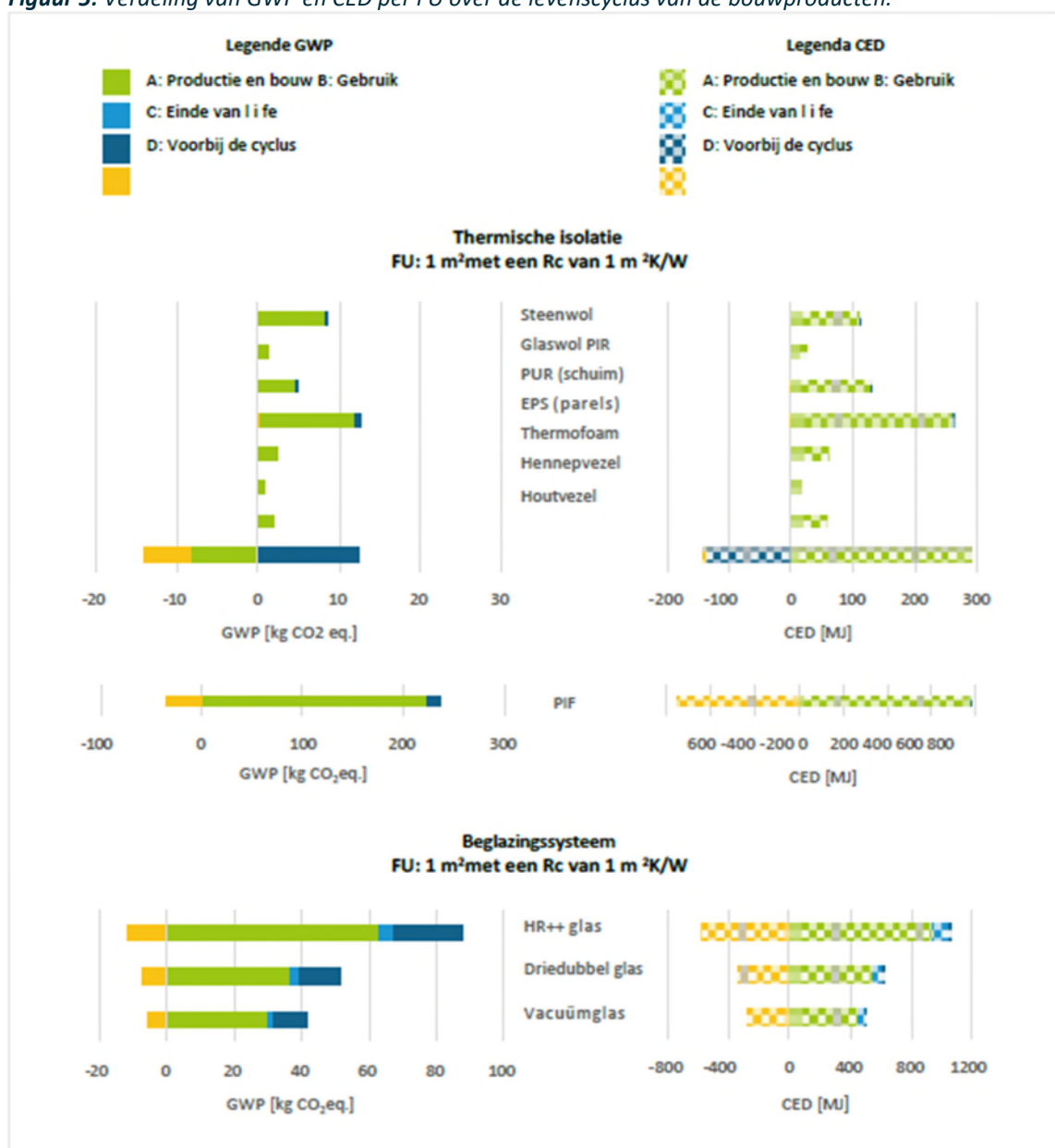
Een opvallende uitzondering vormt houtvezelisolatie. In de *end-of-life*-fase (fase C) vertoont dit product een negatieve CED, omdat het verbrand wordt voor energieretrieving. Die energie wordt als een positieve bijdrage meegeteld in de volgende levenscyclus wat resulteert in een negatieve energievraag. Tegelijkertijd veroorzaakt de verbranding wel CO<sub>2</sub>-uitstoot, wat het GWP in die fase verhoogt. Daar staat tegenover dat de productie van houtvezel gepaard gaat met CO<sub>2</sub>-opname tijdens de groei van bomen wat resulteert in een negatief GWP-effect in fase A.

Verder blijkt uit de resultaten dat fase D (de zogenaamde '*end-of-life*'-fase) een significante rol speelt bij materialen met een hoog recyclingpotentieel, zoals:

- Aluminiumfolie in PIF
- Glas in beglazing
- Metalen in warmtepompen en ventilatiesystemen

Bij deze producten compenseert fase D deels de impact van fase A, omdat gerecycled materiaal grondstoffen en energiegebruik in toekomstige levenscycli helpt vermijden.

**Figuur 5:** Verdeling van GWP en CED per FU over de levenscyclus van de bouwproducten.



Figuur 6: Verdeling van GWP en CED per FU over de levenscyclus van de bouwproducten.



## 5.4 Sensitiviteitsanalyse van de levenscyclus gebaseerde CED- en GWP-waarden

Er zijn twee soorten gevoeligheidsanalyses uitgevoerd op de resultaten zoals gepresenteerd in het vorige hoofdstuk. De ene werd uitgevoerd voor bouw gerelateerde producten en de andere voor installaties. De resultaten van de gevoeligheidsanalyse zijn bereiken van de CED en GWP per product die in de rest van de studie worden gebruikt.

Het isolerend vermogen van een materiaal hangt af van de warmtegeleidingscoëfficiënt of zogenaamde  $\lambda$ -waarde. Hoe lager deze coëfficiënt, hoe minder warmte een materiaal kan overdragen, wat leidt tot een beter isolerend vermogen. Wanneer de dikte van het materiaal in aanmerking wordt genomen, kan de warmteweerstandcoëfficiënt of Rc-waarde worden berekend. Hoe dikker het materiaal, hoe hoger de Rc-waarde. Dit maakt het mogelijk om een hoge Rc-waarde te bereiken, ook al heeft het materiaal een hoge warmtegeleidingscoëfficiënt. In de LCA-berekeningen bevat de FU voor isolatie en glas een Rc-waarde van 1 m<sup>2</sup>K/W. Aangezien de warmtegeleidingscoëfficiënt van materialen varieert, kan de dikte van het materiaal om een Rc-waarde van 1 m<sup>2</sup>K/W te bereiken ook variëren. Daarom kunnen de GWP- en CED-effecten veranderen wanneer verschillende warmtegeleidingscoëfficiënten voor dezelfde materialen worden toegepast.

Om de impact van de variatie in warmtegeleidingscoëfficiënten te achterhalen, is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd. Net als de warmtegeleidingscoëfficiënt geeft de U-waarde de snelheid van warmteoverdracht door glas weer. Hoe hoger deze waarde, hoe lager het isolerend vermogen. Daarom is er een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd op beglazing om het effect van verschillende U-waarden te bepalen.

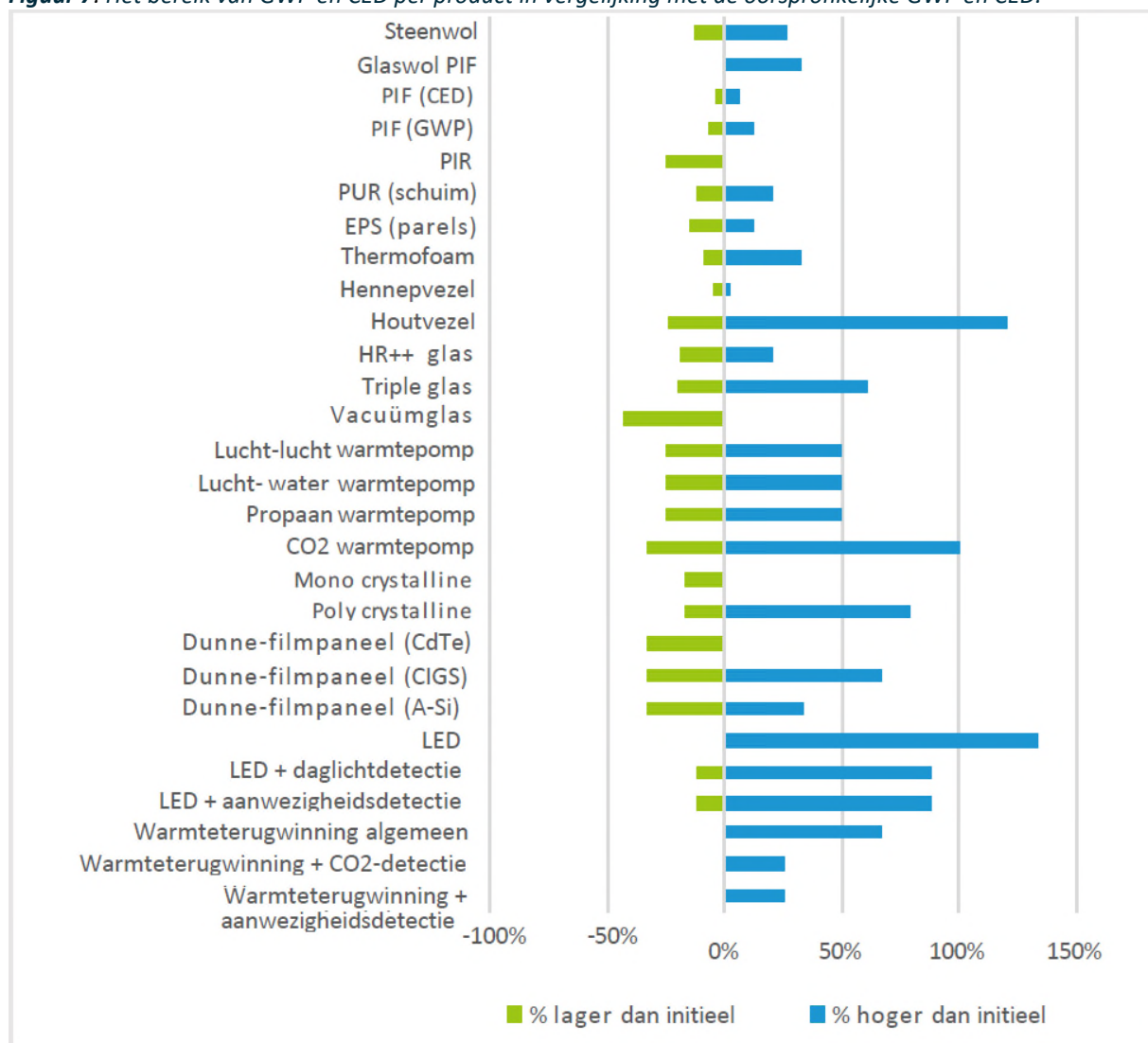
De levenscyclus van een product is een belangrijke factor die het resulterende GWP en CED beïnvloedt. In deze studie wordt uitgegaan van een RSL van 50 jaar. Als de levenscyclus van het product korter is dan aanvankelijk aangenomen, zijn er meer levenscycli nodig om aan de RSL van 50 jaar te voldoen, wat resulteert in een hogere impact dan aanvankelijk berekend. Omgekeerd, als de levenscyclus van het product langer is dan aanvankelijk werd aangenomen, zijn er minder levenscycli nodig om aan de RSL van 50 jaar te voldoen. In dat geval zou de impact lager zijn dan aanvankelijk bepaald.

Aangezien de bouwproducten een levenscyclus van 50 jaar hebben, wordt aangenomen dat een iets langere of kortere levenscyclus geen significante invloed zou hebben op het resulterende GWP en CED. De impact van verschillende warmtegeleidingscoëfficiënten en U-waarden, zoals hierboven besproken, zal naar verwachting groter zijn. Daarom is alleen voor de installaties een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd die zich richt op de levenscyclus van het product en het effect daarvan op het resulterende GWP en de CED.

De input van de gevoeligheidsanalyse wordt gebruikt om de minimale en maximale GWP- en CED-impact te berekenen. Deze extreme waarden zijn vergeleken met het initiële GWP en CED. Het verschil tussen de minimale en initiële impact is berekend, evenals het verschil tussen de maximale en initiële impact. Beide waarden worden in Figuur 16 weergegeven als percentages van de initiële waarde. Deze percentages zijn hetzelfde voor het GWP en de CED voor alle producten, behalve voor PIF-isolatie. Dit komt omdat PIF een isolatielaag en een dunne laag aluminium bevat. Verschillende warmtegeleidingscoëfficiënten zijn geanalyseerd voor de isolatielaag, maar de coëfficiënt voor de aluminiumlaag bleef hetzelfde. Daardoor worden de initiële GWP en CED van beide lagen PIF mogelijk niet door dezelfde factor beïnvloed, zoals het geval is voor de andere producten. Daarom worden de CED en GWP van PIF afzonderlijk weergegeven in Figuur 7.

De initiële impact is betrouwbaarder als het minimum- en maximumpercentage dicht bij elkaar liggen, zoals het geval is bij hennepvezel. Dit geeft aan dat het GWP en de CED het minst betrouwbaar zijn voor houtvezel, warmtepompen met CO<sub>2</sub> als koudemiddel en LED-verlichting.

**Figuur 7:** Het bereik van GWP en CED per product in vergelijking met de oorspronkelijke GWP en CED.



## 5.5 Op levenscyclus gebaseerde GWP en CED, financiële kosten en terugverdiertijden van maatregelpakketten

De GWP- en CED-bereiken uit paragraaf 5.4 dienen als input voor de LCA-studies voor elk gebouw. Daarnaast worden de financiële kosten per product gebruikt om de financiële kosten per gebouw te berekenen. Conform de methode in hoofdstuk 3, worden eerst de GWP en CED-waarden en de financiële kosten en terugverdiertijden berekend voor elk afzonderlijk product binnen een maatregel. Deze resultaten worden uitgewerkt in paragraaf 5.5.1. Deze resultaten vormen de basis voor de analyse van de maatregelpakketten in 5.5.2 en 5.5.3.

### 5.5.1 GWP, CED en financiële terugverdiertijden per product

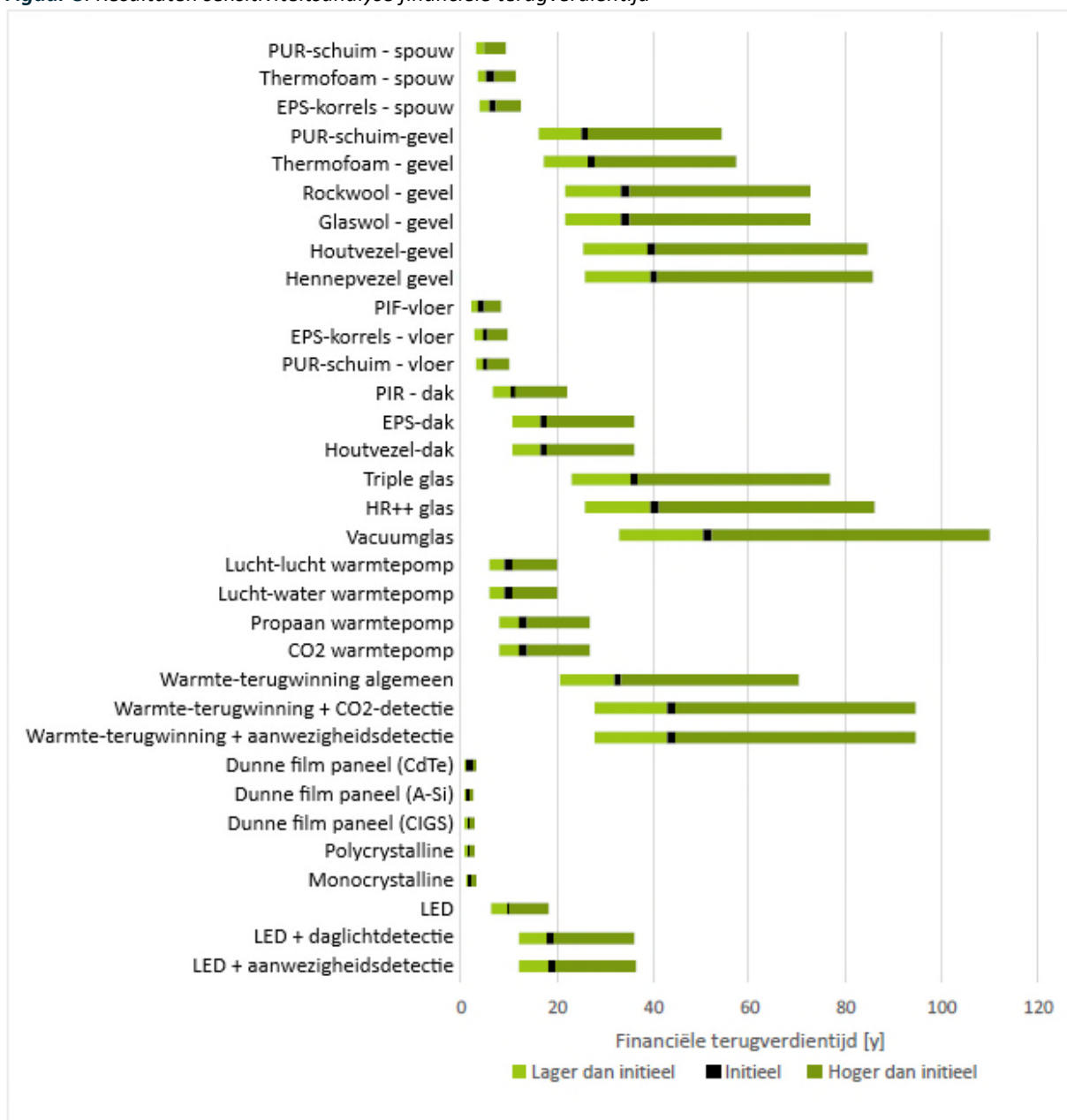
Op basis van de resultaten van GWP, CED en financiële kosten per product zijn de terugverdiertijden berekend met behulp van de formules uit paragraaf 3.3. Tabel 8 toont de gemiddelde terugverdiertijden per product, waarbij donkerdere kleuren de kortste terugverdiertijd aanduiden. Hieruit blijkt dat LED-verlichting en PIF-isolatie langere terugverdiertijden hebben dan de resterende levensduur van 50 jaar. Andere maatregelen blijven binnen deze termijn. In de meeste gevallen geldt: hoe lager de CED-terugverdiertijd, hoe lager ook de GWP-terugverdiertijd, met uitzondering van houtvezelisolatie en PIF-isolatie.

**Tabel 8:** Gemiddelde GWP- en CED-terugverdiertijden voor de respectievelijke producten per maatregel

Maatregel	Product	Gemiddelde terugverdiertijd GWP (jaar)	Gemiddelde terugverdiertijd CED (jaar)
Isolatie spouw	Thermofoam	0.3	0.3
	EPS parels	0.9	1.3
	PUR-schuim	4.8	5.9
Isolatie gevel	Houtvezel	-4.0	21.3
	Thermofoam	1.3	1.6
	Glaswol	2.5	2.7
	Hennepvezel	3.4	6.2
	Steenwol	16.4	12.8
	PUR-schuim	23.7	29.5
Isolatie vloer	EPS parels	2.6	3.7
	PUR-schuim	13.2	16.4
	PIF	209.5	14.0
Isolatie dak	Houtvezel	-1.6	9.7
	EPS	1.9	3.1
	PIR	3.3	5.9
Beglazing	Vacuümglas	13.0	4.6
	HR++ glas	15.2	5.4
	Driedubbel glas	17.3	6.1
Warmtepomp	lucht-lucht warmtepomp	0.3	4.2
	lucht-water warmtepomp	0.3	4.2
	Koelmiddel: Propaan	0.3	4.0
	Koelmiddel: CO2	0.5	6.3
Ventilatiesysteem	Warmteterugwinning+ aanwezigheid detectie	0.2	1.2
	Warmteterugwinning+ CO2-detectie	0.2	1.3
	Warmteterugwinning algemeen	0.2	1.9
Zonnepanelen	Dunne-filmpaneel (CdTe)	1.3	2.7
	Dunne-film paneel (CIGS)	1.9	5.6
	Dunne-film paneel (A-Si)	3.3	7.3
	Polykristallijn	3.9	8.5
	Monokristallijn	4.0	9.8
Verlichting	LED+ daglichtdetectie	109.2	196.8
	LED+ aanwezigheidsdetectie	137.4	248.6
	LED	225.2	408.7

Aangezien energieprijzen aanzienlijk zijn gestegen is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd om het effect hiervan op de terugverdientijd te beoordelen binnen de looptijd van de respectievelijke projecten. De resultaten in Figuur 8 tonen aan dat de maximale terugverdientijd sterk toeneemt bij lagere besparingen, terwijl een stijging van energiekosten de terugverdientijd verkort. De keuze voor het voordeligste product binnen elke maatregel verandert hierdoor echter niet.

**Figuur 8:** Resultaten sensitiviteitsanalyse financiële terugverdientijd



## 5.5.2 GWP, CED en financiële kosten per maatregelpakket

Om de effecten en terugverdientijd per maatregelpakket te bepalen, wordt per maatregel één product geselecteerd op basis van drie scenario's, zoals gedefinieerd in methodologie in hoofdstuk 3:

- Scenario 1: product met de laagste GWP-terugverdientijd
- Scenario 2: product met de laagste CED-terugverdientijd
- Scenario 3: product met de laagste financiële terugverdientijd

De analyse toont aan dat voor elk project dezelfde producten zijn geselecteerd binnen elk scenario en maatregeltipe. Deze zijn samengevat in Tabel 12. Voor PV-panelen blijkt het CdTe-dunnefilmpaneel in alle zes projecten het gunstigst op alle drie de criteria, mits opgenomen in het maatregelpakket. Bij gevel- en dakisolatie verschilt het optimale product per scenario. Standaardproducten bij warmtepompen, verlichting en ventilatie hebben doorgaans de laagste financiële terugverdientijd, terwijl varianten met alternatieve koelmiddelen of sensoren beter presteren op GWP en CED.

**Tabel 9:** Respectievelijke producten voor maatregelenpakketten verdeeld per scenario

Maatregel	Scenario 1: Min. GWP terugverdientijd	Scenario 2: Min. CED terugverdientijd	Scenario 3: Min. financiële terugverdientijd
<b>Isolatie spouw</b>	Thermofoam	Thermofoam	PUR-schuim
<b>Isolatie gevel</b>	Houtvezel	Thermofoam	PUR-schuim
<b>Isolatie vloer</b>	EPS parels	EPS parels	PIF
<b>Isolatie dak</b>	Houtvezel	EPS	PIR
<b>Beglazing</b>	HR++ glas	HR++ glas	Driedubbel glas
<b>Warmtepomp</b>	Koelmiddel: Propaan	Koelmiddel: Propaan	lucht-lucht warmtepomp
<b>PV-panelen</b>	Dunne-filmpaneel (CdTe)	Dunne-filmpaneel (CdTe)	Dunne-filmpaneel (CdTe)
<b>Verlichting</b>	LED + daglichtdetectie	LED + daglichtdetectie	LED
<b>Ventilatiesysteem</b>	Warmteterugwinning + aanwezigheidsdetectie	Warmteterugwinning + aanwezigheidsdetectie	Warmteterugwinning algemeen

Figuren 10 en 11 tonen de GWP-, CED- en kosteneffecten per scenario bij het bereiken van respectievelijk energielabel A of energieneutraal. Gebouwen met een slechter initieel label (zoals E) kennen hogere milieueffecten en kosten, doordat meer maatregelen nodig zijn. Gebouwen met label C bereiken hun doel met minder maatregelen en dus lagere impact.

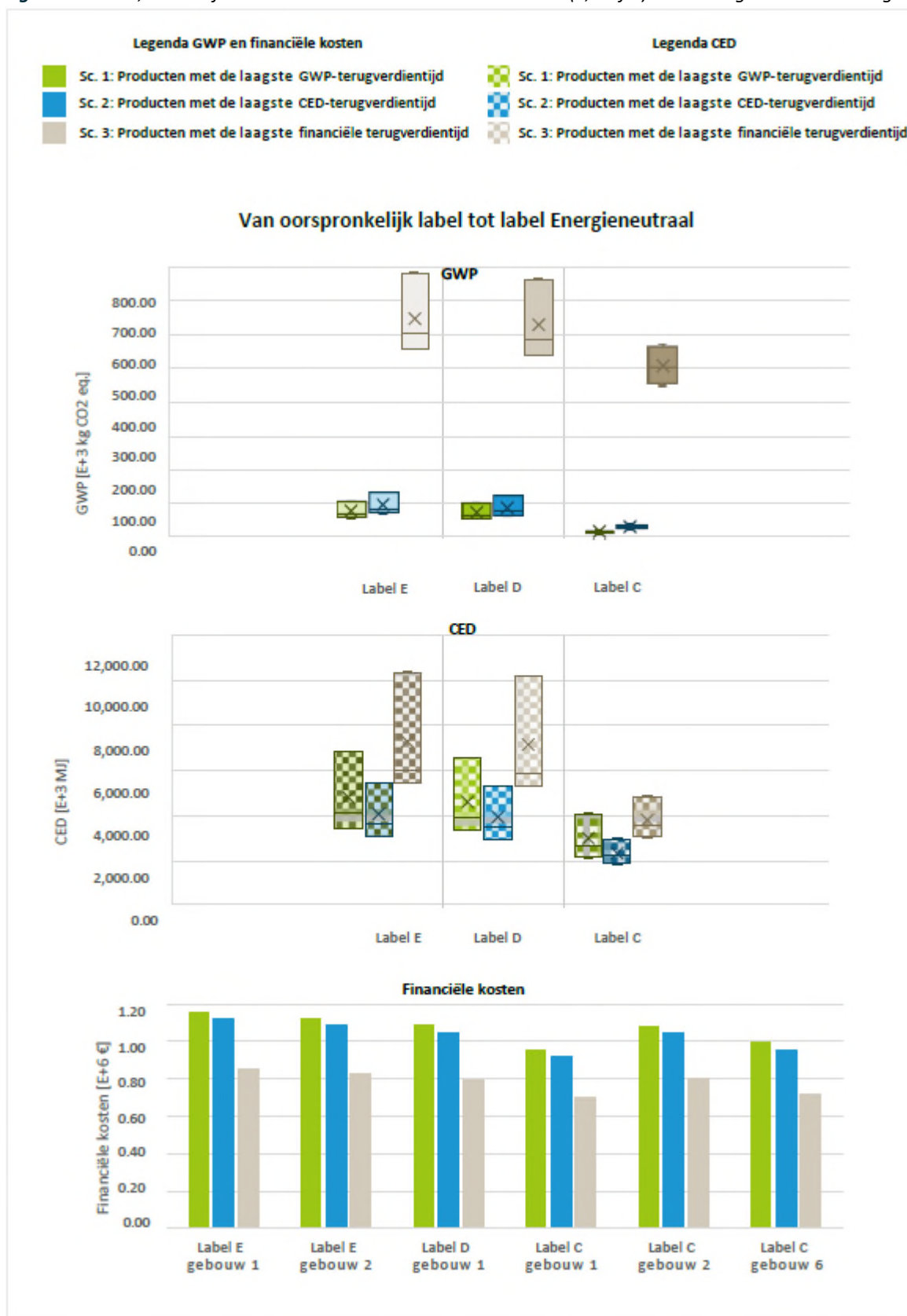
Scenario 3 leidt doorgaans tot hogere GWP- en CED-waarden, met name door het gebruik van PIF-isolatie. Dit materiaal wordt vaak gekozen vanwege lage kosten, maar veroorzaakt relatief veel uitstoot. Bij label C, waar enkel dakisolatie nodig is, wordt PIR gebruikt als goedkoper én duurzamer alternatief.

De financiële kosten zijn binnen scenario's grotendeels gelijk voor gebouwen met hetzelfde startlabel, tenzij extra maatregelen nodig zijn. Zo kent gebouw 5 hogere kosten door aanvullende beglazing en ventilatiesystemen ten opzichte van gebouwen 4 en 6 met hetzelfde initiële label.

**Figuur 9: GWP, CED en financiële kosten om van het initiële label (E, D of C) naar label A te gaan**



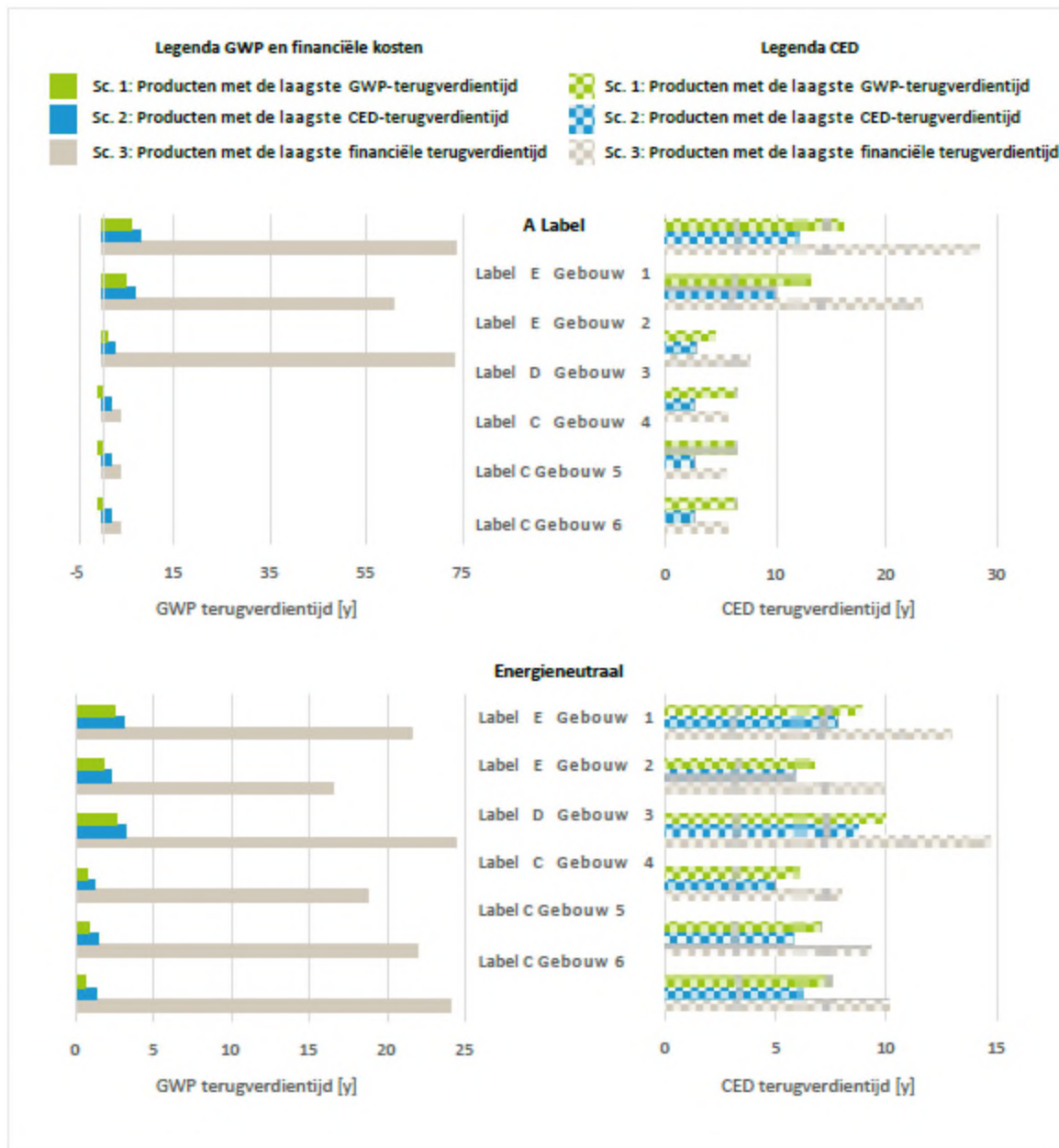
**Figuur 10: GWP, CED en financiële kosten om van het initiële label (E,D of C) naar Energieneutraliteit te gaan**



### 5.5.3 GWP, CED en financiële terugverdiertijden per maatregelpakket

De terugverdiertijden van de maatregelpakketten per gebouw zijn berekend op basis van de resultaten uit Figuren 9 en 10. Figuur 11 toont de GWP- en CED-terugverdiertijden, terwijl Figuur 12 de financiële terugverdiertijden weergeeft.

**Figuur 11:** GWP, CED en financiële kosten om van het initiële label (E,D of C) naar Energieneutraliteit te gaan



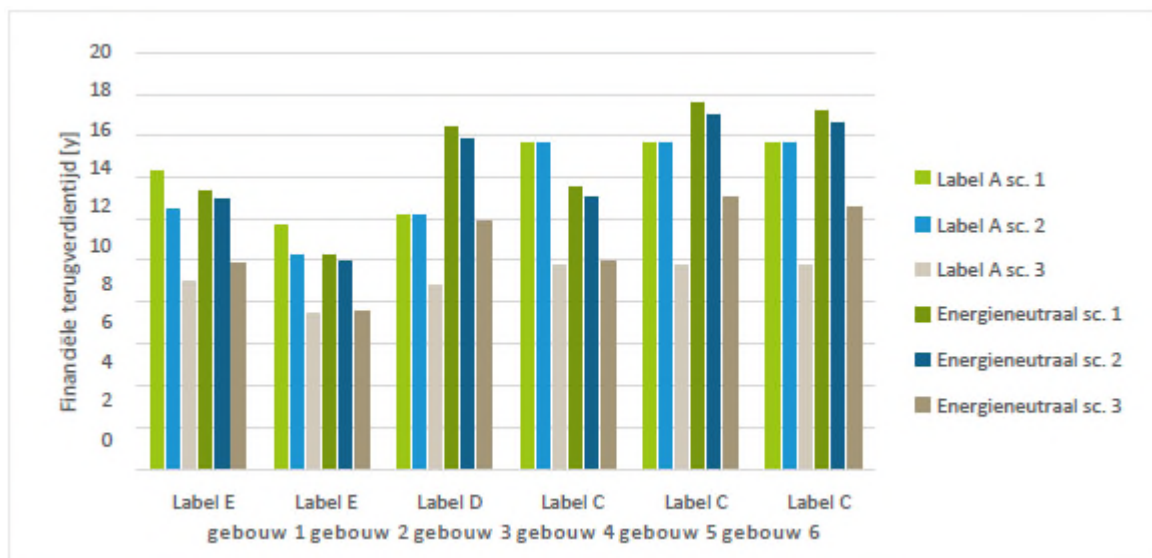
Op basis van Figuur 11 is zichtbaar dat het selecteren van de producten met de laagste financiële terugverdiertijd (scenario 3) in alle gevallen leidt tot de hoogste GWP- en CED-terugverdiertijden. Dit wordt grotendeels veroorzaakt door de toepassing van PIF-isolatie als vloerisolatie. PIF heeft weliswaar lage kosten, maar een relatief hoge milieu-impact.

Voor gebouwen 1 en 2 is ook de keuze voor conventionele LED-verlichting in scenario 3 van invloed op de langere CED-terugverdiertijd. Verlichting met daglicht- of aanwezigheidsdetectie scoort op milieugebied beter, maar wordt in scenario 3 niet geselecteerd vanwege de hogere kosten. De bijdrage van LED-verlichting aan de totale CED-terugverdiertijd is echter beperkter dan die van PIF-isolatie aan de GWP-terugverdiertijd.

Toch blijven vrijwel alle terugverdientijden binnen de resterende levensduur van 50 jaar, behalve de GWP-terugverdientijd in scenario 3. Figuur 12 toont dat scenario 1 (gebaseerd op minimale GWP) doorgaans de hoogste financiële terugverdientijd oplevert. Voor gebouwen 3, 5 en 6 is bovendien de terugverdientijd voor energieneutraal langer dan voor label A. Bij gebouwen 1, 2 en 4 is dit omgekeerd.

Volgens de methodologie (hoofdstuk 3) hangt de financiële terugverdientijd af van de verhouding tussen investeringskosten en jaarlijkse besparing. De hogere investeringskosten voor energieneutraal verklaren deels de langere terugverdientijden. Specifieke verschillen tussen gebouwen zijn echter lastig te herleiden vanwege uiteenlopende combinaties van maatregelen en hoeveelheden.

**Figuur 12:** Financiële terugverdientijden meten pakketten (Label A en Energieneutraal) voor de zes gebouwen



## 5.6 Integratie van GWP en CED in het energiebesparingsadvies

In de vorige paragraaf zijn de GWP-, CED- en financiële terugverdientijden per product en maatregelenpakket berekend. Tijdens interviews met vijf klanten werd onderzocht hoe deze informatie op een duidelijke en bruikbare manier in het energiebesparingsadvies kan worden opgenomen. Hieruit kwamen twee voorkeuren naar voren.

De eerste optie is om de GWP- en CED-terugverdientijden toe te voegen aan de bestaande beslissingstabel in het adviesrapport, waarin de financiële terugverdientijd reeds is opgenomen. Vier van de vijf klanten gaven aan deze tabel actief te gebruiken, wat suggereert dat een uitbreiding met milieu-informatie goed zou aansluiten bij hun huidige werkwijze.

De tweede optie is het opnemen van een aparte bijlage waarin de milieueffecten per product visueel worden weergegeven met symbolen in plaats van getallen. Twee respondenten gaven aan dat symbolen het vergelijken van producten eenvoudiger maken. Tabel 10 toont hiervan een voorbeeld voor isolatiematerialen. Elk 'blad'-symbool staat voor een lagere GWP- of CED-impact; hoe meer symbolen, hoe duurzamer het product. Voor financiële kosten wordt het omgekeerde toegepast met 'munt'-symbolen: hoe minder symbolen, hoe lager de kosten.

Tabel 10: Visualisatie GWP, CED en de financiële kosten van isolatiematerialen middels symbolen

Maatregel	Product	GWP*	CED*	Financiële kosten**
Isolatie spouw	PUR-schuim	🍃🍃	💰	💰💰💰
	Thermofoam	🍃🍃🍃🍃🍃	💰💰💰💰💰	💰💰💰💰💰
	EPS parels	🍃🍃🍃🍃🍃	💰💰💰💰💰	💰💰💰💰💰
Isolatie gevel	Steenwol	🍃🍃🍃	💰💰💰💰	💰💰💰💰💰💰
	Glaswol	🍃🍃🍃🍃🍃	💰💰💰💰💰	💰💰💰💰💰💰
	PUR-schuim	🍃🍃	💰	💰💰💰
	Thermofoam	🍃🍃🍃🍃🍃	💰💰💰💰💰	💰💰💰💰💰
	Hennepvezel	🍃🍃🍃🍃🍃	💰💰💰💰💰	💰💰💰💰💰💰
	Houtvezel	🍃🍃🍃🍃🍃	💰💰	💰💰💰💰💰💰
	Isolatie vloer	PIF	🍃	💰
PUR-schuim		🍃🍃	💰	💰
EPS parels		🍃🍃🍃🍃🍃	💰💰💰💰💰	💰
Isolatie dak	PIR	🍃🍃🍃🍃	💰💰💰	💰💰💰
	EPS	🍃🍃🍃🍃🍃	💰💰💰💰💰	💰💰💰💰💰
	Houtvezel	🍃🍃🍃🍃🍃	💰💰	💰💰💰💰💰💰

\*Hoe meer bladsymbolen, hoe lager de GWP- en CED-impact

\*\*Hoe meer muntsymbolen, hoe hoger de financiële kosten

In het geval dat een klant vloerisolatie wil kiezen, kan uit Tabel 10 worden afgeleid dat de drie producten vergelijkbare financiële kosten hebben. Bijgevolg kan de klant kiezen voor EPS-parels als hij lagere GWP- en CED-impacts wil bereiken in vergelijking met PIF- en PUR-schuim. De productselectie voor de andere maatregelen kan op een vergelijkbare manier worden uitgevoerd. Het is belangrijk op te merken dat vergelijkingen tussen producten alleen kunnen worden gemaakt binnen hetzelfde maatregeltype, aangezien verschillende maatregeltypen verschillende FU's hebben.

## 5.7 Het effect van GWP en CED op basis van levenscyclus op geadviseerde en gekozen maatregelen

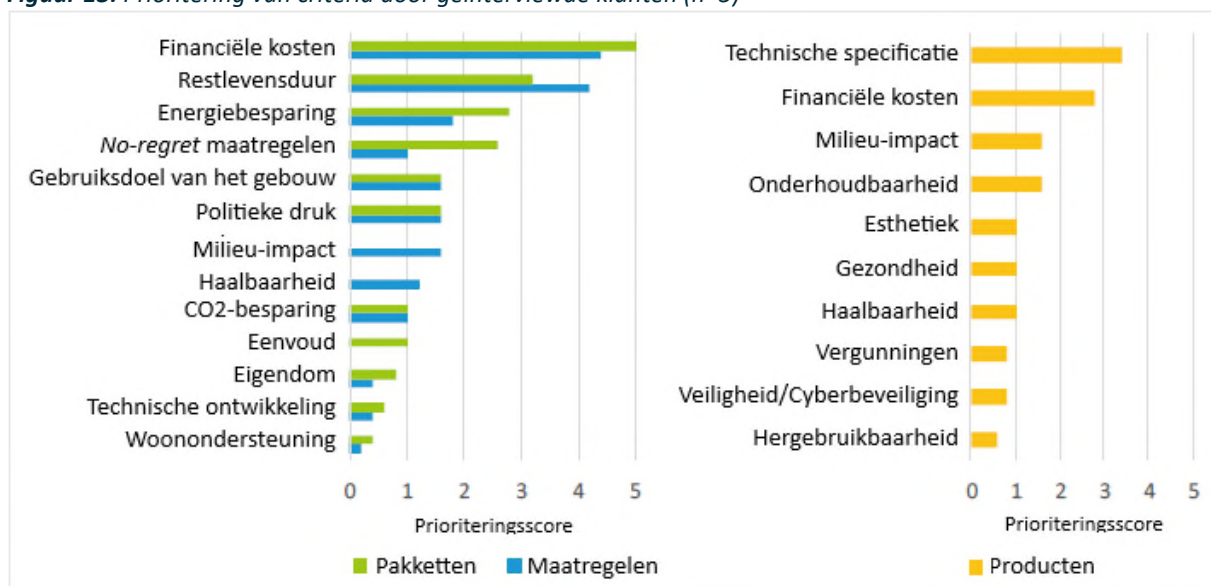
De resultaten met betrekking tot GWP, CED en financiële terugverdientijden (zoals besproken in paragraaf 4.3 en 4.5) zijn voorgelegd aan klanten en medewerkers van Antea Group om te onderzoeken in hoeverre deze informatie hun besluitvorming bij toekomstige projecten kan beïnvloeden. De bevindingen zijn verzameld via interviews met klanten en een interne brainstormsessie.

### 5.7.1 Inzichten uit klantinterviews

Vijf klanten van Antea Group werden geïnterviewd om inzicht te krijgen in de criteria die zij hanteren bij het selecteren van energiebesparende pakketten, maatregelen en producten. Zoals beschreven in hoofdstuk 3 kregen respondenten de opdracht om criteria te rangschikken op prioriteit, waarbij het belangrijkste criterium vijf punten kreeg en het minst belangrijke één punt. werd klanten gevraagd om criteria voor het selecteren van energiebesparende pakketten, maatregelen en producten te benoemen en te rangschikken. Elk criterium kreeg een score van één tot vijf, waarbij vijf de hoogste prioriteit aangaf.

De resultaten in Figuur 13 laten zien dat bij de keuze voor pakketten en maatregelen financiële kosten de hoogste prioriteit krijgen, gevolgd door de resterende levensduur van bestaande componenten. Dit tweede criterium wordt vaak gekoppeld aan kostenoptimalisatie: maatregelen die samenvallen met geplande vervangingen, zoals dakrenovatie, zijn efficiënter uitvoerbaar. Op de derde plaats staat energiebesparing, ondanks dat dit de kern vormt van het adviestraject. CO<sub>2</sub>-reductie werd slechts door één respondent expliciet genoemd; anderen beschouwen dit als onderdeel van het bredere energiebesparingsdoel.

**Figuur 13:** Prioritering van criteria door geïnterviewde klanten (n=5)



Bij de selectie van producten verschuift de prioritering enigszins. Technische specificaties krijgen hier de hoogste score, gevolgd door financiële kosten. Ook onderhoudsgemak, herbruikbaarheid en milieu-impact werden vaker genoemd, wat erop wijst dat klanten bij productkeuze meer aandacht besteden aan duurzaamheid dan bij pakketselectie. Milieuoverwegingen worden daarbij vooral geassocieerd met het vermijden van giftige stoffen en het verminderen van grondstoffengebruik.

Slechts twee van de vijf respondenten gaven aan alle geadviseerde maatregelen standaard te implementeren. De overige drie maken op basis van eigen criteria een selectie. Tijdens het eerste deel van het interview was er nog geen toelichting op GWP en CED. Na uitleg over de levenscyclusimpact van producten en presentatie van concrete waarden, gaf iedereen aan in toekomstige projecten bewuster rekening te willen houden met GWP en CED. De meeste respondenten zagen CED als belangrijker dan GWP, of vonden beide even zwaar wegen – zolang dit binnen het beschikbare budget mogelijk was.

Eén overheidsorganisatie vormde hierop een uitzondering: deze respondent gaf aan dat CO<sub>2</sub>-reductie leidend is in de besluitvorming, en financiële kosten van ondergeschikt belang zijn. Drie andere klanten benoemden technische of praktische beperkingen als rem op duurzame keuzes, zoals het niet kunnen toepassen van dikkere isolatiematerialen.

Aan het einde van het interview gaf een meerderheid aan dat zij zich bewuster zijn geworden van het feit dat de milieubelasting van gebouwen verder gaat dan operationele energie. Zij erkenden dat materiaalkeuzes tijdens de ontwerp- en renovatiefase een significante impact hebben op het milieu, en dat GWP- en CED-informatie een waardevolle aanvulling vormen op financiële en technische overwegingen.

## 5.7.2 Reflecties uit de interne brainstormsessie

Naast de klantinterviews werd een interne brainstormsessie gehouden met medewerkers van Antea Group, voorafgegaan door een enquête. De enquête toonde aan dat medewerkers – net als klanten – vooral waarde hechten aan energiebesparing, financiële kosten, duurzame energieopwekking en de klantvraag zelf. CO<sub>2</sub>-reductie werd ook hier slechts zelden expliciet genoemd als selectiecriteria, ondanks dat dit een expliciet onderdeel is van het advies.

Tijdens de brainstormsessie werd duidelijk dat medewerkers in praktijk vooral inspelen op klantverwachtingen, waarbij financiële en energiebesparende argumenten leidend zijn. Milieueffecten, zoals GWP en CED, worden als aanvullende complexiteit ervaren. Medewerkers gaven aan dat het verzamelen en communiceren van milieugegevens veel tijd kost, wat kan leiden tot hogere advieskosten – iets wat klanten vaak willen vermijden.

Om deze barrière te verlagen, werd voorgesteld om een centrale interne database op te zetten waarin GWP- en CED-gegevens per producttype beschikbaar zijn. Dit zou het mogelijk maken om deze informatie eenvoudig en snel te integreren in adviezen, zonder dat dit leidt tot extra werkdruk of hogere kosten voor de klant.

De deelnemers benadrukten het belang van het meenemen van levenscyclusimpact in energiebesparingsadviezen, mits dit werkbaar blijft binnen de commerciële realiteit van klantverwachtingen. Hoewel het onderwerp als complex werd ervaren, was er breed draagvlak voor het explicieter integreren van GWP en CED in het adviesproces.

## 6. Conclusie

In deze ketenanalyse is onderzocht of het opnemen van levenscyclusgebaseerde milieu-indicatoren – *Global Warming Potential* (GWP) en *Cumulative Energy Demand* (CED) – de besluitvorming in energiebesparingsadviezen voor utiliteitsgebouwen kan beïnvloeden.

Uit de analyse van 17 energiebesparingsmaatregelen blijkt dat de productkeuze binnen een maatregeltype grote invloed heeft op zowel de milieubelasting als de terugverdientijd. Vooral bij gevel- en dakisolatie en PV-panelen lopen de GWP- en CED-scores sterk uiteen. Zo levert PIF-isolatie de kortste financiële terugverdientijd op, maar heeft het ook de hoogste GWP. Ook conventionele LED-verlichting scoort financieel gunstiger dan sensorgestuurde varianten, maar minder goed scoort op CED.

Op maatregelpakketniveau laten de resultaten zien dat het optimaliseren op basis van laagste financiële terugverdientijd (scenario 3) systematisch leidt tot de hoogste GWP- en CED-terugverdientijden. Daarentegen leiden pakketten geoptimaliseerd voor lage GWP (scenario 1) tot de hoogste financiële terugverdientijd. De meeste terugverdientijden blijven binnen de resterende levensduur van het gebouw, met uitzondering van de GWP-terugverdientijd in scenario 3.

De interviews met klanten en de interne brainstormsessie maken duidelijk dat milieu-indicatoren momenteel zelden een doorslaggevende rol spelen in besluitvorming. Financiële kosten, resterende levensduur en energiebesparing zijn de dominante selectiecriteria. Wel tonen klanten en adviseurs zich positief over het opnemen van GWP- en CED-informatie, mits dit begrijpelijk wordt gepresenteerd en binnen het budgettaire kader blijft. Symbolische weergaven en integratie in bestaande adviesstructuren worden hierbij als kansrijk gezien.

De ketenanalyse toont aan dat het integreren van GWP en CED op product- en maatregelniveau kan bijdragen aan bewustere keuzes. Daarbij is het van belang dat de informatie laagdrempelig beschikbaar is en visueel ondersteund wordt. Verder blijkt dat klanten eerder openstaan voor milieu-gebaseerde optimalisatie bij productkeuze dan bij maatregelpakketselectie.

Kortom, het toevoegen van GWP- en CED-indicatoren aan energiebesparingsadviezen vergroot de kans op duurzamere keuzes, zolang de informatie relevant, visueel inzichtelijk en praktisch toepasbaar blijft. Verdere ontwikkeling van hulpmiddelen zoals productdatabases en visuele vergelijkingsmodellen kan dit proces ondersteunen en helpen om duurzaamheid structureel te integreren in de energietransitie van utiliteitsgebouwen.

## 7. Bronnenlijst

- Asif, M. (2019). An empirical study on life cycle assessment of double-glazed aluminium-clad timber windows. *International Journal of Building Pathology and Adaptation*, 37(5), 547-564. DOI: 10.1108/IJBPA-01-2019-0001
- Assan Alüminyum. (2021). Environmental product declaration; Aluminium foil (EPD registration No. S-P-02232). The International EPD System.
- Beccali, M., Cellura, M., Fontana, M., Longo, S., & Mistretta, M. (2013). Energy retrofit of a single-family house: Life cycle net energy saving and environmental benefits. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27, 283-293. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.040>
- Bertin, K., Canale, L., Abdellah, O. B., Méquignon, M., & Zisis, G. (2019). Life cycle assessment of lighting systems and light loss factor: A case study for indoor workplaces in France. *Electronics*, 8(11), 1278. <https://doi.org/10.3390/electronics8111278>
- CEN (2011, november). Sustainability of construction works – Assessment of environmental performance of buildings – Calculation method [European Standard NEN-EN 15978:2011]. CEN: Brussels, 140 pp.
- Dovjak, M., Fošir, M., Pajek, L., Igljč, A., Božiček, V., & Kunič, R. (2017). Environmental impact of thermal insulations: How do natural insulation products differ from synthetic ones? IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 92, 012009. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/92/1/012009>
- Entrop, A. G., & Brouwers, H. J. H. (2009). Assessing the sustainability of buildings using a framework of triad approaches. *Journal of Building Appraisal*, 5(4), 293-310. <https://doi.org/10.1057/jba.2009.36>
- Esfehani, H. H., Schäuble, J., Paul, E., & Bohne, D. (2019). IOP Conf. Series: *Materials Science and Engineering*, 609, 052042. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/609/5/052042>
- European Committee for Standardization (CEN). (2011). Sustainability of construction works – Assessment of environmental performance of buildings – Calculation method (EN 15978:2011). CEN.
- Füchsl, S., Rheude, F., & Röder, H. (2022). Life cycle assessment (LCA) of thermal insulation materials: A critical review. *Cleaner Materials*, 5, 100119. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100119>
- GaBi. (z.d.). GaBi Software. Sphera Solutions.
- GUBU architecten bna. (z.d.). Vacuümglas. *Duurzaam Verbouwen*. Geraadpleegd op <https://www.gubu.nl/nieuws/vacumglas>
- Günkaya, Z., Özkan, A., & Banar, M. (2021). The effect of energy-saving options on environmental performance of a building: A combination of energy audit-life cycle assessment for a university building. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 882-8832. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11141-z>
- Kaneko, Y., Matsushita, M., Kitagami, S., & Kiyohara, R. (2013). An energy-saving office lighting control system linked to employee's entry e it. *IEEE 2nd Global Conference on Consumer Electronics (GCCE)*, 440-444. <https://doi.org/10.1109/GCCE.2013.6664883>
- Knauf Insulations. (2021). *Environmental product declaration; Mineral plus, mineral wool products λ 0.034 W/mK* (EPD registration No. S-P-04572). The International EPD System.
- Knauf Insulations. (2023). *Environmental product declaration; DDP2-U, DDP2* (EPD registration No. S-P-09125). The International EPD System.

- Laurin, L. (2019). *Handling recycling in life cycle assessment*. Gedownload van [https://earthshiftglobal.com/client\\_media/files/pdf/Handling\\_Recycling\\_in\\_Life\\_Cycle\\_Assessment\\_2019-11-15.pdf](https://earthshiftglobal.com/client_media/files/pdf/Handling_Recycling_in_Life_Cycle_Assessment_2019-11-15.pdf)
- Longi. (2023). *Environmental product declaration; Solar photovoltaic module* (EPD registration No. S-P-09079). The International EPD System.
- Louws, M. (2019). *HFK-afbouw brengt markt in beweging; Koudemiddeltransitie: alle alternatieven op en rij*. Geraadpleegd van <https://www.gasco.nl/nieuws/koudemiddelen-transitie-white-paper>
- Ökobaudat (2021). Database search [online database]. Geraadpleegd van [https://www.oekobaudat.de/no\\_cache/en/database/search/daten/db2.html#bereich2](https://www.oekobaudat.de/no_cache/en/database/search/daten/db2.html#bereich2)
- Pang, Z., Chen, Y., Zhang, L., O'Neill, Z., Cheng, H., & Dong, B. (2020). Nationwide HVAC energy-saving potential quantification for office buildings with occupant-centric controls in various climates. *Applied Energy*, 279, 115727. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115727>
- Pastuszek, ., & ěgierek, P. (2022). Photovoltaic cell generations and current research directions for their development. *Materials*, 15(16), 5542. <https://doi.org/10.3390/ma15165542>
- Pepi Rer. (2022). *Environmental product declaration; Polyethylene foam* (EPD registration No. S-P-07857). The International EPD System.
- Pombo, O., Allacker, K., Rivela, B., & Neila, J. (2016). Sustainability assessment of energy saving measures: A multi-criteria approach for residential buildings retrofitting – A case study of the Spanish housing stock. *Energy and Buildings*, 116, 384-394. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.01.019
- Schulte, M., Lewandowski, I., Pude, R., & Wagner, M. (2021). Comparative life cycle assessment of bio-based insulation materials: Environmental and economic performances. *GCB Bioenergy*, 13, 979-998. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12825>
- Souza, D. F., Silva, P. P. F., Fontenele, L. F. A., Barbosa, G. D., & Oliveira Jesus, M. (2019). Efficiency, quality, and environmental impacts: A comparative study of residential artificial lighting. *Energy Reports*, 5, 409-424. DOI: 10.1016/j.egyr.2019.03.009
- SSC Group. (2022). *Environmental product declaration; Fixed window* (EPD registration No. S-P-06573). The International EPD System. Geraadpleegd van <https://api.environdec.com/api/v1/EPDLibrary/Files/fcca117b-b699-4818-c3e2-08db39c762ee/Data>
- Swegon Group. (2021). *Environmental product declaration; Swegon CASA air handling units* (EPD registration No. S-P-05388). Geraadpleegd van <https://api.environdec.com/api/v1/EPDLibrary/Files/44d0684c-87db-4965-c721-08da1b891163/Data>
- Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (2022, 21 november). *Energielabel C Kantoren*. Geraadpleegd van <https://www.rvo.nl/onderwerpen/wetten-en-regels-gebouwen/energielabel-c-kantoren>
- Tenapors. (2022). *Environmental product declaration; Thermal insulation material* (EPD registration No. S-P-07794). Geraadpleegd van <https://api.environdec.com/api/v1/EPDLibrary/Files/355cdae3-c66b-425d-830e-08dad6f6494e/Data>
- The International EPD System. (z.d.). *Search the EPD library*. Geraadpleegd van <https://environdec.com/library>
- ThermoFoam. (z.d.). *ThermoFoam: De ultieme upgrade voor oude of verzakte spouwmuurisolatie*. Geraadpleegd op <https://thermofoam.nl/>
- Thünen-Institut für Holzforschung. (2023). *Process data set: Wood fiber insulation – dry process German average*. Ökobaudat. Geraadpleegd van

[https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=5488d3f3-1e39-4a71-b357-ef605b65ed9c&version=00.00.062&stock=OBD\\_2023\\_I&lang=en](https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=5488d3f3-1e39-4a71-b357-ef605b65ed9c&version=00.00.062&stock=OBD_2023_I&lang=en)

Trilux. (2023). *Environmental product declaration; Planar LED downlight* (EPD registration No. S-P-07792). Geraadpleegd van <https://api.environdec.com/api/v1/EPDLibrary/Files/7b97194e-a999-4d2a-48dd-08db1f315c5e/Data>

Vidal, R., Alberola-Borràs, J., Sánchez-Pantoja, N., & Mora-Seró, I. (2021). Comparison of perovskite solar cells with other photovoltaic technologies from the point of view of life cycle assessment. *Advanced Energy & Sustainability Research*, 2(2000088). <https://doi.org/10.1002/aesr.202000088>

World Green Building Council (2022). *EU policy whole life carbon roadmap*. Geraadpleegd van <https://viewer.ipaper.io/worldgbc/eu-roadmap/?page=42>

Wu, J., Liu, G., Marson, A., Fedele, A., Scipioni, A., & Manzardo, A. (2022). Mitigating environmental burden of the refrigerated transportation sector: Carbon footprint comparisons of commonly used refrigeration systems and alternative cold storage systems. *Journal of Cleaner Production*, 273, 133514. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133514>

Yavuz, C., Yanikoglu, E., & Güler, Ö. (2012). Evaluation of daylight responsive lighting control systems according to the results of a long term experiment. *Light & Engineering*, 20(4), 75-83.

**Bijlagen**

## Bijlage A: Overzicht van maatregelcategorieën

De maatregelen van alle relevante projecten zijn geanalyseerd en onderverdeeld in elf categorieën. De maatregelen die behoren tot de zes meest geadviseerde maatregelen staan in Tabel 1. De maatregelen die behoren tot de overige vijf categorieën staan in Tabel 2.

**Tabel 11:** Respectievelijke maatregelen van de zes belangrijkste geadviseerde maatregelcategorieën

Categorie	Maatregel	Overijssel	Limburg, Drenthe & Gelderland
Isolatie	Extra geïsoleerd dak (plat)	x	x
	Extra geïsoleerd dak (niet-geïsoleerd plat)		x
	Extra isolatie dak (helling)	x	x
	Extra isolerende vloer	x	x
	Nieuwe vloer met extra isolatie	x	
	Extra geïsoleerde vloer (niet-geïsoleerd)		x
	Extra isolerende gevel	x	x
	Extra isolerende gevel (binnen)	x	
	Muurisolatie	x	
	Geïsoleerde voorzetwanden voor de gevel	x	
	Paneelisolatie	x	x
	Paneelisolatie (niet-geïsoleerd)	x	
	Extra isolerende invulpanelen	x	
	Isolatie spouwmuur controleren	x	
	Isolatie spouwmuur	x	x
	Isolatie damwand	x	
	Isolatie balkon	x	
Beglazing	Plaats HR++ glas	x	
	Enkel glas naar HR++	x	x
	Dubbel glas naar HR++ glas	x	x
	Plaats driedubbel glas	x	
	Enkel glas tot driedubbel glas	x	
	Dubbel glas naar driedubbel glas	x	
	HR naar HR++ glas	x	x
	HR tot driedubbel glas	x	
	HR++ tot driedubbel glas	x	
	Driedubbel glas met zonwering	x	
Warmtepomp	Warmtepomp plaatsen	x	x
	Warmtepomp lucht-lucht	x	x
	Warmtepomp tapwater	x	x
	Warmtepomp lucht-water	x	x
	VRF-systeem	x	x
PV-paneel	PV-panelen plaatsen	x	x
Verlichting	Verlichting vervangen door LED	x	x
	Verlichting vervangen door LED met aanwezigheidsdetectie	x	x
Ventilatie	Gebalanceerde ventilatie met warmtewisselaar	x	x
	Mechanische ventilatie vervangen	x	
	Gebalanceerde ventilatie	x	x

**Tabel 12:** Respectievelijke maatregelen van de categorie “overige maatregelen”

Categorie	Maatregel	Overijssel	Limburg, Drenthe & Gelderland
Ruimteverwarming	Convectoren met laag H2O		x
	Centrale verwarmingsinstallaties		x
	Extra vloerverwarming	x	
	Infrarood panelen	x	
	Palletketel	x	
	Split unit airconditioner vervalt	x	
	Stadsverwarming	x	
	Elektrische kachels verwijderen	x	
Verwarming leidingwater	Elektrische boiler	x	
	Zonneboiler	x	
	Inbouwboiler	x	
	Geiser vervangen	x	
	Douche WTW	x	
Speciale beglazing en deuren	Dakraam sluiten	x	
	Plaats monumentglas	x	
	Extra isolerende kanteldeur	x	
Bouw	Overhang plaatsen	x	
Zwembad	Nieuwe zwembadpomp	x	

## Bijlage B: Pakketten, maatregelen en optionele producten per gebouw

De zes gebouwen hebben meerdere maatregelenpakketten, elk met een eigen energielabel. De maatregelen in elk pakket staan weergegeven in Tabel 22. Voor elke maatregel kunnen verschillende producten worden geselecteerd. Een overzicht van deze producten vindt u in Tabel 23.

**Tabel 13:** Maatregelen opgenomen in de pakketten per gebouw

	Gebouw 1			Gebouw 2			Gebouw 3			Gebouw 4		Gebouw 5		Gebouw 6	
	C	A	EN	C	A	EN	B	A	EN	A	EN	A	EN	A	EN
Isolatie spouw	x			x											
Isolatie gevel		x	x		x	x			x		x		x		x
Isolatie vloer	x	x	x	x	x	x		x	x		x		x		x
Isolatie dak		x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Beglazing			x			x		x	x		x		x		
Warmtepomp			x			x			x		x		x		x
Zonnepanelen			x			x			x		x		x		x
Verlichting		x	x	x	x	x			x						
Ventilatie systeem			x			x			x		x		x		x

C = C label, B = B label, A = A label A, EN=Energie neutraal.

**Tabel 14: Optionele producten per maatregel**

Maatregel	Product
Isolatie spouw	PUR-schuim
	Thermofoam
	EPS parels
Isolatie gevel	Steenwol
	Glaswol
	PUR-schuim
	Thermofoam
	Hennepvezel
	Houtvezel
Isolatie vloer	PIF
	PUR-schuim
	EPS parels
Isolatie dak	PIR
	EPS
	Houtvezel
Beglazing	HR++ glas
	Driedubbel glas
	Vacuümglas
Warmtepomp	lucht-lucht warmtepomp
	lucht-water warmtepomp
	Koelmiddel: Propaan
	Koelmiddel: CO2
Ventilatie systeem	Warmteterugwinning algemeen
	Warmteterugwinning+ CO2-detectie
	Warmteterugwinning+ aanwezigheidsdetectie
PV-panelen	Monokristallijn
	Polykristallijn
	Dunne-filmpaneel (CdTe)
	Dunne-film paneel (CIGS)
	Dunne-film paneel (A-Si)
Verlichting	LED
	LED+ daglichtdetectie
	LED+ aanwezigheidsdetectie

## Bijlage C: Tweede functionele eenheid - referentiestromen per gebouw

De tweede FU betreft de maatregelen die nodig zijn om een gebouw energielabel A of Energieneutraal te laten behalen. De referentiestromen voor deze FU worden per gebouw weergegeven in Tabel 15 voor energielabel A en in Tabel 16 voor Energieneutraal.

**Tabel 15:** Referentiestromen voor gebouwen om energielabel A te bereiken

Gebouw	Oorspronkelijk label	Referentiestroom		
		Maatregel	Hoeveelheid	Eenheid
Gebouw 1	E	Isolatie gevel	423.1	m <sup>2</sup>
		Isolatie vloer	455.0	m <sup>2</sup>
		Isolatie dak	452.6	m <sup>2</sup>
		Verlichting (kleedkamer en ingang)	20.0	stukken
		Verlichting (sportfunctie)	49.0	stukken
Gebouw 2	E	Isolatie gevel	423.0	m <sup>2</sup>
		Isolatie vloer	455.0	m <sup>2</sup>
		Isolatie dak	452.6	m <sup>2</sup>
		Verlichting (kleedkamer en ingang)	20.0	stukken
		Verlichting (sportfunctie)	49.0	stukken
Gebouw 3	D	Isolatie vloer	442.5	m <sup>2</sup>
		Isolatie dak	439.6	m <sup>2</sup>
		Beglazing (eerste enkele)	34.9	m <sup>2</sup>
		Beglazing (initieel dubbel)	19.5	m <sup>2</sup>
		Beglazing (ingang)	11.1	m <sup>2</sup>
Gebouw 4	C	Isolatie dak	439.6	m <sup>2</sup>
Gebouw 5	C	Isolatie dak	439.6	m <sup>2</sup>
Gebouw 6	C	Isolatie dak	439.6	m <sup>2</sup>

**Tabel 16:** Referentiestromen voor gebouwen om Energieneutraal te bereiken

Gebouw	Oorspronkelijk label	Referentiestroom		
		Maatregel	Hoeveelheid	Eenheid
Gebouw 1	E	Isolatie gevel	423.1	m <sup>2</sup>
		Isolatie vloer	455.0	m <sup>2</sup>
		Isolatie dak	452.6	m <sup>2</sup>
		Beglazing (sportfunctie)	48.5	m <sup>2</sup>
		Beglazing (ingang)	3.6	m <sup>2</sup>
		Beglazing (kleedkamer)	97.0	m <sup>2</sup>
		Warmtepomp (kleedkamer)	1.0	stukken
		Warmtepomp (sportfunctie)	1.0	stukken
		Warmtepomp (leidingwater)	1.0	stukken
		Ventilatiesysteem (kleedkamer)	1.0	stukken
		Ventilatiesysteem (sportfunctie)	1.0	stukken
		Zonnepanelen	16.7	kWp
		Verlichting (kleedkamer en ingang)	20.0	stukken
		Verlichting (sportfunctie)	49.0	stukken

Gebouw	Oorspronkelijk label	Referentiestroom		
		Maatregel	Hoeveelheid	Eenheid
Gebouw 2	E	Isolatie gevel	423.0	m <sup>2</sup>
		Isolatie vloer	455.0	m <sup>2</sup>
		Isolatie dak	452.6	m <sup>2</sup>
		Beglazing (initieel dubbel)	109.0	m <sup>2</sup>
		Warmtepomp (kleedkamer)	1.0	stukken
		Warmtepomp (sportfunctie)	1.0	stukken
		Warmtepomp (leidingwater)	50.0	kW
		Ventilatiesysteem (kleedkamer)	1.0	stukken
		Ventilatiesysteem (sportfunctie)	1.0	stukken
		Zonnepanelen	15.7	kWp
		Verlichting (kleedkamer en ingang)	20.0	stukken
		Verlichting (sportfunctie)	49.0	stukken
Gebouw 3	D	Isolatie gevel	450.1	m <sup>2</sup>
		Isolatie vloer	442.5	m <sup>2</sup>
		Isolatie dak	439.6	m <sup>2</sup>
		Beglazing (eerste enkele)	20.0	m <sup>2</sup>
		Beglazing (initieel dubbel)	35.0	m <sup>2</sup>
		Beglazing (ingang)	11.0	m <sup>2</sup>
		Warmtepomp (sportfunctie)	1.0	stukken
		Warmtepomp (kleedkamer)	1.0	stukken
		Warmtepomp (leidingwater)	1.0	stukken
		Ventilatiesysteem (sportfunctie)	1.0	stukken
		Ventilatiesysteem (kleedkamer)	1.0	stukken
		Zonnepanelen	10.8	kWp
		Verlichting (kleedkamer en ingang)	20.0	stukken
		Verlichting (sportfunctie)	49.0	stukken
Gebouw 4	C	Isolatie gevel	400.0	m <sup>2</sup>
		Isolatie vloer	442.5	m <sup>2</sup>
		Isolatie dak	439.6	m <sup>2</sup>
		Beglazing (initieel dubbel)	98.0	m <sup>2</sup>
		Beglazing (ingang)	2.9	m <sup>2</sup>
		Beglazing (ingang)	1.0	stukken
		Warmtepomp (kleedkamer)	1.0	stukken
		Warmtepomp (leidingwater)	1.0	stukken
		Ventilatiesysteem	1.0	stukken
		Zonnepanelen	11.4	kWp
		Gebouw 5	C	Isolatie gevel
Isolatie vloer	442.5			m <sup>2</sup>
Isolatie dak	439.6			m <sup>2</sup>
Beglazing (sportfunctie)	98.1			m <sup>2</sup>
Beglazing (kleedkamer)	2.9			m <sup>2</sup>
Beglazing (ingang)	11.1			m <sup>2</sup>
Warmtepomp (sportfunctie)	1.0			stukken
Warmtepomp (kleedkamer)	1.0			stukken
Warmtepomp (leidingwater)	1.0			stukken
Ventilatiesysteem (sportfunctie)	1.0			stukken
Ventilatiesysteem (kleedkamer)	1.0			stukken
Zonnepanelen	11.4			kWp
Gebouw 6	C	Isolatie gevel	400.0	m <sup>2</sup>
		Isolatie vloer	442.5	m <sup>2</sup>
		Isolatie dak	439.6	m <sup>2</sup>
		Warmtepomp (sportfunctie)	30.5	kW
		Warmtepomp (kleedkamer)	30.5	kW
		Warmtepomp (leidingwater)	50.0	kW
		Ventilatiesysteem (sportfunctie)	1,600.0	m <sup>3</sup>
		Ventilatiesysteem (kleedkamer)	480.0	m <sup>3</sup>
		Zonnepanelen	9.3	kWp

## Over Antea Group

Antea Group is het thuis van 1800 trotse ingenieurs en adviseurs. Samen bouwen wij elke dag aan een veilige, gezonde en toekomstbestendige leefomgeving. Je vindt bij ons de allerbeste vakspecialisten van Nederland, maar ook innovatieve oplossingen op het gebied van data, sensing en IT. Hiermee dragen wij bij aan de ontwikkeling van infra, woonwijken of waterwerken. Maar ook aan vraagstukken rondom klimaatadaptatie, energietransitie en de vervangingsopgave. Van onderzoek tot ontwerp, van realisatie tot beheer: voor elke opgave brengen wij de juiste kennis aan tafel. Wij denken kritisch mee en altijd vanuit de mindset om samen voor het beste resultaat te gaan. Op deze manier anticiperen wij op de vragen van vandaag en de oplossingen voor morgen. Al 70 jaar.

## Contactgegevens

Tolhuisweg 57  
8443 DV Heerenveen  
Postbus 24  
8440 AA Heerenveen

### Copyright ©

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar worden gemaakt door middel van druk, fotokopie, elektronisch of op welke wijze dan ook, zonder schriftelijke toestemming van de auteurs.

De informatie die in dit rapport is opgenomen is uitsluitend bestemd voor geadresseerde(n) en kan persoonlijke of vertrouwelijke informatie bevatten. Gebruik van deze informatie, door anderen dan de geadresseerde(n) en gebruik door hen die niet gerechtigd zijn van deze informatie kennis te nemen, is niet toegestaan. De informatie is uitsluitend bestemd om te worden gebruikt door de geadresseerde, voor het doel waarvoor dit rapport is vervaardigd. Indien u niet de geadresseerde bent of niet gerechtigd bent tot kennisneming, is openbaarmaking, vermenigvuldiging, verspreiding en/of verstrekking van deze informatie aan derden niet toegestaan, tenzij na schriftelijke toestemming door Antea Group en wordt u verzocht de gegevens te verwijderen en direct een melding te maken bij [security@antegroup.nl](mailto:security@antegroup.nl). Derden, zij die niet geadresseerd zijn, kunnen geen rechten aan dit rapport ontleen, tenzij na schriftelijke toestemming door Antea Group.

[www.anteagroup.nl](http://www.anteagroup.nl)