



Natuurlijke koudemiddelen in warmtepompen



Studie naar de huidige positie van natuurlijke koudemiddelen in warmtepompen en de toekomstverwachtingen

Charles Geelen, Infinitus Energy Solutions
René van Gerwen, Entropycs (Entropy Cooling Solutions)

Mei 2021

Deze rapportage is opgesteld in opdracht van RVO.nl voor de Topsector Energie op verzoek van TKI Urban Energy.

Ref.: TSE4200018

Inhoudsopgave

Samenvatting.....	4
1 Inleiding.....	11
1.1 Doel van de studie.....	11
1.2 Scope.....	12
1.3 Werkwijze en opzet rapportage.....	12
2 Kenmerken, overzicht en toepassingen van koudemiddelen.....	14
2.1 Inleiding.....	14
2.2 Relevante kenmerken van koudemiddelen.....	14
2.2.1 Mechanische dampcompressie en koudemiddelen.....	14
2.2.2 Natuurlijke versus synthetische koudemiddelen.....	14
2.2.3 Milieueffecten van koudemiddelen.....	15
2.2.4 Veiligheidsaspecten van koudemiddelen.....	18
2.2.5 De belangrijkste koudemiddelen en eigenschappen samengevat.....	21
2.2.6 Beschikbaarheid en kosten van koudemiddelen.....	22
2.2.7 Druk- en temperatuurkarakteristieken van koudemiddelen.....	25
2.3 Koudemiddelvrije en minder gebruikelijke concepten.....	28
3 Natuurlijke koudemiddelen in detail.....	30
3.1 Koolwaterstoffen.....	30
3.2 Kooldioxide.....	34
3.3 Ammoniak.....	37
4 Relevante wet- en regelgeving en bijbehorende normen.....	40
4.1 F-gassen wetgeving, verwachte revisie.....	40
4.2 Wet- en regelgeving, richtlijnen en normen voor natuurlijke koudemiddelen.....	42
4.3 Competentie en certificering voor het werken met koudemiddelen.....	45
4.4 Waardering in Breeam.....	46
5 Effecten van koudemiddelkeuze op de energieprestatie.....	48
5.1 Berekende COP's.....	48
5.2 Producten – Leveranciersdata.....	56
5.3 Projecten.....	59
5.3.1 Gerealiseerde projecten.....	59
5.3.2 Onderzoek, ontwikkeling en demonstratieprojecten.....	60
6 Overzicht van warmtepomptoepassingen en mogelijke koudemiddelopties.....	64
7 Conclusies en aanbevelingen.....	69
8 Bibliografie.....	71
Bijlagen.....	76

Bijlage 1: Vier generaties koudemiddelen in historisch perspectief.....	77
Bijlage 2: Details over het broeikaseffect van koudemiddelen; GWP en TEWI	79
Bijlage 3: Details over de afbraakproducten en milieueffecten van F-gassen (HFK, HFO)	86
Bijlage 4: Details over de veiligheid van koudemiddelen.....	89
Bijlage 5: Details over de invloed van druk- en temperatuurkarakteristieken op de COP	97
Bijlage 6: Details over koudemiddelvrije en minder gebruikelijke concepten.....	99
Bijlage 7: EU Verordeningen en EU-richtlijnen met betrekking tot koudemiddelen	109
Bijlage 8: Nederlandse wet- en regelgeving en bijbehorende richtlijnen met betrekking tot koudemiddelen.....	116
Bijlage 9: Normen met betrekking tot koudemiddelen	127
Bijlage 10: Overzicht berekende COPs (CoolTools)	133

SAMENVATTING

Doel, scope en aanpak van de studie

Doel van deze studie is om inzicht te verschaffen in de toepassingsmogelijkheden van natuurlijke koudemiddelen. Het rapport van deze studie, met name de bijlagen, dienen als naslagwerk ter ondersteuning van beleidsmakers, fabrikanten, adviseurs, ontwerpers en installateurs bij de keuzeoverwegingen voor het toe te passen koudemiddel in een warmtepomp. Uiteraard is het belangrijk om altijd de technische handleidingen van fabrikanten te raadplegen voor een veilige toepassing.

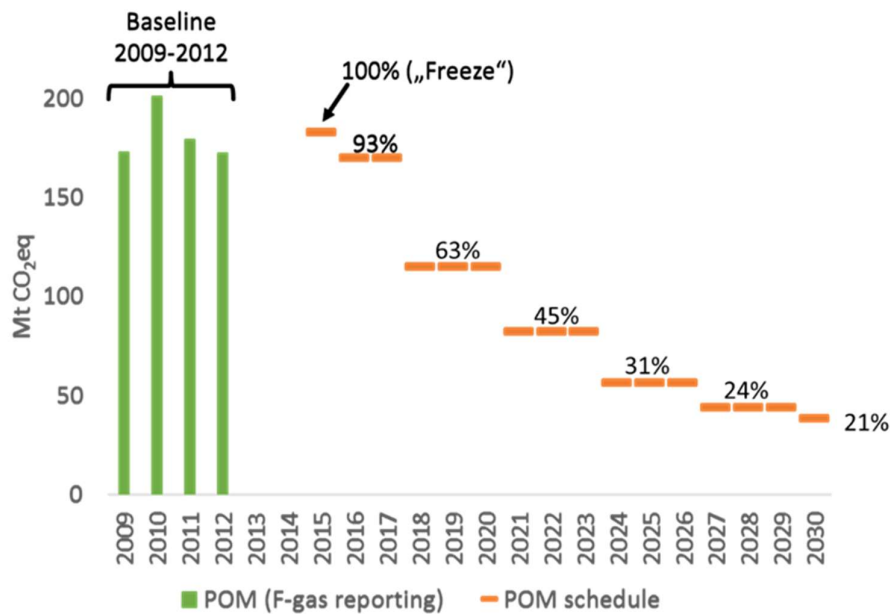
De studie beperkt zich tot warmtepompen voor toepassing voor ruimteverwarming en warm tapwatervoorziening in de gebouwde omgeving (woningen, utiliteit); warmtepompen voor industriële toepassingen komen beperkt aan de orde.

De studie, in opdracht van de Rijksdienst voor Ondernemend Nederland RVO en TKI Urban Energy, is uitgevoerd op basis van de deskundigheid van de opstellers, gecombineerd met bronnen uit de literatuur en informatie van deskundigen uit binnen- en buitenland vanuit het netwerk van de opstellers. Prestatievergelijkingen zijn uitgevoerd aan de hand van berekeningen met gespecialiseerde simulatieprogramma's en getoetst aan informatie uit praktijkprojecten. Een groep van deskundigen uit de industrie, kennisinstellingen en de overheid heeft het conceptrapport becommentarieerd.

De studie heeft geleid tot de volgende conclusies en aanbevelingen.

Productie en gebruik synthetische koudemiddelen worden afgebouwd

De Europese F-gassen Verordening bepaalt dat de productie van synthetische koudemiddelen (HFK) met een significant broeikas effect wordt afgebouwd. Deze koudemiddelen kunnen daarom in de toekomst steeds minder worden gebruikt. Het afbouwtraject is weergegeven in de onderstaande figuur 4-1.



Figuur 4-1: GWP-gewogen afbouw volgens Europese F-gassen Verordening (POM = Placing on the Market) (1).

De Verordening bevat daarnaast gebruiksverboden voor specifieke toepassingen.

Deze Europese F-gassen Verordening is direct werkend in alle lidstaten en een-op-een geïmplementeerd in het Nederlandse F-gassen Besluit (2) en bijbehorende Regeling.

De belangrijkste koudemiddelen met hun eigenschappen

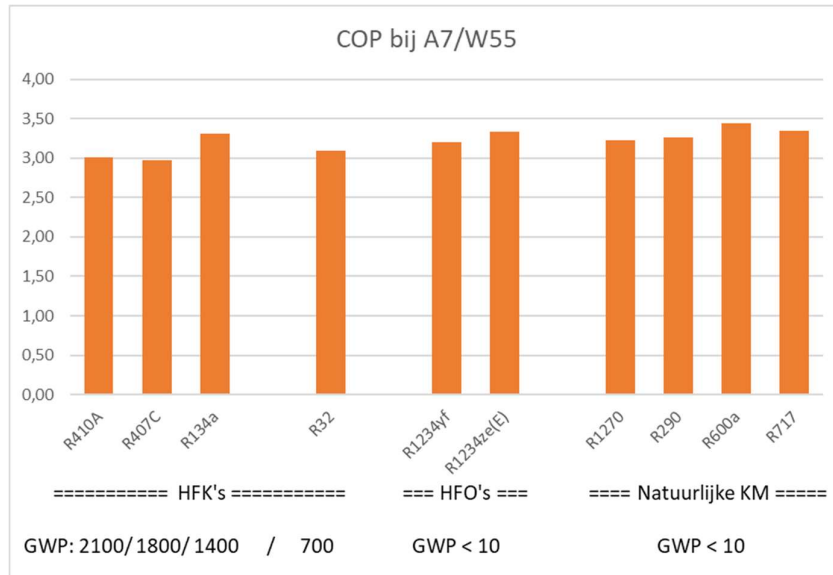
In onderstaande overzichtstabel 2-2 worden de belangrijkste koudemiddelen met hun relevante kenmerken samengevat. Naast de in deze tabel opgenomen koudemiddelen zijn er nog tal van mengsels met HFO's in ontwikkeling, maar deze zijn op dit moment (begin 2021) nog niet commercieel verkrijgbaar of hebben zich nog niet bewezen. Daarom zijn die niet in deze overzichtstabel opgenomen.

Type	R-nummer	Chemie	ODP	GWP	Veiligheids klasse
Synthetisch: CFK & HCFC					
	R12	met chloor, fluor en koolstof	1	10900	A1
	R22	met chloor, fluor, waterstof en koolstof	0,055	1810	A1
Synthetisch: HFK en mengsels met HFK (GWP>150)					
	R134a	met fluor, waterstof en koolstof	0	1430	A1
	R32	met fluor, waterstof en koolstof	0	675	A2L
	R410A	mengsel met hoge GWP, met "glide"	0	2088	A1
	R507A	mengsel met hoge GWP, zonder "glide"	0	3985	A1
	R452B, R454B	Mengsels met lagere GWP, met "glide"	0	676 467	A2L
Synthetisch: HFO en mengsels met HFO (GWP<150)					
	R1234yf	met fluor, waterstof en koolstof; dubbele binding	0	4	A2L
	R1234ze (E)	met fluor, waterstof en koolstof; dubbele binding	0	7	A2L
	R454C	Mengsels met zeer lage GWP met "glide"	0	146	A2L
Natuurlijk					
Ammoniak	R717	NH ₃	0	0	B2L
Kooldioxide	R744	CO ₂	0	1	A1
Koolwaterstoffen	R290 R600a R1270	Met waterstof en koolstof (C ₃ H ₈ , C ₄ H ₁₀ , C ₃ H ₆)	0	2-6	A3

Tabel 2-2: overzicht van de belangrijkste koudemiddelen (volgens EN 378-1:2016 Annex E)
Voor de uitleg van de gebruikte begrippen wordt verwezen naar paragraaf 2.2.5.

Energetische prestatie van natuurlijke koudemiddelen

Berekening van de COP met simulatieprogramma CoolTools (3) laat zien dat – onder verder gelijke omstandigheden – de rendementen van warmtepompen met natuurlijke koudemiddelen niet onder doen voor die met synthetische koudemiddelen of zelfs iets beter kunnen zijn. De overgang op natuurlijke koudemiddelen leidt tot gelijke of hogere rendementen.



Klimaat effect, GWP en TEWI

Met een TEWI-berekening worden het directe klimaateffect (GWP van het koudemiddel) en indirecte klimaateffect (CO₂ emissie bij de opwekking van elektriciteit voor de aandrijving) van de beschouwde warmtepompen bepaald. De verhouding tussen direct en indirect effect hangt sterk af aard van de elektriciteitsopwekking. Op basis van de huidige equivalente CO₂ emissie bij de gemiddelde opwekking in Nederland is de indirecte bijdrage relatief groot, en de directe bijdrage dus relatief klein. Bij verdere vergroening van de elektriciteitsproductie wordt de directe bijdrage van de GWP van het koudemiddel relatief belangrijker, en daarmee het klimaatvoordeel van natuurlijke koudemiddelen substantiëler ten opzichte van de traditionele synthetische koudemiddelen.

De toekomst van natuurlijke koudemiddelen

Voor veel warmtepomptoepassingen zijn er geschikte natuurlijke koudemiddelen beschikbaar, met gering effect op het milieu, vergelijkbare of betere prestaties en acceptabele, stabiele kosten; de drie belangrijkste natuurlijke koudemiddelen zijn koolwaterstoffen, kooldioxide en ammoniak.

Koolwaterstoffen zijn vooral geschikt voor kleinere warmtepompen, monoblocks en single split airconditioners; voor collectieve systemen (blokverwarming, appartementencomplexen) en industriële toepassingen zijn deze geschikt, afhankelijk van de mogelijkheden tot adequate risicobeheersing. Voor grotere multi-split en VRF-systemen zijn de toepassingsmogelijkheden beperkt, vanwege de kosten van en beperkingen door de vereiste veiligheidsvoorzieningen.

Kooldioxide is vooral geschikt voor hogere afgiftetemperaturen (zowel tapwater als ruimteverwarming in combinatie met een temperatuur-gelaagde buffer), voor zowel kleine als grote warmtepompen.

Ammoniak is vooral geschikt voor industriële warmtepompen, en op termijn in bijzondere technische uitvoering als hybride huishoudelijke warmtepomp (aardgasgestookt).

Bestaande warmtepompen kunnen in de regel niet worden omgebouwd naar natuurlijke koudemiddelen.

Onderstaande tabel 6-1 geeft voor een aantal warmtepomptoepassingen de toekomstige natuurlijke koudemiddelen aan.

Veiligheid

Bij het gebruik van koudemiddelen treden veiligheidsrisico's op; voor ieder specifiek koudemiddel, apparaat en toepassingsdetails moeten deze risico's in kaart worden gebracht en worden beheerst met gebruikmaking van technische en organisatorische maatregelen. Fabrikanten en installateurs moeten veilige apparaten op de markt plaatsen, waarbij naar normen kan worden verwezen (bijvoorbeeld de generieke EN 378 of productnormen uit de IEC 60335 serie).

Bij koolwaterstoffen zijn deze risico's vooral gerelateerd aan de brandbaarheid; de Nederlandse praktijkrichtlijn NPR7600:2020 - Toepassing van brandbare koudemiddelen in koelinstallaties en warmtepompen (4) geeft aan hoe deze risico's kunnen worden beheerst.

Bij kooldioxide zijn deze risico's vooral gerelateerd aan hoge drukken en de vorming van vast kooldioxide (droogijs); de Nederlandse praktijkrichtlijn NPR7601:2020 - Toepassing van kooldioxide als koudemiddel in koelinstallaties en warmtepompen (5) geeft aan hoe deze risico's kunnen worden beheerst.

Bij ammoniak zijn deze risico's vooral gerelateerd aan de giftigheid; de Nederlandse richtlijn PRS-13:2020 - Toepassing van ammoniak als koudemiddel in koelinstallaties en warmtepompen (6) geeft aan hoe deze risico's kunnen worden beheerst.

Veiligheidsmaatregelen leiden tot kostenverhoging bij de aanschaf van een warmtepomp, en vaak ook tot hogere gebruikskosten (meer controles of onderhoud).

Toepassingsmogelijkheden van de belangrijkste natuurlijke koudemiddelen

De onderstaande tabel geeft een globaal overzicht van de toepassingsmogelijkheden op basis van de beschikbare informatie, en de berekeningen zoals weergegeven in dit rapport.

De kleuren hebben de volgende betekenis:

- Groen: wordt al toegepast en/of geen significante beperkingen
- Geel: minder voor de hand liggend
- Oranje: zeer beperkt of moeilijk toepasbaar

	R290	R600a	R717	R744
	Propanaan	Isobutaan	Ammoniak	CO ₂
Vermogen				
Huishoudelijk: <12 kW			*)	
Blokverwarming/kleine utiliteit/gestapelde bouw: < 70 kW			*)	
Wijk/grote utiliteit: >70 kW/unit		*)	*)	
Toepassing/functie				
LT-ruimteverwarming: 35 °C		*)	*)	*)
MT-ruimteverwarming: 55 °C		*)	*)	*)
Hoge temperatuur ruimteverwarming: 75 °C			*)	*)
Tapwater 60-80 °C			*)	
Bron				
Buitenlucht: -12 tot +15 °C		*)		
Bodemwarmtewisselaar (of drinkwater): 0 tot 8 °C				
Grondwater: 10 tot 18 °C				
Ventilatielucht: 20°C				*)
Rest/afvalwarmte (ook RIO-Thermie): 20-30 °C				*)
Specifieke aspecten				
	*)	*)	*)	*)

Tabel 6-1: overzicht warmtepomptoeepassingen met natuurlijke koudemiddelen

*) voor nadere toelichting en extra info wordt verwezen naar Hoofdstuk 6.

Wat is belangrijk voor de toekomst van natuurlijke koudemiddelen?

Bij alle warmtepomptoepassingen is het van belang om zorg te dragen voor minimale emissies van koudemiddel, om zo het effect op het milieu en klimaat te minimaliseren.

Fabrikanten van warmtepompen, projectontwikkelaars, adviseurs en ontwerpers die betrokken zijn bij warmtepompprojecten, wordt aanbevolen om toepassing van (een warmtepomp met) een natuurlijk koudemiddel te overwegen. Voor bestaande warmtepompen met F-gassen met een significant broeikaseffect wordt aanbevolen om, zodra de mogelijkheid zich voordoet, vervanging door een versie met een koudemiddel met een lagere GWP te overwegen.

Ook verbetering van de terugwinning, recycling en vernietiging van koudemiddelen aan het einde van de technische levensduur van warmtepompen draagt positief bij aan het verminderen van het klimaateffect.

Voor het werken met alle soorten koudemiddelen in warmtepompen zijn specifieke kennis en vaardigheden vereist. Ontwerpers, fabrikanten, installateurs, monteurs, onderhouds- en bedieningspersoneel moeten adequaat zijn getraind, en bij voorkeur zijn bedrijven en personen gecertificeerd. Dit laatste is alleen voor installatiebedrijven en hun personeel wettelijk verplicht bij het werken met F-gassen met een significant broeikaseffect (2). Bij natuurlijke koudemiddelen (koolwaterstoffen boven 5 kg, kooldioxide boven 10 kg en ammoniak boven 10 kg) is competent personeel wettelijk vereist volgens het Activiteitenbesluit (7).

De Stichting Netwerk Koude- en Klimaattechniek beheert een integraal competentiesysteem van zelfregulering door en voor de betrokken sectoren, waarmee hier invulling aan wordt gegeven voor alle soorten koudemiddelen, zowel natuurlijke als F-gassen (8). Alle bedrijven en personen die dit aangaan wordt aanbevolen om zich bij dit competentiesysteem aan te sluiten.

Zowel natuurlijke koudemiddelen als koudemiddelvrije warmtepompconcepten hebben significante ondersteuning nodig om ontwikkeling en (grootschalige) marktintroductie te versnellen, vanwege de achterstand ten opzichte van de volledig uitontwikkelde en ingeburgerde synthetische koudemiddelen.

1 INLEIDING

1.1 DOEL VAN DE STUDIE

Hoofddoel

Doel van deze studie is om Inzicht te verschaffen in de toepassingsmogelijkheden van natuurlijke koudemiddelen aan de hand van een overzicht van specifieke kenmerken, kwantificering van de effecten op het energetisch rendement van warmtepompen (mede in relatie tot de mogelijkheid van hogere afgiftetemperaturen) en aanwezige blokkades in huidige wet- en regelgeving en normen.

Effecten van koudemiddelkeuze

De koudemiddelkeuze is een cruciale factor bij het ontwerp van een warmtepomp. De koudemiddelkeuze bepaalt de componentkeuze en het detailontwerp. De keuze is eenmalig voor de hele levensduur van de warmtepomp, omdat het in het algemeen niet mogelijk is om gedurende de levensduur van koudemiddel te wisselen; zo dit al technisch mogelijk is, dan leidt dat vrijwel altijd tot suboptimaal functioneren. Over de gehele technische levensduur, die kan oplopen tot 15 à 20 jaar, komen de cumulatieve effecten van de koudemiddelkeuze tot uiting: milieueffecten door koudemiddelemissies, effect op energiegebruik, exploitatiekosten, bedrijfszekerheid, levensduur, veiligheidsaspecten. Al deze aspecten komen in deze studie aan de orde.

De koudemiddelkeuze is slechts één van de vele factoren die van invloed zijn op de warmtepompprestaties, waarbij deze factoren elkaar onderling beïnvloeden. Voor ieder koudemiddel dient het systeem geoptimaliseerd te worden. Een goed voorbeeld hiervan is CO₂ als koudemiddel, waar op CO₂ toegespitste optimalisatietechnieken als parallelle compressie, flash gas bypass en ejectoren worden toegepast om de prestaties te verbeteren.

De effecten van koudemiddelkeuze op de warmtepompprestaties worden in deze studie mede beoordeeld aan de hand van de resultaten van theoretische prestatievergelijkingen, gebaseerd op simulatieberekeningen met verschillende koudemiddelen; het grote voordeel van deze aanpak is dat alleen de invloed van de thermodynamische koudemiddeleigenschappen tot uiting komt inde resultaten, omdat alle overige factoren daarbij gelijk blijven.

Resultaten van vergelijkende praktijkmetingen zijn slechts beperkt beschikbaar en niet goed te vergelijken, omdat in de praktijk die overige factoren zelden gelijk zijn. Dit geldt onder meer voor het gedrag van de bewoners t.a.v. de comfort-instellingen van de ruimtetemperatuur en het gebruik van warm tapwater. Ook spelen secundaire affecten een rol, met name verschillen in warmteoverdrachts- en stromingseigenschappen.

De betrouwbaarheid van prestatievergelijkingen, zowel op basis van berekeningen als metingen, is daarom beperkt, en uitspraken over prestatie-effecten van koudemiddelkeuze zijn daarom altijd indicatief.

1.2 SCOPE

- a. De studie beperkt zich tot warmtepompen voor toepassing voor ruimteverwarming en warm tapwatervoorziening in de gebouwde omgeving (woningen, utiliteit); warmtepompen voor industriële toepassingen komen beperkt aan de orde.
- b. Bij de studie zijn betrokken als warmtebronnen: (buiten)lucht, bodem, grondwater; rest- en afvalwarmte worden niet als bronnen bij deze studie betrokken.
- c. Airconditioning met een warmtepompfunctie worden buiten beschouwing gelaten; warmtepompen met een (beperkte) koelfunctie komen beperkt aan de orde, voor zover dat de keuze van het koudemiddel zou kunnen beïnvloeden.
- d. Van alternatieve warmtepomptechnieken waarbij geen koudemiddel nodig is wordt een zeer beknopt overzicht gegeven, beperkt tot een aantal in Nederland beschikbare of in ontwikkeling zijnde technieken.

1.3 WERKWIJZE EN OPZET RAPPORTAGE

Bronnen en commentaar op eindconcept

De studie is uitgevoerd op basis van de deskundigheid van de opstellers, gecombineerd met bronnen uit de literatuur en informatie van deskundigen uit binnen- en buitenland vanuit het netwerk van de opstellers. Prestatievergelijkingen zijn uitgevoerd aan de hand van berekeningen met gespecialiseerde simulatieprogramma's.

Het eindconcept van dit rapport is becommentarieerd door een aantal externe experts uit de industrie, kennisinstellingen en de overheid (op verzoek van RVO en TKI Urban Energy en tijdens een webinar), waarna het commentaar is verwerkt in deze definitieve versie.

Hoofdstukindeling

In **hoofdstuk 2** worden de hoofdkenmerken en een overzicht van toepassingen van koudemiddelen gegeven, met de nadruk op mechanische dampcompressie systemen. Het verschil tussen natuurlijke en synthetische koudemiddelen wordt besproken, alsmede milieueffecten en veiligheidsaspecten van koudemiddelen. Vervolgens worden de belangrijkste koudemiddelen en eigenschappen samengevat en komen beschikbaarheid en kosten van koudemiddelen aan de orde. Druk- en temperatuurkarakteristieken van koudemiddelen, en de huidige toepassingsgebieden bij warmtepompen in relatie tot vermogen en functie worden onderzocht. Alternatieve, koudemiddelvrije concepten voor de mechanische dampcompressie worden kort besproken.

In **hoofdstuk 3** komen de drie belangrijkste natuurlijke koudemiddelen in detail aan de orde: koolwaterstoffen, kooldioxide en ammoniak.

Hoofdstuk 4 geeft een overzicht van de relevante wet- en regelgeving en bijbehorende normen. Ook wordt ingegaan op competentie en certificering voor het werken met koudemiddelen.

In **hoofdstuk 5** komen de effecten van koudemiddelkeuze op de energieprestatie aan de orde, inclusief de resultaten van simulatieberekeningen en gegevens van praktijkprojecten.

Hoofdstuk 6 geeft een overzicht van warmtepomptoepassingen en mogelijke koudemiddelopties, zowel natuurlijke als synthetische, per toepassingscategorie.

In **hoofdstuk 7** worden de conclusies en aanbevelingen samengevat.

Hoofdstuk 8 bevat de bibliografie. In de tekst van dit rapport is met een volgnummer tussen “()” de bronverwijzing opgenomen, die verwijst naar de genummerde bronnen in dit hoofdstuk 8.

Tabellen en figuren zijn genummerd met het overeenkomstige hoofdstuknummer. In de hoofdstukken wordt verwezen naar diverse genummerde **bijlagen** met verdieping en achtergrondinformatie.

2 KENMERKEN, OVERZICHT EN TOEPASSINGEN VAN KOUEMIDDELEN

2.1 INLEIDING

In dit hoofdstuk wordt toegelicht wat de relevante kenmerken van koudemiddelen zijn. Hierna volgt een overzicht van de beschikbare koudemiddelen voor warmtepompen, met de van belang zijnde kenmerken. Het onderwerp van deze studie is weliswaar “natuurlijke koudemiddelen”, maar voor deze studie is het toch zinvol om ook het hele koudemiddellandschap te schetsen. Daarom komen alle koudemiddellopties die op dit moment bekend zijn globaal aan de orde in dit hoofdstuk 2. De voornaamste kenmerken (milieueffecten, veiligheidsaspecten, beschikbaarheid, kosten en te verwachten kostenontwikkeling) worden in dit hoofdstuk globaal behandeld. Daarna volgen druk en temperatuurkarakteristieken, en de toepassingsgebieden van warmtepompen in relatie tot vermogen en functie.

In dit hoofdstuk komen de koudemiddelen aan de orde, die van toepassing zijn bij het gebruikelijke “reverse Rankine concept” voor warmtepompen. Aan het slot van dit hoofdstuk worden alternatieve, koudemiddelvrije warmtepompconcepten kort besproken, waarbij geen koudemiddel wordt gebruikt (paragraaf 2.3).

Een gedetailleerde uitwerking van een aantal specifieke aspecten van natuurlijke koudemiddelen volgt in de hoofdstukken 3 en verder.

2.2 RELEVANTE KENMERKEN VAN KOUEMIDDELEN

2.2.1 Mechanische dampcompressie en koudemiddelen

In deze studie ligt de nadruk op het conventionele reverse Rankine concept, met mechanische dampcompressie; meer dan 99 % van de apparaten voor koeling, airconditioning en warmtepompen zijn gebaseerd op dit concept. Daarbij is altijd een koudemiddel nodig dat in een gesloten kringloop verdampt en condenseert. Daarom gaat deze studie over koudemiddelen voor dit traditionele reverse Rankine concept. Deze koudemiddelen worden onderverdeeld in twee groepen: natuurlijke en synthetische. In paragraaf 2.2.2 wordt dit toegelicht. In de daaropvolgende paragrafen van dit hoofdstuk 2 worden de belangrijkste aspecten en effecten van koudemiddelen (natuurlijk en synthetisch) en hun toepassingen besproken.

2.2.2 Natuurlijke versus synthetische koudemiddelen

Tot het midden van de vorige eeuw werden er alleen natuurlijke koudemiddelen gebruikt. Er bestaat geen eenduidige en wereldwijd geaccepteerde definitie van natuurlijke koudemiddelen. In Nederland wordt in het Activiteitenbesluit als definitie

gebruikt: “de toepassing als koudemiddel van koolstofdioxide, ammoniak of koolwaterstoffen, niet zijnde een gefluoreerd broeikasgas als bedoeld in EU-Verordening nr. 517/2014 of een gereguleerde stof als bedoeld in EU-Verordening nr. 1005/2009, ozonlaag afbrekende stoffen” (9), zie ook paragraaf 4.2. Een ruimere definitie die het begrip inhoudelijk verduidelijkt, gaat uit van stoffen die van nature in grote hoeveelheden in ons ecosysteem voorkomen, waarbij de hoeveelheden die als koudemiddel worden toegepast verwaarloosbaar zijn ten opzichte van de totale hoeveelheid. Deze stoffen hebben daarmee in de praktijk bewezen dat er bij gebruik als koudemiddel geen significant nadelige milieueffecten op kunnen treden (op korte en lange termijn). CO₂, koolwaterstoffen en ammoniak worden wereldwijd gezien als de belangrijkste natuurlijke koudemiddelen en vallen binnen deze uitgebreide definitie. Deze definitie ondervangt dat grootschalige emissies van natuurlijke stoffen, zoals ammoniak in de landbouw en CO₂ als voornaamste broeikasgas, nadelige milieueffecten hebben, maar als koudemiddel goed kunnen worden toegepast, gezien de verwaarloosbaar kleine hoeveelheden als koudemiddel. Deze uitgebreide definitie ondervangt ook dat gehalogeneerde koolwaterstoffen niet als natuurlijk worden beschouwd, ondanks aanwijzingen dat minieme sporen gehalogeneerde koolwaterstoffen van natuurlijke oorsprong in de atmosfeer zouden zijn aangetroffen (met name CF₄) (10).

Naast deze natuurlijke koudemiddelen bestaan er sinds de vijftiger jaren van de vorige eeuw synthetische koudemiddelen, die door de mens via complexe scheikundige processen worden geproduceerd. Vrijwel alle synthetische koudemiddelen bevatten naast koolstof ook fluor (F-gassen). De productiesector wordt daarom vaak aangeduid met de term Fluorchemie. Naast fluor worden ook andere halogenen toegepast (chloor, broom, jood); als verzamelnaam wordt daarom ook de term gehalogeneerde koolwaterstoffen gebruikt.

Voor al deze synthetische stoffen blijft er altijd de onzekerheid of er in de toekomst, na (jaren van) gebruik en emissie, zal blijken dat er significant nadelige milieueffecten plaatsvinden, zie paragraaf 2.2.3. Bij natuurlijke koudemiddelen bestaat deze onzekerheid niet.

In bijlage 1 worden de vier generaties koudemiddelen in historisch perspectief chronologisch behandeld, en worden details over de belangrijkste koudemiddelen vermeld.

2.2.3 Milieueffecten van koudemiddelen

Alle koudemiddelen hebben effecten op het milieu. Hieronder worden de belangrijkste effecten besproken.

- **Aantasting ozonlaag**

De chloorhoudende koudemiddelen (CFK's en HCFK's) zijn de belangrijkste veroorzakers van het gat in de ozonlaag. Via een wereldwijde succesvolle aanpak

(Montreal Protocol) zijn deze stoffen op dit moment in de laatste fase van afbouw; dit is een van de succesvolle praktijkvoorbeelden van een wereldwijde actie om milieuschade tegen te gaan. Omdat de afbouw wereldwijd vrijwel voltooid is, wordt in deze studie geen aandacht meer besteed aan de ozonlaagproblematiek.

- **Aardopwarming**

CFK-, HCFK- en HFK-koudemiddelen leveren een significante bijdrage aan het wereldwijde klimaatprobleem. De GWP-waarde (Global Warming Potential) geeft de broeikasbijdrage per kilogram, ten opzichte van CO₂, het belangrijkste broeikasgas (de GWP van CO₂ is per definitie één). Tabel 2-2 geeft de GWP-waarde van de belangrijkste koudemiddelen. In bijlage 2 staan meer details over het broeikas effect van koudemiddelen.

Wereldwijd wordt gewerkt aan het verminderen van de uitstoot van broeikasgassen. Over de relatieve bijdrage van koudemiddelen ten opzichte van de totale uitstoot lopen de cijfers sterk uiteen, variërend van 7 % in 2015 tot 25 % in 2030. In ieder geval rechtvaardigt deze relatieve bijdrage een actief reductieprogramma voor koudemiddelemisaties, vastgelegd in de Europese F-gassen Verordening (2014), bindend voor alle landen van de Europese Unie. Hierin staan maatregelen om de uitstoot te verminderen van F-gassen met een GWP boven 150. Annex 1 van deze F-gassen Verordening bevat een tabel met alle F-gassen waarvoor de bepalingen van de Verordening (afbouw) gelden. Annex 2 bevat een tabel met F-gassen (merendeels met GWP kleiner dan 150) waarvoor alleen de rapportageverplichting geldt. Beneden een GWP van 150 legt de F-gassen Verordening geen reductiemaatregelen op. Hier komt mogelijk verandering in als gevolg van de revisie van deze Verordening, die op dit moment in onderhandeling is. Bijlage 2 geeft een overzicht van GWP-waarden van de belangrijkste koudemiddelen. In hoofdstuk 4 en de bijlages 8 en 9 wordt de wet- en regelgeving in detail besproken.

Directe en indirecte bijdrage aan aardopwarming

Naast de invloed van het koudemiddel (GWP, directe bijdrage) heeft het energiegebruik van een warmtepomp ook invloed op de aardopwarming (indirecte bijdrage), via de manier waarop de energie wordt geconverteerd (met een kolencentrale of windturbine).

De **directe bijdrage** aan de aardopwarming (GWP van het koudemiddel) heeft te maken met de GWP van het koudemiddel en de hoeveelheid koudemiddel die in de atmosfeer terecht komt. Lekkage kan optreden, variërend van een klein lek dat lang onopgemerkt kan blijven, tot een catastrofaal lek waarbij een installatie instantaan volledig leegloopt. Ook treedt koudemiddelekkage op bij het uitvoeren van onderhoud en reparaties (o.a. bij koudemiddelvrij maken en vacumeren). Gemiddeld is als vuistregel de jaarlijkse lekkage 1 tot 30 % van de koudemiddelvulling per jaar. In de literatuur gepresenteerde lekpercentages lopen sterk uiteen, zijn specifiek voor bepaalde toepassingen, en zijn zelden

bruikbaar om te veralgemeniseren. De grote spreiding wordt veroorzaakt door tal van factoren. Bij een standaard huishoudkoelkast, met een hermetisch gesloten koelcircuit en geoptimaliseerd ontwerp en uitvoering, hoort deze ondergrens van 1 %/jaar; bij een autoairconditioning met open compressor, vibraties en matig onderhoud, kan dit oplopen tot 30 %/jaar. Bij de meeste stationaire toepassingen in Nederland is op dit moment de lekkage naar verwachting ruim beneden de 10 %. In hoofdstuk 5 (berekeningen) wordt met 2 % jaarlijkse lekkage gerekend (voor standaard kleine huishoudelijke warmtepompen).

Bij de terugname, verwerking, recycling of vernietiging van koudemiddel komt een gedeelte vrij in de atmosfeer, dat meetelt bij de directe bijdrage. In hoofdstuk 5 (berekeningen) wordt gerekend met 20 % emissie naar de atmosfeer van de totale hoeveelheid terug te nemen koudemiddel.

De Europese F-gassen Verordening is gericht op het terugdringen van deze emissies (lekkage) en het gefaseerd terugdringen van het gebruik van koudemiddelen met een hoge GWP, zie paragraaf 4.1.

Opmerking: bij de productie van F-gassen komen ook broeikasgassen vrij; deze bijdrage wordt in het algemeen niet meegerekend bij de directe bijdrage.

De **indirecte bijdrage** hangt af van het elektriciteitsverbruik en de manier waarop de elektriciteit wordt opgewerkt. Als niet bekend is hoe de elektriciteit wordt opgewerkt, kan worden gerekend met de hoeveelheid CO₂-equivalent per kWh die voor ieder land wordt gepubliceerd (nationale elektriciteitsfactor). In hoofdstuk 5 komen de energieprestaties van warmtepompen in relatie tot de koudemiddelkeuze aan de orde.

De **totale bijdrage** is de som van de directe en indirecte bijdrage. Sinds 1990 worden methodes ontwikkeld en toegepast om deze beide invloeden te combineren. Het meest bekend is de TEWI (Total Equivalent Warming Impact) methode, naast de LCA (Life Cycle Analysis). De uitkomst van dergelijke berekeningen zijn dermate afhankelijk van de aannames en methodedetails, dat de berekende absolute waarden weinig betekenis hebben; vergelijkende berekeningen geven wel inzicht in gevoeligheden en relatieve effecten.

In hoofdstuk 5 wordt deze TEWI-benadering gebruikt bij de vergelijking van de prestaties van diverse koudemiddelen in warmtepompen.

- **Afbraakproducten van F-gassen (TFA)**

HFK's en HFO's worden in het milieu afgebroken tot HF, carbonylfluoride en HCl en in zogenaamde korte keten fluorcarbonsuren. Van deze laatste zuren is Trifluorazijnzuur (TFA) de belangrijkste. Deze stof is toxisch, hoopt zich op in waterige milieus en is biologisch niet afbreekbaar. Op basis van de lange-termijn risico's van TFA, is er wereldwijd bezorgdheid over de emissie van HFK en HFO-koudemiddelen naar het milieu. De fabrikanten van deze stoffen, en veel producenten van apparaten met deze stoffen, betwijfelen dat er een milieuprobleem met TFA's als afbraakproduct van koudemiddelen kan optreden. In bijlage 3 worden meer details over TFA's gegeven.

- **PFAS**
Vijf Europese landen, waaronder Nederland, hebben medio 2020 het verzoek ingediend om de toepassing van per- en polyfluoroalkyl stoffen (PFAS) in Europa af te bouwen. HFK's (en HFO's) vallen onder deze categorie stoffen. In bijlage 3 wordt nader ingegaan op PFAS.
- **Verbrandingsproducten van F-gassen (HF)**
Bij de verbranding van F-gassen ontstaan restproducten. Met name fosgeen en waterstoffluoride (HF) worden daarbij genoemd, maar harde en consistente gegevens zijn niet beschikbaar. In bijlage 3 wordt nader ingegaan op HF als restproduct bij verbranding.
- **Onzekerheden bij milieueffecten van F-gassen**
Uit bovenstaande punten blijkt dat er onzekerheden zijn over de milieueffecten van F-gassen (HFK's en HFO's). Indien in de toekomst blijkt dat milieueffecten ontoelaatbaar zijn, dan zijn corrigerende ingrepen om reeds ontstane en toekomstige milieuschade te beperken uiterst gecompliceerd. Dit is in het verleden al twee keer gebleken, met de CFK's als hoofdveroorzaker van het gat in de ozonlaag, en met het antwoord daarop, de HFK's, met, naar later duidelijk werd, hun grote bijdrage per kilogram aan de opwarming van de aarde. Die onzekerheid over nadelige milieueffecten is de hoofdreden voor de aanbeveling om terughoudend te zijn met de toepassing van synthetische koudemiddelen (HFK, HFO), zeker in die gevallen waar een natuurlijk alternatief zonder nadelen kan worden toegepast. Bij natuurlijke koudemiddelen bestaat deze onzekerheid niet, zoals uitgelegd in paragraaf 2.2.2 en bijlage 1, 2 en 3.

2.2.4 Veiligheidsaspecten van koudemiddelen

Brandbaarheid en giftigheid

De afgelopen 60 jaar zijn we gewend geraakt aan, en verweend met, een breed scala aan niet-brandbare en laag-giftige koudemiddelen in veiligheidsklasse A1 (de bekende CFK's, HCFK's en HFK's). Vanwege de negatieve milieueffecten van deze F-gassen (ozonlaag aantasting, aardopwarming) worden we gedwongen om in de toekomst met enkel brandbare koudemiddelen om te gaan, met als enige uitzondering het niet-brandbare CO₂. De chemische industrie zet zich in om mengsels te ontwikkelen die niet toxisch en niet brandbaar zijn, en een verwaarloosbare GWP hebben, maar er wordt niet verwacht dat dit binnen afzienbare tijd tot praktische resultaten voor een breed toepassingsgebied leidt.

Brandbaarheid is gemeengoed in onze dagelijkse omgeving: koken, verwarmen en rijden probleemloos op brandbare gassen, ook als er goede niet-brandbare alternatieven zijn. Brandbaarheid is vanuit deze analogie geen reden om een koudemiddel categorisch af te wijzen. Wel moet bij de toepassing van brandbare koudemiddelen rekening worden gehouden met de hieraan gerelateerde veiligheidsaspecten en bijbehorende regelgeving.

Hierbij zijn met name de twee Europese ATEX (ATmosphère EXplosible) richtlijnen van belang. Deze hebben betrekking op alle situaties waar een kans bestaat op gas- en stofontploffingsgevaar. Bedrijven en organisaties die werken in explosiegevaarlijke omgevingen dienen maatregelen te nemen zodat werknemers op een veilige manier hun werkzaamheden kunnen uitvoeren.

Door de koeltechnische sector is in de jaren 60 een wereldwijde veiligheidsclassificatie ontwikkeld, met brandbaarheidsklassen 1, 2 en 3. Deze is met de introductie van de brandbare HFO's aangepast, met het doel om de toepassingsmogelijkheden van deze HFO's te verruimen. Er zijn criteria ontwikkeld die HFO's kunnen onderscheiden van andere brandbare koudemiddelen, met name de koolwaterstoffen, resulterend in een nieuwe brandbaarheidsklasse 2L.

Voor de giftigheid bestaan twee klassen: A betekent laag giftig (vrijwel alle praktisch bruikbare koudemiddelen) en B betekent hoog giftig (ammoniak). Bijlage 4 geeft meer details over deze veiligheidsclassificatie. In tabel 2-1 is de huidige veiligheidsclassificatie samengevat.

<i>Brandbaarheid</i> ▼	<i>Koudemiddel classificatie</i>	
<i>Sterk brandbaar</i>	A3	B3
<i>Brandbaar</i>	A2	B2
<i>Matig brandbaar</i>	A2L	B2L
<i>Onbrandbaar</i>	A1	B1
<i>Giftigheid</i> ▶	<i>Lage giftigheid</i>	<i>Hoge giftigheid</i>

Tabel 2-1: veiligheidsclassificatie voor koudemiddelen (ISO 817, EN 378)

Naast brandbaarheid bestaat het begrip explosiviteit. Beide begrippen worden vaak door elkaar gebruikt. In deze studie wordt volstaan met de term brandbaarheid, om verwarring in terminologie te voorkomen.

Een belangrijke veiligheidsparameter is de onderste ontstekingsgrens (Lower Flammability Limit LFL of Lower Explosion Limit LEL), de minimale concentratie van koudemiddel die in staat is tot vlamvoortplanting binnen een homogeen mengsel van koudemiddel en lucht. De meeste veiligheidsmaatregelen zijn erop gericht om te voorkomen dat een concentratie boven deze LFL-grens kan ontstaan, en om te voorkomen dat er gelijktijdig een ontstekingsbron aanwezig is.

ADR en CLP

Voor transport, verpakking en etikettering van gevaarlijke stoffen (Europese overeenkomst voor het internationale vervoer van gevaarlijke goederen over de weg ADR 2019, en EU Verordening 1272/2008 (met wijziging 2019) betreffende de indeling,

etikettering en verpakking van stoffen en mengsels CLP) bestaan wettelijk verplichte classificaties die niet consistent zijn met de koudemiddelclassificatie van tabel 2-1. Het door de leverancier meegeleverde veiligheidsblad van een koudemiddel (Material Safety Data Sheet MSDS, zie voorbeeld (11)) geeft hier informatie over, zie bijlage 4.

Drukveiligheid

Naast toxiciteit en brandbaarheid zijn andere veiligheidsaspecten van belang. Met name de drukveiligheid speelt een rol. De classificatie in de Richtlijn Drukapparatuur (PED) in twee stofgroepen (gevaarlijk en ongevaarlijk) leidt tot de volgende indeling in relatie tot de koudemiddelclassificatie van tabel 2-1:

- PED Stofgroep 1 (gevaarlijk): alle koudemiddelen met toxiciteit B en brandbaarheid 2L, 2 of 3 (o.a. R32, R1234yf, ammoniak, koolwaterstoffen).
- PED Stofgroep 2 (ongevaarlijk): alle koudemiddelen met toxiciteit A en brandbaarheid 1 (o.a. R134a, R410A, kooldioxide).

Er is één inconsistentie: R1234ze(E) is volgens tabel 2-1 geclassificeerd als A2L (matig brandbaar), maar voor de PED als ongevaarlijk geclassificeerd (stofgroep 2); dit heeft te maken met verschil in temperatuur waarbij de brandbaarheid wordt bepaald.

Drukaspecten worden in paragraaf 2.2.6 behandeld.

Details over de veiligheidsaspecten van koudemiddelen, classificatie en terminologie staan in bijlage 4.

Wet- en regelgeving en bijbehorende (veiligheids)normen komen aan de orde in hoofdstuk 4; bijlagen 8 en 9 geven details over de wet- en regelgeving.

2.2.5 De belangrijkste koudemiddelen en eigenschappen samengevat

In onderstaande overzichtstabel 2-2 worden de belangrijkste koudemiddelen met hun relevante kenmerken samengevat, gevolgd door een uitleg van de in de tabel gebruikte begrippen.

Naast de in deze tabel opgenomen koudemiddelen zijn er nog tal van mengsels met HFO's in ontwikkeling, maar deze zijn op dit moment (begin 2021) nog niet commercieel verkrijgbaar of hebben zich nog niet bewezen. Daarom zijn die niet in deze overzichtstabel opgenomen.

Type	R-nummer	Chemie	ODP	GWP	Veiligheids klasse
Synthetisch: CFK & HCFC					
	R12	met chloor, fluor en koolstof	1	10900	A1
	R22	met chloor, fluor, waterstof en koolstof	0,055	1810	A1
Synthetisch: HFK en mengsels met HFK (GWP>150)					
	R134a	met fluor, waterstof en koolstof	0	1430	A1
	R32		0	675	A2L
	R410A	mengsel met hoge GWP, met "glide"	0	2088	A1
	R507A	mengsel met hoge GWP, zonder "glide"	0	3985	A1
	R452B, R454B	Mengsels met lagere GWP, met "glide"	0	676 467	A2L
Synthetisch: HFO en mengsels met HFO (GWP<150)					
	R1234yf	met fluor, waterstof en koolstof; dubbele binding	0	4	A2L
	R1234ze (E)		0	7	A2L
	R454C	Mengsels met zeer lage GWP met "glide"	0	146	A2L
Natuurlijk					
Ammoniak	R717	NH ₃	0	0	B2L
Kooldioxide	R744	CO ₂	0	1	A1
Koolwaterstoff en	R290 R600a R1270	Met waterstof en koolstof (C ₃ H ₈ , C ₄ H ₁₀ , C ₃ H ₆)	0	2-6	A3

Tabel 2-2: overzicht van de belangrijkste koudemiddelen (volgens EN 378-1:2016 Annex E)

Toelichting bij de begrippen in tabel 2-2.

- **Type:** hoofdgroepen op basis van eigenschappen en chemie; de synthetische koudemiddelen ven -mengsels zijn onderverdeeld in met/zonder ozonaantasting ODP, en met broeikasbijdrage GWP >150 dan wel GWP<150; de grens van GWP=150 is ingegeven vanuit de huidige EU F-gassen

verordening, waarin de afbouwmaatregelen hoofdzakelijk betrokken zijn op de F-gassen en -mengsels met GWP>150.

- **R-nummer:** internationaal gebruikte code voor koudemiddelen.
- **Chemie:** de atomen in het molecuul c.q. de mengseleigenschappen; HFO's zijn HFK's met een dubbele binding, een techniek om een molecuul minder stabiel te maken; minder stabiel betekent lagere GWP, maar meestal ook toenemende brandbaarheid.
- **Mengsel** met /zonder "glide":
 - o een "(temperature) glide", of temperatuurtraject, betekent dat verdamping of condensatie van een mengsel plaatsvindt bij een glijdende temperatuur (bij constante druk); deze "glide" bedraagt voor koudemiddelmengsels meestal 1 tot 10 K;
 - o een azeotroop mengsel van stoffen heeft een specifieke concentratie waarbij het mengsel zich gedraagt als een enkelvoudige stof, en dus verdampt of condenseert bij een constante temperatuur en druk; het R-nummer vangt aan met een 5, soms gevolgd door een hoofdletter voor een specifieke mengverhouding binnen de azeotrope condities;
 - o een niet-azeotroop (of zeotroop) mengsel van stoffen heeft geen eenduidige relatie tussen druk en temperatuur bij verdampen en condenseren; hier treedt dus de "glide" op; het R-nummer vangt aan met een 4, met hoofdlettertoevoeging voor een specifieke mengverhouding.
- **ODP:** ozonlaag aantastend vermogen; per definitie 1 voor CFK R11
- **GWP:** bijdrage aan aardopwarming ten opzichte van CO₂ (per definitie 1 voor CO₂), op basis van effect over 100 jaar; meestal wordt gerefereerd aan de publicaties in IPCC AR4 en AR5.
- **Veiligheidsklasse:** classificatie als koudemiddel volgens ISO 817/EN378: A=laag-giftig, B=giftig; 1=onbrandbaar, 2L=matig brandbaar, 2=brandbaar, 3=sterk brandbaar.

Meer details zijn te vinden in bijlage 1, 2, 4 en 8.

2.2.6 Beschikbaarheid en kosten van koudemiddelen

Het aantal op de markt aangeboden koudemiddelen neemt nog steeds toe, met name de veelheid aan mengsels met HFO's als een van de componenten, waarmee wordt gepoogd om directe vervangers met een lagere GWP te creëren voor specifieke koudemiddelen en toepassingen (drop-in). Op dit moment zijn er ruim 60 verschillende koudemiddelen en -mengsels op de markt. Het aanbod wijzigt voortdurend, waardoor deze studie slechts een onvolledige momentopname kan geven.

De informatie over beschikbaarheid en kosten in deze paragraaf is gebaseerd op gesprekken met leveranciers/distributeurs van koudemiddelen en installateurs van koelinstallaties en warmtepompen, en heeft betrekking op de situatie in Nederland.

Beschikbaarheid

- De belangrijkste natuurlijke koudemiddelen (propaan, isobutaan, CO₂ en ammoniak) zijn ruim beschikbaar; het is van groot belang dat alleen gegarandeerde koudemiddelkwaliteit (bij voorkeur met R-nummer, maar in ieder geval met het juiste CAS-nummer) wordt gebruikt, en geen gassen die voor andere doeleinden worden aangeboden.
De verwachte gestage groei voor alle natuurlijke koudemiddelen zal geen leveringsprobleem voor de toekomst veroorzaken, gezien de beperkte hoeveelheid als koudemiddel, ten opzichte van andere toepassingsgebieden van deze stoffen. De stabiele markt voor natuurlijke koudemiddelen is een groot voordeel ten opzichte van de verwachte al dan niet incidentele schaarste op de markt bij de F-gassen (HFK's, HFO's).
- Traditionele HFK's met GWP > 750 zijn op dit moment nog goed verkrijgbaar; per 1 januari 2021 leidt de quotaregeling naar verwachting tot een 18% afname van het aanbod ten opzichte van 2020, wat vooral in de prijs tot uiting zal komen.
- HFK's met GWP tussen 150 en 700, met name R32, zijn ruim beschikbaar en er wordt door de leveranciers geen leveringsprobleem voor de toekomst voorzien; het nieuwe koudemiddel R515B met een GWP van 293, als een van de weinigen met lager GWP ingedeeld als onbrandbaar en laag-giftig (A1), is voorlopig nog beperkt leverbaar;
- Meerdere HFO's en mengsels met GWP < 150 zijn ruim beschikbaar en er wordt door de leveranciers geen leveringsprobleem voor de toekomst voorzien; daarnaast zijn er mengsels ontwikkeld die op dit moment (begin 2021) nog niet of beperkt verkrijgbaar zijn, en met name worden gebruikt voor testdoeleinden.

Terugname, recycling, regenerering, vernietiging en illegale handel van F-gassen

- Een belangrijke maar onzekere factor voor de beschikbaarheid van F-gassen is de hoeveelheid hergebruikt koudemiddel. De Europese F-gassen verordening eist dat alle gebruikte F-gassen worden teruggewonnen (recovered) en worden gerecycled (hergebruikt zonder opwerking tot nieuwspecificatie), geregenereerd (reclaimed, opgewerkt tot nieuwe specificatie) of professioneel vernietigd. Dat geldt voor koudemiddel dat gedurende de levensduur van de installatie niet meer aan de benodigde kwaliteit voldoet, en voor de koudemiddelinhoud bij ontmanteling van de installatie aan het eind van de levensduur. Het gedeelte dat daadwerkelijk kan worden hergebruikt is onzeker en kan in de toekomst afnemen als gevolg van de toenemende hoeveelheid mengsels en de logistieke beperkingen bij gescheiden terugname.
- Er wordt veel gepubliceerd over illegale handel in koudemiddelen in de EU, onder andere in (12), onderdeel van het Dossier illegale koudemiddelen. Een van de problemen daarbij is dat de kwaliteit van illegaal koudemiddel niet is gegarandeerd, wat tot veiligheidsrisico's en prestatieproblemen kan leiden. Er wordt verwacht dat dit probleem niet in omvang afneemt, zeker niet wanneer schaarste en prijsverhoging toenemen. Handhaving in Nederland ligt bij de Inspectie voor de Leefomgeving en Transport ILT.
- Afblazen van F-gassen in de atmosfeer is verboden.

- Voor natuurlijke koudemiddelen is gecontroleerd en veilig afblazen mogelijk.
- Terugname en gecontroleerde vernietiging van natuurlijke koudemiddelen (verbranding, lokaal of bij een gespecialiseerde verbrandingsinstallatie) is zinvol bij grote hoeveelheden, of wanneer veilig afblazen praktisch niet mogelijk is.

Kosten en te verwachten kostenontwikkeling

De kosten voor het koudemiddel zijn zelden een doorslaggevend argument voor de keuze van een koudemiddel, omdat de kosten voor eerste vulling en periodieke navulling relatief beperkt zijn ten opzichte van de overige kosten. Bij een relatief lekdichte installatie zijn deze kosten beperkt tot circa 1 % van de totale levensduurkosten; bij een lekkende installatie (slechte kwaliteit, slecht onderhoud) kan dit oplopen tot meer dan 20 %. Ondanks het beperkte belang worden de kostenaspecten van koudemiddelen toch vaak benadrukt bij de keuze van het type koudemiddel.

De volgende algemene kostenoverwegingen zijn van toepassing.

- Kosten van de natuurlijke koudemiddelen zijn zeer stabiel en relatief laag.
- Kosten van F-gassen fluctueren sterk en zijn dagprijzen; prijzen zijn sterk afhankelijk van leverancier-afnemer relaties, omvang en aard van leveringen. Leveranciers, distributeurs en installateurs kunnen niet voorspellen hoe de prijsontwikkelingen de komende jaren zullen zijn. Als historisch voorbeeld: in 2017 en 2018 zijn voor sommige F-gassen prijzen met een factor 10 gestegen, maar in 2020 weer sterk gedaald tot dicht bij de oorspronkelijke prijs. Vanwege de toenemende productie- en importbeperkingen (GWP-gewogen quotaregeling volgens de Europese F-gassen Verordening, zie paragraaf 4.1) zal het aanbod van de hoog-GWP F-gassen de komende jaren aanzienlijk verminderen, wat een sterk effect heeft op de prijs (marktmechanisme: hoe schaarser, hoe duurder). Er wordt daarom verwacht dat F-gassen met hoge GWP de komende jaren wereldwijd sterk in prijs zullen stijgen, omdat de transitie naar laag-GWP alternatieven naar verwachting op wereldschaal zal achterblijven bij de wettelijk gereguleerde afname van het aanbod van hoog-GWP koudemiddelen.
- HFK's met lagere GWP worden wellicht ook duurder vanwege toenemende vraag en bijkomende (tijdelijke) schaarste.
- Omdat de markt voor F-gassen beheerst wordt door een zeer klein aantal grote multinationals, kunnen zij met prijspolitiek de koudemiddelkeuze en marktprijzen zeer doelgericht beïnvloeden.
- Indicatieve kosten (momentopname eind 2020, in €/kg) zijn opgenomen in tabel 2-3. Deze tabel is gebaseerd op prijzen per kilogram; dit is voor vergelijkingsdoeleinden niet helemaal correct, omdat de hoeveelheid benodigd koudemiddel in een warmtepomp voornamelijk afhankelijk is van de condensatiewarmte per kilogram (verdampingswarmte bij een koelinstallatie). De genoemde prijzen zijn alleen bedoeld om een globale indruk te krijgen van absolute en relatieve prijzen, en zijn gebaseerd op gesprekken met leveranciers/distributeurs van koudemiddelen en installateurs van koelinstallaties en warmtepompen in Nederland.

Koudemiddel	Prijs €/kg
CO ₂ (R744)	2-5
Propaan/isobutaan (R290/R600a)	7-9
NH ₃ (R717)	4-6
R32	20-35
R410A	20-45
R134a	15-50
R404A	50-70
R1234yf	80-110

Tabel 2-3: kostenindicatie koudemiddelen (stand eind 2020, informatie van leveranciers/distributeurs en installateurs)

In hoofdstuk 6 wordt ingegaan op de geschiktheid van diverse koudemiddelen voor warmtepomptoepassingen.

2.2.7 Druk- en temperatuurkarakteristieken van koudemiddelen

Tal van parameters zijn van belang bij de keuze van het koudemiddel voor een specifieke toepassing.

Ieder koudemiddel en -mengsel heeft verschillende thermodynamische en (thermo)fysische eigenschappen. Deze eigenschappen zijn merendeels onderling afhankelijk, en bepalen uiteindelijk de (technische) geschiktheid van een specifiek koudemiddel voor een specifieke toepassing. In veel gevallen kan één parameter (bijvoorbeeld de compressie eindtemperatuur) bepalen of een koudemiddel-toepassing combinatie technisch mogelijk is. In deze studie kan dit complexe gebied niet volledig worden behandeld. In hoofdstuk 3 komt dit in meer detail aan de orde voor de drie belangrijkste natuurlijke koudemiddelen.

In deze paragraaf komt een van de belangrijkste parameters bij de keuze van een koudemiddel aan de orde: de relatie tussen druk en temperatuur.

Omdat het algemeen toegepaste mechanisch dampcompressieconcept werkt met koudemiddelverdamping op lage temperatuur en condensatie op hogere temperatuur, zijn de bijbehorende absolute drukken, het drukverschil en de drukverhouding erg belangrijk. Voor enkelvoudige koudemiddelen is de relatie druk-temperatuur bij verdamping en condensatie eenduidig (zoals water bij 1 bar(a) altijd verdampt bij 100 °C). Datzelfde geldt voor azeotrope mengsels (alle koudemiddelen met een R-nummer in de 500 serie, zoals R507) die zich gedragen als een enkelvoudige stof; voor zeotrope (niet-azeotrope) mengsels (alle koudemiddelen met een R-nummer in de 400 serie, zoals R410A) geldt dit niet; daarbij treedt de beruchte “temperatuur-glide” op die, afhankelijk van het soort toepassing en het ontwerp, voordelig of nadelig is. Zie ook de toelichting bij tabel 2-2 en de berekeningen in hoofdstuk 5.

Absolute druk, drukverschil en drukverhouding

Bij de gewenste verdampings- en condensatietemperatuur hoort dus een druk die eenduidig is voor een specifiek koudemiddel (als voorbeeld: propaan condenseert op 40 °C altijd bij een druk van 13,7 bar(a). Omdat het koudemiddel in een gesloten circuit circuleert, worden altijd absolute drukken gebruikt, en niet de relatieve druk ten opzichte van de omgeving (bar(g), met "g" van "gauge", ofwel meterdruk; bar(a) is gelijk aan bar(g) plus 1).

Er worden veel stellige uitspraken gedaan over gewenste en toelaatbare drukken in koelinstallaties en warmtepompen, maar we leren uit de recente historie dat inzichten met betrekking tot de gewenste en toeplaatbare drukken voor koudemiddelen in de loop van de jaren sterk kunnen wijzigen. Een paar voorbeelden hiervan:

- decennialang waren drukken boven de 25 bar(a) niet bespreekbaar; het pionieren met CO₂ als koudemiddel (eerst alleen bij zeer lage temperaturen, met bijbehorende lagere drukken, na korte tijd ook bij hogere temperaturen/drukken) leidde al snel tot nieuwe componenten, met name compressoren speciaal geschikt voor CO₂, die veel hogere drukken, drukverschillen en drukverhoudingen aankunnen, oplopend tot 80 bar(a); vervolgens leidde deze componentontwikkeling tot de mogelijkheid om ook ammoniak bij aanzienlijk hogere temperatuur/druk te condenseren, waarmee de tegenwoordig veel toegepaste hoge-temperatuur ammoniak warmtepomp praktisch mogelijk werd;
- volgens velen moet de absolute druk binnen het koudemiddelcircuit altijd boven de atmosferische druk (1 bar(a)) blijven, waardoor in geval van een lek er nooit lucht en water(damp) in het circuit kan komen; in de loop van de jaren werd dit steeds meer losgelaten, zoals de huishoudelijke vrieskist met R134a of isobutaan, waarbij de verdampingsdruk aanzienlijk onder 1 bar(a) ligt;
- het meest extreme voorbeeld is de al decennia lang op de markt verkrijgbare absorptie-airconditioner (chiller) met lithiumbromide als absorbers en water als het koudemiddel; het hele koudemiddelcircuit is daarmee diep onder atmosferische druk ("vacuüm"), maar het concept werkt prima, al zijn de ontwerpuitdagingen bij hoge onderdruk aanzienlijk.

Vanwege deze historische ervaring wordt onderscheid gemaakt tussen de korte termijn (0-3 jaar) en de langere termijn.

Korte termijn (0-3 jaar)

Voor de korte termijn is bepalend welke warmtepompcomponenten commercieel verkrijgbaar zijn voor een toepassing, en voor welke koudemiddelen en condities (temperaturen, drukken) deze door de leverancier zijn vrijgegeven (conform specificaties). Zodra er buiten deze specificaties wordt gewerkt, vervalt de verantwoordelijkheid (en garantie) van de componentleverancier; een systeembouwer of installateur kan dit risico nemen, maar zal dat zelden doen, behoudens voor tests, demo's en pilots.

Soms kan het ontbreken van een kleine, betaalbare component bepalend zijn voor het op de markt kunnen brengen van een specifieke warmtepomp. Dat blijkt meestal pas in

de fase van het detailontwerp, waar in deze studie niet op in kan worden gegaan. Wat wel wordt besproken is de beschikbaarheid van geschikte compressoren, het kloppende hart van iedere warmtepomp.

Compressorleveranciers leveren hun product met veel informatie over de toepassingsmogelijkheden en -grenzen, met name de drukken en temperaturen.

Figuur 2-1 geeft een voorbeeld hiervan. De werkcondities van deze compressor, werkend met HFK-koudemiddel R410A, moeten dus onder alle omstandigheden binnen het aangegeven gebied blijven. De complexe vorm van deze “werkingsenveloppe” wordt bepaald door de constructiedetails, en toelaatbare drukken, drukverschillen en drukverhoudingen.

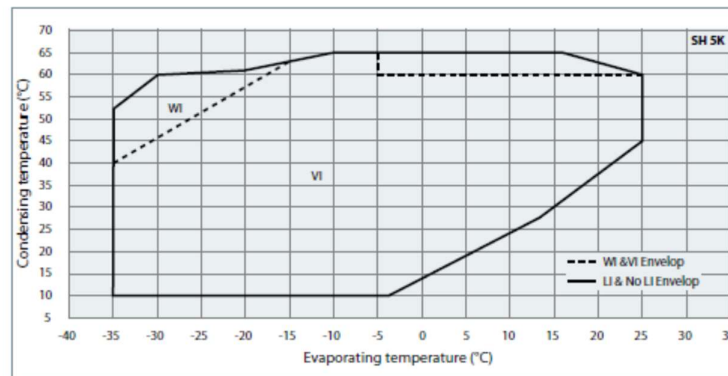
Requirement

R The operating envelope for PSH065/105 compressors is given in the figures below and guarantees reliable operation of the compressor for steady-state and transient operation.

Steady-state operation envelope is valid for a suction superheat within 5K range at nominal voltage.

R In every instance, the discharge temperature must be kept below 135°C

operating envelop PSH065



Figuur 2-1: voorbeeld uit Danfoss compressordocumentatie voor warmtepomptoepassingen met R410A

Langere termijn (> 3 jaar)

Voor de langere termijn is de verwachting gerechtvaardigd dat componenten worden ontwikkeld en vrijgegeven voor aantrekkelijke markttoepassingen, waarbij technisch en economisch veel meer mogelijk is dan vaak wordt beweerd (met gevestigde commerciële belangen op de achtergrond), zoals blijkt uit eerdergenoemde voorbeelden.

Voor de langere termijn kan daarom op basis van de thermodynamische gegevens van koudemiddelen worden gezocht naar de hoogste COP. Daarbij hoeven de huidige praktische grenzen voor druk en temperatuur bij huidige componenten niet beperkend te zijn, omdat de beschikbaarheid van componenten zich zal aanpassen aan de marktbehoefte, en technologische innovaties kunnen plaatsvinden.

In de hoofdstukken 5 en 6 wordt verder uitgewerkt welke koudemiddelen het meest aantrekkelijk zijn voor warmtepompen, met inachtneming van de beschikbaarheid van componenten, met name compressoren, in relatie tot het koudemiddel en de specifieke toepassingsdetails.

In bijlage 5 wordt in detail uitgelegd wat de invloed van druk- en temperatuurkarakteristieken op het vermogen en de COP is.

Conclusies ten aanzien van druk- en temperatuurkarakteristieken

In het algemeen kan worden gesteld dat de optredende drukken bij het gebruik van natuurlijke koudemiddelen van dezelfde orde grootte zijn als bij het gebruik van synthetische koudemiddelen. De enige uitzondering is kooldioxide (R744), waarbij de drukken meestal significant hoger zijn; de te selecteren componenten moeten daarop afgestemd zijn.

2.3 KOUEMIDDELVRIJE EN MINDER GEBRUIKELIJKE CONCEPTEN

In deze studie ligt de nadruk op het conventionele reverse Rankine concept, met mechanische dampcompressie; meer dan 99 % van de apparaten voor koeling, airconditioning en warmtepompen zijn gebaseerd op dit concept. Daarbij is altijd een koudemiddel nodig dat in een gesloten kringloop verdampt en condenseert. Daarom gaat deze studie over koudemiddelen voor het traditionele reverse Rankine concept. Er zijn tal van alternatieve concepten mogelijk waar geen verdampend/condenserend koudemiddel voor nodig is. Deze alternatieve concepten hebben in veel gevallen specifieke voordelen ten opzichte van het traditionele "reverse Rankine" concept, maar zij hebben ook een nauwelijks te overbruggen ontwikkelingsachterstand en moeten daardoor opboksen tegen het conventionele reverse Rankine concept, met afgeschreven ontwikkelingskosten en kostenvoordelen van massaproductie. In tabel 2-4 worden koudemiddelvrije en minder gebruikelijke concepten opgesomd die op dit moment in Nederland in ontwikkeling of marktrijp zijn, veelal met overheidssteun. In deze tabel is ook een oordeel over de technologievolwassenheid (Technology Readiness Level, TRL) opgenomen. In (13) en in bijlage 6 worden deze alternatieve concepten in detail besproken.

Concept	Bedrijf/organisatie in Nederland	TRL (indicatief)
Water in mechanische compressiekringloop	eChiller	7-9
Aardgasgestookte adsorptie warmtepomp	Cooll	8
Absorptie	Diverse	5-9
verwarming en vrije koeling met bodemenergie	Diverse	5-9
Thermo-akoestisch	Blue Heart Energy SoundEnergy	7
Luchtcyclus (Air cycle)	Tarnoc	7
Adiabatische en dauwpuntskoeling	Diverse	7-9
Stirling	TU Twente	5-9
Magneto-calorisch	TU Delft	4-6

Tabel 2-4: koudemiddelvrije en minder gebruikelijke concepten en hun technologievolwassenheid (Technology Readiness Level, TRL (14), met als uiterste niveaus: TRL 1 = basisprincipe bekend en TRL 9 = bewezen onder praktijkomstandigheden, competitief te produceren)

Strikt genomen zijn adsorptie en absorptie niet koudemiddelvrij; er wordt een verdampend en condenserend koudemiddel toegepast, vergelijkbaar met een koudemiddel in het conventionele reverse Rankine concept. Omdat de “thermische compressor” (met adsorbent of absorbent, aangedreven met warmte) zo afwijkend is van de gebruikelijke mechanische compressor, zijn deze concepten toch in deze paragraaf opgenomen.

Uit alle informatie met betrekking tot deze alternatieve concepten wordt geconcludeerd dat er goede voortgang wordt geboekt met de (door)ontwikkeling van diverse koudemiddelvrije en minder gebruikelijke concepten, waarbij op de korte termijn (1-3 jaar) de praktijktoepassingen naar verwachting nog beperkt zullen zijn. Op de langere termijn (4-10 jaar) is de kans reëel dat een aantal concepten succesvol in specifieke toepassingsmarkten (vaak niches) zullen penetreren.

Deze koudemiddelvrije warmtepompconcepten hebben significante ondersteuning nodig om ontwikkeling en (grootschalige) marktintroductie te versnellen, vanwege de achterstand ten opzichte van de volledig uitontwikkelde en ingeburgerde synthetische koudemiddelen met bijbehorende toepassingen.

3 NATUURLIJKE KOUEMIDDELEN IN DETAIL

In paragraaf 2.2 is het hele koudemiddellandschap besproken. In dit hoofdstuk 3 worden de drie belangrijkste natuurlijke koudemiddelen in detail besproken: koolwaterstoffen, kooldioxide en ammoniak.

3.1 KOOLWATERSTOFFEN

Koolwaterstoffen zijn al vanaf de uitvinding van mechanische koeling populaire koudemiddelen. Voor het merendeel van de toepassingen zijn ze koeltechnisch superieur en energie-efficiënt. Vanwege de sterke brandbaarheid zijn er veiligheidsmaatregelen nodig en zijn er beperkingen voor de maximale hoeveelheid koudemiddel in de installatie, of voor specifieke toepassingen. Er is behoefte aan heldere wetgeving en normen die aangeven op welke manier de veiligheid moet worden gewaarborgd, maar op dit moment zijn die niet beschikbaar. De huidige wetgeving is generiek, en de huidige normen zijn onduidelijk, verouderd, inconsistent of in revisie.

Als voorbeeld, wordt er op dit moment in IEC, ISO en CEN gewerkt aan conditionele verruiming van een oude grens van 150 gram brandbaar koudemiddel, die wordt gehanteerd voor het kunnen toepassen van hermetisch gesloten apparaten op iedere willekeurige locatie, zonder aanvullende veiligheidsmaatregelen. Deze grens wordt naar verwachting voor koolwaterstoffen verruimd tot 500 gram, met inachtneming van bepaalde veiligheidsmaatregelen.

Een belangrijke innovatie op dit gebied is onderzoek en ontwikkeling van warmtepompen met een zo laag mogelijke koudemiddel-inhoud (15).

Omdat er zoveel verschillende uitvoeringsvormen en opstellingsdetails van warmtepompen bestaan, is een simplistische benadering met veilige maximale koudemiddel vulhoeveelheden (zoals in veel huidige normen het geval is), niet zinvol en onwenselijk. Voor het voldoen aan de essentiële eisen van EU Richtlijnen (CE-markering), overige wetgeving en productaansprakelijkheid kan daarom meestal niet worden teruggevallen op normen, maar moet aan de hand van specifieke risicobeoordelingen conformiteit worden aangetoond. Dit geldt overigens niet alleen voor koolwaterstoffen, maar voor alle koudemiddelen. In hoofdstuk 4 komt dit in detail aan de orde.

Tabel 3-1 geeft een overzicht van de koolwaterstoffen die in aanmerking komen als koudemiddel in warmtepompen. Al deze koolwaterstoffen zijn ingedeeld in veiligheidsklasse A3 (sterk brandbaar, zie tabel 2-1).

Naam	R-nummer	Atmosferisch kookpunt (°C)	Druk bij 25 °C (bara)	Opmerkingen
Ethaan	R170	-89	24	Zelden toegepast, hoge druk
Propaan	R290	-42	9,6	Meest toegepast
Propeen (propyleen)	R1270	-48	11,5	Nog weinig toegepast, reukwaarschuwing
Butaan	R600	0	2,5	Hoge temperatuur warmtepompen
Isobutaan	R600a	-12	3,5	Geschikt voor kleine apparatuur
n-Pentaaan	R601	36	0,6	Hoge temperatuur warmtepompen
Propaene	R433A	-44	10,3	Mengsel van R290 en R1270, reukwaarschuwing

Tabel 3-1: overzicht van koolwaterstof-koudemiddelen voor warmtepompen

Over de verschillende koolwaterstof koudemiddelen valt het volgende te zeggen.

- De meest toegepaste koolwaterstoffen **lijken qua eigenschappen sterk op de conventionele (H)CFK's en HFK's en HFO's**, afgezien van de brandbaarheid. Oliekeuze is zelden een probleem.
- **Propaan (R290) wordt al lange tijd het meest gebruikt** in alle soorten toepassingen, en lijkt sterk op HCFK R22. Voor R290 zijn dan ook de meeste componenten goed beschikbaar. Het merendeel van de **R290-systemen heeft vergelijkbare of betere prestaties (capaciteit, COP)** dan de overeenkomstige HFK's of HFO's.
- **Isobutaan (R600a) is de huidige standaard voor kleine hermetische systemen** (huishoudkoelkasten en-vriezers, warmtepompdrogers), waardoor kleine componenten goed(koop) beschikbaar zijn; de eigenschappen lijken sterk op HFK R134a en CFK R12; de drukken zijn bij R600a lager dan bij R290, maar de volumetrische koelcapaciteit is ook lager, waardoor grotere componenten moeten worden toegepast, wat prijsverhogend kan werken, zeker bij grotere systemen. **De prestaties (COP) zijn in het algemeen goed**, zeker bij warmtepompen voor hogere temperatuur.

Minder frequent toegepaste koolwaterstoffen.

- Propeen (R1270) wordt weinig toegepast, maar heeft het voordeel dat bij een lekkage er zich een olieachtige reuk verspreidt, waardoor dit koudemiddel zelfalarterend is, zoals bij ammoniak ook het geval is.
- Butaan (R600) en n-Pentaaan (R601) zijn geschikt voor hoge temperatuur warmtepompen (met name stoomproductie), maar worden zelden toegepast.

- Het mengsel met merknaam Propaene (R433A) is een bijna azeotroop mengsel van R290 en R1270, wordt zelden gebruikt, heeft eigenschappen die vrijwel gelijk zijn aan R22, en het voordeel van de zelfalarmering vanwege de R1270 -reuk.

Brand- en explosieveiligheid

De sterke brandbaarheid en de lage explosiegrens van koolwaterstoffen maken dat **maatregelen nodig zijn om de risico's te beheersen**. Dit geldt overigens ook voor alle brandbare F-gassen (R32, HFO's). Deze maatregelen kunnen zijn:

- beperken van de koelmiddelinhoud; met technische maatregelen kan met weinig koudemiddel toch een aanzienlijke capaciteit worden geleverd (zoals in het TKI Urban Energy HP Launch project, met een warmtepomp die minder dan 150 g propaan bevat (16));
- buiten plaatsen van het installatiedeel dat koudemiddel bevat; bij een eventuele lekkage zorgt snelle vermenging met omgevingslucht voor verlaging van het risico op brand of explosie;
- gebruik van een geventileerde omkasting; hierbij wordt het koudemiddelcircuit in een omkasting geplaatst die voorzien is van een detector en ventilatie. De omkasting wordt geventileerd bij detectie van een lek;
- gebruik van vonkvrije (“non-sparking”) apparatuur, hulpmiddelen en eventueel ATEX-componenten (Ex-proof);
- eisen aan de positie in, of het minimum volume van, de ruimte waarin een apparaat is geplaatst, waarmee de concentratie in geval van een lek beperkt kan blijven.

Traditioneel ging de voorkeur uit naar **maximum toelaatbare koudemiddelhoeveelheden** in een apparaat, vastgesteld in een norm of wet. Maar daarmee wordt geen recht gedaan aan de grote variëteit aan uitvoerings-, opstellings- en gebruiksdetails, en worden ontwikkelingen naar betere veiligheidsmaatregelen afgeremd. In plaats van rigide limieten voor de koelmiddelinhoud wordt bij voorkeur op basis van een **specifieke risicobeoordeling** bepaald welke veiligheidsmaatregelen nodig zijn bij een gegeven hoeveelheid brandbaar koelmiddel in een specifiek apparaat op een specifieke locatie. De internationale normen (EN, EIC, ISO) op dit gebied reflecteren deze trend en zijn op dit moment (begin 2021) sterk in beweging, met tal van commissies en werkgroepen die bezig zijn met revisies en nieuwe documenten. Paragraaf 4.2 en bijlage 9 geven meer details over de beschikbare normen.

Het LifeFront project, met financiële steun vanuit het EU LIFE programma, heeft meerdere documenten geproduceerd die hieromtrent duidelijkheid creëren en ontwerpers, producenten en installateurs ondersteunen bij het uitvoeren van risicoanalyses en het detailleren van de veiligheidsaspecten bij toepassing van koolwaterstof koudemiddelen, met inbegrip van de opstellingslocaties (17).

In (18) is de huidige stand beschreven met betrekking tot veiligheidsaspecten voor split airco's en warmtepompen met propaan.

Toepassingen

De toepassingen van koolwaterstoffen nemen wereldwijd snel toe, ook in Nederland.

De volgende toepassingen van koolwaterstof koudemiddel komen voor.

- Stekkerklare koel- en vriesapparaten verkoopmeubelen en -vitrines: koolwaterstoffen worden wereldwijd standaard toegepast in huishoudelijke koelkasten, diepvriezers en warmtepompdrogers, en steeds vaker in stekkerklare (plug-in) vitrines en meubelen voor de detailhandel; historisch is 150 gram brandbaar koudemiddel vastgelegd in normen, als veilige maximum koudemiddelinhoud in hermetisch gesloten apparatuur op iedere mogelijke locatie; inmiddels is de norm IEC-60335-2-89 (voor vitrines en meubelen) in 2020 aangepast, waardoor onder voorwaarden tot 500 gram koolwaterstof kan worden toegepast.
- Voor kleine hermetisch gesloten warmtepompen met watercircuit voor warmteafgifte en in pandige opstelling, bevat de norm IEC 60335-2-40 (airconditioners en warmtepompen) ook de 150 g grens, die naar verwachting de komende tijd onder voorwaarden wordt verruimd tot 500 g; producenten anticiperen hierop met gebruikmaking van een risicoanalyse; voor warmtepompen die volledig buiten kunnen worden opgesteld, zijn de veiligheidsvoorzieningen minder stringent.
Volgens (19) zijn sinds 2017 warmtepomp modellen met R290 op de Europese markt, van fabrikanten als Heliotherm, Glen Dimplex, Alpha Innotec en NIBE.
- Monoblocks en split-units voor airconditioning, soms met warmtepompfunctie: ook hier wordt gewerkt aan, en geanticipeerd op, een verruiming van de grens van 150 g inhoud in de IEC-60335-2-40 norm. In een recent (2020) rapport van de Europese Commissie (20) over de beschikbaarheid van koudemiddelen voor nieuwe single split airconditioners, wordt de verwachting uitgesproken dat propaan het preferente koudemiddel zal zijn voor deze toepassingen. In China en India was in 2019 productiecapaciteit voor 7 miljoen apparaten met propaan per jaar (tot 7 kW koelvermogen). Ook wordt bevestigd dat de capaciteit en COP beter zijn dan van apparaten met conventionele HFK's. Wel zijn de huidige productiekosten iets hoger vanwege de vereiste veiligheidsvoorzieningen, en vanwege beperkte productieschaalvoordelen. Voor grotere multi-split en VRF-systemen (klimaatsysteem waarmee verschillende ruimtes kunnen worden verwarmd of gekoeld, met één buitendeel en één leidingencircuit, vertakt naar meerdere ruimtes), kan de koudemiddelinhoud oplopen tot tientallen kilo's; koolwaterstoffen zijn daarbij zelden toepasbaar, omdat de vereiste veiligheidsvoorzieningen het systeem te duur en onpraktisch maken.
- Koelinstallatie/warmtepomp in een geventileerde omkasting volgens de norm EN378: hiermee kunnen grotere koudemiddelinhouden veilig worden toegepast.
- Diverse toepassingen in de detailhandel, logistiek en industrie, voor koeling, airconditioning en warmtepompen, met koolwaterstof inhoud oplopend tot 100 kg.

De Nederlandse praktijkrichtlijn NPR 7600:2020 (4) geeft aan hoe bij de toepassing van brandbare koudemiddelen aan de wettelijke eisen in Nederland kan worden voldaan. Ook geeft dit document informatie over de veilige toepassing van brandbare koudemiddelen, inclusief koolwaterstoffen. Vier Werkvoorschriften van de KNVvK vormen een aanvulling op deze NPR 7600 (21).

De benodigde veiligheidsmaatregelen leiden tot kostenverhoging bij de aanschaf van een warmtepomp, en vaak ook tot hogere gebruikskosten (meer controles of onderhoud).

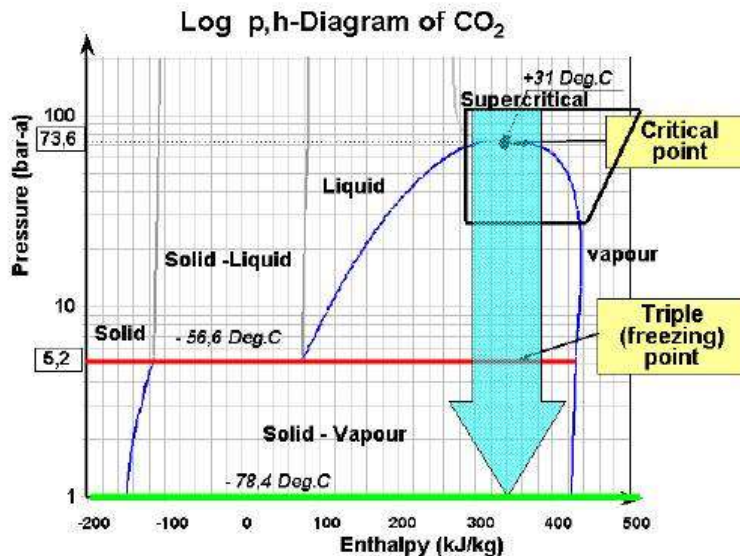
In (22) zijn actuele details (2020) over koolwaterstoffen als koudemiddel in Nederland opgenomen; (23) geeft praktijkvoorbeelden. In (24) en (25) worden twee recente ontwikkelingen beschreven van warmtepompen met gebruikmaking van innovatieve veiligheidsconcepten (zie ook par. 5.2.2).

3.2 KOOLDIOXIDE

Kooldioxide (koolstofdioxide, CO₂, R744) is een van de oudste koudemiddelen ter wereld. CO₂ is ingedeeld in koelmiddelklasse A1 (laag giftig, niet brandbaar). Dit is het krachtigste argument om CO₂ toe te passen uiteraard naast het hoofdargument van de verwaarloosbaar lage GWP van 1. Voor de communicatie met het publiek is het een lastige boodschap: "bestrijding van het CO₂ klimaatprobleem met de inzet van CO₂". Het argument is dat de hoeveelheid CO₂ als koudemiddel verwaarloosbaar is ten opzichte van de totale hoeveelheid aan CO₂-emissies.

CO₂ heeft een aantal eigenschappen die sterk afwijken van die van de overige koudemiddelen. Deze afwijkende eigenschappen zijn soms voordelig, maar soms ook nadelig of beperkend. In het logP-h diagram hieronder met ingetekende trans-kritische kringloop (zie figuur 3-1) zijn de volgende specifieke eigenschappen aangegeven:

- het tripelpunt (vast-vloeibaar-damp, bij -56,6 °C);
- droogijs (vast-damp, bij -78,4 °C);
- kritiek punt (wel/geen verschil vloeistof-damp, bij 31 °C).



Figuur 3-1: logP-h diagram van CO₂ (26)

De belangrijkste afwijkingen worden hieronder verder besproken:

- Het **relatief laag kritisch punt** (31°C) heeft tot gevolg dat boven deze temperatuur geen verdamping of condensatie meer mogelijk is (superkritische stoftoestand); daarom zijn speciale voorzieningen nodig (gaskoeler in plaats van condensor in **trans- of superkritische koelsystemen**). Ook kan de gebruikelijke techniek voor ontdooien van verdampers (luchtkoelers) met heet gas niet worden toegepast.
- Bij het tripelpunt is er vorming van **koolzuursneeuw of droogijs**, dat wordt gevormd bij een verzadigingstemperatuur van -56,6 °C. Droogijs verdampt, zonder tussenovergang naar de vloeibare fase (desublimatie) bij een temperatuur van -78 °C en wordt daarom veel gebruikt als koelmedium in open koelprocessen (zoals vaccinkoeling) en is commercieel verkrijgbaar voor dit doel. Ook kan vloeibare CO₂ onder hoge druk op locatie worden geëxpandeerd in een vriestunnel, waarbij deels droogijs, deels koud gas wordt gevormd. Deze open koeltoepassingen vallen buiten het bestek van deze studie. In een gesloten systeem met CO₂ koudemiddel moet bij ontwerp en bedrijfsvoering voorkomen worden dat in het systeem droogijs ontstaat, met name in (veiligheids)ventielen of leidingen die daardoor kunnen blokkeren.
- In gesloten systemen kan de **druk erg hoog** worden. Bij 20 °C is de verzadigingsdruk 57,3 bar(a). Drukken tot 80 bar(a) kunnen optreden. Dat is prima werkbaar, maar het ontwerp en de uitvoering van de installatie moeten wel op deze drukken zijn afgestemd, wat vaak tot kostenverhoging leidt. Er zijn in veel gevallen voorzieningen nodig die bij stilstand voorkómen dat de druk in het CO₂-circuit onacceptabel hoog oploopt (gecontroleerd afblazen, noodkoeling).

- Bij lekkage kan de CO₂-concentratie in (kleine) gesloten ruimten mogelijk oplopen tot boven de grens die voor mensen gevaarlijk is. Dit vraagt extra aandacht.
- CO₂ heeft een extreem **hoge volumetrische koelcapaciteit**. Deze is circa viermaal die van ammoniak, vijfmaal die van propaan en achtmaal die van R1234yf. Daardoor kunnen compressoren, warmtewisselaars en veel leidingen aanzienlijk kleiner zijn met dezelfde koel- of verwarmingscapaciteit (tot een factor 3, wat de kostenverhoging voor de hoge drukken deels compenseert). Volgens (19) geldt voor een R744 (CO₂) system ten opzichte van een vergelijkbaar R290 (propaan) system dat de R744 compressor een factor 2,5 kleiner, en een platenwarmtewisselaar een factor 3 kleiner kan worden uitgevoerd.
- De thermodynamische eigenschappen van CO₂ maken een standaard installatie relatief **inefficiënt bij verdampingstemperaturen boven -20 °C** of condensatietemperaturen boven 20 °C. Er zijn daarom meerdere technieken ontwikkeld waarmee de efficiëntie toeneemt (parallele compressie, flash gas bypass, ejector, compressor toerenregeling). Met deze technieken, die overigens ook bij veel andere koudemiddelen kunnen worden toegepast, wordt in veel gevallen de efficiëntie acceptabel of zelfs beter dan met conventionele koudemiddelen. De complexiteit en kosten van het systeem lopen daarbij op. De combinatie met gebruik van de restwarmte en toepassing van een warmtepompfunctie kan de efficiency en rentabiliteit aantrekkelijk maken.
- Een redelijke COP komt alleen tot stand als de gaskoeler wordt afgekoeld naar de intredetemperatuur van het waterverwarmingsproces. Bij warmtapwaterproductie is dat ca. 15 °C.

Het koudemiddel CO₂ maakt een snelle groei door. De toepassingen zijn zeer divers.

Toepassingen

- Cascade koelsystemen met CO₂ in de lage trap: dit zijn twee gescheiden koelkringlopen met verschillende koudemiddelen, gekoppeld via een cascade warmtewisselaar (condensor voor de lage trap en verdamper voor de hoge trap). Bij lage temperaturen (beneden -20 °C verdampingstemperatuur) komen de bovengenoemde voordelige eigenschappen van CO₂ goed tot hun recht. In de hoge trap wordt dan bij voorkeur ammoniak of koolwaterstof als koudemiddel toegepast. Daarmee wordt de hoeveelheid toxisch of brandbaar koudemiddel tot een veiliger minimum beperkt en circuleert het niet door de ruimten waar de verdampers zich bevinden. CO₂/NH₃ cascadesystemen zijn energetisch superieur bij deze lage temperaturen en kunnen als een goede techniek worden beschouwd voor industriële toepassingen (diepvriezen) en vriesopslag. Voor grotere supermarktsystemen is dit een optie die nog weinig wordt toegepast vanwege de meerkosten van het installatieconcept.
- Centraal CO₂-koel/diepvries systeem: dit is de meest gebruikte oplossing voor supermarkten in Europa omdat deze centrale met meerdere CO₂-compressoren in staat is om de koeltoepassingen en de diepvriestoepassingen flexibel te bedienen, inclusief airconditioning, warmteterugwinning of warmtepompfunctie voor warm sanitair water en ruimteverwarming. Er is typisch sprake van een

standaard frame of “rack” waarop de componenten zijn gemonteerd. In oktober 2019 zijn er meer dan 23.000 transkritische CO₂ installaties in Europa.

- Luchtgekoelde condensing unit: in het vermogensbereik van 4 tot 35 kW vormen deze apparaten een oplossing voor het koelen van koelmeubelen of koelruimten in winkels, tankstations en andere verkooppunten. Warmteterugwinning is ook mogelijk, waardoor via een watercircuit de warmte die vrijkomt bij het koelproces terug naar de winkel gebracht kan worden. Recent is een grote Japanse producent op de markt gekomen met een CO₂ condensing unit voor airconditioningtoepassingen.
- Kleine, stekkerklare, koel- en diepvriestoepassingen (flessen- en drankblikkoelers): het gaat hier typisch om kleinere koel- en diepvriesmeubelen voor impulsverkoop aan de kassa van supermarkten, in kantines etc. CO₂ in stekkerklare koel- en diepvriestoepassingen kan energetisch aantrekkelijk zijn, maar is in veel gevallen (te) duur in aanschaf. Na eerdere succesvolle ontwikkelingen (met name door Coca-Cola) loopt het aantal apparaten in de praktijk terug vanwege de hoge aanschafkosten.
- Warmtepompen: CO₂ in warmtepompen kan aantrekkelijk zijn, zeker in die gevallen waar hoge temperaturen gewenst zijn (sanitair tapwater). Het capaciteitsbereik en het toepassingsgebied van een CO₂ warmtepomp is zeer ruim: 3,5 kW tot meerdere MW, van huishoudens tot grootschalige stadsverwarming en industriële verwarming. Voor huishoudelijke toepassingen zijn CO₂ warmtepompen veelal te duur of niet efficiënt genoeg. In Japan zijn CO₂ tapwater warmtepompen al jaren succesvol ingezet, vanwege de specifieke (dagelijkse tapwaterbehoeftepatronen) marktcultuur aldaar (4 kW, circa 500.000 stuks per jaar). Dit Japans concept (voortbouwend op de Ecocute) wordt in Nederland in 2021 voor een pilot ingezet en getest voor verwarming en tapwater (27) (zie ook par 5.3.2).

De praktijkrichtlijn NPR 7601:2020 (5) geeft aan hoe aan de wettelijke eisen in Nederland kan worden voldaan. Ook geeft dit document informatie over de veilige toepassing van kooldioxide als koudemiddel.

In (28) zijn actuele details (2020) over kooldioxide als koudemiddel in Nederland opgenomen.

3.3 AMMONIAK

Ammoniak (R717, NH₃) is een van de oudste koudemiddelen, populair vanaf de uitvinding van mechanische koeling en sindsdien nooit meer weggeweest. **Koeltechnisch superieur en energie-efficiënt** in bijna alle toepassingen. De technologie is nog steeds in ontwikkeling, wat kansen geeft voor innovatie en uitbreiding naar nieuwe toepassingen en versterking van marktpositie.

Ammoniak als koudemiddel scoort **zeer goed voor het milieu**, met een hoge efficiëntie, geen broeikasgaseffect en een verwaarloosbare milieubelasting. **Ammoniak is giftig en matig brandbaar**, waardoor speciale aandacht nodig is voor arbeidsveiligheid, externe veiligheid, brandbestrijding en brandpreventie, corrosie. De penetrante reuk van ammoniak is effectief zelfalarderend bij een (klein) lek (5 ppm reukgrens).

In constructieve zin is van belang dat koper, het gangbare materiaal voor koudemiddelleidingen, niet kan worden toegepast met ammoniak. Dit leidt tot de noodzaak om andere (duurdere) materialen (staal) en verbindingstechnieken (lassen) te gebruiken. Tevens moet rekening worden gehouden met specifieke corrosiemechanismen bij de toepassing van ammoniak, zoals ammoniak spanningscorrosie (6).

Toepassingen

- Standaard koudemiddel voor industriële toepassingen, in de voedingsmiddelensector en bij koel- en vrieshuizen. De hoeveelheid koudemiddel kan oplopen tot 80.000 kg (in de grootste consumptie-ijsfabrieken in Europa, met koelvermogen van tientallen MW). Veel toegepaste techniek is pomp- en zwaartekrachtcirculatie (met "natte" verdamping), veelal met meerdere temperatuurniveaus. De installatie wordt klant-specifiek ontworpen en ter plaatse geïnstalleerd/geassembleerd.
- Indirecte systemen met een koudedragers (water, glycol, brijn, kooldioxide) als koude-transportmedium. Hiermee wordt de totale hoeveelheid ammoniak sterk gereduceerd en geconcentreerd in de machinekamer, wat de veiligheid sterk verhoogt.
- Cascadesystemen met ammoniak in de hoge temperatuurtrap en kooldioxide in de lage trap. Hiermee wordt de totale hoeveelheid ammoniak sterk gereduceerd en geconcentreerd in de machinekamer, wat de veiligheid sterk verhoogt.
- Add-on warmtepomp, toegevoegd aan een industriële koelinstallatie. In plaats van de gebruikelijke verdampingscondensor wordt een ammoniakcircuit met hogedrukcompressor toegevoegd, waarmee warm water wordt gemaakt voor verwarming, of warm proceswater.
- Compacte vloeistofkoelers (Chiller packs, packaged units, skids), in een frame gemonteerde eenheden waarmee koud water, glycol of brijn wordt gemaakt, voor industriële of airconditioning toepassing. Vermogens variëren van tientallen kW tot meerdere MW. De installatie wordt compleet voor-gemonteerd, getransporteerd naar de eindbestemming. Door de compacte bouwwijze is de ammoniakhoeveelheid beperkt van tientallen tot enige honderden kilo's; met plaatsing in een container of op het dak zijn de mogelijkheden voor veilige toepassing sterk verruimd.
- Hoge temperatuur warmtepomp, vooral voor industriële toepassingen, maar ook in potentie voor de grote supermarkten en gebouwverwarming. Vermogens variëren van tientallen kW tot meerdere MW (zie ook paragraaf 2.2.7).

- Goede voorbeelden van de innovatiemogelijkheden met ammoniak zijn de hoge temperatuur ammoniak warmtepomp voor industriële en vergelijkbare toepassingen.
- Voor kleine toepassingen (< 10 kW) zijn ammoniakinstallaties meestal te duur om concurrerend te zijn; bovendien zijn veel componenten voor kleine systemen niet commercieel verkrijgbaar. Uitzonderingen zijn de al meer dan vijftig jaren toegepaste absorptiekoelkast met ammoniak/water als werkstofpaar (voor hotelkamers, campings etc.) en de aardgasgestookte ammoniak adsorptie warmtepomp die in paragraaf 2.3 en bijlage 6 is beschreven.

De richtlijn PGS-13:2020 (6) geeft aan hoe aan de wettelijke eisen in Nederland kan worden voldaan. Ook geeft dit document een schat aan informatie over de veilige toepassing van ammoniak als koudemiddel.

De benodigde veiligheidsmaatregelen leiden tot kostenverhoging bij de aanschaf van een warmtepomp, en vaak ook tot hogere gebruikskosten (meer controles of onderhoud). Ook de materiaalkeuze (staal) en verbindingstechnieken (lassen) kunnen tot kostenverhoging leiden. Bij doorontwikkeling en toenemende productieschaal kunnen deze extra kosten worden gereduceerd.

In (29) zijn actuele details (2020) over ammoniak als koudemiddel in Nederland opgenomen; (30) geeft praktijkvoorbeelden.

4 RELEVANTE WET- EN REGELGEVING EN BIJBEHORENDE NORMEN

In dit hoofdstuk wordt een overzicht gepresenteerd van de relevante wet en regelgeving die van toepassing is op het gebruik van de verschillende natuurlijke en synthetische koudemiddelen in Nederland. Achtereenvolgens komen de F-gassen, de natuurlijke koudemiddelen en de wettelijke eisen aan competentie en certificering aan de orde.

In bijlage 7 wordt relevante Europese wet- en regelgeving in detail besproken.

Bijlage 8 geeft details over relevante wet- en regelgeving en bijbehorende richtlijnen in Nederland.

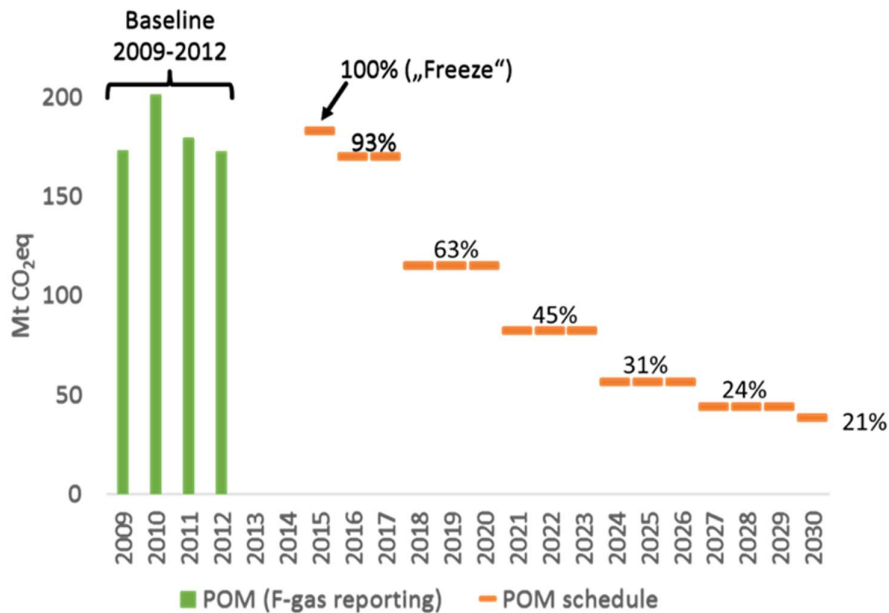
Bijlage 9 geeft details over de relevante normen en richtlijnen met betrekking tot koudemiddelen.

4.1 F-GASSEN WETGEVING, VERWACHTE REVISIE

De EU F-gassen Verordening 517/2014 beoogt een reductie van de uitstoot van F-gassen met de inzet van maatregelen op drie niveaus.

- a) stapsgewijze GWP-gewogen beperkingen op productie, import en gebruik van F-gassen;
- b) verbod van F-gassen in bepaalde apparatuur;
- c) emissiebeperking, met name regulering van terugwinning en vernietiging aan het eind van de levensduur van apparatuur, maatregelen om de lekkage van koudemiddel uit installaties te reduceren en borging van vakbekwaamheid van personen en kwaliteit van bedrijven.

Het uiteindelijke doel is om de uitstoot in 2030 met twee-derde te verminderen ten opzichte van het 2014 niveau. Figuur 4-1 (1) toont het EU-afbouwschema (bovengenoemde maatregel a)).



Figuur 4-1: GWP-gewogen afbouw volgens Europese F-gassen Verordening (POM = Placing on the Market) (1).

Deze Europese F-gassen Verordening is een-op-een geïmplementeerd in het Nederlandse Besluit (2) en bijbehorende regeling.

Op dit moment (begin 2021) loopt het voorbereidingsproces voor de herziening van de EU F-gassen Verordening. Een groot aantal belanghebbenden is gevraagd om zienswijzen in te dienen. De verwachting is dat de hoofdelementen van de huidige Verordening worden voortgezet, in ieder geval tot 2030. De bijdrage aan het herzieningsproces vanuit de Nederlandse overheid wordt gecoördineerd door Rijkswaterstaat en Ministerie EZK.

In mei 2021 is een lijst met aanscherpingsopties gepresenteerd (31); eind 2021 komt de Europese Commissie met een concreet voorstel. Voor de groep F-gassen met GWP < 150, waarvoor op dit moment alleen een rapportageverplichting geldt, worden aanvullende reductiemaatregelen verwacht. Ook worden stimuleringsmaatregelen voor natuurlijke koudemiddelen en alternatieve technologieën verwacht, en meer aandacht voor competentie, vakbekwaamheid, training en certificering voor alle koudemiddelen, zowel natuurlijke als F-gassen.

4.2 WET- EN REGELGEVING, RICHTLIJNEN EN NORMEN VOOR NATUURLIJKE KOUEMIDDELEN

In deze paragraaf komen de specifieke wet- en regelgeving voor natuurlijke koudemiddelen aan de orde, en de richtlijnen en normen waar deze wetgeving naar verwijst.

Wetgeving wordt deels in Europa en deels door de Nederlandse overheid vastgesteld en gepubliceerd op de respectievelijke overheidswebsites.

Normen worden in Nederland door, en onder verantwoordelijkheid van, het Nederlands Normalisatie Instituut NEN gepubliceerd. Dat geldt voor de internationale normen (ISO, IEC, EN) en voor de Nederlandse normen (NEN) en praktijkrichtlijnen (NPR).

Voor natuurlijke koudemiddelen is er op dit moment geen wetgeving van toepassing die vergelijkbaar is met de EU F-gassen wetgeving (zie paragraaf 4.1), die een-op-een is overgenomen in de Nederlandse wetgeving.

Specifiek voor natuurlijke koudemiddelen staan er in het Activiteitenbesluit Milieubeheer specifieke bepalingen voor natuurlijke koudemiddelen, gericht op de veiligheidsaspecten, met een bindende verwijzing naar NPR7600 (voor koolwaterstoffen), NPR 6701 (voor kooldioxide) en PGS-13 (voor ammoniak). Dit wordt hieronder toegelicht.

Activiteitenbesluit milieubeheer en Besluit activiteiten milieubeheer

In het Besluit algemene regels voor inrichtingen milieubeheer, Activiteitenbesluit 2007 (7), met uitwerking van de regels in de Activiteitenregeling, worden koelinstallaties met natuurlijke koudemiddelen expliciet genoemd met verwijzing naar PGS 13, NPR 7600 en NPR 7601. In de bijbehorende ministeriële Regeling staan meer details over de relatie met deze 3 richtlijnen. Het Activiteitenbesluit zou een tijd geleden zijn opgegaan in de nieuwe integrale Omgevingswet, maar de invoering daarvan is meerdere malen uitgesteld; Januari 2022 is genoemd als invoeringsdatum.

De volgende hoofdpunten zijn van toepassing. Onder koelinstallaties worden tevens airconditioners en warmtepompen verstaan.

Voor een koelinstallatie met meer dan:

- a) 10 kg kooldioxide is NPR 7601 van toepassing (5);
- b) 5 kg koolwaterstoffen is NPR7600 van toepassing (4);
- c) 10 kg ammoniak is PGS-13 van toepassing (6).

Deze drie documenten worden hieronder en in bijlage 8 besproken.

In grote lijnen houdt dit in dat er dwingende eisen zijn gesteld aan melding, vergunningverlening, ontwerp, uitvoering, opstellingslocatie, bedrijfsvoering, onderhoud (jaarlijkse preventieve controle), competentie en certificering van personen en bedrijven

(stelsel van zelfregulering door de sector, analoog aan het wettelijk verplichte stelsel voor de F-gassen).

Beneden de genoemde inhoudslicieten geldt de algemene zorgplicht volgens de Arbowet.

Boven 100 kg koolwaterstoffen of 1.500 kg ammoniak geldt een vergunningsplicht.

De verplichtingen liggen primair bij de eigenaar van de installatie en de werkgever van personeel.

NPR 7600:2020 Toepassing van brandbare koudemiddelen in koelinstallaties en warmtepompen

Deze NPR is in eerste versie rond 2000 opgesteld door private partijen, om op dat moment invulling te geven aan het vacuüm op dat moment met betrekking tot de toepassing van koolwaterstof koudemiddel. NPR-en worden uitgebracht door NEN, onder inhoudelijke verantwoordelijkheid van de Normcommissie koelinstallaties en warmtepompen.

In de 2020 versie (4) is het toepassingsgebied uitgebreid tot alle brandbare koudemiddelen (A2L, A2, A3), in installaties boven de 150 g koudemiddel, om invulling te geven aan de behoefte om de veiligheid bij brandbare F-gassen te waarborgen. In 2015 heeft deze NPR kracht van wet gekregen via vermelding in Nederlandse wetgeving (Activiteitenbesluit). Deze wetgeving eist dat aan delen van de NPR 7600 wordt voldaan bij koelinstallaties met een koolwaterstof koudemiddelinhoud van 5 kg en meer.

De onderstaande veiligheids-, milieu- en gezondheidsaspecten die een rol spelen bij de toepassing van brandbare koudemiddelen (zowel natuurlijke als synthetische koudemiddelen) worden in deze praktijkrichtlijn behandeld:

- Beschrijvingen van koudemiddelen en toepassingsgebieden;
- Verwijzingen naar onderliggende richtlijnen en normen;
- Classificatie van koelinstallaties met het oog op veiligheidsniveaus;
- Eisen aan het ontwerp van een koelinstallatie met brandbare koudemiddelen;
- Functionele eisen en uitvoeringseisen aan veiligheidsvoorzieningen;
- Eisen en werkzaamheden voor het correct beheren van een installatie (met name minstens eenmaal per jaar periodieke preventieve controles door competente personen);
- Competenties en vereiste certificeringen (zie paragraaf 4.3).

NPR 7601:2020 Toepassing van kooldioxide als koudemiddel in koelinstallaties en warmtepompen.

Deze NPR is in eerste versie rond 2000 opgesteld door private partijen, om op dat moment invulling te geven aan het vacuüm op dat moment met betrekking tot de toepassing van kooldioxide koudemiddel. NPR-en worden uitgebracht door NEN, onder

inhoudelijke verantwoordelijkheid van de Normcommissie koelinstallaties en warmtepompen. In de 2020 versie (5) is het toepassingsgebied beperkt tot installaties boven de 10 kg inhoud. In 2015 heeft deze NPR kracht van wet gekregen via vermelding in Nederlandse wetgeving (Activiteitenbesluit). Deze wetgeving eist dat aan delen van de NPR 7601 wordt voldaan bij koelinstallaties met een kooldioxide koudemiddelinhoud van 10 kg en meer.

De onderstaande veiligheids-, milieu- en gezondheidsaspecten die een rol spelen bij de toepassing van CO₂ koudemiddel worden in deze praktijkrichtlijn behandeld:

- Beschrijvingen van koudemiddel en toepassingsgebieden;
- Verwijzingen naar onderliggende richtlijnen en normen;
- Classificatie van koelinstallaties met het oog op veiligheidsniveaus;
- Eisen aan het ontwerp van een koelinstallatie met CO₂;
- Functionele eisen en uitvoeringseisen aan veiligheidsvoorzieningen;
- Eisen en werkzaamheden voor het correct beheren van een installatie (met name minstens eenmaal per jaar periodieke preventieve controles door competente personen);
- Competenties en vereiste certificeringen (zie paragraaf 4.3).

PGS 13: ammoniak als koudemiddel

PGS 13 is een Nederlandse Richtlijn voor de brandveilige, arbeidsveilige en milieuveilige toepassing van ammoniak als koudemiddel in koelinstallaties en warmtepompen, onderdeel van de Publicatiereeks Gevaarlijke Stoffen PGS. Tussen 1990 en 2001 was dit de CPR 13 (Commissie Preventie van Rampen). De PGS geeft een nadere uitwerking van wettelijke voorschriften op grond van de Omgevingswet, de Arbeidsomstandighedenwet en de Wet veiligheidsregio's, en heeft een krachtige wettelijke inbedding.

Een drastisch herziene versie van deze PGS 13, de "Nieuwe Stijl", is inhoudelijk gereed en wordt volgens planning in 2021 ingevoerd (6). Deze herziening maakt onderdeel uit van de modernisering van alle PGS-documenten (serie documenten over de toepassing van gevaarlijke stoffen) die in de herziene versie zijn gebaseerd op een expliciete risicobenadering.

De herziene PGS 13 is van toepassing op koelinstallaties en warmtepompen met ammoniak als koudemiddel en moet worden gevolgd bij ontwerp, bouw en bedrijfsvoering van nieuwe installaties. Secundaire circuits (water, glycol, brijn, kooldioxide, enz.) en thermisch gedreven koelinstallaties zijn uitgesloten.

De PGS Nieuwe Stijl kent de volgende hoofdelementen:

- wettelijke kaders;
- risicobenadering met de scenario's;
- doelen om de risico's te beheersen;
- maatregelen om aan de doelen te voldoen;

- eisen en werkzaamheden voor het correct beheren van een installatie (waaronder periodieke preventieve controles door competente personen);
- competenties en vereiste certificeringen (zie paragraaf 4.3);
- relevante informatie over ammoniak, gevaaraspecten, risico's.

4.3 COMPETENTIE EN CERTIFICERING VOOR HET WERKEN MET KOUDEMIDDELEN

Werken met F-Gassen

Voor het werken met F-gassen (alle handelingen aan het koudemiddelcircuit) stelt de Europese F-gassen verordening verplichte vakbekwaamheid en certificering van personen, en kwaliteitsborging en certificering van de bedrijven onder wier verantwoordelijkheid deze werkzaamheden worden uitgevoerd. Dit geldt voor alle F-gassen die in bijlage 1 van de Verordening zijn opgenomen; in de praktijk betreft dat alle HFK-koudemiddelen met GWP>150. R134a, R410A en R32 vallen onder deze verplichting; HFO's (R1234yf, R1234ze(E) en HFO-mengsels met GWP<150) vallen niet onder deze verplichting. Binnen Europa geldt een wederzijdse acceptatieplicht van persoons- en bedrijfscertificaten.

Voor Nederland is uitwerking van certificering van personen en bedrijven onder het F-gassen besluit vastgelegd in twee gedetailleerde Beoordelingsrichtlijnen, vastgesteld door Rijkswaterstaat (Ministerie van Infrastructuur en Milieu) (32):

- BRL 100 Beoordelingsrichtlijn voor het certificaat f-gassen voor ondernemingen, versie 2.0, 6 juni 2019;
- BRL 200 Beoordelingsrichtlijn voor het certificaat f-gassen voor personen, versie 1.2, 1 mei 2017.

Via verwijzing naar deze Beoordelingsrichtlijnen in het Nederlandse F-gassen Besluit, hebben deze kracht van wet.

De uitvoering is neergelegd bij organisaties die examineren en certificaten uitgeven, zoals STEK en InstallQ. De examinering heeft een theorie- en praktijkcomponent. Certificeringsinstellingen (CI's) voeren de audits uit. Opleiding en training worden door tal van organisaties verzorgd.

In Nederland wordt het F-gassen certificaat voor personen uitgegeven met onbeperkte geldigheidsduur, in tegenstelling tot de meeste andere EU-landen die een periodieke her-certificering eisen.

Werken met brandbare koudemiddelen, kooldioxide en ammoniak

In paragraaf 4.2 is uitgelegd dat het Nederlandse Activiteitenbesluit eist dat personen competent zijn die werken met koolwaterstoffen (boven 5 pg), kooldioxide (boven 10 kg) en ammoniak (boven 10 kg). In de onderliggende NPR 7600, NPR 7601 en PGS-13 is een identieke paragraaf opgenomen die verwijst naar een systeem van zelfregulering door de sector. De gedachte hierachter is dat de sector zelf de verantwoordelijkheid neemt om deze competenties en certificering in de praktijk te organiseren; mocht de overheid na verloop van tijd van mening zijn dat de sector hier geen adequate invulling aan heeft gegeven, dan kan de overheid zelf maatregelen nemen.

Door de sector (gezamenlijke branchepartijen in Nederland) is in 2019 de Stichting Netwerk Koude- en Klimaattechniek NKK opgericht om invulling te geven aan deze zelfregulering (8).

Een stelsel van Eind- en Toets-termen is medio 2021 beschikbaar, waarmee exameninstellingen, certificeringsinstellingen en opleiders invulling geven aan deze zelfregulering, onder verantwoordelijkheid van deze Stichting NKK. Dit betreft drie separate examens/certificaten: voor alle brandbare koudemiddelen (koolwaterstoffen en brandbare F-gassen), voor kooldioxide en voor ammoniak. Tevens wordt voor brandbare koudemiddelen en voor kooldioxide een variant voor kleine installaties uitgegeven. In voorbereiding zijn competentie-eisen voor ontwerpers en bedienend personeel.

Bij de vaststelling van competentie-eisen wordt aangesloten bij de systematiek van de norm EN ISO 22712 Refrigerating systems and heat pumps — Competence of personnel, de wereldwijde standaard voor competentie (vakbekwaamheid) bij het werken met koelinstallaties en warmtepompen, zie bijlage 9.

Bedrijven kunnen hun organisatiekwaliteit voor het werken met natuurlijke koudemiddelen aantonen middels een bedrijfscertificering, via eerdergenoemde certificeringsinstellingen.

Voor natuurlijke koudemiddelen en brandbare F-gassen wordt zoveel als mogelijk aangesloten bij de methodiek voor de wettelijke vereiste F-gassen certificering, met name de BRL 100 en BRL 200, omdat vrijwel alle bedrijven in de toekomst zullen werken met een veelheid aan natuurlijke en synthetische koudemiddelen, waarbij een uniforme aanpak ten aanzien van competentie en certificering voor de praktijk wenselijk is.

4.4 WAARDERING IN BREEAM

BREEAM (33) is een certificeringsmethode voor de duurzaamheid van o.m. nieuwe en bestaande gebouwen. De duurzaamheidscriteria waarop gebouwen of projecten worden beoordeeld zijn vastgelegd in de Beoordelingsrichtlijn BREEM-NL. De criteria betreffen een breed scala van duurzaamheidsaspecten: niet alleen energie, maar ook gezondheid, transport, materialen, water, landgebruik & ecologie, afval, vervuiling en management. In relatie tot koudemiddelen kunnen in de BREEAM-systematiek maximaal 3 punten worden toegekend in de categorie Vervuiling-POL 1:

- bij een GWP = 0 (of geen koudemiddel): 3 punten;
- bij een GWP ≤ 5: 2 punten;
- bij een GWP ≤ 750 én DELC₁ ≤ 500 kg CO₂ equivalent per kW verdampervermogen: 1 punt.

Daarnaast worden er bij vrijwel alle koudemiddelen eisen gesteld aan lekdetectie en/of automatische opvang bij lekkage.

Bij de toetsing van de criteria staat voorop dat alle systemen (met elektrische compressors) in overeenstemming moeten zijn met de vereisten van NEN-EN 378:2016 of ISO 5149:2014. Aanvullend voor koelsystemen die ammoniak bevatten dienen deze tevens te voldoen aan PGS13:2009, bij brandbare koudemiddelen NPR 7600:2020 en kooldioxide NPR 7601:2020 (34).

¹ DELC staat voor Direct Effect Life Cycle; deze waarde wordt bepaald volgens een methode vergelijkbaar met de directe component in de TEWI-berekening

5 EFFECTEN VAN KOUEMIDDELKEUZE OP DE ENERGIEPRESTATIE

De energieprestatie van een warmtepomp wordt voornamelijk bepaald door de bron en afgifte temperatuur. Daarbij is het van belang de componenten van de warmtepomp optimaal te kiezen: isentropisch rendement zo hoog mogelijk in het beoogde werkgebied van de compressor en voldoende grootte van de warmtewisselende oppervlakken in verdamper en condensor. Ook spelen gebruiksomstandigheden en gebruikersgedrag een belangrijke rol.

Bij gelijke externe omstandigheden heeft elk koudemiddel zijn eigen (theoretische) COP. Een hogere afgiftetemperatuur, zoals mogelijk met bijv. propaan of CO₂, heeft uiteraard ook invloed.

In de hiernavolgende paragrafen komen achtereenvolgens aan de orde:

Met behulp van het softwarepakket “Cooltools” (3) zijn berekeningen gemaakt ter bepaling van de COP, rekening houdend met de praktische verliezen in de koudemiddelcyclus zoals compressor-rendement, sub-cooling in de condensor en super-heating in de verdamper en de temperatuurverschillen tussen koudemiddel en externe media.

Uit de openbaar beschikbare fabrikantgegevens van seriematig geproduceerde en standaard verkrijgbare kant en klaar warmtepompen is een grafisch overzicht gemaakt van de opgegeven COPs.

Van warmtepompen met natuurlijke koudemiddelen is een project-overzicht opgesteld van momenteel bekende referentieprojecten.

5.1 BEREKENDE COP'S

Stationaire simulaties

CoolTools is een software-pakket ontwikkeld door IPU (35), een organisatie gelieerd aan de Deense Technische Universiteit DTU in Lyngby, Denemarken. Cooltools (en voorganger CoolPack) wordt al decennialang wereldwijd gebruikt als betrouwbare en praktische simulatiemethode. Met deze software wordt de COP aan condensorzijde berekend voor meerdere koudemiddelen, bron- en afgiftecondities.

Uitgangspunten simulaties

Basis is de Carnot-formule (36), rekening houdend met de volgende items (incl. de gekozen waarden daarbij):

- Het isentropisch rendement van de compressor: 70%
- De superheating (damp-oververhitting) in de verdamper: 4 K, waarvan 1 K niet benut
- De subcooling (vloeistof onderkoeling) in de condensor: 2 K

- Het rendement van een interne warmtewisselaar tussen zuig-gas en gecondenseerd koudemiddel: 40%
- Drukverlies in zuig en persleiding uitgedrukt in temperatuurverlies: elk 0,5 K (equivalent verschil in verzadigde temperatuur)

Voor de berekeningen met CoolTools zijn zowel de brontemperatuur als de afgiftetemperatuur gevarieerd, daarbij zoveel mogelijk aansluitend bij de standaard condities waarop warmtepompen worden getest. De simulatie met CoolTools staat los van de EU-Energy-Label benadering.

Omdat zowel toepassing in de nieuwbouw als in de bestaande bouw van belang is, zijn ook berekeningen bij hoge ontwerptemperaturen meegenomen.

Bij de brontemperaturen zijn, vanwege de mogelijkheid van (klein)collectieve systemen, ook de COPs berekend bij 10 en 20 °C brontemperatuur bij toepassing van een WKO-bronnet (5^e generatie warmtedistributie) resp. de distributie van laagwaardige restwarmte.

Bij gebouwkoeling en verwarming worden veelal VRF-systemen toegepast die zowel koelen als verwarmen. Ze bevatten relatief veel (HFK)-koudemiddel door gebruik van een uitgebreid leidingnet. Vanwege de veelheid aan systeemcombinaties en gebruiksomstandigheden, zijn de VRF-systemen buiten beschouwing gelaten bij deze vergelijking.

Tabel 5-1 omvat een overzicht van de berekeningen met ruimteverwarming als toepassing.

Bron Afgifte Temperatuur [°C]	35	55	65	75
-7	A-7/W35	A-7/W55	A-7/W65	A-7/W75
0	B0/W35	B0/W55	B0/W65	B0/W75
7	A7/W35	A7/W55	A7/W65	A7/W75
10	W10/W35	W10/W55	W10/W65	W10/W75
20	W20/W35	W20/W55	W20/W65	W20/W75

Tabel 5-1: Overzicht van de berekeningen voor ruimteverwarmingstoepassing

Toelichting bij tabel 5-1 en de grafieken:

Bron/Afgifte

- A: Air (buitenlucht), in Nederland wordt hiervoor ook de L van Lucht gebruikt
- B: gesloten bodem (Brine)
- W: open bodem (grondwater)

Bron/Afgifte

- W: Water (lucht als afgiftesysteem is niet in de beschouwing meegenomen).

De koudemiddelen zijn gerangschikt in volgorde van afnemende GWP. Voor de eigenschappen van deze koudemiddelen, zie tabel 2-2 in paragraaf 2.2.5.

Afwijkende aanpak voor CO₂

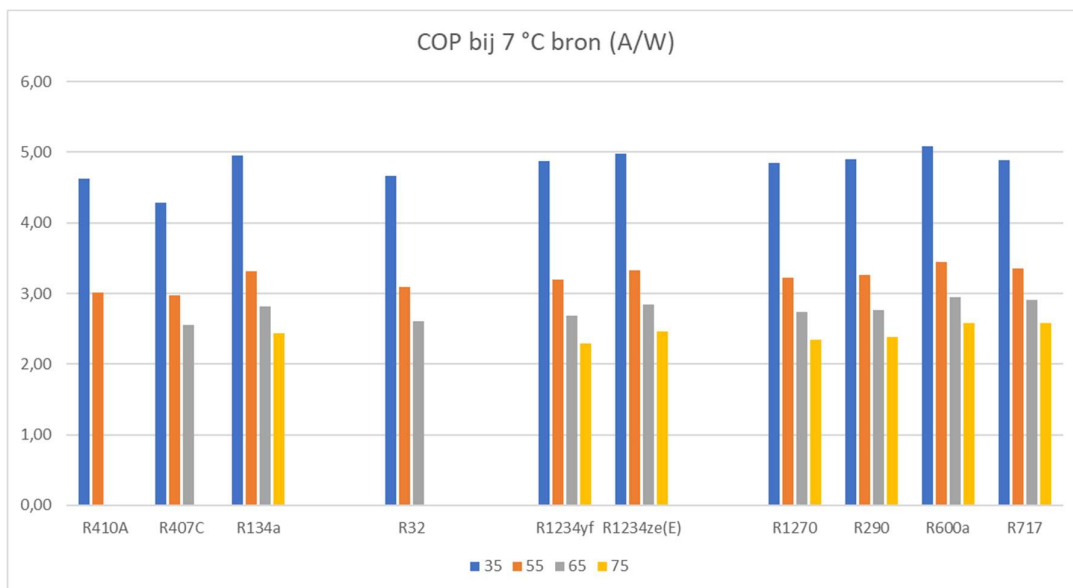
Vanwege de trans-kritische cyclus van CO₂ is de prestatie niet in dezelfde systematiek te bepalen en is niet meegenomen in deze vergelijking. Ook vanwege het lage kritische punt van CO₂ (31 °C) worden de goede prestaties met name bereikt bij warm tapwater bereiding met een doorstroomsysteem en bij lage-temperatuur ruimteverwarming. Zie ook paragraaf 3.2 met de beschrijving van de werking van de CO₂-warmtepomp, paragraaf 5.2 met de leveranciersgegevens en paragraaf 5.3.2 met ontwikkelingen.

Resultaten van stationaire simulaties

Een deel van de resultaten hiervan zijn weergegeven in de onderstaande tabellen en grafieken. De volledige resultaten zijn opgenomen in bijlage 10.

Voor de volledigheid hierbij ook (nogmaals) de scheikundige namen van de natuurlijke koudemiddelen:

- R1270: propaan (propyleen)
- R290: propaan
- R600a: isobutaan
- R717: ammoniak



Figuur 5-1: COP per koudemiddel bij buitenlucht van +7 °C als bron

Het beeld dat hierboven is weergegeven voor de bronconditie A7 is representatief voor de andere berekende broncondities waarvan de resultaten in bijlage 10 zijn opgenomen.

Analyse van stationaire simulaties

- R600a (Isobutaan) haalt steeds 3-10% hogere COP's t.o.v. propaan, oplopend bij de hoge afgiftetemperaturen. Isobutaan wordt veel toegepast bij kleine vermogens (huishoudelijke koel/vrieskasten), vanwege de eigenschappen die sterk lijken op voorlopers HFK R134a en CFK R12; bij warmtepompen voor ruimteverwarming en/of tapwater wordt meestal R290 (propaan) toegepast,

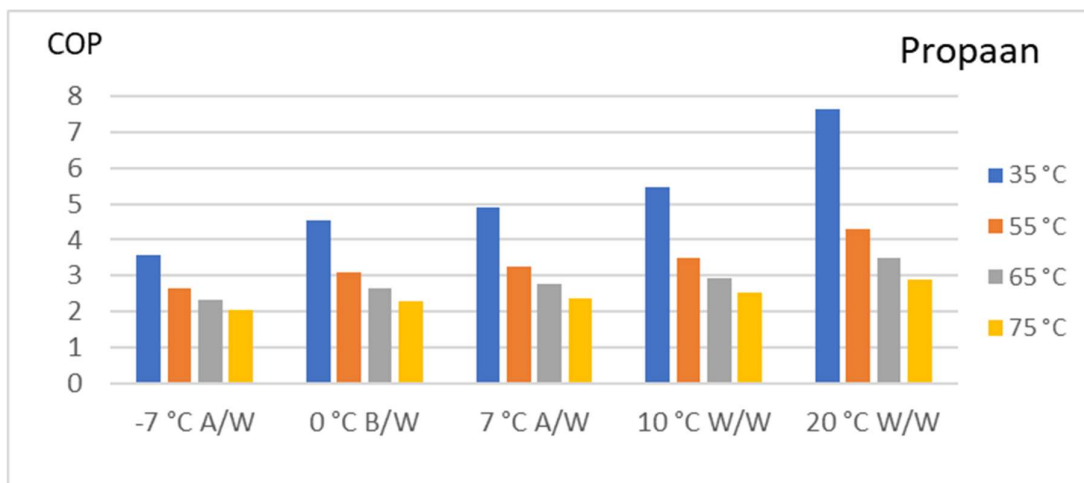
waarbij de componenten kleiner en dus goedkoper kunnen worden uitgevoerd (met eigenschappen die op voorloper HCFC R22 lijken); het COP-voordeel bij R600a kan deze keuze bij hoge afgiftetemperaturen rechtvaardigen.

- Opvallend is dat het nu gangbare synthetische koudemiddel R410A (GWP = 2088) een 5-8% lagere COP heeft dan R290 en bovendien niet geschikt is voor hogere afgiftetemperaturen.
- R134a (GWP = 1430) is evenals R290 (GWP = 3) wel geschikt voor hoge afgiftetemperaturen, bij een vrijwel gelijke COP.
- R32 (GWP = 675) is toepasbaar tot ca. 65 °C afgifte, heeft echter een (ca. 5%) lagere COP dan R134a en R290.
- Van de laag-GWP synthetische koudemiddelen heeft HFO R1234ze(E) (GWP = 7) steeds de hoogste COP. De COP's zijn minder hoog dan die van isobutaan, maar wel 2-3% hoger dan die van propaan. In hoeverre dit voordeel van R1234ze(E) zich in de praktijk bewijst is niet verder onderzocht.

Resultaatmatrix COP met bron en afgiftetemperaturen voor propaan:

Bron / afgifte	35 °C	55 °C	65 °C	75 °C
-7 °C L/W	3,59	2,63	2,31	2,03
0 °C B/W	4,54	3,10	2,66	2,30
7 °C L/W	4,90	3,26	2,77	2,38
10 °C W/W	5,46	3,50	2,94	2,51
20 °C W/W	7,64	4,29	3,48	2,89

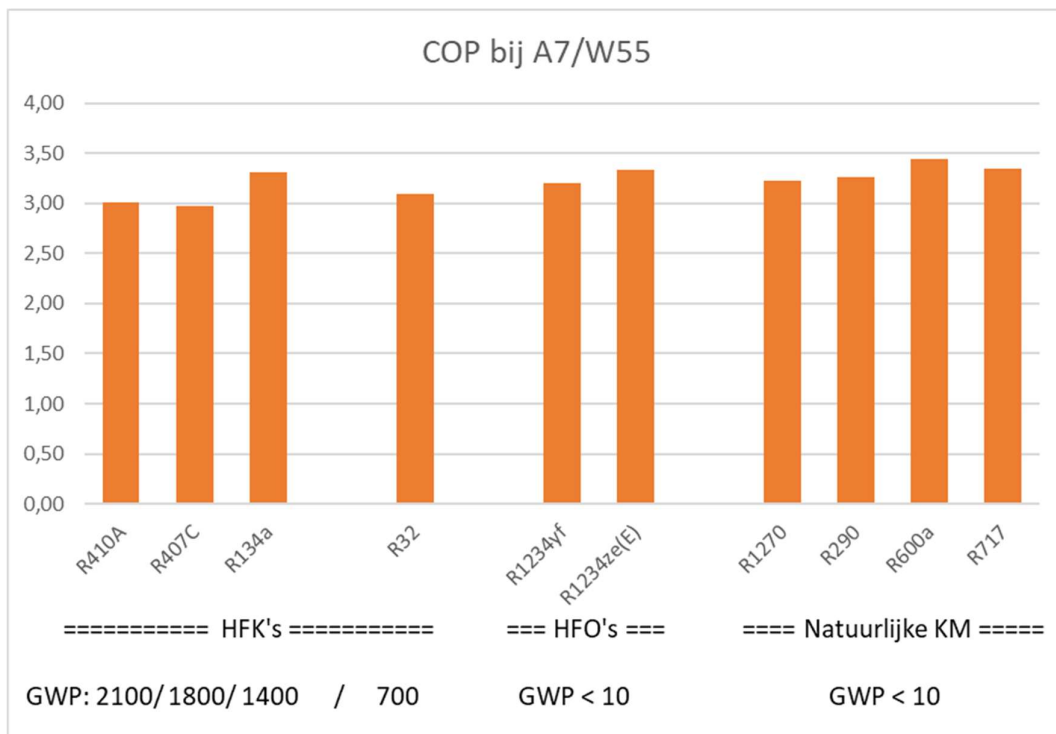
Tabel 5-2: COP's van propaan (R290) als functie van de afgifte- en brontemperatuur



Figuur 5-2: Invloed van bedrijfscondities voor propaan (R290)

In de onderstaande figuur 5-3 zijn de COP's van de verschillende koudemiddelen weergegeven bij één zelfde conditie (A7/W55: 7 °C buitenlucht als bron en 55 °C afgifte

t.b.v. ruimteverwarming). De volgorde van links naar rechts neemt het GWP af. De COP van CO₂ (R744) is niet geheel vergelijkbaar vanwege de afwijkende cyclus met een gaskoeler i.p.v. condensor. De conditie 55 °C aanvoer en 47 °C retour, zou in de gebruikelijke definitie van de Lorentzen-COP voor trans-kritische cycli overeenkomen met een gemiddelde gaskoelertemperatuur van 65 – 70 °C. Bij opwarming van tapwater van 10 naar 60 °C in een doorstroomsysteem zijn met CO₂ COP's van 3,5 tot 4,5 realistisch.



Figuur 5-3: COP van de verschillende koudemiddelen bij dezelfde bedrijfsconditie

Uit de berekende COP's blijkt dat de momentane COP van de koudemiddelen licht varieert. Voor de totale energieprestatie zijn er – alleen op basis van de koudemiddelkeuze – geen grote verschillen te verwachten. Het maximale verschil tussen het koudemiddel met de hoogste COP (R600a) en dat met de laagste COP (R407C) is 15%. Andere systeem-aspecten in de warmtepomp zoals compressorrendement, regeling en grootte van de warmtewisselaars, hebben – zeker gezamenlijk – een minstens zo grote invloed.

Ook blijkt uit de resultaten dat de ontwikkeling van hoog-GWP naar laag-GWP koudemiddelen een licht positieve invloed heeft op de energieprestatie (bij gelijkblijvende overige invloedfactoren).

Dynamische jaarrond simulaties

Er zijn geen indicaties dat de bevindingen bij de eerder beschreven stationaire momentane simulaties substantieel afwijken van bevindingen op basis van dynamische jaarrond simulaties.

Conclusie uit berekeningen

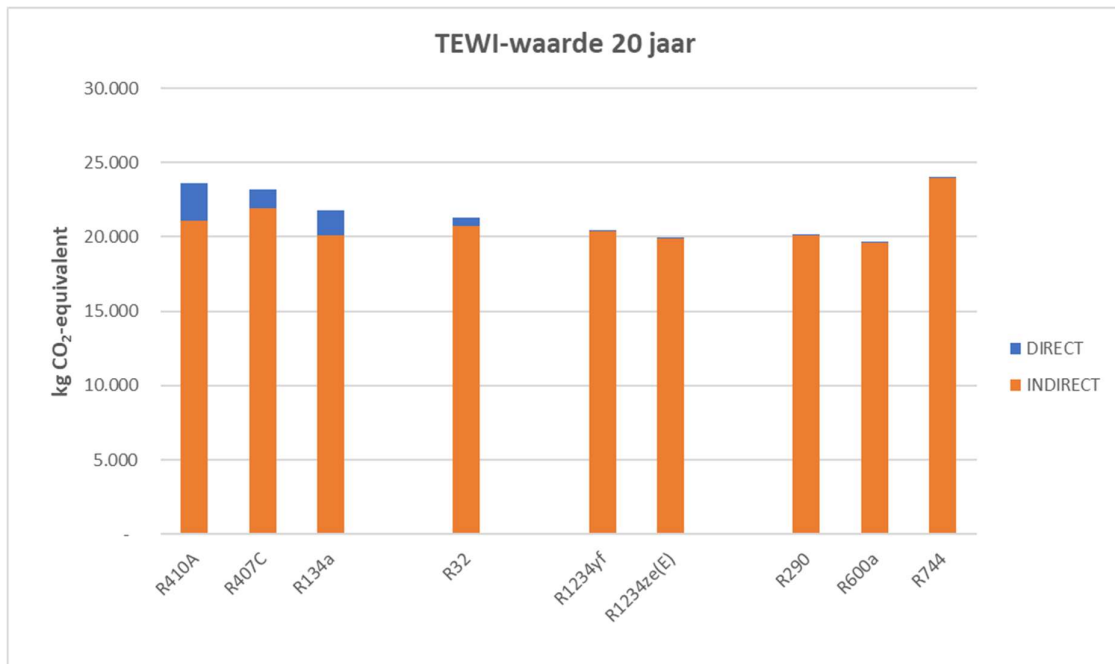
De conclusie uit de uitgevoerde berekeningen is dat de keuze van het koudemiddel geen significante invloedfactor is op de prestaties van een warmtepomp bij specifieke werkcondities. Voor de optimale keuze zijn zowel natuurlijke als synthetische koudemiddelen beschikbaar die vergelijkbaar goed presteren onder de onderzochte condities. Dit ondersteunt de in paragraaf 2.2.3 aangegeven preferentie voor natuurlijke koudemiddelen.

Globale TEWI-benadering

In een TEWI-berekening wordt de impact van het gebruik van een koudemiddel op de atmosfeer bepaald. Hiertoe wordt de equivalente CO₂-uitstoot berekend van het directe gebruik (statistische bepaling van lekkage van de koudemiddelinhoud) en de indirecte CO₂-uitstoot door het elektriciteitsgebruik tijdens de levensduur. De uitkomst van de berekening is sterk afhankelijk van de gekozen uitgangspunten t.a.v. het statistische lekpercentage, de opwekmethode van elektriciteit en de beschouwde periode. De TEWI-methode wordt uitgebreid omschreven in par. 2.2.3.

In de onderstaande figuur 5-4 is de directe en indirecte TEWI-waarde bij een jaarlijkse warmtevraag van 8000 kWh voor ruimteverwarming en 2000 kWh voor tapwater weergegeven op basis van de volgende hoofduitgangspunten:

- periode: 20 jaar;
- jaarlijks lekpercentage: 2% (37);
- recycling aan het einde van de technische levensduur (20 jaar): 80%;
- GWP₁₀₀ t.b.v. de directe bijdrage;
- CO₂-emissie elektriciteitsopwekking: 0,34 kg/kWh-e;
(huidige normwaarde t.b.v. energieprestatieberekeningen (NTA 8800)).



Figuur 5-4: TEWI-berekening van de koudemiddelen

De directe bijdrage is rechtstreeks afhankelijk van de GWP-waarde van het koudemiddel en niet meer zichtbaar bij de natuurlijke koudemiddelen en bij de R1234-varianten (beperkt tot ca. 10 kg CO₂-equivalent).

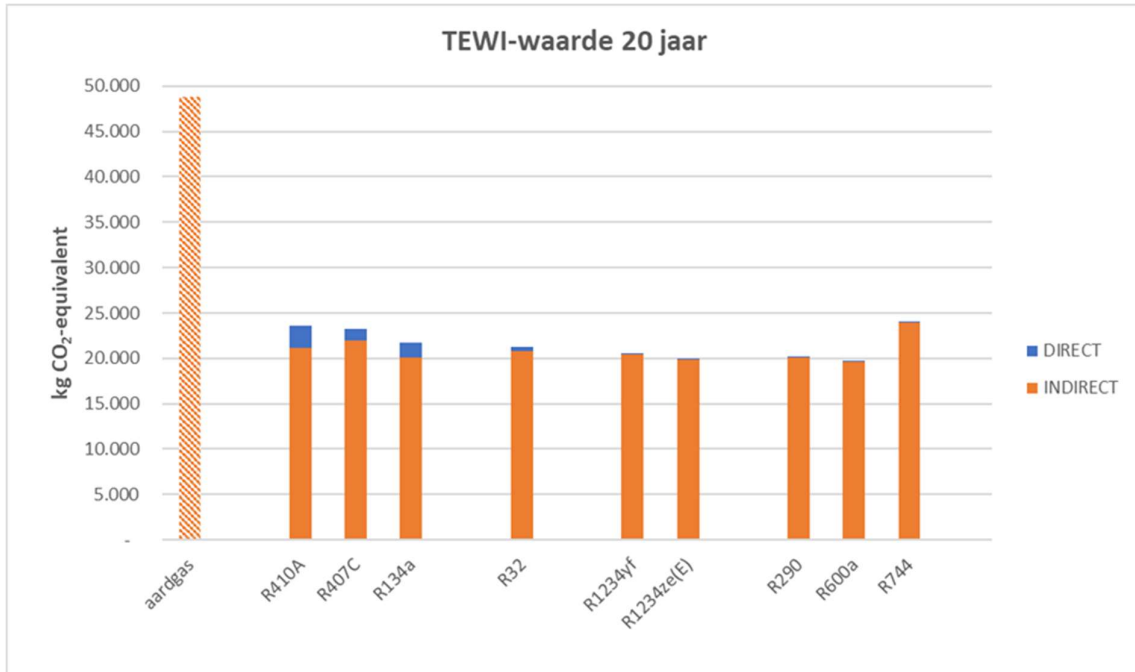
De indirecte bijdrage door het elektriciteitsverbruik is echter dominant. De relatief kleine verschillen hierin ontstaan door de COP-verschillen tussen de koudemiddelen onderling. CO₂ als koudemiddel heeft een significant hogere indirecte bijdrage vanwege de lagere COP voor ruimteverwarming.

De hoge indirecte bijdrage ontstaat doordat de normwaarde van 0,34 kg/kWh-e gebaseerd is op een (voor de nabije toekomst berekende) mix van groene stroom en van elektriciteit geproduceerd met fossiele brandstof. Gerekend met de huidige elektriciteitsmix zouden de oranje kolommen ca. 50% groter zijn, en daarmee nog dominanter.

Een ander beeld ontstaat wanneer het vermeden gasverbruik² wordt betrokken in de TEWI-berekening. Immers i.t.t. de koelfunctie (waarop de TEWI-bepaling oorspronkelijk is ontwikkeld), verdrijft een warmtepomp in verwarmingsfunctie meestal de CO₂-emissie van een equivalente hoeveelheid aardgas.

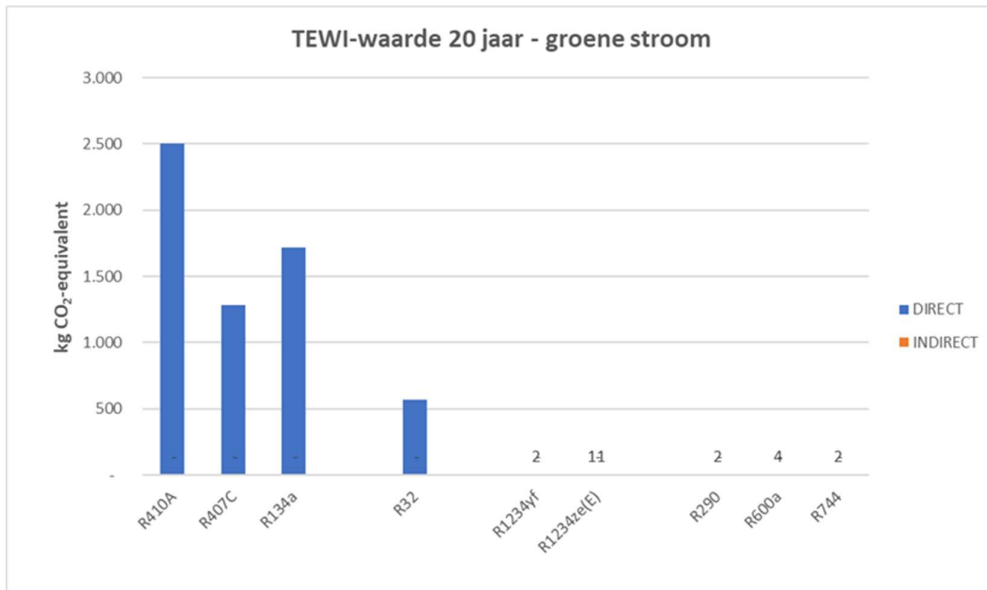
Dezelfde hoeveelheid warmteproductie door middel van de verbranding van aardgas gaat gepaard met een CO₂-emissie van bijna 50.000 kg. Dit is weergegeven met de gestreepte kolom aan de linkerkant van de grafiek in figuur 5-5. Duidelijk blijkt hieruit dat de inzet van warmtepompen (ook met de huidige brandstof-mix voor elektriciteitsopwekking) altijd resulteert in een lagere CO₂-emissie. Gedurende de levensduur van de warmtepomp. De keuze van het koudemiddel heeft hierop slechts een marginaal effect.

² Opwekking van eenzelfde hoeveelheid warmte met een HR-ketel zou gepaard gaan met een CO₂-emissie van ca. 50.000 kg (ca. 1400 m³ gas per jaar)



Figuur 5-5: TEWI-berekening van de koudemiddelen in vergelijking het gebruik van het aardgas

Volledig gebruik makend van groene stroom, valt de indirecte bijdrage volledig weg en is de GWP van de koudemiddelen volledig bepalend.



Figuur 5-6: TEWI-berekening van de koudemiddelen bij gebruik van groene stroom

In bijlage 2 zijn de volledige uitgangspunten opgenomen alsmede een beknopte gevoeligheidsanalyse.

5.2 PRODUCTEN – LEVERANCIERSDATA

In de onderstaande grafiek (figuur 5-5) zijn voor drie koudemiddelen (R410A, R32 en R290) van 15 warmtepompen de COP's opgenomen zoals die door de leveranciers worden opgegeven.

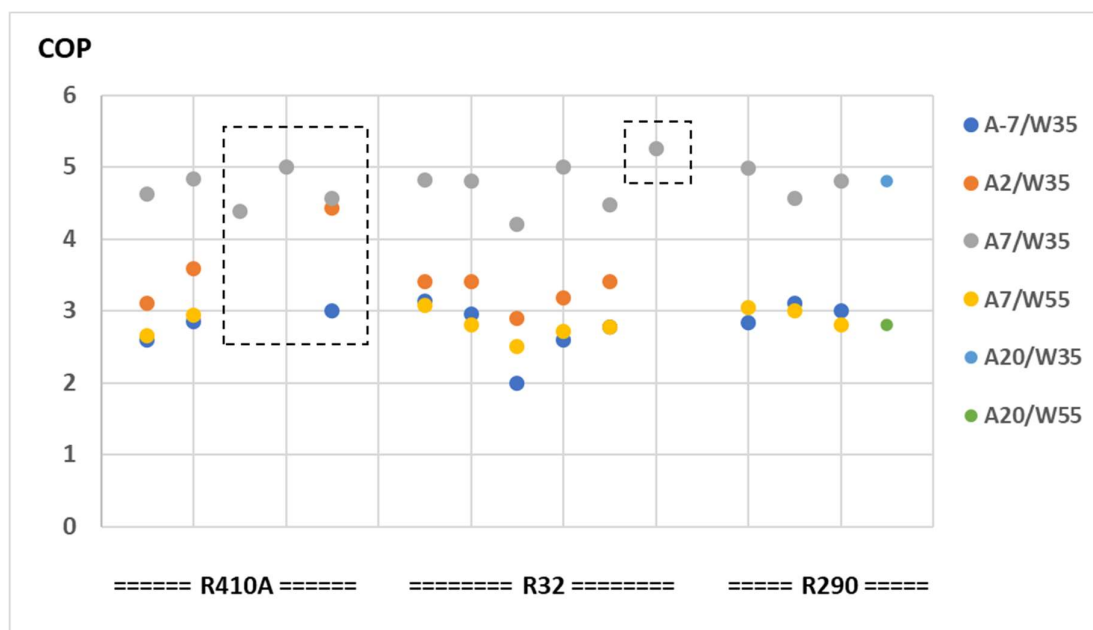
Deze COP's zijn bepaald tijdens genormeerde metingen (EN 14511 en/of EN 14825) in daartoe geaccrediteerde test laboratoria.

Elke verticale combinatie van stippen betreft één warmtepomp.

De waarden zijn gegroepeerd per koudemiddel: er zijn 5 warmtepompen met R410A opgenomen, 6 met R32 en 4 met R290.

De kleuren van de stippen hebben betrekking op de standaardconditie waarbij de COP van toepassing is cf. de legenda.

De met stippellijnen omkaderde punten hebben betrekking op deellastbedrijf; normaal gesproken zijn deze hoger dan bij vollastbedrijf onder dezelfde condities.



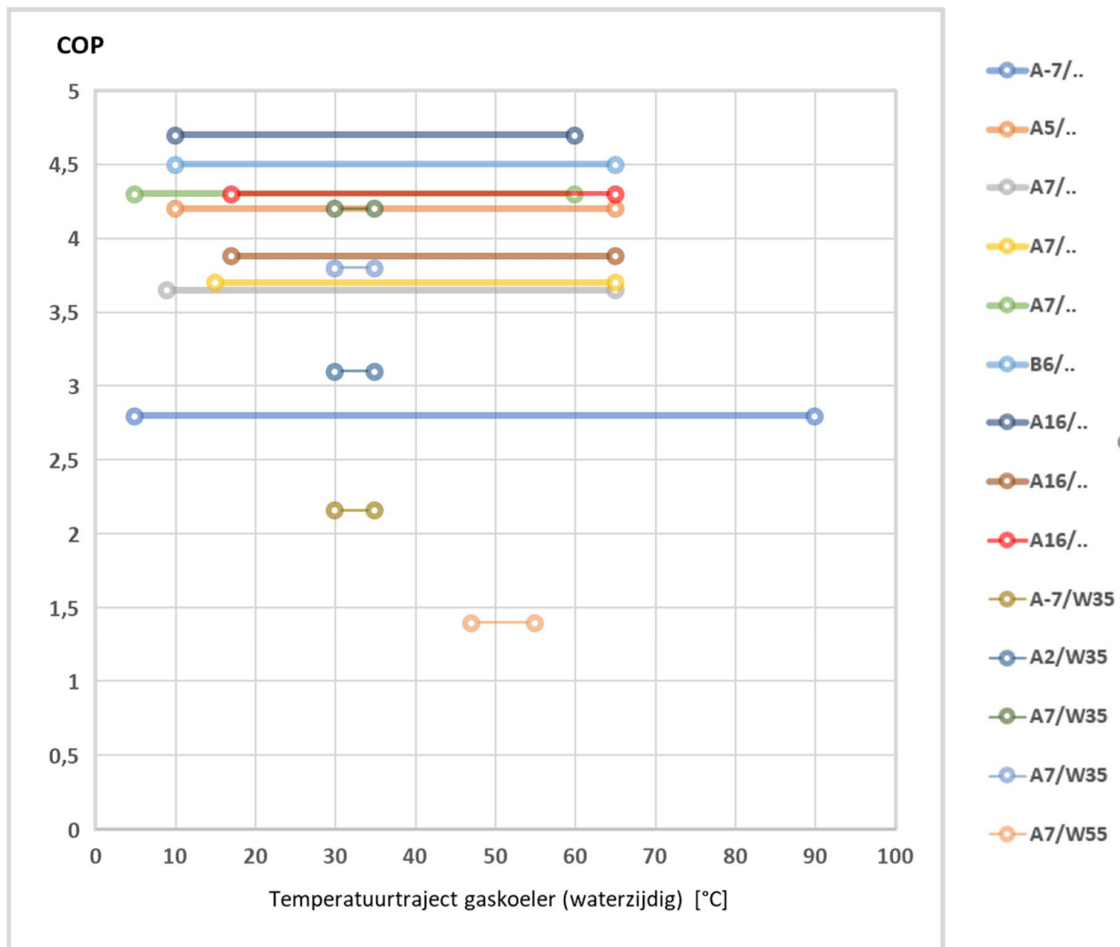
Figuur 5-5: COP's uit leveranciersdata

In de grafiek is uiteraard duidelijk zichtbaar dat de COP's bij alle koudemiddelen hoger zijn naarmate de brontemperatuur hoger, en de afgiftetemperatuur lager is. Van wezenlijk belang is echter dat er geen significante verschillen zijn tussen de drie gangbare sub-kritische koudemiddelen. Bij een meer gedetailleerde observatie is te zien dat R290 iets hogere COP's levert bij de condities A7/W55 en A-7/W35 (gele en donkerblauwe punten).

Ook voor warmtepompen met CO₂ als koudemiddel zijn COP's op basis van leveranciersdata geïnventariseerd en weergegeven in de onderstaande figuur 5-6. Een vergelijking voor CO₂ (R744) is beperkt mogelijk binnen de standaard meetcondities uit

de EN 14511 of de EN 14825 vanwege het trans-kritische werkgebied: de warmteafgifte vindt plaats d.m.v. een gaskoeler i.p.v. een condensor. Hierdoor is er bij CO₂ sprake van een temperatuurtraject i.p.v. een vaste condensatietemperatuur.

In de onderstaande grafiek is dit traject weergegeven als een horizontale lijn. De meeste trajecten zijn lang: van ca. 10 °C tot ca. 65 of zelfs 90 °C. Dit zijn alle warmtepompen die toegepast worden voor de verwarming van tapwater. Dit betreft doorstroomsystemen of systemen voorzien van een of meer warmtebuffers met bijzonder goede temperatuur-gelaagdheid, waarbij het water koud intreedt en heet uittreedt, klaar voor gebruik als warmtapwater. De korte trajecten corresponderen met toepassing voor ruimteverwarming en betreffen genormeerde test-condities waarbij er sprake is van circulerend systeemwater. In de legenda zijn de bijbehorende broncondities aangegeven. Hierbij staat A voor buitenlucht (Air) en B voor water met antivries (Brine); het daaropvolgende getal geeft de temperatuur van de bron aan. A-7 betekent dus buitenlucht van -7 °C. De aanduiding W35 of W55 heeft betrekking op de afgiftetemperatuur van een watergevuuld systeem voor ruimteverwarming (35 resp. 55 °C). De punten (..) na de slash (/) geven aan dat er sprake is van een temperatuurtraject voor de opwarming van tapwater (hier is geen genormeerde aanduiding voor). Dit temperatuurtraject is af te lezen uit de grafiek: bij de bovenste (donkerblauwe) lijn (A16/..) is de waterintrede 10 °C en de uittrede 60 °C.



Figuur 5-6: COP van CO₂ als koudemiddel

Uit de inventarisatie komen enkele specifieke kenmerken naar voren:

- met CO₂ kunnen hoge COP's worden behaald bij lange temperatuurtrajecten;
- de laagste lange lijn valt daarbij extra op: een hoge COP van 2,8 bij -7 °C lucht als bron en afgiftemperatuur van 90 °C tapwater; dit komt (mede) door de zeer lage intredetemperatuur van 5 °C in de gaskoeler;
- bij de overige lange trajecten valt de grote spreiding in COP's op (tussen 3,6 en 4,5) bij vrijwel gelijke condities. Dit kan mogelijk verklaard worden uit de constructief-technische details van de warmtepompen, deze informatie was echter niet beschikbaar;
- de COP bij A16 als bronconditie scoort het hoogst: 4,75 – daarbij wordt 60 °C tapwater geleverd;
- voor ruimteverwarming (de korte trajecten in de grafiek) blijkt dat bij lage afgifte temperatuur (W35) de COP van CO₂ slechts iets lager is dan de COP van de sub-kritische koudemiddelen in figuur 5-4. Bij hoge afgiftemperatuur (W55) ligt de prestatie van CO₂ onder genormeerde testcondities duidelijk en substantieel lager t.o.v. de sub-kritische koudemiddelen.

Hieruit wordt duidelijk dat de toepassing van CO₂-warmtepompen vooral bij de productie van warm tapwater zeer kansrijk is. Dit blijkt ook uit de vele gerealiseerde praktijkvoorbeelden in de volgende paragraaf.

Verder is het – zoals bij elke warmtepomp - van belang zo weinig mogelijk aan/uit schakelingen te laten plaatsvinden. Het voordeel van het lange temperatuurtraject aan de afgiftezijde komt daarbij goed tot z'n recht bij een doordachte afstemming van tapwateropslag en tapwaterbehoefte in relatie tot het warmtepompvermogen. Toepassing in collectieve warm tapwater-systemen (hotels, gestapelde bouw) ligt daarbij voor de hand.

Vanwege de transkritische cyclus is het bij CO₂ van belang bij de hogere afgiftetemperaturen (55 °C en hoger zoals die met name in de bestaande bouw voorkomen) voor ruimteverwarming een groter verschil tussen aanvoer- en retourtemperatuur te bewerkstelligen. Voor de retourtemperatuur wordt een maximum van ca. 40 °C als grenswaarde gehanteerd om optimaal gebruik te kunnen maken van de werking van de gaskoeler en daarmee het rendement te verhogen. Dit kan worden bereikt door combinatie met een warmtebuffer met voldoende temperatuur-gelaagdheid.

Ook toepassing bij lage temperatuur ruimteverwarming is interessant, ondanks de iets lagere COP voor ruimteverwarming, heeft CO₂ hier het voordeel van niet-brandbaarheid. Bij combitoestellen zal de betere COP voor tapwater de totale prestatie op vergelijkbaar niveau brengen.

5.3 PROJECTEN

5.3.1 Gerealiseerde projecten

Natuurlijke koudemiddelen worden al enige tijd toegepast in seriematig geproduceerde warmtepompen. Deze warmtepompen zijn kant en klaar beschikbaar en kunnen als Plug&Play-unit worden ingebouwd in een cv-systeem.

Het onderstaande overzicht geeft een globaal beeld van de op dit moment beschikbare toestellen, zonder daarbij compleet te kunnen zijn. Van de grotere warmtepompen (30-40 kW) met CO₂ als koudemiddel zijn een aantal referentie-projecten vermeld.

Alpha Innotec - LWDV (propaan – 8 kW):

Grote aantallen individueel/particulier

Vaillant - aroTherm plus (propaan – tot 12 kW):

Sinds september 2020 beschikbaar. Tot nu hoofdzakelijk individueel/particulier toegepast.

NIBE – F370/F470 (propaan – 2,2 kW)

Grote aantallen individueel/particulier

Mitsubishi Electric – QAHV (CO₂ – 40 kW) Alklima:

- Albus Hotel - Amsterdam: tapwater
- Courtyard Marriott Hotel – Hoofddorp: tapwater
- Zorggroep Tangenborgh – Coevorden: tapwater
- Begeleid wonen Zozijn – Heerhugowaard
- Stadshotel – Woerden
- Grote aantallen individuele/particuliere toepassingen

MHI – Qton (CO₂ – 30 kW)

- DUWO – Leiden: tapwater t.b.v. 160 studentenflats – 2 maal 30 kW (Coolmark/VINK)
- Marriott Hotel – Schiphol: tapwater – 6 maal 30 kW (Coolmark)
- VV Nieuwerkerk: tapwater - 30 kW (Coolmark)
- Mentrumbouw – Amsterdam: tapwater en ruimteverwarming (HT) t.b.v. 90 studio's – 4 maal 30 kW (STULZ/INNQ)

5.3.2 Onderzoek, ontwikkeling en demonstratieprojecten

In de afgelopen jaren zijn een aantal interessante ontwikkel-projecten gestart gebruik makend van subsidiemogelijkheden (o.m. DEI en TSE Energie Innovatie). De projecten zijn in verschillende ontwikkelstadia, van prototype tot praktijkdemonstratie. Hieronder volgt een beknopte omschrijving.

Specifieke toepassing Eco-Cute voor NL-markt

In een gezamenlijk project van Vattenfall, Feenstra, DENSO en SOLVIS wordt de Ecocute van DENSO doorontwikkeld voor toepassing op de Nederlandse markt. Dit systeem maakt gebruik van een hoge-temperatuur-CO₂-warmtepomp en een gelaagd buffervat met temperatuurafhankelijke instroomvoorziening. De gebruikte buffer fungeert als warmtebatterij die zowel wordt ingezet voor het leveren van warmte aan de radiatoren als voor het maken van warm tapwater. De temperatuurgelaagdheid in de buffer maakt het mogelijk een groot temperatuurverschil te handhaven over de warmtepomp. Voor een optimaal rendement is een retourtemperatuur uit het afgiftesysteem van ca. 40 °C nodig. Hiertoe dient (o.m.) het debiet van de afgiftecomponenten (in de bestaande bouw meestal radiatoren) nauwkeurig ingeregeld te worden. Het tapwater wordt net als in meeste cv-ketels instantaan en legionellaveilig gemaakt via geïntegreerde tapwateropwekking (fresh-water-station). Dit systeem gebruikt een externe (buiten de warmtebuffer) geplaatste warmtewisselaar. Hierdoor bevat de warmteopslag geen drinkwater. Een voorraad van warm tapwater is dus niet nodig. Het doel van dit project is een systeem te ontwikkelen dat 1-op-1 de cv-ketel kan vervangen in de bestaande bouw.

Ontwikkeling R290-warmtepomp met extreem lage koudemiddel inhoud

High Performance Little Air Unit Natural Charge Heatpump (HP-Launch);
Projectdeelnemers: HAN, Re/genT, BDH, Haagse Hogeschool, MMID, TransferWorks

Doel van dit project is de ontwikkeling van een propaan-warmtepomp met een zo laag mogelijke koudemiddelinhoud.

De grootste uitdaging ligt daarbij in de ontwikkeling van optimale warmtewisselaars (condensor en verdamper) waarbij koudemiddelinhoud en rendement ieder een tegengestelde optimalisatie-richting hebben.

De resultaten van de prestatietesten uitgevoerd/geanalyseerd door Re/genT (15) laten zien dat met een extreem lage koudemiddelinhoud van 150 en 170 gram R290 condensorvermogens van ca. 3,5 kW geleverd kunnen worden. De COPs zijn daarbij in 7 van de 10 meetcondities hoger dan die van een op de markt beschikbare standaard WP die als referentie-unit in deze studie is betrokken.

Testresultaten:

	Vermogen [kW]	COP
A7/W35 – 150 g	3,4	4,47
A7/W35 – 170 g	3,5	4,63

Wonen Limburg

In dit project wil Wonen Limburg met een grootschalige pilot vaststellen of een hoog temperatuur lucht/water warmtepomp geschikt is voor de energietransitie. Hiertoe worden 4 wooncomplexen in Venray en 4 in Weert voorzien van een tweetraps propaan/isobutaan warmtepomp. Het betreft twee verschillende concepten: Venray heeft een ringleidingsysteem, Weert een apart collectief systeem voor ruimteverwarming en een individuele tapwatervoorziening. In de pilot wordt naast de robuustheid ook het dynamisch gedrag van de warmtepompen getest met zowel een stooklijn aan de afgifte kant als een variabele brontemperatuur, namelijk de buitenlucht. De energie voor de warmtepomp wordt voor een substantieel deel opgewekt met een zon-PV installatie. Dit concept zal doorontwikkeld worden voor opschaling in het project Nederlandse warmtepompenfabriek (MOOI32016) *De meetapparatuur is geïnstalleerd, er zijn momenteel nog wijzigingen die worden aangebracht waarna de monitoring kan plaatsvinden.*

Stille NOM-energiemodule o.b.v. CO₂-warmtepomp

De eerste activiteiten binnen het project waren gericht op het integreren van de CO₂-warmtepomp in een nieuwe energiemodule. Een nieuw ontwerp is gemaakt waarin de CO₂-warmtepomp, samen met de reeds bestaande installaties (omvormer, WTW-unit, monitoringskast), in de energiemodule past.

Vervolgens is de module gedurende een half jaar getest in Landsmeer, waar honderdtwintig woningen tot Nul op de Meter (NOM)-woning gerenoveerd zijn. Door het energieverbruik van de warmtepomp, en het water- en warmteverbruik van de bewoners te vergelijken met twee vergelijkbare woningen, is onderzocht of de CO₂-warmtepomp daadwerkelijk de verwachte rendementen op tapwater en ruimteverwarming heeft gehaald met hetzelfde comfort als warmtepompen die werken met R410A-koudemiddel.

Het comfort is gemeten door te vergelijken of bij de CO₂-warmtepomp de volgende aspecten even goed, of beter worden gewaarborgd, als bij de R410A-koudemiddel

warmtepomp: of de ingestelde kamertemperatuur binnen dezelfde tijd wordt gehaald, of de kamertemperatuur even constant blijft, en of er voldoende water van de gewenste temperatuur geleverd kan worden. Daarnaast is de bewoners gevraagd naar hun comfortbeleving.

Verder is er een decibeltest uitgevoerd (op één meter afstand van de energiemodule). Dit is zowel bij de CO₂-warmtepomp gedaan als bij de warmtepomp met R410A-koudemiddel.

Door BAM en Alklima zijn testen uitgevoerd en geluidmetingen gedaan. Promotie en bewonerscommunicatie is uitgevoerd met ondersteuning door Woningcorporatie Eigen Haard

De resultaten van dit project zijn (38), (39):

- een prototype van een energiemodule met CO₂-warmtepomp waarmee een woning aardgasloos, en i.c.m. zonnepanelen en isolatie van gevel en dak, Nul op de Meter gemaakt kan worden;
- verificatie dat de COP-waarde van de nieuwe energiemodule (met CO₂-warmtepomp) ca. 0,5 hoger ligt dan die van de nu gebruikte warmtepomp in de energiemodule;
- verificatie dat de nieuwe energiemodule (met CO₂-warmtepomp) het comfort level van de energiemodule met de nu gebruikte warmtepomp niet alleen evenaart, maar zowel kwantitatief (gemeten waarden) als kwalitatief (bewonerservaring) overstijgt;
- uit de metingen van de energieprestatie blijkt een praktische SCOP (gemiddeld seizoens-rendement) gewogen gemiddelde van ruimteverwarming en tapwater opwekking van 2,85 (tov 2,31 met R410A) en 2,88 (tov 2,27 met R410A).

Vanwege de positieve resultaten van het project overweegt BAM om de nieuwe warmtepomp standaard in haar energiemodule te integreren. Hierbij ziet BAM de nieuwe warmtepomp met name interessant voor inzet in minder goed geïsoleerde woningen. Eerst moet hiervoor de nieuwe warmtepomp door Alklima op de Nederlandse markt gebracht worden, naar verwachting in 2020/2021.

Hoge veiligheid propaan warmtepomp met standaardcomponenten

Carel Industries in Italië ontwikkelde een propaan-warmtepomp voor huishoudelijke toepassing met standaardcomponenten én een acceptabel veiligheidsniveau. In een samenwerking van systeem- en componentenfabrikanten is een betaalbare en betrouwbare warmtepomp ontwikkeld. In de recent gepresenteerde publicatie (24) wordt de ontwikkeling beschreven van een R290 lucht-water warmtepomp.

Veilige R290 warmtepomp met 800 g vulling

Nibe en Alpha-Innotec hebben in samenwerking met AHT, ECOS, HEAT en Shecco een prototype ontwikkeld van een huishoudelijke warmtepomp met 800 g propaan

vulling, waarbij met gebruikmaking van speciale veiligheidsvoorzieningen de veiligheidsrisico's acceptabel zijn (25). Deze ontwikkeling vond plaats in het kader van het LIFEFRONT-project (17).

Overige:

- Kuikenbroederij van Hulst Veldhoven:
Industriële toepassing van R290 en R600a, ontwikkeld door Servex. Dit betreft een tweetraps warmtepomp met beide koudemiddelen in cascade, waarmee altijd de productie van 80 °C cv-water gegarandeerd moet worden, ook bij -20 °C buitenlucht als bron. Het systeem is uitgerust met 3 warmtepompen vanwege de gewenste redundantie t.b.v. de bedrijfszekerheid.
Het systeem werkt naar tevredenheid. Er zijn nog geen meetgegevens beschikbaar.
- Gulpener bierbrouwerij: "Brouwen zonder stoomketel"
- Industriële toepassing R600a: met een door Servex ontwikkelde butaan-warmtepomp wordt stoom van 120 °C geproduceerd voor het brouwproces.
- In combinatie met andere proces-innovaties (waardoor ook de energievraag van het proces vermindert) wordt binnenkort aardgasvrij bier gebrouwen.
De installatie is in aanbouw.

Dit type warmtepomp, ontwikkeld t.b.v. industriële toepassingen, kan uitstekend worden doorontwikkeld als (modulaire) warmtepomp voor blokverwarming bij bestaande flatgebouwen waar nog hoge-temperatuur verwarming nodig is. Dit concept zal doorontwikkeld worden voor opschaling in het project Nederlandse warmtepompenfabriek (MOOI32016)

Het is van belang dat bij dergelijke grote, niet-standaard warmtepompen een competente ontwerper en installateur zijn betrokken die goed op de hoogte zijn van de van toepassing zijnde nationale wet- en regelgeving, zoals bij de hier beschreven projecten het geval is.

6 OVERZICHT VAN WARMTEPOMPTOEPASSINGEN EN MOGELIJKE KOUEMIDDELOPTIES

Dit hoofdstuk beperkt zich tot de meest toegepaste natuurlijke koudemiddelen: propaan, isobutaan, ammoniak en kooldioxide. In een tabel wordt een overzicht gepresenteerd van warmtepomptoepassingen met het bijbehorende perspectief voor deze natuurlijke koudemiddelen.

Ammoniak wordt al bijna 100 jaar gebruikt in de koelindustrie en staat bekend om zijn hoge energetisch rendement, dat voornamelijk te danken is aan de hoge verdampings-energie.

In tegenstelling tot zijn uitstekende koudemiddeleigenschappen, is ammoniak giftig en brandbaar en niet toepasbaar in combinatie met koper.

Om de koudemiddel-inhoud te beperken en distributie in een wijdvertakt systeem te voorkomen (buiten industriële toepassingen) wordt ammoniak vaak gebruikt in combinatie met een secundair medium (CO₂, en in de koudetechniek: water-glycol). Deze aspecten leiden ertoe dat de toepassing van ammoniak (naast industriële) met name tot grote (collectieve) systemen zoals sportcentra (zwembad-ijsbaan) en supermarkten beperkt blijft. Ook voor collectieve systemen in de gebouwde omgeving (wijkverwarming) biedt dit mogelijkheden, waarbij het voor de hand ligt de technische ruimte niet met een woongebouw te integreren, maar de ammoniak voerende delen in een apart gebouwtje op te stellen vanwege de giftigheid en brandbaarheid.

Isobutaan wordt met name toegepast in koelkasten (kleine vermogens). Voor ruimteverwarming en/of tapwater zijn geen toepassingen bekend. Het hoge kritische punt van isobutaan maakt condensortemperaturen van ruim boven 100 °C mogelijk, waarmee toepassing voor HT-verwarming en tapwater voor de hand zou liggen. De lage volumetrische capaciteit van isobutaan (zie par 3.1) leidt tot relatief hoge volumestromen per kW in het interne koudemiddelcircuit. Dit gaat gepaard met grote componenten compressoren, warmtewisselaars en leidingdiameters, hetgeen de omvang en de kostprijs van de warmtepomp verhoogd. Desalniettemin vinden momenteel twee interessante pilot-projecten plaats met industriële toepassing van isobutaan in een kuikenbroederij en een bierbrouwerij (zie par. 5.3.2).

Propan heeft uitstekende eigenschappen voor zowel laag als hoog-temperatuur ruimteverwarming en tapwaterproductie. Toepassing vindt reeds geruime tijd plaats. Vanaf ca. 2017 zijn diverse seriematig geproduceerde toestellen beschikbaar van met name Europese fabrikanten in de vermogensrange van 5 tot 20 kW.

CO₂ is vanwege de trans-kritische cyclus vooral geschikt voor verwarming van tapwater en kan daarnaast ook worden toegepast voor laagtemperatuur ruimteverwarming. Voor ruimteverwarming op hoge temperatuur (vanaf ca. 55 °C) is er ook potentieel maar is een directe koppeling aan het afgiftesysteem niet mogelijk. Verschillende partijen zetten echter interessante stappen in de ontwikkeling van totaalsystemen - waaronder toevoeging van een temperatuur-gelaagde buffer met water of PCM's (40) als opslag medium - waarbij een CO₂ warmtepomp als warmtebereider voor zowel warm tapwater als ruimteverwarming dient.

De toepassingsmogelijkheden van koudemiddelen hangen nauw samen met hun fysische eigenschappen zoals ook besproken in par. 2.2.7. In onderstaand overzicht in tabel 6-1 zijn de mogelijkheden samengevat d.m.v. een "stoplicht-model". Daarbij is een uitsplitsing gemaakt naar vermogen, functie en bron. Functie en bron hebben betrekking op het temperatuurniveau van resp. condensor en verdamper. De waardering hierbij is met name gebaseerd op de fysische eigenschappen van het koudemiddel.

Bij het vermogen zijn vooral de beperkingen van ammoniak voor kleine vermogens bepalend en bij isobutaan de omvang van de installatie bij grotere vermogens die de toepassing minder voor de hand liggend maken. De gehanteerde grenzen zijn op 12 kW gekozen voor ruimteverwarming in standaard (bestaande) woningen en op 70 kW voor grote utiliteit vanwege de grens tussen ISDE en EIA-ondersteuning door de overheid.

Bij de onderstaande classificering (tabel 6-1) is meegenomen dat er qua energetisch rendement (COP) slechts kleine verschillen zijn tussen de verschillende koudemiddelen, waardoor de invloed op de toepassingsmogelijkheden marginaal is. De enige uitzondering hierop is de toepassing van CO₂ bij MT- en HT-ruimteverwarming (zie de betreffende noot bij de tabel), daar is de COP – onder standaard meetcondities - wél bepalend in de classificering.

De kleuren hebben de volgende betekenis:

- Groen: wordt al toegepast en/of geen significante beperkingen
- Geel: minder voor de hand liggend
- Oranje: zeer beperkt of moeilijk toepasbaar

De onderstaande tabel geeft een globaal overzicht van de toepassingsmogelijkheden op basis van de beschikbare informatie, en de berekeningen zoals weergegeven in dit rapport.

	R290	R600a	R717	R744
	Propaan	Isobutaan	Ammoniak	CO ₂
Vermogen				
Huishoudelijk: <12 kW			1)	
Blokverwarming/kleine utiliteit/gestapelde bouw: < 70 kW		2)	1)	
Wijk/grote utiliteit: >70 kW/unit		2)	1)	
Toepassing/functie				
LT-ruimteverwarming: 35 °C		3)	4)	5)
MT-ruimteverwarming: 55 °C		3)	4)	6)
Hoge temperatuur ruimteverwarming: 75 °C			4)	6)
Tapwater 60-80 °C			4)	
Bron				
Buitenlucht: -12 tot +15 °C		7)		
Bodemwarmtewisselaar (of drinkwater): 0 tot 8 °C				
Grondwater: 10 tot 18 °C				
Ventilatielucht: 20°C				8)
Rest/afvalwarmte (ook RIO-Thermie): 20-30 °C				8)
Specifieke aspecten				
	9)	10)	11)	12)

Tabel 6-1: overzicht warmtepomptoepassingen met natuurlijke koudemiddelen

- 1) Vanwege de giftigheid is toepassing binnenshuis niet strevenswaardig. Ook buitenshuis vraagt de toepassing van ammoniak om uitgebreide veiligheidsmaatregelen. Bij kleine vermogens maakt dit de installatie onevenredig kostbaar.
- 2) Bij grote vermogens wordt de installatie relatief omvangrijk, maar dat is in de meeste gevallen geen probleem.
- 3) De fysische eigenschappen leiden bij isobutaan tot een hoge COP bij hoge afgiftetemperaturen.

- 4) Alleen als centrale toepassing buiten het woongebouw met distributie d.m.v. secundair medium.
- 5) Iets minder goed rendement dan propaan, echter niet-brandbaar.
- 6) Vanwege het (zeer) matige rendement bij een klein temperatuurverschil over intrede-uitrede condensor, is toepassing bij hogere afgiftetemperaturen in conventionele cv-systemen – alhoewel technisch mogelijk - niet aan te bevelen.
Vergroting van het temperatuurverschil tussen aanvoer en retour, zodanig dat de retourtemperatuur onder de 40 °C uitkomt, levert een substantiële verbetering van de COP op, waardoor toepassing voor hoge-temperatuur ruimteverwarming wel interessant wordt. Hiervoor is het nodig een warmtebuffer met goede temperatuurgelaagdheid tussen de warmtepomp en het afgiftesysteem te schakelen. Dit systeem is momenteel in ontwikkeling bij een aantal marktpartijen.
- 7) Er moet rekening mee worden gehouden dat R600a sub-atmosferisch is bij een verdampingstemperatuur onder -12 °C; dat hoeft geen probleem te zijn (R600a wordt standaard toegepast in hermetisch systeem voor huishoudkoelkasten en -vriezers).
- 8) Verdampingstemperatuur (zeer) dicht bij kritisch punt, waardoor de technisch-fysische grenzen van efficiënte toepassing worden bereikt.
- 9) Bij toepassing binnenshuis zijn (beperkte) extra ventilatie-eisen van toepassing.
- 10) Vanwege de lage dichtheid gaat het gebruik van isobutaan gepaard met relatief grote systeemcomponenten; dat kan in een aantal gevallen leiden tot kostenverhoging.
- 11) Componenten met koper, zink of aluminium kunnen niet worden toegepast, dit leidt doorgaans tot een hogere kostprijs.
- 12) Vanwege de hoge drukken zijn zwaardere leidingen en compressoren nodig.

Koeling is niet apart beschouwd omdat een warmtepomp met koelfunctie vrijwel nooit leidt tot een andere keuze voor het koudemiddel.

Bij industriële toepassingen komen ook temperaturen boven de 80 °C voor. Hierbij wordt naast isobutaan ook n-pentaan als natuurlijk koudemiddel gebruikt. Deze toepassingen blijven buiten beschouwing in het kader van deze studie. Meer informatie hierover kan worden gevonden op internet: (41), (42) en (43).

Toepassing van grootschalige (HT-)warmtepompen vraagt om zorgvuldige afweging, analyse en besluitvorming in een vroeg projectstadium, waarbij de keuze van het koudemiddel bepalend is voor prestaties en risicobeheersing. Het is van belang daarbij de juiste expertise in te schakelen.

Huishoudelijke warmtepomp en toepasbare koudemiddelen in Duitsland

Een recent (eind 2020) overzicht over periode 2015-2030 van de procentuele inzet van diverse koudemiddelen voor huishoudelijke warmtepompen in Duitsland is overgenomen in Tabel 6-2. Op basis van marktanalyse is dit gepresenteerd door het Duitse Milieuministerie (44), (45). Opvallend in dit overzicht is de verwachting dat in 2030 30% van de nieuwe huishoudelijke warmtepompen in Duitsland met propaan (R290) zijn gevuld, en 50 % met mengsels met HFO's (merendeels met een GWP net onder 150); slechts 3% werkt met CO₂. Het gebruik van R32 wordt, na een groei, vanaf 2025 weer sterk afgebouwd. Deze resultaten, op basis van "business as usual", hebben geleid tot gerichte activiteiten om de transitie naar natuurlijke koudemiddelen in Duitsland te versnellen. Voor andere landen, inclusief Nederland, zijn geen vergelijkbare overzichten bekend.

Kriterium Kältemittel in Wärmepumpen

MARKTANALYSE: AKTUELL AUF DEM DEUTSCHEN MARKT VERFÜGBARE WÄRMEPUMPEN UND PROGNOSTIZIERTE ENTWICKLUNG

- Anforderungen durch geltendes Recht und laufende Rechtsetzungsinitiativen, Normen und Standards
- Analyse anderer Umweltzeichen, Zertifizierungen und (Förder-)Programme

Kältemittel in Wärmepumpen	Marktdurchdringungsraten bei Neuanlagen [%]				
	2015	2018	2020	2025	2030
R410A	40	45	35	0	0
R407C	54	40	20	0	0
R134a	6	6	0	0	0
R466A	0	0	0	2	2
R32	0	< 1	20	30	12
R513A	0	0	2	5	3
R454C/R455A/R454B	0	0	12	35	50
R290	0	7	10	25	30
R744	0	< 1	< 1	3	3

Quelle: eigene Darstellung basierend auf Gschrey, B.; Osterheld, S; Kleinschmidt, J: (2020) Implementierung des EU-HFKW-Phase-down in Deutschland - Realitätscheck und Projektion. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau

Tabel 6-2: overzicht over periode 2015-2030 van de procentuele inzet van koudemiddelen voor nieuwe huishoudelijke warmtepompen in Duitsland (44).

7 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

Op basis van de beschikbare informatie, en de berekeningen zoals weergegeven in dit rapport, kunnen de volgende conclusies en aanbevelingen worden gegeven voor de toepassingsmogelijkheden van natuurlijke koudemiddelen.

De positie van natuurlijke koudemiddelen

- Synthetische koudemiddelen (HFK) met een significant broeikaseffect worden afgebouwd en kunnen daarom in de toekomst minder worden gebruikt.
- Voor veel warmtepomptoeepassingen zijn er geschikte natuurlijke koudemiddelen beschikbaar, met gering effect op het milieu, vergelijkbare of betere prestaties en acceptabele, stabiele kosten; de drie belangrijkste natuurlijke koudemiddelen zijn koolwaterstoffen, kooldioxide en ammoniak.
- Koolwaterstoffen zijn vooral geschikt voor kleinere warmtepompen, monoblocks en single split airconditioners; voor collectieve systemen (blokverwarming, appartementencomplexen) en industriële toepassingen zijn deze geschikt, afhankelijk van de mogelijkheden tot adequate risicobeheersing. Voor grotere multi-split en VRF-systemen zijn de toepassingsmogelijkheden beperkt, vanwege de kosten van en beperkingen door de vereiste veiligheidsvoorzieningen.
- Kooldioxide is vooral geschikt voor hogere afgiftetemperaturen (tapwater), voor zowel kleine als grote warmtepompen.
- Ammoniak is vooral geschikt voor industriële warmtepompen, en op termijn in bijzondere technische uitvoering als hybride huishoudelijke warmtepomp (aardgasgestookt).
- Bestaande warmtepompen kunnen in de regel niet worden omgebouwd naar natuurlijke koudemiddelen.

Veiligheid

- Bij het gebruik van koudemiddelen treden veiligheidsrisico's op; voor ieder specifiek koudemiddel, apparaat en toepassingsdetails moeten deze risico's in kaart worden gebracht en worden beheerst met gebruikmaking van technische en organisatorische maatregelen.
- Bij koolwaterstoffen zijn deze risico's vooral gerelateerd aan de brandbaarheid; de Nederlandse praktijkrichtlijn NPR7600:2020 - Toepassing van brandbare koudemiddelen in koelinstallaties en warmtepompen (4) geeft aan hoe deze risico's kunnen worden beheerst.
- Bij kooldioxide zijn deze risico's vooral gerelateerd aan hoge drukken, lekkages in kleine ruimten en de vorming van vast kooldioxide (droogijs); de Nederlandse praktijkrichtlijn NPR7601:2020 - Toepassing van kooldioxide als koudemiddel in koelinstallaties en warmtepompen (5) geeft aan hoe deze risico's kunnen worden beheerst.

- Bij ammoniak zijn deze risico's vooral gerelateerd aan de giftigheid; de Nederlandse richtlijn PRS-13:2020 - Toepassing van ammoniak als koudemiddel in koelinstallaties en warmtepompen (6) geeft aan hoe deze risico's kunnen worden beheerst.
- De benodigde veiligheidsmaatregelen leiden in eerste instantie veelal tot kostenverhoging bij de aanschaf van een warmtepomp, en vaak ook tot hogere gebruikskosten (meer controles of onderhoud). Met innovatieve oplossingen en schaalvergroting kunnen deze meerkosten in veel gevallen beperkt blijven.
- Uiteraard is het belangrijk om altijd de technische handleidingen en instructies van fabrikanten te volgen voor een veilige toepassing.

Wat is belangrijk voor de toekomst van natuurlijke koudemiddelen?

- Fabrikanten van warmtepompen, projectontwikkelaars, adviseurs en ontwerpers die betrokken zijn bij warmtepompprojecten, wordt aanbevolen om een natuurlijk koudemiddel te overwegen.
- Voor alle warmtepompen is het van belang om zorg te dragen voor minimale emissies van koudemiddel, afhankelijk van het negatieve effect op het milieu en klimaat; dit geldt voor de hele keten (ontwerp, bedrijfsvoering, einde levensduur).
- Voor bestaande warmtepompen met F-gassen met een significant broeikaseffect wordt aanbevolen om, zodra de mogelijkheid zich voordoet, vervanging door een versie met een koudemiddel met een lagere GWP te overwegen.
- Voor het werken met alle soorten koudemiddelen in warmtepompen zijn specifieke kennis en vaardigheden vereist; ontwerpers, fabrikanten, installateurs, monteurs, onderhouds- en bedieningspersoneel moeten adequaat zijn getraind; bij voorkeur zijn bedrijven en personen gecertificeerd; dit is alleen voor installatiebedrijven en hun personeel wettelijk verplicht bij het werken met F-gassen met een broeikaseffect (2); bij natuurlijke koudemiddelen (koolwaterstoffen boven 5 kg, kooldioxide boven 10 kg en ammoniak boven 10 kg) is competent personeel wettelijk vereist volgens het Activiteitenbesluit (7).
- De Stichting Netwerk Koude- en Klimaattechniek beheert een integraal competentiesysteem van zelfregulering door en voor de betrokken sectoren, waarmee hier invulling aan wordt gegeven (8). Alle bedrijven en personen die dit aangaan wordt aanbevolen om zich bij dit competentiesysteem aan te sluiten.
- Zowel natuurlijke koudemiddelen als koudemiddelvrije warmtepompconcepten hebben significante ondersteuning nodig om ontwikkeling en (grootschalige) marktintroductie te versnellen, vanwege de achterstand ten opzichte van de volledig uitontwikkelde en ingeburgerde synthetische koudemiddelen.
- Toepassing van grootschalige (HT-)warmtepompen vraagt om zorgvuldige afweging, analyse en besluitvorming in een vroeg projectstadium.

8 BIBLIOGRAFIE

1. -. EU progress under the hydrofluorocarbon phase-down set out in the EU F-gas Regulation. [Online] 2020. <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/placing-on-the-market-of-hfcs>.
2. —. Besluit gefluoreerde broeikasgassen en ozonlaagafbrekende stoffen. [Online] 30 sept 2015. <https://wetten.overheid.nl/BWBR0037088/2015-12-01>.
3. —. CoolTools v1.0.1. IPU, Kongens Lyngby, Denmark. [Online] <https://www.ipu.dk/products/cooltools/>.
4. —. NEN - NPR 7600:2020 Brandbare koudemiddelen. [Online] <https://www.nen.nl/npr-7600-2020-nl-265329>.
5. —. NEN - NPR 7601:2020 kooldioxide als koudemiddel. [Online] <https://www.nen.nl/npr-7601-2020-nl-265812>.
6. —. PGS 13 Nieuwe Stijl. [Online] 2020. <https://publicatiereeksgevaarlijkstoffennl/nieuws/ontwerp-versie-pgs-13-over-ammoniak-koelinstallaties-gepubliceerd.html>.
7. —. Activiteitenbesluit Milieubeheer. [Online] 2007. <https://wetten.overheid.nl/BWBR0022762/2021-01-01>.
8. —. Stichting Netwerk Koude- en Klimaattechniek. [Online] <https://www.netwerkkoudeklimaat.nl/>.
9. —. InfoMil - Veiligheidsvoorschriften voor koelinstallaties met natuurlijke koudemiddelen. [Online] <https://www.infomil.nl/onderwerpen/integrale/activiteitenbesluit/activiteiten/installaties/koelinstallatie/automatische/>.
10. **Worton, David R., Jakob Schwander, William T. Sturges, Robert Mulvaney, Jean-Marc Barnola, Lara Gunn, Paul Begley, Stephen P. Humphrey, David E. Oram, Patricia Martinerie, Keith P. Shine, and Laila K. Gohar.** Atmospheric Trends and Radiative Forcings of CF4 and C2F6 Inferred from Firm Air." [Online] Environmental Science & Technology 41, no. 7 (2007): 2184-2189. <https://whatsyourimpact.org/greenhouse-gases/fluorinated-gas-emissions>.
11. -. Veiligheidsblad R290 Wetfalen gassen . [Online] 2018. https://www.linde-gas.nl/wcs/resources/store/715848735/linSelfServices/downloadSafetyDataSheets?catalogId=3074457345616681918&langId=113&storeId=715848735&fromMSDS=true&filename=SDS_000010021747_NL_NL.PDF.
12. **Hoff, Menno van der.** illegale-handel-f-gassen-eu-doors-wide-open. *Koude & Luchtbehandeling RCC*. [Online] 2019. <https://www.koudeenluchtbehandeling.nl/verdieping/illegale-handel-f-gassen-eu-doors-wide-open-97772>.
13. **Gerwen, R.J.M. van.** natuurlijke exoten: waar staan we en wat brengt de toekomst? *Koude & Luchtbehandeling RCC*. [Online] 2021. https://www.koudeenluchtbehandeling.nl/verdieping/natuurlijke-exotenwaar-staan-we-en-wat-brengt-de-toekomst-102894?utm_source=Vakmedianet_red&utm_medium=email&utm_campaign=20210204_rcc_nwe%20versie&tid=TIDP4611226X20AA5A71DC2C447DA890410DC888A132YI4&utm_c.

14. -. TKI Urban Energy Kennisbank Koudetechnieken. [Online] <https://www.topsectorenergie.nl/tki-urban-energy/kennisbank/factsheets-koudetechnieken>.
15. **Gorp, van, T., en Beek, van, M.** *Report_20202_RO04_V1_Measurement_Prototype_Heat_Pump*. HP-Launch. sl : Re/genT, 2020.
16. -. HAN - project hplaunch. [Online] 2020. <https://www.han.nl/projecten/2020/hplaunch/>.
17. —. lifefront downloads. *EU LIFEFRONT project - Flammable Refrigerant Options for Natural Technologies – Improved standards & product design for their safe use.* [Online] 2020. <http://lifefront.eu/downloads/>.
18. **Hoff, M. van der.** Vakblad Warmtepompen propaan split aircos - wat mag wel wat mag niet. [Online] 2020. <https://www.vakbladwarmtepompen.nl/techniek/artikel/2020/11/propaan-splitaircos-wat-mag-wel-wat-mag-niet-1016454>.
19. **Kleefkens, O.** *Refrigerants for Heat Pump Water Heaters. Report IEA Annex 46 HPT-AN46-04.* 2019.
20. **Commission, European.** The availability of refrigerants for new split air conditioning systems that can replace fluorinated greenhouse gases or result in a lower climate impact, report C(2020) 6637 final. [Online] 2020. https://ec.europa.eu/clima/sites/default/files/news/docs/c_2020_6637_en.pdf.
21. -. KNVvK Werkvoorschriften voor brandbare koudemiddelen/koolwaterstoffen. [Online] <https://www.knvvkyoungcool.nl/kenniskring-natuurlijke-koudemiddelen>.
22. **Gerwen, R.J.M. van.** koolwaterstoffen-huidige-status-en-toekomstbeeld. [Online] https://www.koudeenluchtbehandeling.nl/verdieping/koolwaterstoffen-huidige-status-en-toekomstbeeld-101168?vakmedianet-approve-cookies=1&_ga=2.177543904.439039896.1599564500-1607000772.1599564500.
23. —. 4 succesvolle voorbeelden van koeling met koolwaterstoffen als-koudemiddel. *koude & Luchtbehandeling RCC.* [Online] 2020. <https://www.koudeenluchtbehandeling.nl/verdieping/4-succesvolle-voorbeelden-van-koeling-met-koolwaterstoffen-als-koudemiddel-101251>.
24. *Benefits and reliability of air-to-water heat pumps in residential applications, using R-290 refrigerant and an alternative design solution to guarantee high safety with standard components.* **Capanelli, Sergio.** Jeju, Korea : 13th IEA Heat Pump Conference, 2021. HPC2020-136.
25. *Increasing flammable refrigerant charge size without compromising safety.* **Meljac, Laure, Forsen, Martin en Colbourne, Daniel.** Jeju, Korea : 13th IEA Heat Pump Conference, 2021. HPC2020-247.
26. **Claesson, J.** KTH · Department of Energy Technology (EGI). [Online] <https://www.researchgate.net/institution/KTH-Royal-Institute-of-Technology>.
27. -. plug-and-play-warmtepomp-van-vattenfall-voor-moeilijke-huizen. [Online] 2020. <https://www.wattisduurzaam.nl/28295/energie-besparen/warmte-koude/plug-and-play-warmtepomp-van-vattenfall-voor-moeilijke-huizen/>.
28. **Wekken, B.J.C van der.** koudemiddel-CO2-waar-staan-we-en-wat-brengt-de-toekomst? [Online] 2020. <https://www.koudeenluchtbehandeling.nl/verdieping/koudemiddel-co2-waar-staan-we-en-wat-brengt-de-toekomst-100633>.

29. **Gerwen, R.J.M. van.** Ammoniak als natuurlijk koudemiddel: waar staan we en wat brengt de toekomst? Koude & Luchtbehandeling RCC. [Online] 2020.
<https://www.koudeenluchtbehandeling.nl/verdieping/ammoniak-als-natuurlijk-koudemiddelwaarstaan-we-en-wat-brengt-de-toekomst-101778>.
30. —. koude en luchtbehandeling RCC praktijkvoorbeelden van chillers en een warmtepomp met ammoniak als koudemiddel. [Online] 2020.
<https://www.koudeenluchtbehandeling.nl/verdieping/praktijkvoorbeelden-van-chillers-en-een-warmtepomp-met-ammoniak-als-koudemiddel-101964>.
31. -. stakeholder-conference-review-rules-fluorinated-greenhouse-gases_en. [Online] 2021.
https://ec.europa.eu/clima/news/stakeholder-conference-review-rules-fluorinated-greenhouse-gases_en.
32. —. Infomil: BRL100 en BRL200. [Online] <https://www.infomil.nl/onderwerpen/lucht-water/lucht/ozon-en-f-gassen/certificering/>.
33. —. Wat is Breeam. *BREEAM*. [Online] <https://www.breeam.nl/wat-is-breeam-nl-1>.
34. —. Milieueffect-van-koudemiddelen. *BREEAM*. [Online] <https://richtlijn.breeam.nl/credit/milieueffect-van-koudemiddelen-1125>.
35. **!PU - Thermodynamics and Energy Technology.** [Online] <https://www.ipu.dk/expertise/thermodynamics-energy-technology/>.
36. **Gerwen, R.J.M. van.** rendementsbepaling van koelmachines - het belang van de carnot cyclus. [Online] 2021. <https://www.koudeenluchtbehandeling.nl/nieuws/rendementsbepaling-van-koelmachineshet-belang-van-de-carnot-cyclus-102885>.
37. **Zottl, Andreas, et al.** *Evaluation method for comparison of heat pump systems with conventional heating systems*. D4.3. sl : IEE/08/775/SI2.529222, 2011.
38. **BAM/Alklima.** *Eindverslag Urban Energy-project - Stille NOM-energiemodule o.b.v. CO2-warmtepomp*. 2019.
39. *CO2-pilots in Nederland*. Alklima.
40. *Warmtepomp met koudemiddel CO2verwarmt flatgebouw in Vlaardingen*. Mooi, Richard. sl : Vakmedianet, 31 mei 2021, RCC-K&L.
41. -. Mayekawa develops high temperature hydrocarbon steam heat pump. [Online] http://www.hydrocarbons21.com/articles/mayekawa_develops_high_temperature_hydrocarbon_steam_heat_pump.
42. —. STEPS: INDUSTRIAL HEAT PUMP FOR STEAM PRODUCTION. [Online] <https://www.tno.nl/en/focus-areas/energy-transition/roadmaps/towards-co2-neutral-industry/making-industrial-heat-management-more-sustainable/steps-industrial-heat-pump-for-steam-production/>.
43. —. WEBINAR HEAT PUMPS FOR DECARBONISING THE INDUSTRY. [Online] <https://www.tno.nl/en/about-tno/events/2020/webinar-heat-pumps-for-decarbonising-the-industry/>.
44. **Thalheim, Dr. Diana.** Expertenworkshop Für Mensch & Umwelt Blauer Engel Die Auszeichnung für umweltfreundliche Produkte Ihres Unternehmens. [Online] Umwelt Bundesamt (Duits Milieu

ministerie) Fachgebiet III 1.4 / Stoffbezogene Produktfragen.

<https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/fluorierte-treibhausgase-fckw>.

45. -. Umwelt Bundesamt UBA: Implementierung des EU-HFKW-Phase-down in Deutschland, September 2020. [Online] <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/implementierung-des-eu-hfkw-phase-down-in>.

46. Maté, J., & Kanter, D. (2011). The benefits of basing policies on the 20-year GWP of HFCs.

[Online] <https://www.semanticscholar.org/>.

<https://pdfs.semanticscholar.org/e874/d2cfb4330c3df9c9851aae903c5fa449a484.pdf> .

47. Campbell, Jyoti S., et al. Photodissociation of CF₃CHO provides a new source of CHF₃ (HFC-23) in the atmosphere: implications for new refrigerants. [Online]

https://assets.researchsquare.com/files/rs-199769/v1_stamped.pdf.

48. -. HFOs: How much is too much? accelerate24.news. [Online] October 2019.

<https://accelerate24.news/magazines/hfos-how-much-is-too-much/> .

49. Solomon, K. R., Velders, G. J. M., Wilson, S. R., Madronich, S., Longstreth, J., Aucamp, P. J., & Bornman, J. F. Sources, fates, toxicity, and risks of trifluoroacetic acid and its salts: Relevance to substances regulated under the Montreal and Kyoto Protocols. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B*, 19(7) 2016. [Online]

<https://doi.org/10.1080/10937404.2016.1175981>.

<https://ozone.unep.org/sites/default/files/2019-08/TFA2016.pdf>.

50. -. World Meteorological Organization (WMO), Executive Summary: Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2018, World Meteorological Organization, Global Ozone Research and Monitoring Project – Report No. 58, 67 pp., Geneva, Switzerland, 2018. [Online]

<https://ozone.unep.org/sites/default/files/2019-04/SAP-2018-Assessment-report-ES-rev%20%281%29.pdf> .

51. Fleet, D., Hanlon, J., Osborne, K., La Vedrine, M., & Ashford, P. Study on environmental and health effects of HFO refrigerants: (Publication number: M-917 | 2017. [Online]

<https://www.miljodirektoratet.no/globalassets/publikasjoner/M917/M917.pdf> .

52. Van der Hoff, M. Onderzoek toont zorgwekkende toename van TFA als afbraakproduct van HFK's en HFO's Koude & Luchtbehandeling. [Online] 2020.

<https://www.koudeenluchtbehandeling.nl/verdieping/onderzoek-toont-zorgwekkende-toename-van-tfa-als-afbraakproduct-van-hfks-en-hfos-101296>.

53. -. ECHA: five-european-states-call-for-evidence-on-broad-pfas-restriction. [Online] 2020.

<https://echa.europa.eu/-/five-european-states-call-for-evidence-on-broad-pfas-restriction>.

54. —. RIVM: Q&A restriction proposal pfas. [Online] 2020.

<https://www.rivm.nl/en/pfas/restriction-proposal-pfas/qas-pfas-restriction-proposal>.

55. —. EFCTC submits comprehensive information package about hfcs and hfos. [Online]

<https://www.fluorocarbons.org/news/pfas-call-for-evidence-efctc-submits-comprehensive-information-package-about-hfcs-and-hfos/>.

56. Tedesco, R. ECOS-briefing-on-HFO-production-and-degradation_final. [Online] 2021.

https://ecostandard.org/wp-content/uploads/2021/05/ECOS-briefing-on-HFO-production-and-degradation_final.pdf.

57. -. Chemical Safety Information-Hydrofluoric Acid. Environment, Health and Safety. [Online] 2018. <https://ehs.unc.edu/chemical/hfa/chemical-safety-information-hydrofluoric-acid/> .
58. —. Final Test Report Ignition behaviour report HFO 1234yf. [Online] 2009. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/419/dokumente/test_report_hfo1234yf_2010_06.pdf.
59. —. Chronic toxicity of R1234yf according to ECHA. [Online] <https://echa.europa.eu/nl/registration-dossier/-/registered-dossier/16012/7/1>.
60. —. Overeenkomst voor het internationale vervoer van gevaarlijke goederen over de weg (ADR). [Online] 2019. <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/publicaties/2015/05/21/adr>.
61. —. CLP Verordening (EG) 1272/2008 betreffende de indeling, etikettering en verpakking van stoffen en mengsels. [Online] <https://www.chemischestoffengoederegeld.nl/content/clp>.
62. —. Wijziging CLP VERORDENING (EU) 2019/521 VAN DE COMMISSIE. [Online] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/nl/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R0521&from=EN>.
63. —. Pressure Equipment Directive PED. [Online] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32014L0068>.
64. —. eChiller. [Online] 2021. <https://www.echiller.nl/>.
65. —. Thermodynamics of high frequency oscillating flow and heat transfer in a Stirling heat pump. *TKI Urban Energy*. [Online] <https://projecten.topsectorenergie.nl/projecten/thermodynamics-of-high-frequency-oscillating-flow-and-heat-transfer-in-a-stirling-heat-pump-00032982>.
66. —. Besluit Activiteiten Leefomgeving. [Online] 2018. <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/besluiten/2018/07/03/besluit-activiteiten-leefomgeving>.
67. —. Infomil: Besluit Activiteiten Leefomgeving - toelichting. [Online] 2021. <https://www.infomil.nl/onderwerpen/integrale/overheden-overheden/besluit-activiteiten/>.
68. —. Pack Calculation Pro. IPU, Kongens Lyngby, Denmark. [Online] <https://www.ipu.dk/products/pack-calculation-pro/>.
69. Campbell, Jyoti S., Kable Scott H., Hansen, Christopher S. *Photodissociation of CF₃CHO provides a new source of CHF₃ (HFC-23) in the atmosphere: implications for new refrigerants*. School of Chemistry, University of New South Wales, Sydney NSW 2052, Australia.

BIJLAGEN

Bijlage 1: Vier generaties koudemiddelen in historisch perspectief	77
Bijlage 2: Details over het broeikaseffect van koudemiddelen; GWP en TEWI	79
Bijlage 3: Details over de afbraakproducten en milieueffecten van F-gassen (HFK, HFO)	86
Bijlage 4: Details over de veiligheid van koudemiddelen	89
Bijlage 5: Details over de invloed van druk- en temperatuurkarakteristieken op de COP	97
Bijlage 6: Details over koudemiddelvrije en minder gebruikelijke concepten	99
Bijlage 7: EU Verordeningen en EU-richtlijnen met betrekking tot koudemiddelen	109
Bijlage 8: Nederlandse wet- en regelgeving en bijbehorende richtlijnen met betrekking tot koudemiddelen	116
Bijlage 9: Normen met betrekking tot koudemiddelen	127
Bijlage 10: Overzicht berekende COPs (CoolTools)	133

BIJLAGE 1: VIER GENERATIES KOUEMIDDELEN IN HISTORISCH PERSPECTIEF

In de loop van de geschiedenis wijzigde het oordeel over de milieueffecten van koudemiddelen regelmatig, met verstreckende gevolgen voor de acceptatie en vervanging. Een historisch overzicht over vier generaties.

De **eerste generatie**, ruim 100 jaar geleden, waren stoffen die zonder noemenswaardige bewerking, vanuit de natuur beschikbaar waren. Bekende voorbeelden zijn ammoniak, kooldioxide, koolwaterstoffen (pentaan, butaan, propaan etc.), zwaveldioxide en vele andere. Deze stoffen komen ruimschoots voor in natuurlijke kringlopen, zodat we kunnen spreken van bewezen natuurlijke koudemiddelen, met volledig bekende en geaccepteerde korte- en lange-termijn milieueffecten. Hun toxiciteit, brandbaarheid of hoge toepassingsdrukken veroorzaken voor de gebruiker technische en veiligheidsrisico's, die in die tijd niet altijd goed beheersbaar waren.

De **tweede generatie**. In de jaren '50 van de vorige eeuw ontwikkelden Amerikaanse chemiereuzen onbrandbare en laag-giftige alternatieven: gehalogeneerde koolwaterstoffen met fluor en chloor, onder de merknaam Freon, de synthetische koudemiddelen die door hun grote chemische stabiliteit veel veiliger waren bij lekkage, vanuit Amerika gepropageerd als ideale veiligheidskoudemiddelen. Deze stoffen veroverden in snel tempo de hele wereld en verdrongen de eerste generatie, met uitzondering van ammoniak in industriële toepassingen. Eind jaren '70 werd bekend dat deze koudemiddelen zich ontleden in de stratosfeer en dat de ontstane vrije chloorradicalen de belangrijkste oorzaak zijn van de afbraak van de ozonlaag. Pas eind jaren '80, werd door de chemische industrie erkend dat er een probleem met de (H)CFK's was, omdat er toen een commercieel aantrekkelijk alternatief op de markt gebracht kon worden: de HFK's als innovatieve milieuvriendelijke oplossing om de ozonlaag te redden). De afbouw van (H)CFK's onder het wereldwijde Montreal-protocol van de Verenigde Naties (1987) was het gevolg, een van de zeldzame voorbeelden van succesvolle wereldwijde samenwerking op milieugebied.

De **derde generatie** koudemiddelen betrof gefluorideerde koudemiddelen die geen ozonafbrekend effect hebben: HFK's, dus zonder chloor. Het gevolg van de succesvolle aanpak onder het Montreal protocol, gericht op het ozonafbrekende aspect, leidde tot een snelle wereldwijde toepassing van de HFK's. Deze derde generatie is onoverzichtelijk, met een zeer grote hoeveelheid azeotrope en zeotrope mengsels. Het broeikasprobleem was al wel bekend, evenals de extreem grote bijdrage van de HFK's, maar dat probleem werd lange tijd gebagatelliseerd door de gevestigde industrieën. De Europese F-gassen verordening komt in 2006 tot stand, met reductiedoel voor broeikasgassen in 2012 met 70%, ten opzichte van het 1990 niveau; in 2014 komt een aangescherpte versie. Vanaf 2015 worden HFK's met een lagere GWP actief gepropageerd, met name het brandbare R32.

De **vierde generatie** koudemiddelen is het resultaat van veel onderzoek door de chemische industrie, waarbij de moleculen steeds complexer worden gemaakt, met ingebouwde instabiliteit door de introductie van een dubbele chemische binding, leidend tot lage GWP: dit zijn de fluor-waterstof olefines (met de commerciële naam HFO, al zijn het HFK's). Nu de industrie sinds kort in staat is om de vierde generatie chemische alternatieven wereldwijd in grote hoeveelheden te produceren en af te zetten, wordt de globale afbouw van de derde generatie HFK's en transitie naar de vierde generatie door de gevestigde industrie actief gepropageerd. Deze HFO's (met name R1234yf en R1234ze(E)) hebben een GWP-waarde ruim onder 150, de ondergrens voor afbouw onder de Europese F-gassen verordening. Deze HFO's zijn vanwege hun instabiliteit in de meeste gevallen brandbaar en vallen in de nieuwe 2L klasse voor matige brandbaarheid. De wereldwijde patenten op de vierde generatie koudemiddelen zijn in eigendom van een klein aantal multinationals. Ook de vierde generatie is erg onoverzichtelijk, met een veelheid aan mengsels met naast een HFO uiteenlopende componenten, en GWP onder 150. Behoudens een enkele uitzondering zijn deze allemaal brandbaar, meestal in de 2L klasse. Op dit moment (begin 2021) komen nog steeds nieuwe mengsels met HFO's en andere componenten op de markt, gericht op specifieke toepassingen en vervanging van specifieke HFK's. Op dit moment zijn meer dan 60 verschillende mengsels geregistreerd. Er zijn verdenkingen voor nadelige milieueffecten van HFO's. Dat komt in bijlage 3 aan de orde.

Gezien de bedenkingen bij de tweede, derde en vierde generatie koudemiddelen, wordt al sinds de jaren '90 teruggegrepen op de eerste generatie: natuurlijke koudemiddelen, met name CO₂, ammoniak en koolwaterstoffen. Deze koudemiddelen vormen het onderwerp van deze studie.

BIJLAGE 2: DETAILS OVER HET BROEIKASEFFECT VAN KOUDEMIDDELEN; GWP EN TEWI

Het broeikaseffect wordt uitgedrukt in kg CO₂-equivalent. Per definitie heeft 1 kg CO₂ een Global Warming Potential of GWP van 1. Het gangbare HFK-koudemiddel voor warmtepompen en airco's, R410A, heeft een GWP van 2088.

De GWP-waarden voor koudemiddelen zijn een voortdurende aanleiding voor discussie. De belangrijkste bronnen zijn de IPCC Assessment Reports, die periodiek worden herzien, waarbij de nieuwste GWP-inzichten worden opgenomen. Bij GWP-waarden wordt daarom als bron meestal AR met een volgnummer vermeld. Annex E van de norm EN378-1 geeft de GWP per koudemiddel. De GWP-waarden in de huidige (2016) versie zijn gebaseerd op data van het IPCC Assessment Report V (AR5); voor koolwaterstoffen die niet zijn opgenomen in AR5, zijn de data gebruikt van de EU F-Gassen Verordening 517/2014. Deze verordening bevat bijlagen met GWP-waarden die gebaseerd zijn op AR4, tenzij anders aangegeven. Wet- en regelgeving in Europa maakt in het algemeen gebruik van de GWP-waarden uit deze EU-verordening.

In dit verband is het van belang om te beseffen dat alle GWP-waarden die in wet- en regelgeving zijn opgenomen, zijn gebaseerd op een tijdhorizon van 100 jaar; het effect over deze extreem lange periode van 100 jaar wordt genormeerd op het effect van CO₂ binnen deze horizon (per definitie voor CO₂ met de waarde van 1). Deze 100 jaar is in de jaren '90 wereldwijd afgesproken als politiek compromis met de direct betrokken industrieën. In relatie tot de huidige maatregelen om het broeikaseffect te beteugelen, is deze 100 jaar horizon extreem lang, en zou het veel beter zijn om deze periode korter te kiezen. Er zijn publicaties waarin de vergelijking wordt gemaakt tussen de 100 jaar en een meer realistische waarde van 20 jaar, consistent met andere tijdpaden uit het klimaatbeleid. Hieruit blijkt dat het relatieve effect van F-gassen ten opzichte van CO₂ significant groter is: voor de meest gebruikte HFK's met een factor 2, voor sommige HFK's oplopend tot een factor 4. Deze constatering rechtvaardigt dus een veel drastischere en snellere afbouw van F-gassen dan in de huidige wet- en regelgeving is opgenomen. (46)

De verwachting is dat we wereldwijd blijven uitgaan van GWP-waarden met een 100 jaar horizon, in lijn met de huidige wettelijke afbouwmaatregelen. Er is wereldwijd onvoldoende politiek draagvlak om de afbouwmaatregelen te baseren op de meer realistische 20 jaar periode. **De GWP-bepaling op basis van een 100 jaar horizon leidt tot een onderwaardering van de negatieve klimaateffecten van koudemiddelen, ten opzichte van CO₂.**

De vierde generatie F-gassen (HFO's) heeft een lage GWP. Een recente studie (2021) geeft aan dat bij het uiteenvallen van deze HFO's in de atmosfeer, andere F-gassen

ontstaan met extreem hoge GWP (met name wordt HFK R23 genoemd, met een GWP ruim boven de 10.000 (47)). Op dit moment worden deze secundaire effecten nog niet meegerekend bij de bepaling van de GWP-waarde van een koudemiddel.

TEWI-berekening

De GWP van een koudemiddel is maatgevend voor de directe bijdrage van een koudemiddel aan het broeikaseffect wanneer het koudemiddel in de atmosfeer terecht komt. Bij de berekening hiervan zijn ook andere uitgangspunten van belang: m.n. het lekpercentage tijdens de levensduur en het aandeel dat niet kan worden opgevangen bij de ontmanteling van de warmtepomp aan het einde van de technische levensduur.

Het directe deel van de TEWI-waarde wordt bepaald door:

- De benodigde vulling aan koudemiddel per kW: deze is afhankelijk van het koudemiddel zelf en de constructie van de warmtepomp. Een groot deel van de koudemiddelinhoud wordt bepaald door het ontwerp van de warmtewisselaars (condensor/verdamer).

Daarnaast bevat de TEWI-berekening een indirect deel dat bepaald wordt door het elektriciteitsverbruik van een warmtepomp(-systeem) gedurende een bepaalde periode (meestal de technische levensduur van de WP). Dit deel is op zijn beurt weer afhankelijk van de manier en het rendement van de elektriciteitsopwekking. Het indirecte deel blijkt allesbepalend wanneer bij die opwekking veel CO₂ vrijkomt (grijze stroom), maar kan ook nul worden wanneer alleen wind of zonne-elektriciteit wordt gebruikt.

Algemene uitgangspunten:

- Beschouwing over een periode van 20 jaar
- Jaarlijks lekpercentage: 2 (statistisch gemiddelde)
- Recycling aan het einde van de technische levensduur (20 jaar): 80%
- CO₂-emissie van de elektriciteitsproductie: 0,34 kg/kWh-e (normwaarde NTA 8800)
- Warmtevraag ruimteverwarming: 8000kWh/jaar
- Warmtapwatervraag: 2000 kWh/jaar

Specifieke uitgangspunten:

	R410A	R407C	R134a	R32	R1234yf	R1234ze(E)	R290	R600a	R744
Koudemiddelvulling bij 10 kW-cond [kg]	2,0	1,2	2,0	1,4	1,0	2,5	1,2	1,2	2,5
COP ruimteverwarming	3,8	3,6	4,1	3,9	4,0	4,15	4,1	4,25	2,8
COP tapwater	2	2	2	2	2	2	2	2	3,5

De COP voor ruimteverwarming is bepaald uit het gemiddelde van de COP bij A7/W35 en A7/W55 cf. de berekeningen met CoolTools (zie Bijlage 10).

Met deze uitgangspunten volgt het beeld van figuur 5-4:



Figuur B2-1: Referentie TEWI bijdrage

Dit resultaat wordt in deze bijlage gebruikt als referentie bij de gevoeligheidsanalyse.

Gevoeligheid m.b.t. de uitgangspunten.

1. Directe bijdrage:

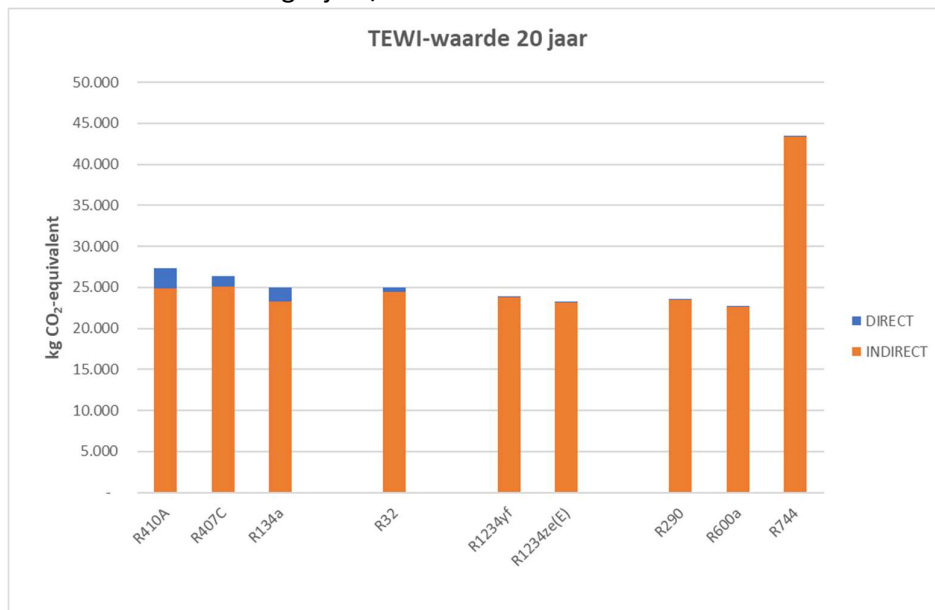
Lekpercentage van 2 naar 6 % per jaar en recyclebare inhoud aan het eind van de levensduur van 80% naar 50%



Figuur B2-2: TEWI-bijdrage bij hogere lekkage en minder terugwinning

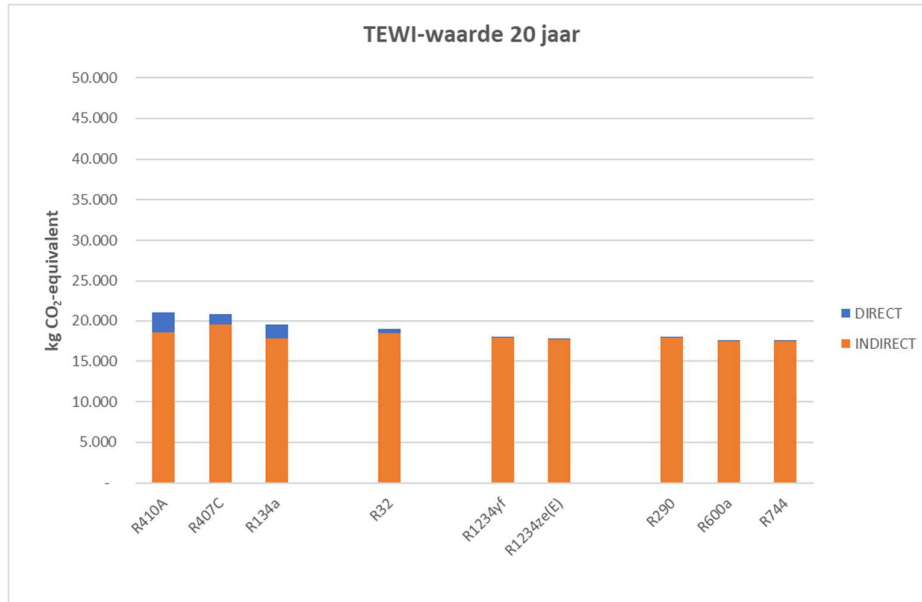
2. Indirecte bijdrage

a. COP ruimteverwarming bij A7/W55



Figuur B2-3: TEWI-waarden bij COP's van A7/W55

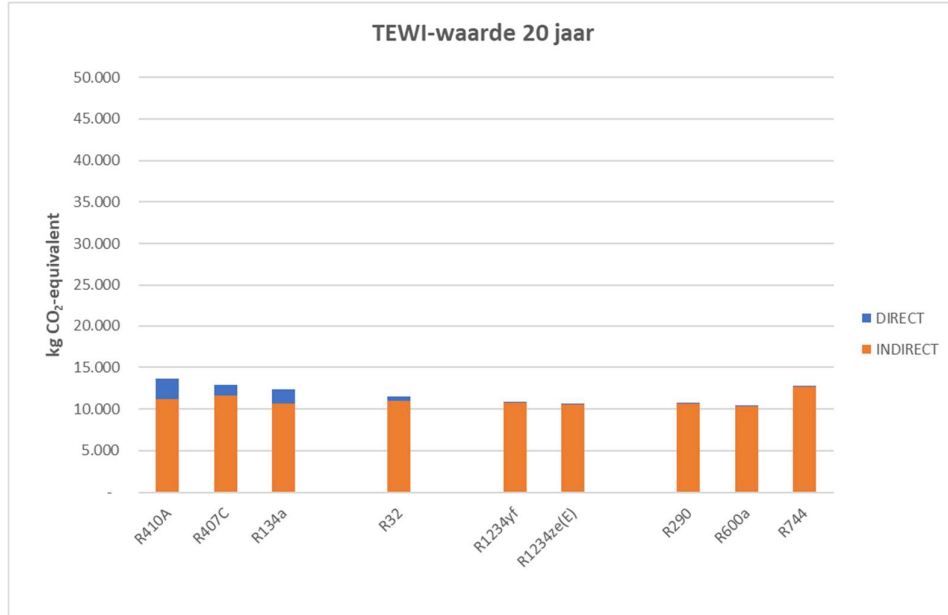
b. COP ruimteverwarming bij A7/W35



Figuur B2-4: TEWI-waarden bij COP's van A7/W35

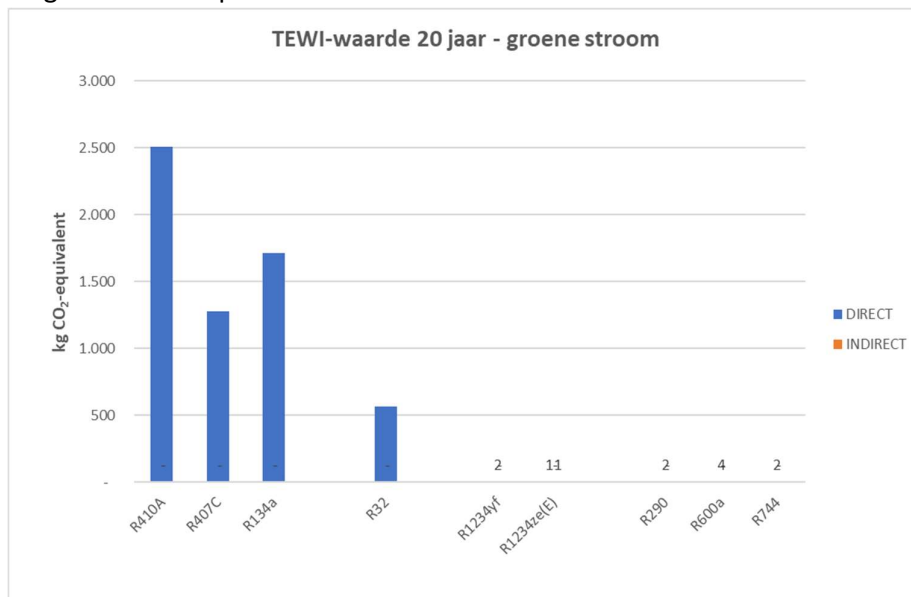
Uit de figuren B2-3 en B2-4 blijkt duidelijk de invloed van de COP voor ruimteverwarming: bij een lage systeemtemperatuur is het rendement hoger en resulteert in een lagere indirecte TEWI-waarde (= maat voor het elektriciteitsverbruik). Bij CO₂ (R744) is dit effect extreem: bij lage temperatuur is het indirecte deel van de TEWI-waarde vergelijkbaar met de andere koudemiddelen. Bij hoge temperatuur ruimteverwarming is het rendement van de warmtepomp bij gebruik van CO₂ erg laag, waardoor een relatief hoge indirecte TEWI-bijdrage ontstaat.

c. Streefwaarde elektriciteitsopwekking in 2030: 0,18 kg CO₂-emissie per kWh-e



Figuur B2-5: elektriciteitsproductie ca. 50% groener

d. 100% groene elektriciteitsopwekking (locaal of centraal):
0 kg CO₂-emissie per kWh-e



Figuur B2-6: volledig groene lokale of centrale elektriciteitsproductie

Conclusie m.b.t. de gevoeligheid:

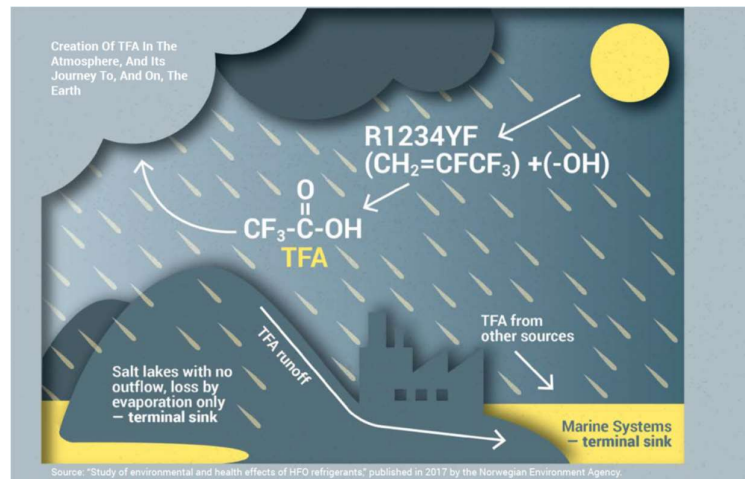
- Onachtzaamheid bij het koudemiddel-beheer verhoogt de directe bijdrage. De indirecte bijdrage wordt hierdoor minder dominant.

- De bedrijfscondities van de warmtepomp hebben een significante invloed op de indirecte bijdrage. Ook wordt de matige prestatie van CO₂ als koudemiddel bij hogere afgiftetemperaturen voor ruimteverwarming duidelijk.
- Vergroening van de elektriciteitsproductie werkt 1-op-1 door in de indirecte bijdrage. De directe bijdrage wordt relatief groter en zal voor de traditionele koudemiddelen de overhand krijgen bij verdere verlaging van de CO₂-emissie bij elektriciteitsproductie.

BIJLAGE 3: DETAILS OVER DE AFBRAAKPRODUCTEN EN MILIEUEFFECTEN VAN F-GASSEN (HFK, HFO)

TFA

HFK's en HFO's worden in het milieu afgebroken tot HF, carbonylfluoride, HCl en zogenaamde korte keten fluorcarbonsuren. Van deze laatste zuren is Trifluorazijnzuur (TFA) de belangrijkste. Deze stof is toxisch, hooft zich op in waterige milieus en is biologisch niet afbreekbaar. Figuur B4-1 geeft een illustratie van de omzetting HFO naar TFA.



Figuur B4-1 Omzetting HFO naar TFA, Shecco Accelerate (48)

De mate waarin dit gebeurt varieert per koudemiddel. Voor de HFK-koudemiddelen geldt dit in beperkte mate, bij de HFO-koelmiddelen R1234ze en R1234yf in sterke mate. Zo wordt voor R1234yf 1 kg koelmiddel omgezet in 1 kg TFA. Tabellen B4-1 en B4-2 ~~Fout! Bladwijzer niet gedefinieerd.~~ geven voor enkele HFK's en HFO's de omzettingcijfers naar TFA (49)

Koudemiddel	HFC-134a	HFC-143a	HFC-227ea	HFO-1234yf	HFO-1234ze
Molecuulgewicht	102.03	84.04	170.03	114.02	114.02
Molaire omzetting naar TFA	21%	100%	100%	100%	NA
Omzetting naar TFA w/w	0.23	1.36	0.67	1.00	

Tabel B4-1: omzetting koudemiddelen naar TFA volgens Solomons e.a. (49)

Table 1. Historical (from 1990) and projected upper range of production of relevant HFCs and HCFCs in tonnes.

Compound ¹	HFC-134a	HFC-143a	HFC-227ea	HFO-1234yf	HFO-1234ze
Molecular weight	102.03	84.04	170.03	114.02	114.02
Molar yield	0.21	1	1	1	NA
Yield of TFA a.e. w/w	0.23	1.36	0.67	1.00	
Total production from 1990 to 2015	3,869,000	537,000	57,000	0	0
Lifetime, year ²	14	51	36	<0.1	<0.1
2011 concentration, ppt ³	63	12	0.6	NA	NA
2011 TFA production flux, tonnes per year	18,000	3,600	510		
Estimated total production by 2050	22,047,000	8,725,000	533,000	3,255,000	NA
Total cumulative contribution to TFA a.e. in the global environment	5,174,000	11,838,000	358,000	3,256,000	
Total yield of TFA a.e. from HFC and HFOs up to 2050	20,625,000				

¹a.e. = acid equivalents

²Lifetimes from Burkholder et al. (2015).

³Concentrations (ppt = parts per trillion, 10⁻¹²) from (Vollmer et al. 2011b) for HFC-134a and HFC-143a, and from Vollmer et al. (2011a) for HFC-227ea.

Tabel B4-2: historische en voorspelde productiehoeveelheden (ton) van HGK's en HFO's gerelateerde TFA volgens Solomons e.a. (49)

TFA is een sterk zuur en niet biologisch afbreekbaar. Het is goed oplosbaar in water en zal zich dus ophopen in het aquatisch milieu. Over de schadelijkheid van deze stof en de mate waarin ze in de natuur voorkomt, zijn de meningen niet volledig eensluidend. De World Meteorological Organization (WMO) (50) zegt in zijn Scientific Assessment of Ozone Depletion, 2018, dat de vorming van TFA vanuit HFK's een verwaarloosbaar risico vormt, maar dat de vorming van TFA uit HFO's nader onderzocht moet worden vanwege de onzekerheid van de toekomstige emissie van HFK-1234yf en andere HFK's die TFA produceren bij de afbraak. Een studie in opdracht van de Noorse Overheid (51) stelt dat er belangrijke kennishiaten zijn. Zo is er geen informatie over de toxiciteit voor organismen die in zoutmeren en zoutwoestijnen worden aangetroffen. Er zijn weinig studies naar TFA-concentraties in het grondwater uitgevoerd en er zijn geen metingen van de TFA-concentraties in gewassen voor menselijke consumptie gerapporteerd. Er wordt gewezen op lacunes en tekortkomingen in de toxiciteitsgegevens in het registratiedossier voor TFA voor zowel het milieu als de gezondheid van de mens. Maatregelen zoals beperking het gebruik en terugwinnen van HFO's reduceren daarom de risico's voor mens en milieu, aldus het rapport.

Een in 2020 gepubliceerde studie naar de aanwezigheid van TFA in arctische ijslagen toont aan dat de concentraties al aan het oplopen zijn en dat er een duidelijk verband is met het gebruik van HFO-koudemiddelen (52).

PFAS

Vijf Europese landen, waaronder Nederland, hebben medio 2020 het verzoek ingediend om afbouw van de toepassing van per- en polyfluoroalkyl stoffen (PFAS) in Europa voor te bereiden, zie de European Chemicals Agency (ECHA) (53) en de vragen en antwoorden van het RIVM (54). HFK's en HFO's vallen onder deze categorie stoffen. De Europese producenten van HFK's en HFO's (EFCTC) hebben hierop gereageerd dat naar hun mening HFK en HFO niet moeten worden behandeld als onderdeel van deze groep PFAS stoffen, maar individueel moeten worden beoordeeld (55), (56). De discussie hierover is gaande (stand begin 2021).

Verbrandingsproduct HF

Wanneer F-gassen verbranden, dan komt er HF, waterstof fluoride, vrij. HF is acut giftig en corrosief, Vanaf 30 ppm, wat overeenkomt met 25 mg/m³ in lucht, wordt HF als levensbedreigend gezien en kan het onherstelbare gezondheidsschade veroorzaken (57). Dit treedt op bij verbranding van alle F-gassen, maar bij HFO's is de hoeveelheid HF aanzienlijk groter vanwege de grotere reactiviteit van deze stoffen. Als voorbeeld: voor elke gram R-1234yf die ontbrandt, komt 70-240 milligram HF vrij, wat betekent dat een dodelijke concentratie snel bereikt wordt in geval van brand.

De discussie rond HF verhevigde zich bij de introductie van HFO R1234yf als koudemiddel voor airconditioning in personenauto's. Het Duitse milieuministerie UBA heeft zich intensief met dit onderwerp beziggehouden (58). Dit heeft geleid tot het negatieve standpunt ten aanzien van HFO's van de Duitse overheid (UBA) (44).

BIJLAGE 4: DETAILS OVER DE VEILIGHEID VAN KOUEMIDDELEN

Alle koudemiddelen vormen een potentieel gevaar voor personen en de omgeving. Deze gevaren zijn zeer divers. We concentreren ons op de belangrijkste veiligheidsaspecten:

- giftigheid;
- brandbaarheid;
- hoge druk.



Voor giftigheid en brandbaarheid heeft de koelsector specifieke normen en regels ontwikkeld die alleen gelden voor de toepassing van stoffen als koudemiddel. Daarnaast zijn er generieke normen en regels die ook voor koudemiddelen gelden. In deze bijlage worden de details besproken.

Specifieke veiligheidsclassificatie van koudemiddelen (ISO817)

Koudemiddelen worden door de koelsector ingedeeld volgens de norm ISO817 naar de mate van brandbaarheid en giftigheid. De Amerikaanse koeltechnische sectorvereniging ASHRAE, waar de merendeels Amerikaanse koudemiddelfabrikanten hun expertise en belangen bundelen, beheren deze classificatie. Daar worden ook de R-nummers voor koudemiddelen en -mengsels uitgegeven, vastgelegd in ANSI/ASHRAE Standard 34, inclusief de veiligheidsklassen. Dit wordt overgenomen in de internationale norm ISO 817 Refrigerants - Designation and safety classification. Deze norm is de basis voor de koelmiddelclassificatie in de Europese norm EN 378, de Europese F-gassen Verordening nr. 517/2014, de Nederlandse Praktijkrichtlijnen NPR7600 (brandbare koudemiddelen), NPR7601 (CO₂ koudemiddel) en PGS-13 (ammoniak).

De volgende klassen worden onderscheiden.

Het bovenstaande is samengevat in tabel 2-1.

<i>Brandbaarheid</i> 	<i>Koudemiddel classificatie</i>	
<i>Sterk brandbaar</i>	A3	B3
<i>Brandbaar</i>	A2	B2
<i>Matig brandbaar</i>	A2L	B2L
<i>Onbrandbaar</i>	A1	B1
<i>Giftigheid</i> 	<i>Lage giftigheid</i>	<i>Hoge giftigheid</i>

Tabel 2-1 (kopie): veiligheidsclassificatie voor koudemiddelen (ISO 817, EN 378)

Hieronder worden deze klassen toegelicht en besproken.

Giftigheid

Klasse A

- De "A" koelmiddelen gelden als niet giftig met een toegestane maximale concentratie gedurende een werkdag (Allowable Daily Exposure Level ADEL) van maximaal 400 ppm.

Klasse B

- De overige "B" koelmiddelen gelden als giftig.

Bespreking giftigheidsclassificatie volgens ISO817

Groot voordeel van deze giftigheidsclassificatie is de eenvoud. Voor de in de praktijk toegepaste koudemiddelen leidt deze aanpak tot klasse A voor alle koudemiddelen, met uitzondering van ammoniak (R717) dat als B wordt geclassificeerd.

Hiermee wordt de suggestie gewekt dat al de A koudemiddelen volledig veilig zijn voor de gezondheid. Dat moet worden genuanceerd; de verdringing van zuurstof door koudemiddelen leidt al snel tot gezondheidsschade (verstikking), zonder dat daar een waarschuwing aan voorafgaat, een serieus veiligheidsrisico.

Bij CO₂ is, ondanks een A-classificatie, de wettelijke grenswaarde 0,5 % en is CO₂ bij 8 % na 30 minuten dodelijk (volgens NPR7601:2020); daarom moet er dus wel degelijk rekening worden gehouden met dit gezondheidsrisico.

Ook is onduidelijk welke bron moet worden gehanteerd bij de ADEL getalswaarde. ISO817 gebruikt Amerikaanse bronnen, maar het chemiebureau (ECHA) van de EU hanteert waarden die voor sommige koudemiddelen tot een B classificatie leiden, zoals bij R1234yf (59).

Brandbaarheid

Koudemiddelen worden ingedeeld in één van de klassen 1, 2, 2L of 3 op basis van hun brandbaarheidsbeproevingen.

- *Klasse 1 (niet brandbaar)*

Een koudemiddel wordt als klasse 1 geclassificeerd, indien het koudemiddel geen vlamvoortplanting laat zien indien dit is beproefd in lucht bij 60 °C en 101,3 kPa. Een koudemiddelmengsel behoort als klasse 1 te worden geclassificeerd, indien de WCFF van het mengsel, zoals bepaald bij de analyse, geen vlamvoortplanting laat zien indien dit is beproefd in lucht bij 60 °C en 101,3 kPa.

- *Klasse 2L (matig brandbaar)*

Een koudemiddel wordt als klasse 2L geclassificeerd indien het voldoet aan de volgende viervoorwaarden:

- het vertoont vlamvoortplanting indien beproefd bij 60 °C en 101,3 kPa;
- het heeft een onderste brandbaarheidsgrens LFL (LEL) > 3,5 vol %;
- het heeft een verbrandingswarmte < 19 000 kJ/kg;
- het heeft een maximum brandsnelheid ≤ 10 cm/s, indien getest bij 23 °C en 101,3 kPa.

- *Klasse 2 (brandbaar)*

Een koudemiddel bestaande uit een enkele verbinding wordt als klasse 2 geclassificeerd indien het voldoet aan de volgende drie voorwaarden:

- het vertoont vlamvoortplanting indien beproefd bij 60 °C en 101,3 kPa;
- het heeft een onderste brandbaarheidsgrens LFL (LEL) > 3,5 volumepercentage;
- het heeft een verbrandingswarmte < 19 000 kJ/kg.

- *Klasse 3 (sterk brandbaar)*

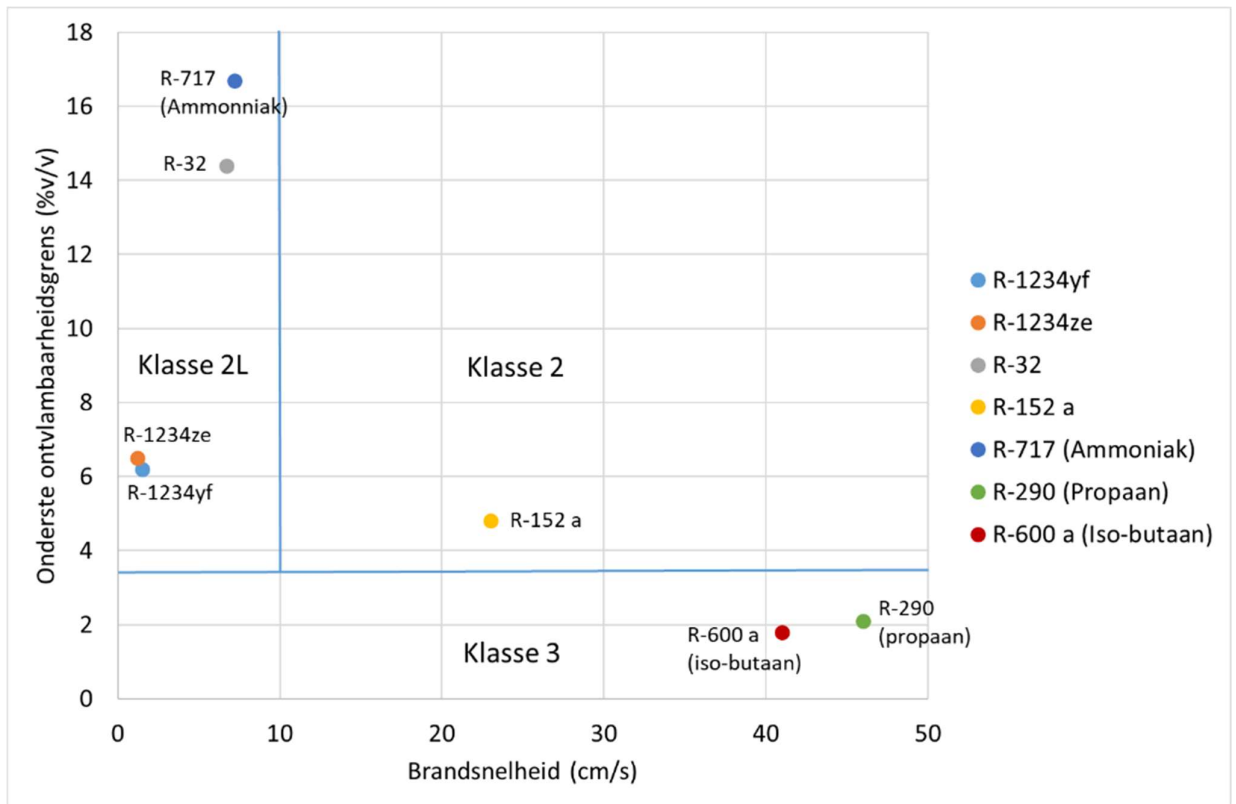
Een koudemiddel wordt als klasse 3 geclassificeerd indien het voldoet aan de beide volgende voorwaarden:

- het vertoont vlamvoortplanting indien beproefd bij 60 °C en 101,3 kPa;
- het heeft een LFL (LEL) < 3,5 volumepercentage of het heeft een verbrandingswarmte > 19 000 kJ/kg;

Bespreking brandbaarheidsclassificatie volgens ISO817

De klasse A2L is in 2015 geïntroduceerd om de nieuwe generatie HFO's en R32 positief te kunnen onderscheiden van andere brandbare koudemiddelen, op basis van de verschillen in vlamvoortplantingssnelheid. Hier kunnen inhoudelijk vraagtekens bij worden gezet, maar deze classificatie volgens ISO 817 wordt toch wereldwijd als standaard gebruikt. Brandbaarheidsrisico van koudemiddelen vereist serieuze aandacht bij ontwerp, bouw, bedrijfsvoering, onderhoud en afbraak; dat geldt ook voor de competentie (vakbekwaamheid) van personen die deze activiteiten uitvoeren. Het maakt daarbij niet uit of het gaat om brandbaarheidsklassen 2L, 2 of 3; de graduele verschillen in brandbaarheid tussen koudemiddelen zijn van secundair belang.

Figuur B4-1 geeft een grafische weergave van de huidige classificatie, met de belangrijkste koudemiddelen.



Figuur B4-1: onderste ontvlambaarheidsgrens als functie van de brandsnelheid voor verschillende koudemiddelen. De klassering volgens ISO 817 is aangegeven.




Er is geprobeerd om giftigheid en brandbaarheid samen te vatten in één parameter: de praktische limiet PL. Deze representeert de hoogste concentratie (in kg/m^3) in een ruimte die niet leidt tot (acute) gezondheidseffecten, en geen ontstekingsrisico vormt. Hiervan kan de maximale koudemiddelvulling voor specifieke toepassingen worden afgeleid. In de tabellen van EN 378-1 bijlage E wordt deze PL per koudemiddel gegeven. In de praktijk is het niet goed mogelijk om giftigheid en brandbaarheid in één getal samen te vatten; de risicomechanismen zijn fundamenteel verschillend, en de lange termijn gezondheidseffecten worden onvoldoende meegewogen. Om deze redenen is in dit rapport de PL niet gebruikt, maar verwezen naar de afzonderlijke giftigheids- en brandbaarheidsparameters.

Classificatie volgens ADR (transport) en CLP (etikettering en verpakking)

Het ADR is een Europese overeenkomst voor het internationale vervoer van gevaarlijke goederen (60), zoals koelmiddelen, over de weg. Hierin staan de regels voor dit transport beschreven. De classificatie van gevaarlijke stoffen sluit aan bij de CLP (zie hieronder). Het ADR stelt niet alleen regels voor het vervoer over de weg, maar ook voor het laden en lossen van gevaarlijke goederen.

De CLP-verordening (EG) 1272/2008 (met wijziging 2019) betreffende de wettelijk verplichte indeling, etikettering en verpakking van stoffen en mengsels (61), (62) classificeert gassen in drie categorieën op basis van ontvlambaarheid, met specifieke criteria die strenger zijn dan die van IS817. Deze gassen dienen aangeduid te worden met

een GHS-pictogram en een gevarenaanduiding. Dit heeft onder andere tot gevolg dat koelmiddelen die volgens ISO 817 als matig brandbaar zijn geclassificeerd, volgens de CLP-verordening (en ook ADR) als een zeer brandbaar gas geclassificeerd staan. In tabel B4-1 staan enkele voorbeelden ter vergelijking van ISO 817 en de CLP-verordening. Zo worden R1234yf en R32 volgens ISO 817 als matig brandbaar beschouwd, terwijl de CLP-verordening stelt dat R32 zeer licht ontvlambaar is en R1234yf ontvlambaar is.

Koude-middel	Onderste ontvlambaarheids-grens (% v/v)	Classificati e volgens ISO 817	Classificatie volgens CLP-verordening	CLP-verordening GHS-pictogram voor brandbaarheid	CLP-verordening gevarenaandui ding voor brandbaarheid
R744	Niet ontvlambaar	A1	Niet ontvlambaar	/	/
R-1234yf	6.2	A2L	Categorie 1B		H221: Ontvlambaar gas
R-32	14.4	A2L	Categorie 1A		H220: Zeer licht ontvlambaar gas
R-717	16.7	B2L	Categorie 2	/	H221: Ontvlambaar gas
R-290	2.1	A3	Categorie 1A		H220: Zeer licht ontvlambaar gas

Tabel B4-1 Classificering van verschillende koudemiddelen volgens ISO 817 en volgens CLP

In de veiligheidsbladen (Material Safety Data Sheets MSDS) die door de gassenleveranciers worden meegeleverd, staan veel details over veiligheid, classificatie en labels. Een voorbeeld voor R290 (propaan) is te vinden in (11).

Classificatie volgens de Richtlijnen voor drukapparatuur (PED) en drukvaten

De Europese richtlijn voor drukapparatuur (2014/68/EU) (Pressure Equipment Directive PED) (63) stelt essentiële veiligheidseisen aan drukapparatuur en samenstellen waarvan de maximaal toelaatbare druk PS meer dan 0,5 bar(o) bedraagt. De PED regelt de verantwoordelijkheden en de verplichtingen van de verschillende marktdeelnemers: fabrikant/installateurs, importeurs, distributeurs, gebruiker, keuringsinstantie en overheid en borgt ontwerp en fabricage volgens de Essentiële Eisen uit bijlage I van de PED; op nationaal niveau worden ook inbedrijfstelling en bedrijfsvoering gereguleerd.

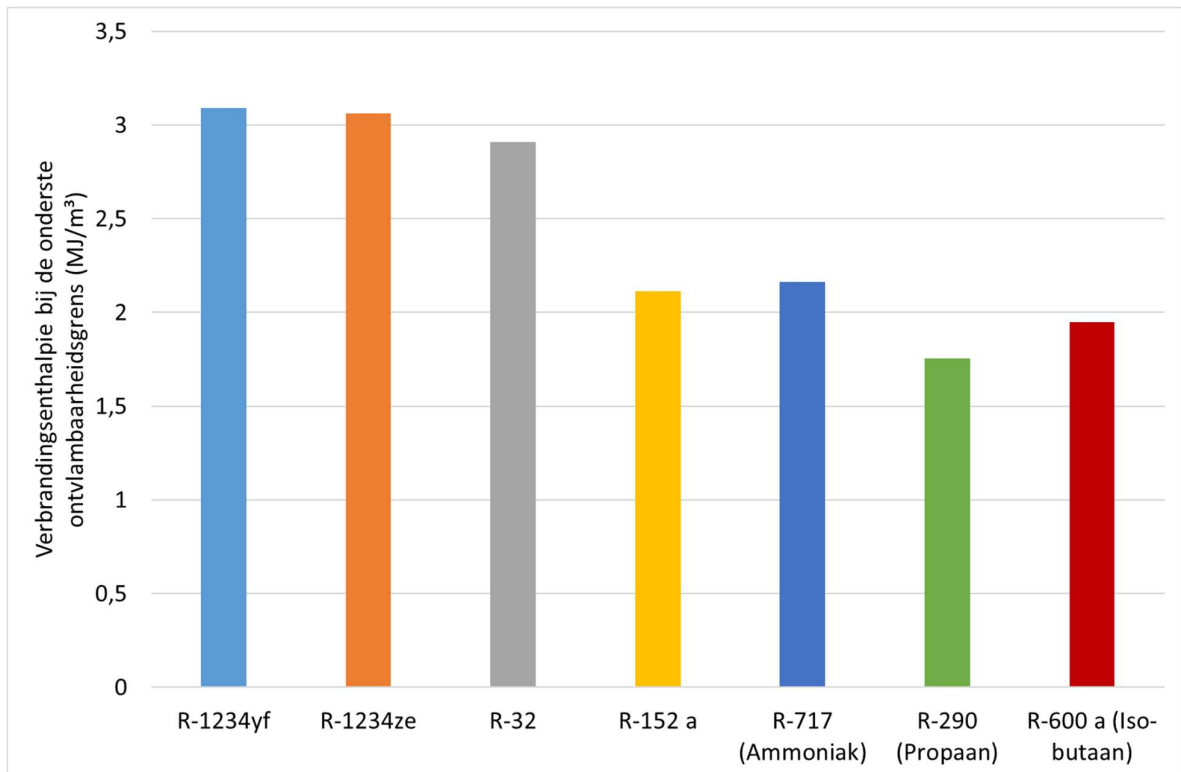
De PED kernt twee stofgroepen: gevaarlijke (groep 1) en ongevaarlijke (groep 2). Met name de klassen voor het keuringsregime, met oplopende intensiteit, is bij stofgroep 2 van toepassing bij lagere getalwaarden voor druk x volume.

De A1 koudemiddelen vallen in groep 2, en alle brandbare en hoog giftige koudemiddelen (R32, HFO, ammoniak propaan) in PED-groep 1. Er is hierop één uitzondering: HFO R1234ze (E) is klasse A2L maar toch PED-stofgroep 2, wat te maken heeft met een verschillende normtemperatuur voor de vaststelling van de brandbaarheid.

Naast de PED bestaat de Europese richtlijn (2014/29/EU) voor drukvaten van eenvoudige vorm. Deze is van belang voor eenvoudige opslagvaten en cilinders met koudemiddel. Deze sluit aan bij de PED.

Verbrandingsenthalpie: de energie die vrijkomt indien een koelmiddel ontbrandt

Indien de verbrandingsenthalpie bij de onderste ontvlambaarheidsgrens wordt uitgezet voor de verschillende koudemiddelen, wat overeenkomt met de energie die kan vrijkomen zodra de onderste ontvlambaarheidsgrens bereikt is en het mengsel met lucht ontbrandt, is het duidelijk dat bij R1234yf, R1234ze en R32 ongeveer 50% meer energie vrijkomt tegenover R290 (zie **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.**). Dit geeft aan welke hoeveelheid explosie-energie vrijkomt indien de onderste ontvlambaarheidsgrens behaald wordt. De classificaties in deze bijlage houden geen rekening met deze parameter, waardoor het explosierisico van bovengenoemde koudemiddelen wordt onderschat.



Figuur B4-2: De verbrandingsenthalpie bij de onderste ontvlambaarheidsgrens voor verschillende koelmiddelen.

Verwarrende termen voor brandbaarheid en explosiviteit

De vertaling van de gebruikte termen naar het Nederlands levert gemakkelijk verwarring op. Het Engelse “flammability” betekent ontvlambaarheid. Letterlijk: hoe gemakkelijk de stof vlam vat. Ontvlambaarheid is echter geen gebruikelijke term in het Nederlands, zodat we bij voorkeur over brandbaarheid spreken. “Lightly flammable” betekent letterlijk gemakkelijk ontvlambaar, maar indien we licht brandbaar zouden schrijven, kan dit in het Nederlands ook de betekenis hebben van niet zo erg brandbaar.

Naast brandbaarheid bestaat het begrip explosiviteit. Beide begrippen worden vaak door elkaar gebruikt.

Een belangrijke veiligheidsparameter is de onderste ontstekings-, ontvlambaarheids-, brandbaarheids- of explosiegrens (Lower Flammability Limit LFL of Lower Explosion Limit LEL), de minimale concentratie van koudemiddel die in staat is tot vlamvoortplanting binnen een homogeen mengsel van koudemiddel en lucht. Al deze termen worden door elkaar gebruikt, en gebruikte definities zijn inconsistent. Veel veiligheidsmaatregelen zijn erop gericht om te voorkomen dat een concentratie boven deze grens kan ontstaan, en om te voorkomen dat er gelijktijdig een ontstekingsbron aanwezig is; meestal wordt daarbij een percentage van 25 tot 50 % van de LFL gehanteerd. De LFL voor koudemiddelen is opgenomen in de classificatietabellen van EN378-1.

In deze studie wordt zoveel mogelijk de term brandbaarheid gebruikt, om verwarring in terminologie te voorkomen.

BIJLAGE 5: DETAILS OVER DE INVLOED VAN DRUK- EN TEMPERATUURKARAKTERISTIEKEN OP DE COP

Energiegebruik, efficiëntie en Carnot

Koeltechnici hebben meestal wel gehoord van de Carnot cyclus, maar wat het belang daarvan is, wordt maar zelden doorgrond. De meeste koeltechnici (en de opleidingen) lopen met een grote boog om de klassieke thermodynamica heen: te theoretisch, abstract, zweverig, daar kun je niets mee in de praktijk. Dat klopt niet, want je moet thermodynamica en Carnot snappen om te bepalen hoe goed of slecht het "rendement" van een koelmachine of warmtepomp is. Bij een open proces, zoals een verbrandingsketel, is het rendement eenvoudig te snappen: 100 % is het gedefinieerde ideaal dat je uit een m³ aardgas kunt halen, en ieder procent daaronder is verlies aan rendement. Maar bij een koelmachine werkt dat niet zo, want dat is een gesloten kringproces, de slang die in zijn eigen staart bijt en in een evenwichtspunt ten opzichte van zijn omgevingen werkt. Dat is wat de 19^e-eeuwse natuurkundige Nicolas Léonard Sadi Carnot op een geniale manier heeft uitgewerkt aan de hand van de hoofdwetten van de klassieke thermodynamica (met latere verfijningen van Rudolf Clausius in 1865). De weg naar zijn resultaat is complex, waarvoor naar de thermodynamica leerboeken wordt verwezen, maar het resultaat is verbluffend eenvoudig en praktisch, vooral voor het eerlijk beoordelen en vergelijken van koelinstallaties en warmtepompen, inclusief onze exoten.

Van nature stroomt warmte alleen maar van een hoge naar een lagere temperatuur, en Carnot bedenkt een fictief ideaal machientje dat warmte pompt tegen de natuur in, vanuit een omgeving met een constante temperatuur (warmtereservoir) naar een andere omgeving met een hogere constante temperatuur, naar analogie met twee vijvers op verschillende hoogte, met een pomp om het water van de laaggelegen vijver omhoog te pompen naar de hooggelegen vijver. Dat Carnot machientje moet met energie (arbeid) worden aangedreven om zijn werk te kunnen doen, net als de pomp bij de vijver. Hoe groter het temperatuurverschil, en hoe groter het hoogteverschil tussen de twee vijvers, hoe meer energie er nodig is om de warmte of het water naar een hoger niveau te pompen. Het ideale machinetje van Carnot pompt die warmte op, zonder enig verlies, en is daarmee dus het theoretisch ideaal voor onze koelmachine of warmtepomp.

De Carnot factor (CoP)

De dimensieloze Carnot factor of Carnot CoP (Coefficient of Performance) is de hoeveelheid warmte die omhoog wordt gepompt (in Joule) gedeeld door de aandrijfenergie (ook in Joule; per tijdseenheid kunnen beide natuurlijk ook als vermogen in Watt worden uitgedrukt). Om die ideale Carnot factor te berekenen heeft Carnot een verbluffend eenvoudige formule afgeleid uit de complexe thermodynamische wetten:

Carnot factor = $T_{\text{laag}} / (T_{\text{hoog}} - T_{\text{laag}})$. Daarbij moeten de temperaturen wel in de Kelvin schaal worden uitgedrukt, anders werkt de formule niet ($T_{\text{kelvin}} = T_{\text{celcius}} + 273$).

Deze formule heeft betrekking op een koelmachine. Voor een warmtepomp gebruikt de formule de T_{hoog} boven de deelstreep, in plaats van de T_{laag} . Met wat omdenken kun je afleiden dat de CoP voor een warmtepomp die van een koelmachine is, plus 1.

Als voorbeeld: de omgeving is $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($273+20=293\text{ K}$) en de inhoud van de vrieskist is op $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($273-20=253\text{ K}$). De Carnot factor is dan $253/(293-253) = 6,3$. Met 1 kW aandrijfvermogen is dus $6,3\text{ kW}$ te koelen.

Dit ideaal kan nooit worden bereikt; de afwijkingen van dat ideaal hebben te maken met het entropiebegrip, wat in dit verband te ver voert om in detail te bespreken.

Hoe komen we van Carnot naar een rendement?

Hoe weet je nu of een koelinstallatie of warmtepomp energetisch goed of slecht presteert? Met Carnot is dat eenvoudig: we definiëren daartoe een rendement ten opzichte van de Carnot factor (Carnot CoP). Daarmee kun je dus met de CoP van een werkelijk apparaat het Carnot rendement in procenten uitrekenen. In ons voorbeeld: als onze vrieskist een werkelijke CoP van $2,1$ heeft, is het rendement dus 33% . Dat is dan trouwens een behoorlijk goed presterende vrieskist.

Om een indruk te geven: een Peltier koeler (de camping koelbox) heeft een Carnot rendement van een paar procent. De best ontworpen moderne industriële ammoniak koelinstallatie komt tot 50% . De realiteit zit meestal tussen deze twee uitersten in.

Ook bij de berekening van Carnot rendementen blijft voorzichtigheid geboden: het moet duidelijk zijn of alle hulpenergie voor ventilatoren, pompen, regeling etc. wel of niet is inbegrepen, of het gaat om vollast ontwerp-CoP of deellast/jaarrond CoP. Let op: vaak worden als temperaturen in de Carnot-berekening de condensatie- en verdampingstemperaturen gebruikt; dat is misleidend en onpraktisch, omdat we dan vergelijken met een niet-ideaal pseudo-Carnot apparaat, terwijl we juist een vergelijking met het Carnot-ideaal willen berekenen. Een ander probleem is de vergelijking van mechanisch (elektrisch) gedreven concepten met thermisch gedreven concepten. Dan speelt ook mee op welke manier de gebruikte elektriciteit wordt opgewekt (kolenstroom of PV-panelen als twee uitersten).

BIJLAGE 6: DETAILS OVER KOUEMIDDELVRIJE EN MINDER GEBRUIKELIJKE CONCEPTEN

In paragraaf 2.3 zijn de alternatieven voor het conventionele reverse Rankine concept met een verdampend en condenserend koudemiddel kort besproken. Ook wordt daar water als natuurlijk koudemiddel genoemd. In deze bijlage staan meer details over deze alternatieven.

Hieronder is tabel 2-4 uit dat hoofdstuk overgenomen. Vervolgens worden deze alternatieven in detail besproken.

Concept	Bedrijf/organisatie in Nederland	TRL (indicatief)
Water in mechanische compressiekringloop	eChiller	7-9
Aardgasgestookte adsorptie warmtepomp	Cooll	8
Absorptie	Diverse	5-9
verwarming en vrije koeling met bodemenergie	Diverse	5-9
Thermo-akoestisch	Blue Heart Energy SoundEnergy	7
Luchtcyclus (Air cycle)	Tarnoc	7
Adiabatische en dauwpuntskoeling	Diverse	7-9
Stirling	TU Twente	5-9
Magneto-calorisch	TU Delft	4-6

Kopie van tabel 2-4: koudemiddelvrije en minder gebruikelijke concepten en hun technologievolwassenheid (Technology readiness level TRL)

Technology readiness levels TRL

De Technology readiness levels (TRL) in tabel 2-4 zijn gedefinieerd overeenkomstig het Europese HORIZON 2020 – Werkprogramma 2014-2015, met 9 niveaus van technologie-rijpheid:

- TRL 1 basic principles observed
- TRL 2 technology concept formulated
- TRL 3 experimental proof of concept
- TRL 4 technology validated in lab
- TRL 5 technology validated in relevant environment (industrially relevant environment in the case of key enabling technologies)
- TRL 6 technology demonstrated in relevant environment (industrially relevant environment in the case of key enabling technologies)
- TRL 7 system prototype demonstration in operational environment

- TRL 8 system complete and qualified
- TRL 9 actual system proven in operational environment (competitive manufacturing in the case of key enabling technologies; or in space)

De TRL's in de tabel zijn overgenomen van (14). In afwijking van en aanvulling op de TRL-waarden uit (2), is voor de Tarnoc turbineketel de TRL ingeschat op niveau 7. Verwarming en vrije koeling met bodemenergie is ingeschat op 5-9. Verdampings- en dauwpuntkoeling is deels standard technologie, deels in (door)ontwikkeling en daarom gewaardeerd op 7-9. Absorptie is deels standard technologie over meer dan honderd jaar, deels in conceptuele (door)ontwikkeling, en daarom gewaardeerd op 5-9.

Transportfunctie van warmte en koude

Voor het beoordelen en vergelijken van concepten is naast energiegebruik de warmtetransportfunctie van belang. De referentie is het conventionele reverse Rankine concept, waarbij het circulerend koudemiddel ook een uiterst effectieve en efficiënte transporteur van de warmte/koude is. Als voorbeeld een split airco unit: de twee delen kunnen vele meters uit elkaar zijn geplaatst (een deel buiten en een deel binnen), verbonden door twee dunne leidingen. Die transportfunctie bezitten de meeste alternatieve concepten helaas niet. Zo heeft bijvoorbeeld een thermo-akoestische unit meestal een koude en een warme plek (hot/cold head), waarbij secundaire circuits (met rondgepompt water of glycol) de warmte/koude transporteren naar de plekken waar die nodig is. Dat levert extra kosten, materialen en inefficiëntie op (extra delta T, pompenergie). Slimme trucs met heat pipes en faseovergang kunnen het iets verbeteren, maar het blijft intrinsiek nadelig. Daarmee komen alternatieve concepten vaak slechter uit een vergelijking met de traditionele apparaten, zodra de secundaire circuits bij de vergelijking worden betrokken.

Als praktijkvoorbeeld van dit warmtetransportnadeel, een overigens succesvol project van Unilever (Ben & Jerry's); een elektrisch gedreven thermo-akoestische koeler (met een bijzonder soort luidspreker en metalen balg) werkte naar behoren, maar de secundaire circuits die de verbindingen met een vriesmeubel voor ijsjes en met de omgeving vormden, deden het concept uiteindelijk falen.

Hieronder volgen de alternatieve, koudemiddelvrije, concepten in detail. Hierbij is grotendeels gebruik gemaakt van (14) en (13).

Water in mechanische compressiekringloop: eChiller

Naast koudemiddelvrije concepten zijn er concepten met minder gebruikelijke natuurlijke koudemiddelen voor mechanische dampcompressie systemen (reverse Rankine) dan de in hoofdstuk 3 in detail behandelde koolwaterstoffen, kooldioxide en ammoniak. Met name water wordt incidenteel toegepast, onbetwist natuurlijk en onbeperkt beschikbaar, in nichetoepassingen met concurrerende COP, maar ook met zeer grote volumestromen waterdamp en hoge onderdruk in delen van het system, wat leidt tot grote systeemvolumes en ongebruikelijke ontwerpuitdagingen. De in Nederland verkrijgbare

eChiller (64) is bij uitstek geschikt voor continue industriële proceskoeling, koeling van server- en controleruimtes en in technische gebouwinstallaties. Apparaten worden op de markt aangeboden met 15 tot 150 kW koelvermogen. Onderstaande tabel is overgenomen uit de website-informatie.

Capaciteiten en prestaties

		Koelwater intrede			
		20 °C	25 °C	30 °C	35 °C
Gekoeldwater uitrede	12 °C	70 kW 9	70 kW 7		
	14 °C	80 kW 10	80 kW 8		
	16 °C	90 kW 12	90 kW 9	90 kW 6	
	18 °C	101 kW 15	101 kW 10	101 kW 7	
	20 °C	114 kW 20	114 kW 12	114 kW 8	114 kW 7
	22 °C	121 kW 26	121 kW 14	121 kW 9	121 kW 7

■ Koelvermogen ■ EER-waarde

Aardgasgestookte adsorptie warmtepomp: Cooll!

Het Enschedese bedrijf Cooll is een spin-off bedrijf van de Universiteit Twente, opgericht in 2009. Cooll ontwikkelt met een aantal industriële partners een energiezuinige en betaalbare verwarmingsoplossing voor bestaande en nieuwe woningen. Het betreft een warmtepomp technologie aangedreven door gas, waarmee 30 – 50% energie en CO₂-uitstoot (bij fossiel gas) kan worden bespaard, in vergelijking met de traditionele HR-ketel. De technologie gebruikt de verbrandingswarmte van brandstoffen op een slimmere manier dan traditionele verbrandingstoestellen. Cooll's adsorptiewarmtepomp bevat een vergelijkbare continue cyclus als een normale mechanische dampcompressie warmtepomp. Compressie van het koudemiddel vindt nu echter plaats met een door warmte aangedreven adsorptiecompressor in plaats van een elektrisch-mechanische compressor. De adsorptiecompressor bestaat uit twee drukvaten, gevuld met hoogwaardige actieve kool die cyclisch worden verwarmd en afgekoeld; een complete cyclus duurt ongeveer 10 minuten. Tijdens verwarming van zo'n drukvat (tot ongeveer 180 °C) wordt ammoniak onder hoge druk uit het adsorptiemateriaal geperst en via een passief ventiel (check valve) naar de hogedrukzijde van de warmtepomp geleid. De ammoniak condenseert in de condensor en geeft daar zijn warmte af aan het verwarmingscircuit van de woning (op bijvoorbeeld 60 °C), waarna de ammoniakdruk wordt verlaagd door het expansieventiel. De vloeibare ammoniak verdampt vervolgens in de verdampers en neemt zo energie op uit de koude buitenlucht. Via een check valve

wordt de ammoniak naar het andere drukvat gezogen, dat op de begintemperatuur van de cyclus staat (60 °C in dit voorbeeld), waarbij het koudemiddel weer aan het adsorptiemateriaal adsorbeert. Na ongeveer 5 minuten draait de functie van de twee drukvaten om en zo ontstaat een semi-continu proces. Ten opzichte van een standaard verbrandingsketel zit de winst in de extra warmte die via de verdamper en de condensor uit de buitenlucht wordt onttrokken. Deze lucht-water warmtepomp is stil, is geschikt voor binnenopstelling, en bereikt een hoge primaire energie efficiëntie in combinatie met hoge temperatuur radiatoren. Om deze redenen is hij zeer geschikt voor bestaande woningen, en kan met name in de vervangingsmarkt een zuinige opvolger van de HR-ketel worden. Dezelfde technologie kan in de toekomst worden aangedreven door biobrandstoffen of (groen) waterstof, waarmee duurzame verwarming via het gasnet mogelijk wordt. In samenwerking met partners uit de verwarmingsindustrie wordt een betaalbaar massaproduct ontwikkeld. Voor een grotere woning met een gasverbruik van bijvoorbeeld 2000 m³ per jaar kan de investering in 5-7 jaar worden terugverdiend door een jaarlijkse besparing van zo'n € 500 op de energierekening. Het concept wordt op dit moment in de praktijk getest.

Strikt genomen is dit concept niet koudemiddelvrij; ammoniak is het verdampend en condenserend koudemiddel, vergelijkbaar met een koudemiddel in het conventionele reverse Rankine concept. Omdat de "thermische compressor" (met koolstof als adsorbent, aangedreven met warmte) zo afwijkend is van de gebruikelijke mechanische compressor, is dit concept toch in deze bijlage opgenomen.

Absorptie: diverse aanbieders

Absorptiekoeling is de oudste vorm van kunstmatige koeling, in de tijd dat het nog niet mogelijk was om betrouwbare mechanische compressoren te fabriceren. Bij dit concept is de mechanische compressor vervangen door een zogenaamde "thermische compressor". Via uitdamping uit een absorbens door middel van toevoer van warmte wordt de partiële dampdruk van het koudemiddel verhoogd. Ammoniak/water en water/lithiumbromide zijn de meest toegepaste stofparen. Deze technieken zijn vanwege hun milieuvoordeel in een aantal toepassingen erg aantrekkelijk, zeker in combinatie met restwarmtegebruik of warmte/koude/krachtkoppeling. Wereldwijd is een beperkt aantal bedrijven in deze technologie gespecialiseerd. In Nederland is dit het bedrijf Colibri BV in Vaals.

Ook voor dit concept geldt dat het niet koudemiddelvrij is en wordt aangedreven door een "thermische compressor".

Verwarming en vrije koeling met bodemenergie: diverse aanbieders

Vrije koeling en verwarming is een alternatief voor apparaten met een koudemiddel, en daarom onderdeel van dit overzicht. Enerzijds een verwarrend domein vanwege de grote verscheidenheid aan terminologie en uitvoeringsvormen, anderzijds zijn zowel open als

gesloten ondiepe (tot ca. 200 m) bodemenergiesystemen al geruime tijd standaard-technologie.

De aardbodem slaat de warmte van de zon op. Daardoor heerst er al vanaf een geringe diepte een vrij constante temperatuur van 10 à 12°C, en die temperatuur loopt op met 1K per 100 meter diepte. Tegenwoordig boren we meestal tot circa 200 meter diepte. Daarmee kan men een bijna ideale bron voor een warmtepomp creëren, waarmee de warmtepomp in de winter op efficiënte wijze een gebouw kan verwarmen. In de zomer kan deze bron dienst doen als directe koeling voor een gebouw, zonder tussenkomst van een warmtepomp/koelmachine. Dat is “vrije” koeling, want er wordt niet traditioneel gekoeld met een airco. De warmte die in de zomer door koeling wordt afgevoerd (met vrije koeling of via een warmtepomp/airco), kan weer in de bodem worden opgeslagen (geregenereerd) voor gebruik in de winter, waarmee het koelen helpt om het verwarmen nog efficiënter te maken.

Bodemenergie of Geothermie?

Beide technieken halen energie uit de bodem. Het verschil zit hem in de diepte waarop gewerkt wordt. In Nederland ligt een belangrijke grens op 500 meter diepte, daaronder is namelijk de Mijnbouwwet van kracht. Op basis van deze diepte kunnen we het gebruik van de bodem voor energielevering indelen in ‘bodemenergie’ (0 – 500 meter) en ‘geothermie’ (dieper dan 500 meter).

– Bodemenergie (0 – 500 meter)

Warmte en koude winning en opslag, met name voor verwarmen en koelen van gebouwen. Dit is wat we ‘bodemenergiesystemen’ noemen. In de praktijk is de diepte waarop deze systemen worden geplaatst meestal beperkt tot ca. 200 meter.

- Open systemen (grondwatersystemen / WKO (warmte/koude opslag) systemen)
- Gesloten systemen (bodemwarmtewisselaarsystemen)
- Geothermie (>500 meter)
- Diepe geothermie (vanaf 1500 meter, tot meer dan 4000 meter), geschikt voor directe warmtelevering
- Ondiepe geothermie (500 – 1500 meter), deels directe warmtelevering, bijvoorbeeld ten bate van tuinbouwkassen.

Krachtenbundeling bodemenergie

BodemenergieNL is de brancheorganisatie voor alle bedrijven en organisaties die aan open en gesloten bodemenergiesystemen werken in Nederland, in de meeste gevallen in combinatie met een warmtepomp. Volgens deze organisatie: “Als we in Nederland in 2050 geen gas meer gebruiken, voorzien bodemenergiesystemen circa 25% van de gebouwen van duurzame verwarming en koeling”.

Projecten bodemenergie

Op dit moment zijn er duizenden projecten in de praktijk gerealiseerd of in uitvoering/voorbereiding, primair gericht op verwarming, met in veel gevallen vrije koeling in de zomer als extra. Daarmee kan de milieuvriendelijke mobiele airco van de bouwmarkt buiten de deur worden gehouden. In Nederland zijn diverse

warmtepompfabrikanten en leveranciers actief op het gebied van bodemenergie (o.m. IthoDaalderop, Nathan, Nibe, Stiebel Eltron, Vaillant).

Thermo-akoestisch: Blue Heart Energy, SoundEnergy

In Nederland zijn meerdere bedrijven actief op het gebied van thermo-akoestische concepten.

Het bedrijf Blue Heart Energy is een "Spin-out" van ECN-technologie (sinds 2018 onderdeel van TNO). Het doel is om warmtepompen voor de gebouwde omgeving te maken via exclusieve licentieovereenkomsten (tot 100 kW). Meer details in <https://blueheartenergy.com/> en (14).

Een ander Nederlands bedrijf is SoundEnergy. Een inert werkgas ondergaat een thermodynamisch kringproces, onder invloed van de periodieke akoestische golfbeweging. Geluidsgolven zijn longitudinaal (in de richting van de golfbeweging), met plaatselijke verdikking en verdunning van het werkgas, voor te stellen als "virtuele zuigers". Daarmee zijn compressie, expansie en verplaatsing van het werkgas te realiseren, in een regenerator ingeklemd tussen twee warmtewisselaars. De fase of timing tussen de periodieke druk en snelheidsvariatie van de akoestische golf bepaalt de richting van het kringproces: als warmtemotor, waarbij warmte wordt omgezet in akoestisch (mechanisch) vermogen, of als warmtepomp, waarbij akoestisch vermogen een temperatuurlift genereert. Hiervoor zijn dus geen mechanisch bewegende delen zoals zuigers en verdringers nodig. Door het ontbreken van een faseovergang is er geen koudemiddel nodig en kan het temperatuurbereik extreem groot zijn. Het principe van deze technologie is al meer dan 150 jaar bekend, als variant op de bekende Stirling machine (conventionele techniek voor het cryogeen vloeibaar maken van gassen), maar pas sinds eind vorige eeuw wordt er gewerkt aan commerciële toepassingen van thermo-akoestiek.

Het THEAC concept

Het THEAC concept van SoundEnergy bestaat uit een ring- of lusvormige akoestische resonator: een thermo-akoestische warmtemotor wordt gecombineerd met een thermo-akoestische warmtepomp. Daarmee wordt het koelsysteem aangedreven met (rest)warmte (zie schema van de THEAC (THErmo Acoustic Cooling). Vloeistofcircuits zorgen voor warmtetoevoer bij hoge temperatuur, warmteafvoer bij omgevingstemperatuur, en de koude-levering voor de airconditioning. Het koelvermogen is sterk afhankelijk van de temperatuurcondities. De thermische responstijd van enkele minuten maakt het systeem uitermate geschikt voor aandrijving met zonnewarmte en snel fluctuerende koelbehoefte (industriële batchprocessen).

THEAC in de praktijk

Vorig jaar bracht SoundEnergy de THEAC-25 op de markt. Inmiddels zijn twee systemen geïnstalleerd; bij de nieuwbouw van het Integraal Kind Centrum 'Magenta' in Delden, als onderdeel van de gebouwkoeling, en bij koffiebrander Mocca d'Or in Zwolle, waarbij

restwarmte van het koffiebranden wordt gebruikt voor gebouwkoeling. Een opgeschaalde versie is in ontwikkeling, bestaande uit modules van ieder 200 kW, tot koelvermogens van ruim 1 MW. www.soundenergy.nl

Luchtcyclus (Air cycle): Tarnoc

Air Cycle toepassingen

Air Cycle systemen staan met name bekend om hun toepassing in de luchtvaart, als standaard techniek voor airconditioning van de cabine. Slim gebruikmaken van de drukverschillen in de straalmotor en het lage gewicht maken dit concept zo succesvol. Air Cycles worden ook gebruikt voor airconditioning in passagierstreinen. Voor cryogene en vriesdroog toepassingen (extreem lage temperatuur) is het concept bij uitstek geschikt. In Japan worden air cycles al jaren succesvol ingezet bij het vriesdrogen en bewaren van vis op extreem lage temperatuur (tot -65 °C); de PascalAir unit van Mayekawa is al enige jaren in veel landen te koop. Het Zwitserse bedrijf Mirai Intex (opgericht in 2015) biedt op de markt zowel open als gesloten air cycle units aan (5 tot 15 kW, tot -110 °C). Bij TNO is al in de negentiger jaren van de vorige eeuw in een groot Europees samenwerkingsproject een succesvolle Air Cycle pilot installatie voor een vriesopslagruimte ontwikkeld en gebouwd (20 kW, -60 °C); dat heeft toen helaas niet geleid tot een volgende stap, bij gebrek aan slagvaardige Nederlandse partijen voor doorontwikkeling en marktintroductie. De extreem lage temperaturen bij air cycles zijn op dit moment uiterst actueel vanwege de Covid-19 vaccinopslag bij temperaturen rond -80 °C.

De Tarnoc Air Cycle technologie

Tarnoc, een Nederlandse startup uit Delft, heeft een "Turbineketel" ontwikkeld. De Turbineketel is een hoog vermogen (20 kW), hoge temperatuur (75 °C) warmtepomp om de traditionele CV-ketel te vervangen. Deze warmtepomp is gebaseerd op het air cycle principe. Ten opzichte van een standaard koelcircuit is een van de grote verschillen dat een open systeem met lucht (R729) wordt toegepast. Dit houdt in dat er in feite geen "verdamer" in het systeem aanwezig is. In plaats van dat het koudemiddel wordt verdampt/opgewarmd, wordt het lage temperatuur koudemiddel naar buiten gelaten en vers koudemiddel aangezogen, net als bij het eerdergenoemde TNO-concept. Het uitlaten en aanzuigen van lucht vervangt de functie van de verdamer (warmtewisselaar), met een effectiviteit van 100%. Bijkomend effect hiervan is dat er geen sprake is van condens of rijpvorming op de verdamer. Bij gangbare warmtepompen is er tussen 0 en 5 °C vaak sprake van rijpvorming op de lamellen, waardoor periodiek de ontdooicyclus geactiveerd moet worden, met een sterk negatief effect op de capaciteit en het rendement van de warmtepomp. Ook zijn lekkages van lucht hier minder belangrijk dan koudemiddellekkage bij een gesloten koelcircuit.

Tarnoc: toegepaste techniek

De naam van de Tarnoc Turbineketel is afkomstig van de andere unieke eigenschap van deze koeltechniek. Waar een koelcircuit zoals gebruikelijk een expansieventiel heeft,

wordt de druk in een air cycle systeem verlaagd door een radiale turbine. Op deze manier wordt er arbeid teruggewonnen uit het gecomprimeerde gas. Doordat de turbine aan dezelfde as is bevestigd als de compressor, vloeit deze arbeid nagenoeg zonder verliezen door naar de compressor. Bijkomend effect van de turbine is dat er een grote delta T tussen de inkomende en uitgaande lucht zit. In het geval van de Turbineketel bedraagt dit onder nominale omstandigheden met lage luchtvochtigheid meer dan 30 K. Dit is significant hoger dan de delta T over de verdamper van huidige warmtepompen. Dit heeft als voordeel dat de benodigde hoeveelheid lucht significant lager is. De Turbineketel heeft een luchtdebiet van circa 1100 m³/h, wat tot wel 5x lager is dan dampcompressie warmtepompen met een vergelijkbare capaciteit. Deze relatief lage luchtbehoefte maakt een binnen-opstelling mogelijk met relatief smalle luchtkanalen.

De Turbineketel maakt gebruik van een volledig olievrij systeem. De combinatie van de compressor, turbine en elektromotor, ook wel de Turbo Core genoemd, maakt daarbij gebruik van hoge snelheid elektromotoren. De elektromotor draait op een toerental van veertigduizend toeren per minuut. Door deze hoge frequentie en de lage druk is de compressor significant lichter en compacter dan een mechanische verdringingscompressor met hetzelfde vermogen.

Tarnoc: pilotopstelling

Komende winter gaat Tarnoc samen met twee woningcorporaties een pilottest uitvoeren. Na deze pilot zal er in 2021 worden toegewerkt naar certificering en bredere beschikbaarheid van de Turbineketel. www.Tarnoc.nl

Adiabatische en dauwpuntskoeling: diverse aanbieders

Tal van concepten voor koeling via het verdampen van water zijn en worden ontwikkeld. Met deze techniek wordt voorkomen dat apparaten met een koudemiddel moeten worden gebruikt. De terminologie is niet altijd consistent. Er wordt gesproken van adiabatische koeling, dauwpuntskoeling, verdampingskoeling, dessicant cooling. Hieronder worden de concepten besproken die in Nederland worden toegepast of ontwikkeld. Omdat deze technologie, in tegenstelling tot de meeste andere koeltechnologieën, niet voor verwarmen kan worden toegepast, is de relevantie voor deze studie beperkt.

Adiabatische koeling

Het verdampen van water in een luchtstroom heeft een koelend effect. Deze werking wordt meestal aangeduid als indirecte of directe adiabatische koeling. Er is een risico op verspreiding van legionella, waarvoor voorzorgsmaatregelen moeten worden genomen.

– *Directe adiabatische koeling*

Bevochtiging van lucht zonder warmte-uitwisseling leidt tot daling van de temperatuur en verhoging van de relatieve luchtvochtigheid. De enthalpie en de natteboltemperatuur wijzigen niet. De laagste temperatuur die bereikt kan worden is de natteboltemperatuur. De relatieve luchtvochtigheid is dan 100%. De lucht is verzadigd. Voor menselijk comfort

is dit niet aangenaam. Het toepassingsbereik van directe adiabatische koeling is dan ook beperkt tot droge klimaten of situaties waarbij een geringe koeling volstaat.

– *Indirecte adiabatische koeling in luchtbehandelingskast*

De meest voorkomende werkwijze is om gebouwen te voorzien van een ventilatiegroep met warmteterugwinning via een warmtewisselaar of een warmtewiel. De retourlucht uit het gebouw wordt bevochtigd, waardoor de temperatuur daalt. Deze koude wordt dan overgedragen op de toevoerlucht. Alle aanbieders van luchtbehandelingskasten bieden deze mogelijkheid, die waarschijnlijk de goedkoopste en meest energiezuinige vorm van comfortkoeling is. De werking wordt begrensd door de natteboltemperatuur. Doordat het binnen koeler is dan buiten, is de natteboltemperatuur ook lager dan buiten. Bij slecht geïsoleerde gebouwen warmt de retourlucht te veel op en is indirecte adiabatische koeling niet geschikt.

Dauwpuntskoeling

Een alternatieve technologie genaamd “dauwpuntskoeling” werd de laatste 20 jaar parallel ontwikkeld in Nederland en onder andere Australië. Hierbij wordt toevoerlucht afgekoeld in een platenwarmtewisselaar en dan in het gebouw geblazen. Een deel van de afgekoelde lucht wordt omgeleid en bevochtigd, terwijl ze opwarmt tegen de toevoerlucht. Hierdoor kan in theorie de lagere dauwpuntstemperatuur bereikt worden in plaats van de natteboltemperatuur. De te bereiken temperatuur van de toevoerlucht is onafhankelijk van de thermische belasting van het gebouw. Dit is met name interessant voor bij gebouwen met veel openingen zoals distributiecentra en fabriekshallen en bij een matige gebouwkwaliteit.

Stirling: TU Twente

In een TKI project (65) onderzoeken TU Twente, Thales en Microgen Engine Corporation BV een elektrisch gedreven vrije zuiger (free piston) Stirling warmtepomp voor huishoudelijk tapwater. Het Stirling concept werkt met een gasvormig medium (meestal Helium) en is traditionele techniek voor het op industriële schaal produceren van vloeibare gassen, bij temperaturen tot dicht bij het absolute nulpunt. Simulatiemodellen zijn ontwikkeld als basis voor een systeemontwerp. Er wordt gerapporteerd dat 1 tot 1,3 kW verwarmingsvermogen wordt geleverd met een COP van 2,1 tot 2,4 bij een brontemperatuur van 20 °C.

Magneto-calorisch: TU Delft

Magnetische koeling maakt gebruik van het zogeheten magneto-calorische effect in bepaalde vaste stoffen. Alle atomen in legeringen – een mengsel van metalen - hebben een eigen (ongeordend) magnetisch veld. Wanneer legeringen in een magnetisch veld worden geplaatst, wordt het magnetisch veld in die legeringen geordend. Dat komt doordat alle atomen de richting van het magnetisch veld overnemen. Door die beweging warmt het materiaal op. Deze warmte kan vervolgens afgevoerd worden naar buiten.

Wanneer het magneetveld weer wordt uitgezet, wordt het magneetveld weer ongeordend en koelt de legering af. Het wordt zelfs kouder dan bij de beginsituatie. Om terug te komen naar de beginsituatie, neemt de legering dan warmte op uit de omgeving. Daardoor daalt de omgevingstemperatuur. Deze cyclus kan continu worden herhaald.

Magneto-calorisch pompen van warmte biedt een aantal voordelen: geen koudemiddel nodig, weinig geluid, in potentie meer energie-efficiënt dan de gebruikelijke technieken. Veel legeringen waarmee deze techniek kan worden gebruikt, bestaan echter uit stoffen die schaars of duur zijn. Recente onderzoeken bieden goedkopere uitkomsten met betaalbare, minder schadelijke en minder schaarse grondstoffen, waaronder een legering van ijzer, silicium, fosfor en mangaan. Deze techniek is echter nog niet commercieel beschikbaar. Het marktperspectief voor magneto-calorische koeling ligt vooral in koelkasten, transportkoeling, supermarktkoeling en woningen; als koelinstallatie, warmtepomp of airco.

De TU Delft is al jaren bezig met de ontwikkeling van de magneto-calorische technologie, in het begin van deze eeuw in consortia met Unilever, BASF en het Franse bedrijf Cooltech. Vooral dankzij professor Ekkes Brück (TU Delft, voorheen UvA), die gespecialiseerd is in deze technologie, met name de zoektocht naar goed bruikbare en betaalbare grondstoffen, met minimale belasting van het milieu. Via de Delftse start-up Magneto BV wordt nu de stap naar de markt gezet. <https://magneto.systems/>

BIJLAGE 7: EU VERORDENINGEN EN EU-RICHTLIJNEN MET BETREKKING TOT KOUEMIDDELEN

EU Verordeningen

Verordeningen zijn wetgevingshandelingen die vanaf hun inwerkingtreding automatisch en op dezelfde manier gelden in alle EU-landen. Ze zijn in hun geheel bindend in alle EU-landen.

EU Verordening ozonlaag afbrekende stoffen, F-gassen Verordening

In twee Europese verordeningen en een richtlijn staan verplichtingen voor ozonlaag afbrekende stoffen en F-gassen en de installaties die deze stoffen bevatten. Deze bevatten voorschriften over afbouw van productie en gebruik, handel, emissiebeheersing, terugwinnen van gassen en etikettering. Europese verordeningen zijn rechtstreeks werkend in alle lidstaten. Het gaat om de volgende verordeningen en richtlijnen.

- Verordening ozonlaag afbrekende stoffen: EG nr. 1005/2009
- F-gassenverordening: EU 517/2014
- MAC-richtlijn (Automotive directieve, gebruik HFK's in auto-airco's): EG 40/2006

Verordening ozonlaag afbrekende stoffen

De Verordening ozonlaag afbrekende stoffen (EG nr. 1005/2009) is een uitwerking en aanscherping van de verplichtingen in het Montreal-protocol over stoffen die de ozonlaag aantasten.

F-gassenverordening

De F-gassenverordening (EU 517/2014) is een uitwerking en aanscherping van de verplichtingen in het Protocol van Kyoto over stoffen die het broeikas effect versterken. Deze verordening moet ervoor zorgen dat de uitstoot van F-gassen op Europees niveau tegen 2030 met minstens 60% wordt gereduceerd ten opzichte van de emissies in 2005.

Onderdelen van de verordening zijn:

- Een quotasysteem voor importeurs en producenten van HFK's (phasedown). Dit quotasysteem zal ervoor zorgen dat tegen 2030 de hoeveelheid HFK's die op de markt worden gebracht met 79% zal zijn gereduceerd ten opzichte van de hoeveelheid die in 2015 op de markt is gebracht (in CO₂-equivalenten uitgedrukt);
- Een lijst met toepassingen waarvoor tegen een welbepaalde datum apparatuur niet meer op de markt mag worden gebracht met F-gassen. De belangrijkste impact zal komen van het verbod vanaf 2020 om koeltoepassingen op de markt te plaatsen met HFK's die een GWP-waarde van 2500 of meer hebben.

- Het gebruik van gefluoreerde broeikasgassen, met een GWP van 2500 of meer voor de service of het onderhoud van koelapparatuur met een hoeveelheid koudemiddevulling van 40 ton CO₂-equivalent of meer, is met ingang van 1 januari 2020 verboden (en 2030 voor gerecycleerde/geregenereerde koudemiddelen).
- Voorschriften voor lekdichtheidscontroles in functie van de tonnage aan CO₂-equivalenten die in een toepassing aanwezig is. Hoe schadelijker het koudemiddel (hoe hoger de GWP-waarde), hoe frequenter er moet worden gecontroleerd op lekkage.
- Het bovenstaande is een summiere samenvatting; de verordening is erg gedetailleerd en complex. In concrete gevallen wordt geadviseerd om de volledige tekst van de verordening te raadplegen.
- De F-gassenverordening (2014) wordt herzien; een lijst met herzieningsvoorstellen is in mei 2021 gepresenteerd; de Europese Commissie komt eind 2021 met een concreet herzieningsvoorstel (31).

EU Richtlijnen

EU Richtlijnen worden Europa-breed vastgesteld en krijgen kracht van wet via nationale wetgeving en implementatie.

De zogenaamde Nieuwe Aanpak Richtlijnen hebben een specifiek doel (de essentiële eisen), maar bieden de EU-landen de vrijheid om zelf te bepalen hoe zij dat willen bereiken. De EU-landen moeten richtlijnen omzetten in nationale wetgeving die tot het gestelde doel moet leiden. De nationale overheden van de EU-lidstaten zijn er verantwoordelijk voor dat de EU-richtlijnen op de juiste wijze wordt toegepast op hun grondgebied.

Veel industriële producten, waaronder koelinstallaties, warmtepompen en onderdelen daarvan, mogen uitsluitend worden verhandeld in de Europese Economische Ruimte (EER) als ze een CE-markering hebben. CE-markering geeft aan dat het product voldoet aan alle op dat product van toepassing zijnde wettelijke eisen op het gebied van veiligheid, gezondheid en milieu, die zijn vastgelegd in meer dan 27 product-specifieke Europese richtlijnen en verordeningen. Met CE-markering verklaart de fabrikant onder eigen verantwoordelijkheid dat zijn product voldoet aan alle essentiële eisen van de toepasselijke EU-richtlijn(en). Dat kan gebeuren aan de hand van geharmoniseerde normen, maar ook andere normen of documenten kunnen daarbij worden gebruikt. Hiertoe moet een fabrikant een conformiteitsbeoordeling uitvoeren, een technisch dossier samenstellen, een EU-conformiteitsverklaring opstellen, zo nodig gebruiksaanwijzingen meeleveren en de CE-markering aanbrengen op zijn product. In veel gevallen eisen de richtlijnen dat de fabrikant zijn product laat testen (keuren) door een onafhankelijke 'Notified Body' (in Nederland heet dat een EU-Conformiteitsbeoordelingsinstantie CBI, om onderscheid te maken met een NL-CBI die alleen de in Nederland wettelijk verplichte conformiteitsbeoordelingen mag uitvoeren ten aanzien van producten in de gebruiksfase, de "nationale kop"). Bij import van een product van buiten de EER moet de importeur nagaan of de fabrikant alle noodzakelijke

stappen voor CE-markering heeft genomen, en neemt meestal feitelijk de verantwoordelijkheden van de fabrikant over.

Op koelinstallaties, warmtepompen en onderdelen daarvan, zijn met name van toepassing de Richtlijnen voor machines, drukapparatuur, elektrische en elektronische apparatuur, energie-efficiëntie en in een aantal gevallen voor potentieel explosieve atmosferen. Deze worden hieronder kort besproken.

MAC-richtlijn (buiten de scope van deze studie)

Richtlijn 2006/40/EG van het Europees Parlement en de Raad van 17 mei 2006 betreffende emissies van klimaatregelingsapparatuur in motorvoertuigen. Vanaf 1 januari 2011 moeten alle nieuwe voertuigtypes worden uitgerust met een koelmiddel dat een GWP-waarde heeft dat lager is dan 150. In de praktijk is dit verbod met enige vertraging, omwille van onzekerheid over de praktische haalbaarheid en de beperkte beschikbaarheid van alternatieve technologieën, geïmplementeerd. In 2013 werd 5% van de nieuwe wagens uitgerust met een alternatief koudemiddel. Vanaf 1 januari 2017 moeten alle nieuwe voertuigen worden uitgerust met een koudemiddel dat een GWP-waarde heeft dat lager is dan 150. HFO R1234yf is wereldwijd als standaard ingevoerd. Vanwege de discussie over de milieuaspecten van HFO's, en de specifieke omstandigheden voor airco's in elektrisch aangedreven voertuigen, komt CO₂ als koudemiddel weer in de discussie. In Australië worden al decennialang honderdduizenden motorvoertuigen door de eigenaar nagevuld met koolwaterstof koudemiddel (retrofill).

Richtlijnen voor drukapparatuur en drukvaten

De Europese richtlijn voor drukapparatuur (2014/68/EU) (Pressure Equipment Directive PED) stelt essentiële veiligheidseisen aan drukapparatuur en samenstellen waarvan de maximaal toelaatbare druk PS meer dan 0,5 bar(o) bedraagt. Hierbij dient de apparatuur overeenkomstig de instructies van de fabrikant/installateur of onder redelijkerwijs te verwachten omstandigheden in bedrijf te worden gesteld. De PED regelt de verantwoordelijkheden en de verplichtingen van de verschillende marktdeelnemers: fabrikant/installateurs, importeurs, distributeurs, gebruiker, keuringsinstantie en overheid en borgt ontwerp en fabricage volgens de Essentiële Eisen uit bijlage I van de PED.

De PED is gebaseerd op categorieën. Afhankelijk van de ontwerpdruk, de omvang van de installatie en de stofgroep van het gebruikte koudemiddel, valt de installatie in één van de vijf gedefinieerde 'veiligheidscategorieën' met oplopend risico:

- Artikel 4.3 (goed vakmanschap, eigen verklaring door de fabrikant)
- Categorie I, onderdeel van een CE-markering op basis van een eigen verklaring van de fabrikant.
- Categorie II, III en IV, onderdeel van een CE-markering waarbij een onafhankelijke keuringsinstantie toezicht houdt op het ontwerp, de fabricage en de eindcontrole van de betreffende installatie. De intensiteit van het toezicht neemt toe

naarmate de installatie in een hogere categorie valt. Dit varieert van verificatie aan de hand van de gebruiksaanwijzing en markeringen tot aan controle van de opstelling, berekeningen en testen.

Voor de implicaties van de koudemiddelkeuze is in dit verband van belang dat brandbare koudemiddelen in de klasse 2L (o.a. R32, HFO, ammoniak), 2 en 3 (koolwaterstoffen) en giftige in klasse B (ammoniak) in PED-stofgroep 1 vallen, en dus een intensiever PED-keuringsregime vereisen dan bij klasse A1 (vrijwel alle overige HFK's) die in stofgroep 2 valt. Er is hierop één uitzondering: HFO R1234ze (E) is klasse A2L maar toch PED-stofgroep 2.

Naast de PED bestaat de Europese richtlijn (2014/29/EU) voor drukvaten van eenvoudige vorm. Deze is van belang voor eenvoudige opslagvaten en cilinders met koudemiddel.

Machinerichtlijn

De Machinerichtlijn 2006/42/EG (juni 2006) bevat eisen waaraan machines bestemd voor de Europese markt moeten voldoen. Deze richtlijn bevat een groot aantal veiligheids- en gezondheidseisen en een klein aantal administratieve eisen. Fabrikanten zijn verplicht de eisen uit de richtlijn toe te passen. Een belangrijk aspect daarbij is de risicoanalyse, waaruit volgt of er aanvullende risico beperkende maatregelen nodig zijn. De Machinerichtlijn is van toepassing op machines, verwisselbare uitrustingsstukken, veiligheidscomponenten, hijs- en hefgereedschappen, kettingen, kabels en banden, verwijderbare mechanische overbrengingssystemen en niet voltooide machines (de zgn. halffabricaten). Koelinstallaties, warmtepompen, compressoren, pompen, etc. vallen onder deze richtlijn.

ATEX richtlijnen

De twee ATEX (ATmosphère EXplosible) richtlijnen hebben betrekking op alle situaties waar een kans bestaat op gas- en stofontploffingsgevaar. Bedrijven en organisaties die werken in explosiegevaarlijke omgevingen dienen maatregelen te nemen zodat werknemers op een veilige manier hun werkzaamheden kunnen uitvoeren.

- ATEX-richtlijn 114 (2014/34/EU, voorheen ATEX 95) bepaalt aan welke eisen en normen apparatuur en producten moeten voldoen die worden gebruikt in explosiegevaarlijke omgevingen. Deze richtlijn is vooral van toepassing op fabrikanten. Producten die voldoen aan de eisen van de ATEX 114 richtlijn zijn te herkennen door een extra teken in combinatie met de CE-markering.
- ATEX-richtlijn 153 (1999/92/EG, voorheen ATEX 137) beschrijft de veiligheidseisen die werkgevers of eigenaren van ATEX-installaties verplicht moeten treffen zodat medewerkers veilig en gezond kunnen werken in omgevingen met explosiegevaar. De werkgever heeft de volgende verplichtingen.



- Gevaarlijke gebieden waarin een kans bestaat op explosies dienen ingedeeld te worden in ATEX-zones.
- Binnen explosiegevaarlijke gebieden moet zijn aangegeven welke explosieve stoffen aanwezig zijn en in welke hoeveelheid deze aanwezig zijn.
- Installaties binnen het explosiegevaarlijke gebied moeten op de juiste manier door installatieverantwoordelijke medewerkers aangelegd, geïnspecteerd en onderhouden worden.
- Werkgevers moeten hun medewerkers opleiden en certificeren zodat zij veilig kunnen werken binnen gevaarlijke gebieden.
- Explosiegevaarlijke gebieden dienen duidelijk gemarkeerd te worden met een waarschuwingsdriehoek.



Koelinstallaties en warmtepompen met brandbare koudemiddelen kunnen, afhankelijk van het soort installatie en de omgeving waarin deze is geplaatst, onderwerp zijn van een ATEX-zoneringsstudie (risicoanalyse). Als uit een dergelijke studie blijkt dat er significante risico's zijn (zoning), dan kan eerst worden geprobeerd om die risico's met maatregelen te elimineren of afdoende te mitigeren. Afhankelijk van het effect daarvan, moeten maatregelen uit beide ATEX-richtlijnen worden toegepast. Helaas wordt in ieder EU-land in de praktijk verschillend omgegaan met de eventuele toepassing van de ATEX-richtlijnen. Ook zijn specifieke Europese normen, zoals EN 378, niet helder over de relevantie van ATEX voor koelinstallaties en warmtepompen.

Richtlijn energieprestatie gebouwen (EPBD)

De herziene Europese Energy Performance of Buildings Directive (EPBD III) is in 2018 vastgesteld. Deze richtlijn heeft als doel om de energie-efficiëntie van gebouwen te verbeteren, waardoor het energiegebruik daalt. De EPBD III is gericht op organisaties en personen die op het terrein van de gebouwde omgeving actief zijn, zoals woningcorporaties, gebouweigenaren, huurders, technische dienstverleners, bouwbedrijven, bouwmaterialenindustrie, bouw- en woningtoezichtinstanties, de installatiesector, netbeheerders, architecten, keuringsinstanties en gemeenten. Van belang voor deze studie zijn met name de volgende twee pijlers:

- Systeemeisen technische bouwsystemen: om de energieprestatie van gebouwen efficiënter te maken, worden in de EPBD III systeemeisen voorgeschreven voor de verbetering van de energieprestatie van technische bouwsystemen. Onder technische bouwsystemen worden systemen verstaan voor ruimteverwarming, ruimtekoeling, ventilatie, warm tapwater, ingebouwde verlichting en gebouwautomatiserings- en controlesystemen; in een aantal landen is hiertoe een systeem van gelijkwaardigheidsverklaringen opgezet;
- Technische keuringen verwarmings- en aircosystemen: de EPBD III bevat de keuringsverplichting voor verwarmings- en airconditioningsystemen vanaf een nominaal vermogen van 70 kW of meer; is één van beide systemen gekoppeld aan een ventilatiesysteem, dan moet dit ventilatiesysteem ook gekeurd worden.

Daarnaast is de verwarmingskeuring voortaan van toepassing op alle verwarmingssystemen, inclusief warmtepompen.

Overige richtlijnen en verordeningen

De volgende EU-richtlijnen zijn veelal van algemene toepassing op koelinstallaties en warmtepompen, waarbij sectorspecifieke aspecten geen rol spelen.

- Laagspanningsrichtlijn 2014/35/EU, februari 2014, betreffende de harmonisatie van de wetgevingen van de lidstaten inzake het op de markt aanbieden van elektrisch materiaal bestemd voor gebruik binnen bepaalde spanningsgrenzen.
- Europese verordening (1272/2008/EG, met wijziging 2019) over indeling en etikettering van chemische stoffen CLP (Classification, Labelling and Packaging, ofwel indeling, etikettering en verpakking).
- REACH is een Europese verordening (EC 1907/2006) over de productie van en handel in chemische stoffen. REACH staat voor Registratie, Evaluatie, Autorisatie en restrictie van Chemische stoffen. De leverancier moet zorgen voor een veiligheidsinformatieblad bij elke chemische stof. De eindgebruiker moet zich houden aan de maatregelen in dit veiligheidsinformatieblad.
- De ADR is een Europese overeenkomst voor het internationale vervoer van gevaarlijke goederen, zoals koudemiddelen, over de weg. De Europese Richtlijn 94/55/EG schrijft voor dat de lidstaten de ADR in eigen wetgeving implementeren. De ADR stelt niet alleen regels voor het vervoer over de weg, maar ook voor het laden en lossen van gevaarlijke goederen.
- De Europese RoHS II Richtlijn 2011/65/EU (Restriction of Hazardous Substances - beperking van gevaarlijke stoffen), is een EU-richtlijn met als doel het gebruik van bepaalde gevaarlijke stoffen in elektrische en elektronische apparatuur te beperken.
- Ecodesign wordt geregeld met meerdere verordeningen en richtlijnen. De Richtlijn Energie gerelateerde producten 2009/125/EC (Energy Related Products, ERP of ecodesign richtlijn) stelt eisen vast met betrekking tot het ecologisch ontwerp van energie-gerelateerde producten. Onder de richtlijn zijn productcategorieën ingericht (de zogenaamde LOT's) waarvoor verordeningen tot stand worden gebracht met daarin specifieke minimumeisen op het gebied van energieprestaties voor producten binnen de LOT. De richtlijn is met name belangrijk voor producenten, importeurs en toeleveranciers van koelinstallaties en warmtepompen. Verordening (EU) 2016/2281 (november 2016) tot uitvoering van Richtlijn 2009/125/EG betreffende de totstandbrenging van een kader voor het vaststellen van eisen inzake ecologisch ontwerp voor luchtverwarmingsproducten, koelproducten, hoge temperatuur proces-chillers en ventilatorluchtkoelers, is in dit verband van belang. Het energielabel is een label dat volgens verschillende Europese richtlijnen (92/75/CEE, 94/2/CE, 95/12/CE, 96/89/CE, 2003/66/CE, 2010/30/EU) moet worden meegeleverd bij de verkoop van onder andere auto's, elektrische apparaten, lampen en gebouwen. Dit label is een maatstaf voor de consument om te zien hoe zuinig, milieuvriendelijk en/of energiebesparend het aangekochte product is. Tevens staat er vaak informatie op over de prestaties van het product en de gebruikte materialen bij

- de productie. De eerdergenoemde LOT's houden zich bezig met de uitwerking en invoering van energie labels voor diverse categorieën. De EU stelt gedelegeerde verordeningen (ook gedelegeerde handelingen genoemd) vast die directe werking hebben en daarom geen wettelijke nationale implementatie behoeven.
- Richtlijn Recycling (WEEE) 2012/19/EU betreft afgedankte elektrische en elektronische apparatuur (Waste of Electrical and Electronic Equipment). De WEEE-richtlijn gaat over de inzameling van alle soorten afgedankte huishoudelijke apparatuur en stelt doelen voor de minimumhoeveelheid elektronisch afval, die per hoofd van de bevolking per jaar ingezameld wordt.

BIJLAGE 8: NEDERLANDSE WET- EN REGELGEVING EN BIJBEHORENDE RICHTLIJNEN MET BETREKKING TOT KOUEMIDDELEN

Nederlandse wet- en regelgeving

In Nederland zijn diverse nationale wetten, wettelijke besluiten en regelingen, en onderliggende richtlijnen van toepassing op (natuurlijke) koudemiddelen. De Nederlandse wetgeving met betrekking tot veiligheid, gezondheid en milieu is op dit moment (begin 2021) in een grote transitie. Bestaande wetgeving wordt geïntegreerd in de nieuwe omgevingswet. Deze bevat alle regels voor ruimte, wonen, infrastructuur, milieu, natuur en water en regelt daarmee het benutten en beschermen van de leefomgeving. Onder de Omgevingswet hangen vier algemene maatregelen van bestuur en een ministeriële regeling met de regels voor het praktisch uitvoeren van de wet.

Volgens oorspronkelijke planning zou deze gewijzigde wetgeving in 2018 van kracht zijn geworden, maar vanwege de grote complexiteit van dit vereenvoudigingsproces en de politieke gevoeligheid, is invoering recent uitgesteld tot 1 januari 2022. Hieronder volgen de details van de relevante wetgeving gerelateerd aan koudemiddelen, met daarbij aangegeven op welke koudemiddelen, technieken en toepassingen deze betrekking hebben. Hierbij wordt zoveel mogelijk geanticipeerd op de toekomstige nieuwe integrale Omgevingswet. Daarna volgen de relevante richtlijnen; daarbij is aangegeven hoe deze richtlijnen, via verwijzing in wetgeving, kracht van wet kunnen krijgen.

F-gassenbesluit en -regeling

Besluit van 30 september 2015, houdende vaststelling van nieuwe regels voor bepaalde gefluoreerde broeikasgassen en ozonlaag afbrekende stoffen ter uitvoering van Verordening (EU) nr. 517/2014 en bijbehorende Regeling van de Staatssecretaris van Infrastructuur en Milieu, van 18 september 2015, nr. IENM/BSK-2015/183974, houdende vaststelling van nieuwe regels voor bepaalde gefluoreerde broeikasgassen en ozonlaag afbrekende stoffen ter uitvoering van Verordening (EU) nr. 517/2014. Dit Besluit en deze Regeling zijn een nationale invulling van de Europese Verordening. De Europese Verordening is in Nederland een-op-een overgenomen, met op details enkele kleine nationale aanpassingen. Deze nationale wetgeving is niet geïntegreerd in de nieuwe Omgevingswet, en zal worden aangepast zodra de Europese F-gassen Verordening wordt gewijzigd. De F-gassenwetgeving is van toepassing op alle koel- en warmtepomptoepassingen van F-gassen met een GWP vanaf 150 (stoffen vermeld in bijlage 1 van de Verordening). Voor de F-gassen met GWP kleiner dan 150 (bijlage 2) geldt alleen een rapportageplicht. Airconditioning in personenauto's zijn uitgezonderd; daarvoor is een Europese MAC Richtlijn, die ook een-op-een in nationale wetgeving is overgenomen. Voor het onderdeel met betrekking tot certificering van personen en bedrijven is oorspronkelijk de stichting STEK als centrale uitvoeringsorganisatie opgericht (rond 1990). Onder druk van een aantal marktpartijen is, met het argument van vrije markt en concurrentie, door de overheid die centrale rol van STEK rond 2012 losgelaten,

en is de uitvoering versnipperd. STEK heeft zich sindsdien doorontwikkeld als een van de belangrijkste spelers in die vrije markt.

Activiteitenbesluit milieubeheer

In het Besluit algemene regels voor inrichtingen milieubeheer, Activiteitenbesluit 2007 (7), met uitwerking van de regels in de Activiteitenregeling, worden koelinstallaties en warmtepompen met natuurlijke koudemiddelen expliciet genoemd met verwijzing naar PGS 13, NPR 7600 en NPR 7601. In de bijbehorende ministeriële Regeling staan meer details over de relatie met deze 3 richtlijnen.

Door deze verwijzingen is sinds 2007 een krachtige relatie ontstaan tussen wetgeving en richtlijnen. De twee NPR-en zijn door de industrie zelfstandig opgestelde richtlijnen, die daarmee kracht van wet krijgen. De PGS-13 is in een hechte samenwerking tussen de industrie, wetgevers, vergunningverleners, handhavers, omgevingsdiensten en Veiligheidsregio's tot stand gekomen.

Het Activiteitenbesluit zou een tijd geleden zijn opgegaan in de nieuwe integrale Omgevingswet, maar de invoering daarvan is meerdere malen uitgesteld; nu is 1 januari 2022 genoemd als invoeringsdatum. Zodra de nieuwe Omgevingswet in werking treedt, treedt ook de opvolger van het Activiteitenbesluit, het Besluit activiteiten leefomgeving (Bal), in werking. Verwacht wordt dat de teksten over natuurlijke koudemiddelen van het huidige Activiteitenbesluit in het definitieve Bal integraal worden overgenomen.

Onder de Omgevingswet (inwerkingtreding uitgesteld tot naar verwachting van kracht vanaf 1 januari 2022) hangen vier algemene maatregelen van bestuur en een ministeriële regeling met de regels voor het praktisch uitvoeren van de wet. Het Besluit activiteiten leefomgeving (Bal) en het Besluit kwaliteit leefomgeving (Bkl) zijn het meest relevant voor koudemiddelen.

Besluit activiteiten leefomgeving Bal

Het Besluit van 3 juli 2018, houdende regels over activiteiten in de fysieke leefomgeving (Besluit activiteiten leefomgeving, 1485 pagina's!) (66), (67) bevat de algemene regels waaraan burgers en bedrijven zich moeten houden als ze bepaalde activiteiten uitvoeren in de fysieke leefomgeving. Ook bepaalt het besluit voor welke activiteiten een omgevingsvergunning nodig is. Het Bal bevat regels met het oog op het waarborgen van de veiligheid bij koelinstallaties gevuld met natuurlijke koudemiddelen. Hieronder is de tekst hieruit letterlijk overgenomen. Totdat het Bal formeel in werking is getreden (uitgesteld tot 1 januari 2022) blijft het Activiteitenbesluit van kracht; onderstaande teksten zijn vrijwel identiek aan het huidige Activiteitenbesluit.

§ 3.2.5 Koelinstallatie met kooldioxide, koolwaterstoffen of ammoniak

Artikel 3.15 (aanwijzing milieubelastende activiteiten)

1. Als milieubelastende activiteit als bedoeld in artikel 2.1 wordt aangewezen het aanwezig hebben van een koelinstallatie met meer dan:

- a. 10 kg kooldioxide;
- b. 5 kg koolwaterstoffen; of
- c. 10 kg ammoniak.

2. Onder de aanwijzing valt niet het aanwezig hebben van een koelinstallatie met: a. een gefluoreerd broeikasgas als bedoeld in Verordening (EU) nr. 517/2014 van het Europees Parlement en de Raad van de Europese Unie van 16 april 2014 betreffende gefluoreerde broeikasgassen en tot intrekking van Verordening (EG) nr. 842/2006 (PbEU 2014, L 150); of b. een gereguleerde stof als bedoeld in Verordening (EG) nr. 1005/2009 van het Europees Parlement en de Raad van de Europese Unie van 16 september 2009 betreffende de ozonlaag afbrekende stoffen (PbEU 2009, L 286).

Artikel 3.16 (aanwijzing vergunningplichtige gevallen)

1. Het verbod, bedoeld in artikel 5.1, tweede lid, van de wet, om zonder omgevingsvergunning een milieubelastende activiteit te verrichten, geldt voor de milieubelastende activiteit, bedoeld in artikel 3.15, voor zover het gaat om een koelinstallatie met meer dan:

- a. 100 kg koolwaterstoffen; of
- b. 1.500 kg ammoniak.

Artikel 3.17 (algemene regels)

1. Bij het verrichten van de activiteit, bedoeld in artikel 3.15, wordt voldaan aan de regels over het aanwezig hebben van een koelinstallatie, bedoeld in paragraaf 4.33, als daarin ten hoogste 100 kg koolwaterstoffen of ten hoogste 1.500 kg ammoniak als koudemiddel wordt toegepast.

§ 4.33 Koelinstallatie met kooldioxide, koolwaterstoffen of ammoniak

Artikel 4.432 (toepassingsbereik)

Deze paragraaf is van toepassing op het aanwezig hebben van een koelinstallatie met kooldioxide, koolwaterstoffen of ammoniak.

Artikel 4.433 (melding)

1. Het is verboden de activiteit, bedoeld in artikel 4.432, te verrichten zonder dit ten minste vier weken voor het begin ervan te melden. 2. Dit artikel is niet van toepassing als de activiteit als vergunning-plichtig is aangewezen in hoofdstuk 3.

Artikel 4.434 (melding: treffen gelijkwaardige maatregel)

1. Als een gelijkwaardige maatregel betrekking heeft op maatregelen als bedoeld in artikel 4.436, eerste of tweede lid is:

- a. toestemming als bedoeld in artikel 4.7 van de wet niet vereist; en*
- b. het verboden de maatregel te treffen zonder dit ten minste vier weken van tevoren te melden.*

2. Een melding bevat:

- a. een beschrijving van de maatregel die zal worden getroffen; en*
- b. gegevens waaruit blijkt dat met de gelijkwaardige maatregel ten minste hetzelfde resultaat wordt bereikt als met de voorgeschreven maatregel is beoogd.*

Artikel 4.435 (externe veiligheid: koelinstallaties met kooldioxide of koolwaterstof)

1. Een koelinstallatie met kooldioxide of koolwaterstoffen is zo ontworpen en geïnstalleerd en wordt zo beheerd en onderhouden dat:

- a. deze op een veilige wijze kan functioneren;*
- b. deze snel en veilig uit bedrijf kan worden genomen; en*
- c. onveilige situaties worden voorkomen.*

2. Aan het eerste lid wordt in ieder geval voldaan als:

- a. een koelinstallatie met kooldioxide is ontworpen en geïnstalleerd en wordt beheerd en onderhouden volgens NPR 7601, paragraaf 5.7 en de hoofdstukken 7 en 8, met uitzondering van de paragrafen 8.3 en 8.6; of b. een koelinstallatie met koolwaterstoffen is ontworpen en geïnstalleerd en wordt beheerd en onderhouden volgens NPR 7600, paragraaf 5.7 en de hoofdstukken 7 en 8, met uitzondering van de paragrafen 8.3 en 8.6.*

Artikel 4.436 (externe veiligheid: koelinstallaties met ammoniak)

1. Met het oog op het waarborgen van de veiligheid is een koelinstallatie met ammoniak ontworpen en geïnstalleerd volgens PGS 13.

2. De koelinstallatie wordt beheerd en onderhouden volgens PGS 13.

3. Een koelinstallatie bij een sneeuwbaan of ijsbaan is een indirect koelsysteem als bedoeld in PGS 13.

Artikel 4.437 (overgangsrecht: koelinstallatie met ammoniak bij sneeuwbaan of ijsbaan)

Artikel 4.436, derde lid, is niet van toepassing als de koelinstallatie voor 1 januari 2010 is geïnstalleerd.

Besluit kwaliteit leefomgeving (Bkl)

In het Bkl staan de inhoudelijke normen voor gemeenten, provincies, waterschappen en het Rijk met het oog op het realiseren van de nationale doelstellingen en het voldoen aan internationale verplichtingen. In het Bkl staan instructieregels voor het omgevingsplan over bijvoorbeeld rampenbestrijding en externe veiligheid. Ook staan in het Bkl beoordelingsregels voor omgevingsvergunningen met het oogmerk van bescherming van de fysieke leefomgeving tegen externe veiligheidsrisico's. Minimum externe veiligheidsafstanden voor ammoniak koelinstallaties tot (kwetsbare) objecten zijn opgenomen in het Bkl (voorheen in BEVI/REVI).

BEVI/REVI (Externe veiligheidsafstanden)

Het Besluit externe veiligheid inrichtingen (Bevi) en de bijbehorende Regeling (REVI) zijn gebaseerd op de Wet milieubeheer en de Wet op de Ruimtelijke Ordening. Het besluit implementeert een deel van EU Richtlijn Seveso II/III en verplicht gemeenten en provincies risicovolle situaties van bedrijven ten opzichte van kwetsbare bestemmingen voor 2010 te saneren als het plaatsgebonden risico hoger is dan 10^{-6} jaar. Het betreft hier vooral aspecten bij de verlening van de milieuvergunning, de vaststelling van een bestemmingsplan en de verlening van vrijstelling van een geldend bestemmingsplan. Een externe veiligheidsafstand zorgt voor bescherming van gebouwen en locaties waar mensen gedurende een periode verblijven. Het gaat om gebouwen en plekken buiten de begrenzing van de locatie van de activiteit. Voor koelinstallaties met ammoniak (tussen 1500 en 10000 kg) zijn tabellen opgenomen met veiligheidsafstanden (in meters). Het bevoegd gezag neemt deze afstanden in acht bij het verlenen van de omgevingsvergunningen en bij het opstellen van omgevingsplannen. BEVI/REVI wordt opgenomen in het Besluit kwaliteit leefomgeving (Bkl).

Arbeidsomstandighedenwetgeving

De Arbeidsomstandighedenwet (Arbowet) bevat rechten en plichten voor zowel werkgever als werknemer op het gebied van arbeidsomstandigheden. De Arbowet bevat met name doelvoorschriften. Het Arbeidsomstandighedenbesluit geeft een uitwerking van de Arbowet. De Arbeidsomstandighedenregeling geeft op haar beurt een uitwerking van regels in het Arbobesluit. In het Arbeidsomstandighedenbesluit (Arbobesluit) staan regels over bijvoorbeeld arbozorg, organisatie van het werk, inrichting van arbeidsplaatsen, gevaarlijke stoffen en persoonlijke beschermingsmiddelen. In de Arbeidsomstandighedenregeling (Arboregeling) staan bijvoorbeeld regels over de taken van de Arbodienst en nadere eisen voor onder andere veiligheid gevaarlijke stoffen, arbeid onder overdruk, arbeidsmiddelen, veiligheids- en gezondheidssignalering.

In PGS 13, NPR 7600 en NPOR 7601 wordt invulling gegeven aan deze arbeidsomstandighedenwetgeving.

Wet veiligheidsregio's

De Wet veiligheidsregio's beoogt een efficiënte en kwalitatief hoogwaardige organisatie te bereiken van de brandweezorg, geneeskundige hulpverlening en crisisbeheersing. Dit gebeurt onder één regionale bestuurlijke regie. Op grond van deze wet kan het bestuur van een veiligheidsregio bepalen of een bedrijf een bedrijfsbrandweer moet hebben. In het Besluit veiligheidsregio's staat een beschrijving van de procedure die het bestuur van de veiligheidsregio moet volgen om te bepalen dat een bedrijf een bedrijfsbrandweer moet hebben. Ook is in dit besluit geregeld welke eisen aan een bedrijfsbrandweeraanwijzing kunnen worden verbonden. PGS 13 geeft invulling hieraan voor ammoniak koelinstallaties.

Warenwet

De Warenwet bevat regels met het oog op productveiligheid om de gezondheid en veiligheid van de gebruiker van dat product te beschermen. Dit kan een werknemer of een consument zijn. In de onderliggende Warenwetbesluiten staan regels voor de fabrikant, leverancier en andere marktpartijen. Die regels zorgen ervoor dat een product voldoet aan essentiële gezondheids- en veiligheidseisen uit Europese richtlijnen.

Warenwetbesluit drukapparatuur 2016

In het Warenwetbesluit drukapparatuur 2016 (WBDA 2016) staan eisen voor drukapparatuur. In het WBDA 2016 is de Europese richtlijn voor drukapparatuur (2014/68/EU) geïmplementeerd. Daarmee kan een apparaat in het handelsverkeer worden gebracht (CE-merk). In aanvulling op de EU-richtlijn staan in de Nederlandse Warenwetregeling drukapparatuur 2016 dat ook een keuring moet plaatsvinden voor in gebruikname en periodiek tijdens de gebruiksperiode.

Warenwetbesluit explosieveilig materieel 2016

In het Warenwetbesluit explosieveilig materieel 2016 staan regels over het op de markt brengen van onder andere apparaten en beveiligingssysteem bestemd voor plaatsen met explosieve atmosferen. In dit besluit is de Productrichtlijn explosieve atmosferen (2014/34/EU) geïmplementeerd. Deze richtlijn wordt ook ATEX 114 genoemd.

Warenwetbesluit drukvaten van eenvoudige vorm

In het Warenwetbesluit drukvaten van eenvoudige vorm staan regels over het op de markt brengen van drukvaten van eenvoudige vorm. In dit besluit is de Europese richtlijn (2014/29/EU) voor drukvaten van eenvoudige vorm geïmplementeerd. Dit is van belang voor opslagvaten en cilinders met koudemiddel.

Warenwetbesluit machines

In het Warenwetbesluit machines staan regels over machines, waaronder veiligheid, keuring en certificering. In de Warenwetregeling machines staan nadere eisen. Koelinstallaties (en sommige componenten) zijn machines.

Besluit energieprestatie gebouwen - Besluit van 24 november 2006 tot implementatie van de richtlijn betreffende de energieprestatie van gebouwen (Besluit energieprestatie gebouwen)

In Nederland is er een systeem van gelijkwaardigheidsverklaringen. Voor deze studie wordt verwezen naar de beschikbare bronnen; er is geen directe relatie met het toegepaste koudemiddel, al is energieprestatie uiteraard wel mede afhankelijk van de keuze van het koudemiddel.

Nederlandse Richtlijnen

BRL 100 en BRL 200

Voor de detailuitwerking van certificering van personen en bedrijven onder het F-gassen besluit zijn twee gedetailleerde beoordelingsrichtlijnen van kracht:

- BRL 100 Beoordelingsrichtlijn voor het certificaat f-gassen voor ondernemingen, versie 2.0, 6 juni 2019 vastgesteld door Rijkswaterstaat (Ministerie van Infrastructuur en Milieu);
- BRL 200 Beoordelingsrichtlijn voor het certificaat f-gassen voor personen, versie 1.2, 1 mei 2017 vastgesteld door Rijkswaterstaat (Ministerie van Infrastructuur en Milieu)

Via verwijzing naar deze BRL-documenten in het F-gassen Besluit krijgen deze kracht van wet.

Door de gezamenlijke sector in Nederland is een systeem van zelfregulering opgezet voor certificering bij het werken met natuurlijke koudemiddelen (personen en bedrijven), die zoveel als mogelijk aansluit bij de systematiek voor F-gassen, als vastgelegd in BRL 100 en BRL 200.

NPR 7600:2020 Toepassing van brandbare koudemiddelen in koelinstallaties en warmtepompen

Deze NPR is in eerste versie rond 2000 opgesteld door private partijen, om op dat moment invulling te geven aan veilige toepassing van koolwaterstof koudemiddel. NPR-en worden uitgebracht door NEN (de Nederlandse NBN), onder inhoudelijke verantwoordelijkheid van de Normcommissie koelinstallaties en warmtepompen.

In de 2020 versie is het toepassingsgebied uitgebreid tot alle brandbare koudemiddelen (A2L, A2, A3), wederom om het vacuüm in te vullen. In 2015 heeft deze NPR kracht van wet gekregen via vermelding in Nederlandse wetgeving. Deze wetgeving eist dat aan (delen van) de NPR 7600 wordt voldaan bij koelinstallaties met een koolwaterstof

koudemiddelinhoud van 5 kg en meer. Ongeacht de inhoud geldt de in de wet genoemde algemene zorgplicht.

De veiligheids-, milieu- en gezondheidsaspecten die een rol spelen bij de toepassing van brandbare koudemiddelen (zowel natuurlijke als synthetische koudemiddelen) worden in deze praktijkrichtlijn behandeld.

Het is mogelijk om af te wijken van de in deze praktijkrichtlijn aangegeven maatregelen indien dit is onderbouwd en indien daarmee een gelijkwaardig veiligheids-, milieu- en gezondheidsniveau wordt bereikt.

Deze richtlijn is een informatieve toelichting bij elementen uit verschillende normen, wetten en daaruit voortvloeiende besluiten, die alle vanuit verschillende invalshoeken eisen stellen aan de koelinstallatie en de bouw, de installatie en het gebruik daarvan.

De NPR bevat de volgende onderdelen.

- Beschrijvingen van koudemiddelen en toepassingsgebieden;
- Verwijzingen naar onderliggende richtlijnen en normen;
- Classificatie van koelinstallaties met het oog op veiligheidsniveaus;
- Eisen aan het ontwerp van een koelinstallatie met brandbare koudemiddelen;
- Functionele eisen en uitvoeringseisen aan veiligheidsvoorzieningen;
- Eisen en werkzaamheden voor het correct beheren van een installatie (met name minstens eenmaal per jaar periodieke preventieve controles door competente personen);
- Competenties en vereiste certificeringen.

Toepassingsgebied

NPR 7600 is van toepassing op stationaire koelinstallaties en warmtepompen met brandbare koudemiddelen en heeft betrekking op de gehele levenscyclus (ontwerp, installatie, oplevering, gebruik, onderhoud, inspectie, keuring en ontmanteling). Giftige (en brandbare) koudemiddelen (zoals ammoniak) vallen buiten het toepassingsgebied. De NPR is niet van toepassing op mobiele installaties, maar elementen uit deze NPR kunnen wel, indien van toepassing, worden gebruikt voor mobiele toepassing. Koelinstallaties die volgens de instructies van de fabrikant geïnstalleerd worden en voldoen aan de EU Laagspanningsrichtlijn, Machinerichtlijn en PED worden beschouwd in overeenstemming te zijn met deze NPR. De installateur van het samenstel (volgens de wet ook fabrikant genoemd) wordt geacht conform deze NPR te handelen. Verder is deze NPR niet van toepassing op systemen met een koudemiddelinhoud < 150 g. Hiervoor wordt verwezen naar NEN-EN-IEC 60335-2-40 en NEN-EN-IEC 60335-2-89 en andere van toepassing zijnde normen in deze 60335-2-reeks. Als in toekomstige versies van deze normen de 150 g grens wijzigt, verandert hiermee ook het toepassingsgebied van de NPR.

Competentie en certificering

Daar waar deze maatregelen gaan over een certificeringsregeling, is deze regeling gebaseerd op zelfregulering van en door de sector. Daarmee kan invulling worden gegeven aan de borging van deze maatregelen, voor zowel de competentie personeel dat werkzaamheden uitvoert, als het bedrijf dat verantwoordelijk is voor de uitvoering van die werkzaamheden. De sector bestaat uit representatieve vertegenwoordigers van alle relevante marktpartijen (zoals ontwerp/ingenieursbureaus, adviseurs, koeltechnische installateurs, leveranciers/fabrikanten, eigenaren/beheerders/gebruikers, certificerende bedrijven, schemabeheerders, opleidingsbedrijven en kennisinstellingen). Voor de invulling van de certificeringsparagraaf, die in exact dezelfde bewoording ook in PGS 13 en NPR 7601 is opgenomen (zie hieronder), is eind 2019 door de sectorpartijen een private stichting opgericht (Netwerk Koude- & Klimaattechniek).

NPR 7601:2020 Toepassing van kooldioxide als koudemiddel in koelinstallaties en warmtepompen.

Voor deze NPR geldt de algemene beschrijving zoals bij NPR 7600 is vermeld, inclusief het gedeelte over competentie en certificering.

In 2015 heeft deze NPR kracht van wet gekregen via vermelding in Nederlandse wetgeving. Deze wetgeving eist dat aan (delen van) de NPR 7601 wordt voldaan bij koelinstallaties met **een kooldioxide koudemiddelinhoud van 10 kg en meer**. Ongeacht de inhoud geldt de in de wet genoemde algemene zorgplicht.

Toepassingsgebied

Binnen het toepassingsgebied vallen mechanische dampcompressie koelinstallaties en warmtepompen met meer dan 10 kg kooldioxide als koudemiddel. De volgende onderwerpen vallen niet binnen het toepassingsgebied van deze NPR:

- Secundaire circuits (water, glycol, brijn, enz.) die worden gebruikt voor de afgifte of opname van warmte naar of van het primaire (kooldioxide houdende) koelcircuit;
- Thermisch gedreven koelinstallaties op basis van het ab- of adsorptieprincipe met kooldioxide als een van de componenten in het koudemiddelmengsel;
- Koelinstallaties met zeotrope of azeotrope koudemiddelmengsels met kooldioxide als een van de componenten in het mengsel.

PGS 13: ammoniak als koudemiddel

PGS 13 is een Richtlijn voor de brandveilige, arbeidsveilige en milieuveilige toepassing van ammoniak als koudemiddel in koelinstallaties en warmtepompen, onderdeel van de Publicatiereeks Gevaarlijke Stoffen PGS. Tussen 1990 en 2001 was dit de CPR 13 (Commissie Preventie van Rampen). Een drastisch herziene versie van deze PGS 13, de "Nieuwe Stijl", is inhoudelijk gereed en wordt volgens planning in de eerste helft van 2020 in Nederland ingevoerd. Deze herziening maakt onderdeel uit van de modernisering van alle PGS-documenten (serie documenten over de toepassing van gevaarlijke stoffen) die in de herziene versie zijn gebaseerd op een expliciete risicobenadering. Op basis van kennis en kunde van deskundigen van bedrijfsleven en

overheid zijn 33 verschillende gevaarsscenario's geïdentificeerd (reeks opeenvolgende gebeurtenissen die leiden tot een ongewenste (gevaarlijke) gebeurtenis), waarbij op een systematische manier 23 doelen en 129 maatregelen zijn geformuleerd. Deze maatregelen verkleinen de kans op een incident, of voorkomen of beperken de nadelige gevolgen van een incident. Deze risicobenadering geeft de gebruiker van de richtlijn meer inzicht in het 'waarom' van opgenomen maatregelen.

De PGS Nieuwe Stijl kent de volgende hoofdelementen:

- De wettelijke kaders;
- De risicobenadering met de scenario's;
- De doelen;
- Maatregelen om aan de doelen te voldoen.
- Bij iedere maatregel is aangegeven waar wettelijke invulling aan wordt gegeven:
 - o Omgevingsveiligheid (O)
 - o Brandbestrijding omgevingsveiligheid (BO);
 - o Arbeidsveiligheid (A);
 - o Brandbestrijding en Rampenbestrijding (BR).

Voor deze studie wordt uitgegaan van het definitief concept van de herziene PGS 13:2020 Nieuwe Stijl, VERSIE 0.2 (APRIL 2020) (6).

Deze herziene PGS 13 is van toepassing op koelinstallaties en warmtepompen met ammoniak als koudemiddel en moet worden gevolgd bij de bouw van nieuwe installaties. De PGS heeft betrekking op de gehele levenscyclus van de installatie. De volgende onderwerpen vallen niet binnen de reikwijdte van deze PGS:

- Secundaire circuits (water, glycol, brijn, kooldioxide, enz.) die worden gebruikt voor de afgifte of opname van warmte van of naar het primaire (ammoniakhoudende) koelcircuit;
- Thermisch gedreven koelinstallaties op basis van het ab- of adsorptieprincipe, met ammoniak als een van de componenten in een koudemiddelmengsel (in de meeste gevallen in combinatie met water als absorbent);
- Koelinstallaties met zeotrope of azeotrope koudemiddelmengsels met ammoniak als een van de componenten in het mengsel.

Indien ammoniak wordt toegepast als een van de koudemiddelen in een cascade-koelinstallatie (meestal in combinatie met kooldioxide als koudemiddel in het andere gedeelte van de cascade-koelinstallatie), is deze PGS primair van toepassing op het koelinstallatiegedeelte met ammoniak als koudemiddel, waarbij rekening moet worden gehouden met de mogelijke gevaren en risico's die kunnen optreden wanneer ammoniak onverhoopt in het andere gedeelte van de koelinstallatie terechtkomt, of wanneer het koudemiddel in het andere installatiegedeelte onverhoopt in het ammoniakgedeelte terechtkomt.

De PGS geeft een nadere uitwerking van wettelijke voorschriften op grond van de Omgevingswet, de Arbeidsomstandighedenwet en de Wet veiligheidsregio's.

De PGS 13 Nieuwe Stijl is opgesteld in een intensief proces van 4 jaren, door een team van vertegenwoordigers van het bedrijfsleven (KNVvK, NVKL, Nekovri) en de overheid (IPO, VNG, Inspectie SZW, Omgevingsdiensten, Brandweer Nederland).

KNVvK werkvoorschriften voor koolwaterstoffen

De Koninklijke Nederlandse Vereniging voor Koude KNVvK heeft in 2018 vier Werkvoorschriften uitgebracht, die een aanvulling zijn op de NPR 7600, en daarmee ontwerpers en installateurs ondersteunen bij de toepassing van brandbare koudemiddelen, in het bijzonder koolwaterstoffen.

De vier documenten behandelen de volgende onderwerpen.

- Specifieke eisen aan de kwaliteit van hardsoldeerverbindingen bij koelinstallaties en warmtepompen met koolwaterstoffen koudemiddel
- Veilig werken met koolwaterstoffen als koudemiddel in koelinstallaties en warmtepompen
- Inpandige toepassing van koolwaterstoffen als koudemiddel in koelinstallaties en warmtepompen
- Stationaire detectoren voor koolwaterstoffen als koudemiddel in koelinstallaties en warmtepompen

Deze werkvoorschriften hebben geen kracht van wet, maar ondersteunen de praktijk. In 2021 worden deze aangepast aan het ruimere toepassingsbereik van NPR 7600:2020 (alle brandbare koudemiddelen). De werkvoorschriften zijn verkrijgbaar via (21).

BIJLAGE 9: NORMEN MET BETREKKING TOT KOUEMIDDELEN

Een groot en structureel probleem met betrekking tot normen voor koelinstallaties en warmtepompen is dat er vier internationale, en twee nationale organisaties zijn die normen ontwikkelen en beheren waarbij de onderlinge afstemming beperkt is.

- CEN ontwikkelt Europese normen (EN). Voor koudemiddelen is CEN/TC-182 (milieu en veiligheid van koelinstallaties en warmtepompen) het belangrijkste; de belangrijkste norm EN 378 valt onder deze TC. CEN/TC 113 is specifiek voor Warmtepompen en airconditioning apparaten.
- ISO ontwikkelt internationale normen (ISO); in veel gevallen is er een overlap met CEN, en moeizame afstemming vanwege de verschillen in belangen tussen Europa en overige delen van de wereld. ISO 817, de norm voor koudemiddeleigenschappen, wordt meestal door CEN overgenomen.
- CENELEC ontwikkelt Europese normen voor elektrische apparaten (EN). De meeste apparaten die elektrisch worden aangedreven worden gezien als elektrische apparaten. Voor koudemiddelen wordt voornamelijk gewerkt aan het omzetten van IEC-normen in EN-normen.
- IEC ontwikkelt Internationale normen voor elektrische apparaten (IEC). De meeste apparaten die elektrisch worden aangedreven worden gezien als elektrische apparaten. Oorspronkelijk gold dat voor apparaten met een stekker, maar de scope is in de loop der jaren steeds verder uitgebreid. Voor koudemiddelen en warmtepompen is vooral IEC 60336-2-40 (airconditioners en warmtepompen) van belang.
- In Nederland wordt CEN en ISO gerepresenteerd bij NEN door NC 341094 Koelinstallaties en warmtepompen. Normen die in Nederland worden uitgebracht krijgen een voorvoegsel NEN. De NC brengt ook praktijkrichtlijnen uit, zoals de NPR 7600 en NPR 7601. Op initiatief van deze NC is in 2020 een ad-hoc afstemmingsgroep met NEC 61 ingesteld, ingegeven door de problemen rond de stemmingen over de 150 g brandbaar koudemiddel kwestie in IEC 60335-2-40 (zie hieronder).
- In Nederland wordt CENELEC en IEC gerepresenteerd bij NEN door NEC-61 Veiligheid van huishoudelijke toestellen.

Gezien deze complexe organisatiestructuur is het in de praktijk voor een klein land als Nederland niet mogelijk om adequaat te opereren op normalisatiegebied. De afgelopen decennia lag focus vooral bij de koudemiddelen. Hieronder volgt een overzicht van de normen die relevant zijn voor koudemiddelen en warmtepompen.

EN 378:2016

NEN EN 378:2016 Koelinstallaties en warmtepompen - Veiligheids- en milieueisen – is de centrale Europese (horizontale) norm die in 4 delen de hele levenscyclus van koelinstallaties en warmtepompen betreft, vanaf het ontwerpen, via bouwen, installeren, bedienen, onderhouden en repareren, tot en met de ontmanteling en

afvoer. Aan deze norm wordt vanaf 1987 gewerkt door een breed team van deskundigen uit heel Europa, vanuit de breed gedragen behoefte aan een eenduidige Europese norm in dit vakgebied. Nederland heeft hier veel inbreng in gehad, vanwege de destijds vooruitstrevende Nederlandse wet- en regelgeving vanaf 1990 (CFK Actieprogramma en Regeling Lekktheid Koelinstallaties), die de voorloper is van de huidige Europese F-gassen verordening, Gerelateerd aan NEN-EN 378 bestaat een grote familie aan detailnormen voor tal van aspecten en componenten (compressoren, leidingen, appendages, veiligheidsvoorzieningen, lekktheid, competentie etc.); deze kunnen worden beschouwd als onderdeel van NEN-EN 378. Door CEN worden 3 versies (Engels, Duits en Frans) verzorgd, waarbij de Engelse versie maatgevend blijft. In Nederland is door NEN een Nederlandse versie van EN 378:2016 gemaakt.

Door CEN/TC-182 worden EN 378 en gerelateerde normen continu verbeterd en uitgebreid, met inschakeling van meer dan 12 expert werkgroepen. De bemensing daarvan gebeurt via de nationale normorganisaties (NEN).

Vermeldenswaardig is Werkgroep WG 12 “Flammable Refrigerants Standardization Request M/555”. Deze WG is in 2018 opgericht door CEN/TC-182, gebaseerd om mandaat M555 (opdracht van de Europese Commissie aan CEN/CENELEC, om belemmeringen in normen weg te nemen voor brandbare koudemiddelen, in het bijzonder van klasse A3). In 2021 publiceert deze WG 12 twee Technische Specificaties (TS), voor de installatie, inclusief de opstellingslocatie, en voor het gebruik van koelinstallaties en warmtepompen met brandbare koudemiddelen, alsmede een Technical Report (TR) met achtergronden en richtlijnen. Dit werk is toenemend relevant omdat vrijwel alle koudemiddelen voor de toekomst (met lage GWP) brandbaar zijn. Het EU LIFEFRONT project heeft meerdere documenten geproduceerd die ontwerpers, producenten en installateurs ondersteunen bij het uitvoeren van risicoanalyses en het detailleren van de veiligheidsaspecten, met inbegrip van de opstellingslocaties, in aanvulling op de beschikbare normen (17).

Toepassingsgebied van EN 378

Deze norm bevat eisen die verband houden met de veiligheid van personen en eigendommen, richtlijnen voor milieubescherming en procedures voor bediening, onderhoud en reparatie van koelsystemen en warmtepompen, en het terugwinnen van koudemiddelen. De norm is van toepassing op stationaire en mobiele koelsystemen van alle afmetingen, met uitzondering van airconditioningsystemen voor voertuigen en behandelt ook de opstellingslocatie van de koelsystemen en Indirecte koel- of verwarmingssystemen. Verticale productfamilienormen (met name de serie (EN)-IEC 60335)) over de veiligheid van koelsystemen hebben voorrang op EN 378; deze worden hieronder behandeld.

Relevante aspecten van EN 378

De 4 delen van EN 378 zijn geheergruopeerd uit 13 delen in de eerste ontwerpfase van deze norm, en behandelen de gehele levenscyclus van een koelsysteem. Deze indeling staat voortdurend ter discussie, maar zal voorlopig niet veranderen. Hieronder volgen de kernaspecten van deze 4 delen. In de vier delen van EN 378 komen de volgende aspecten aan de orde:

Deel 1: Basiseisen, definities, classificatie en selectiecriteria;

- Definities van vaktechnische begrippen
- Classificatie- en selectiecriteria. Verblijfsruimten worden in categorieën ingedeeld met het oog op de veiligheid van de personen die direct kunnen worden getroffen in geval van abnormale werking van het koelsysteem. Op basis van de locatie, het aantal mensen dat van de locatie gebruikmaakt, de toegangscategorieën, systeemdetails en het soort koudemiddel.
- Deze classificatie leidt tot maximum koudemiddelvullingen (in kg), soms met aanvullende veiligheidsvoorschriften. Deze benadering staat onder druk, omdat dit een grove simplificatie inhoudt en technische ontwikkelingen blokkeert. De norm laat daarom toe dat van deze maximum koudemiddelvullingen kan worden afgeweken indien een gelijkwaardig veiligheidsniveau wordt aangetoond middels een risicobeoordeling. Toekomstige versies van EN 378 en de producten van WG 12 zullen deze aanpak naar verwachting verder ondersteunen.
- Deze classificatie- en selectiecriteria worden tevens gebruikt in de delen 2, 3 en 4.
- In bijlage E worden de veiligheidsclassificatie van en informatie over koudemiddelen in tabelvorm gepresenteerd; zie ook bij ISO 817.

Deel 2: Ontwerp, constructie, beproeven, merken en documentatie;

- Detaileisen zijn opgenomen aan het ontwerp, de constructie en de montage van koelsystemen, inclusief leidingen, de componenten en de materialen. Ook worden hierin eisen gespecificeerd voor beproeven, inbedrijfstelling, merken en documentatie. Eisen voor secundaire warmteoverdrachtscircuits worden uitgesloten, met uitzondering van eisen in verband met het koelsysteem.
- Delen van dit deel zijn geharmoniseerd, vastgelegd in bijlagen ZA (relatie met EU-richtlijn Drukapparatuur 2014/68/EU) en ZB (relatie met EU-Machinerichtlijn 2006/42/EG)

Deel 3: Installatieplaats en persoonlijke bescherming;

- Veiligheidseisen voor de locatie van het koelsysteem en zijn componenten.
- Detaileisen aan de elektrische installaties en veiligheidsvoorzieningen.
- Bijlage A geeft eisen aan persoonlijke beschermingsmiddelen

Deel 4: Bediening, onderhoud, reparatie en terugwinning.

- Eisen voor bediening, onderhoud en reparatie van koelsystemen en terugwinning, hergebruik en afvoer van alle typen koudemiddelen, compressorolie en warmteoverdrachtsvloeistoffen.

(EN) IEC 60335 serie

IEC 60336 Household and similar electrical appliances - Safety - is een serie normen die in de elektrotechnische normalisatiewereld wordt ontwikkeld (IEC en CENELEC). Deze is parallel aan ISO en CEN voor de niet-elektrische normen, en worden meestal (verticale) productfamilie normen genoemd. De horizontale norm EN 378 geeft aan dat voor producten die onder deze productfamilienormen vallen, de laatste prevaleren.

Dergelijke IEC-normen worden in veel gevallen ook omgezet in EN-IEC normen; deze omzetting is op dit moment om diverse redenen ernstig vertraagd.

Het bestaan van twee parallelle normcircuits levert continu onduidelijkheid en spanning op, omdat deze elektrische productnormen vaak een ruime en een vaag gedefinieerd toepassingsgebied hebben, met veel overlap met niet-elektrische normen. Op nationaal vlak zijn beide normwerelden ook vaak strikt gescheiden. In Nederland is recent een NEN ad-hoc Joint Working Group opgericht, om afstemming te bereiken.

Een actueel thema daarbij is de beroemde 150 g limiet voor brandbare koudemiddelen, die lang geleden in deze 60335 serie terecht is gekomen, met onduidelijke onderbouwing. Beneden deze grens kan apparatuur op iedere locatie worden toegepast. In afwachting van verruiming van deze limiet gaan veel fabrikanten boven deze grens uit, met een goede onderbouwing van een vergelijkbaar veiligheidsniveau aan de hand van een specifieke risicobeoordeling.

In deze 60335-familie zijn tal van deelnormen gericht op koelinstallaties en warmtepompen. De belangrijkste worden hieronder opgesomd, inclusief details over deze 150 g.

(EN) IEC 60335-2-24 Household and similar electrical appliances - Safety - Part 2-24: Particular requirements for refrigerating appliances, ice-cream appliances and icemakers

Deze norm is vooral van toepassing op huishoudelijke koel- en vriesapparatuur. Dit is een specifieke wereld met een beperkt aantal grote multinationale producenten, die nauw bij de normalisatie zijn betrokken. In Europa is deze gehele markt al jaren overgaan naar isobutaan (R600a) als koudemiddel, waarbij in het algemeen worden volstaan met minder dan 150 g. koudemiddel. Er wordt gewerkt aan verruiming van deze grens.

(EN) IEC 60335-2-89 Household and similar electrical appliances - Safety - Part 2-89: Particular requirements for commercial refrigerating appliances and ice-makers with an incorporated or remote refrigerant unit or motorcompressor

Deze norm is vooral van toepassing op stekkerklare (plug-in) koel- en vriesvitruines, -kasten en -kisten in de detailhandel. De 150 g grens was hier een grote beperking voor het toepassen van brandbare koudemiddelen. Eind 2019 is na een moeizame stemronde geaccepteerd dat onder voorwaarden deze grens kan worden verruimd tot 500 g.

(EN) IEC 60335-2-40 Household and similar electrical appliances - Safety - Part 2-40: Particular requirements for electrical heat pumps, air-conditioners and dehumidifiers

Deze norm is vooral van toepassing op airconditioners (monoblock, split, VRF) en warmtepompen voor toepassing in (kantoor)gebouwen en woningen. De 150 g grens is ook hier een grote beperking voor het toepassen van brandbare koudemiddelen in bepaalde toepassingen en omdat ze in de hoofden van de betrokkenen een beperking suggereert die er niet is. Annex GG beschrijft de maximale koudemiddelinhoud, de ventilatie-eisen en de eisen voor secundaire circuits. Op dit moment wordt gewerkt aan verruiming onder voorwaarden, zoals hierboven aangegeven.

ISO 5149

ISO 5149:2014 lijkt sterk op EN 378, maar bevat een aantal essentiële detailverschillen. De revisieprocessen zijn evenwel essentieel verschillend in ISO ten opzichte van CEN, waarbij in ISO vaak de USA en Japan dominant zijn, en Europa verdeeld is. Er zijn krachten (meest buiten Europa) om de volgende versie van ISO 5149 de EN 378 te laten vervangen als EM-ISO 5149. Omdat daarmee Europa de greep op de inhoud kwijtraakt, maar wel via de harmonisatie met Europese Richtlijnen een inbedding in wet- en regelgeving vastlegt, wordt deze optie door velen als ongewenst gezien. In deze studie wordt niet verder ingegaan op deze ISO 5149, en vormt EN 378 de basis.

ISO 22712

Deze norm is de ISO-versie van de EN 13313 Refrigerating systems and heat pumps — Competence of personnel. Deze EN versie is begin deze eeuw vanuit Nederland geïnitieerd, vanuit de toenmalige voortrekkersrol die was opgebouwd met RLK en STEK. In 2020 is deze EN-norm omgezet in een ISO-versie, met helaas een ander nummer omdat bij ISO het nummer 13313 al voor en andere norm in gebruik is. Deze ISO-versie wordt ook als EN ISO 22712 uitgebracht.

Deze norm beschrijft in detail de benodigde competentie-eisen voor diverse handelingen aan een installatie (ontwerpen, installeren, onderhouden etc.), al dan niet met een praktische component, en op 4 competentieniveaus. Het is de bedoeling om wereldwijd zoveel mogelijk gebruik te maken van deze norm bij het opzetten en uitvoeren van trainingen, curricula, eind- en toetstermen en bijbehorende certificering.

ISO 817

ISO 817:2014 Refrigerants -Designation and safety classification- met periodieke actualisering, geeft de dampdichtheid, moleculaire massa, het normaal kookpunt,

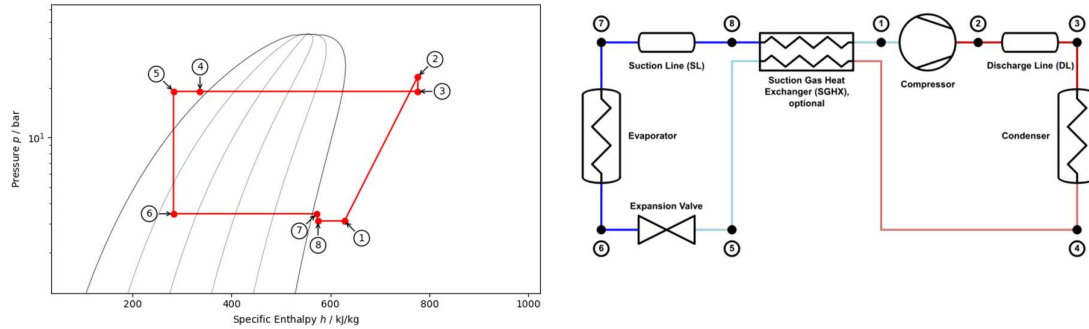
azeotrope temperaturen, ODP en GWP van koudemiddelen. Daarnaast worden de veiligheidsclassificatie en concentratielimieten gegeven.

Dit betreft het R-nummer (Refrigerant) en de classificatie A (laag giftig) of B (giftig) en 1 (niet brandbaar) A2L (matig brandbaar), A2 (brandbaar) en A3 (sterk brandbaar). De klasse A2L is in 2015 geïntroduceerd om de nieuwe generatie HFO's en R32 positief te kunnen onderscheiden van andere brandbare koudemiddelen, op basis van de verschillen in vlamvoortplantingssnelheid. Hier worden inhoudelijk vraagtekens bij gezet, maar deze classificatie volgens ISO 817 wordt toch wereldwijd als onbetwistbare standaard geaccepteerd.

De merendeels Amerikaanse fabrikanten van koudemiddelen leggen hun koudemiddeldetails vast in deze ISO 817, die weer is afgeleid van de Amerikaanse ANSI/ASHRAE Standard 34. De koudemiddelinformatie uit EN 378 en de Europese F-gassen Verordening nr. 517/2014 is hierop gebaseerd.

BIJLAGE 10: OVERZICHT BEREKENDE COPS (COOLTOOLS)

Om de principes aan te geven in het logp-h diagram zijn de waarden van het equivalente temperatuurverlies in de zuig- en persgasleiding overdreven, evenals het rendement van zuiggas-warmtewisselaar



Overzicht van de berekeningen:

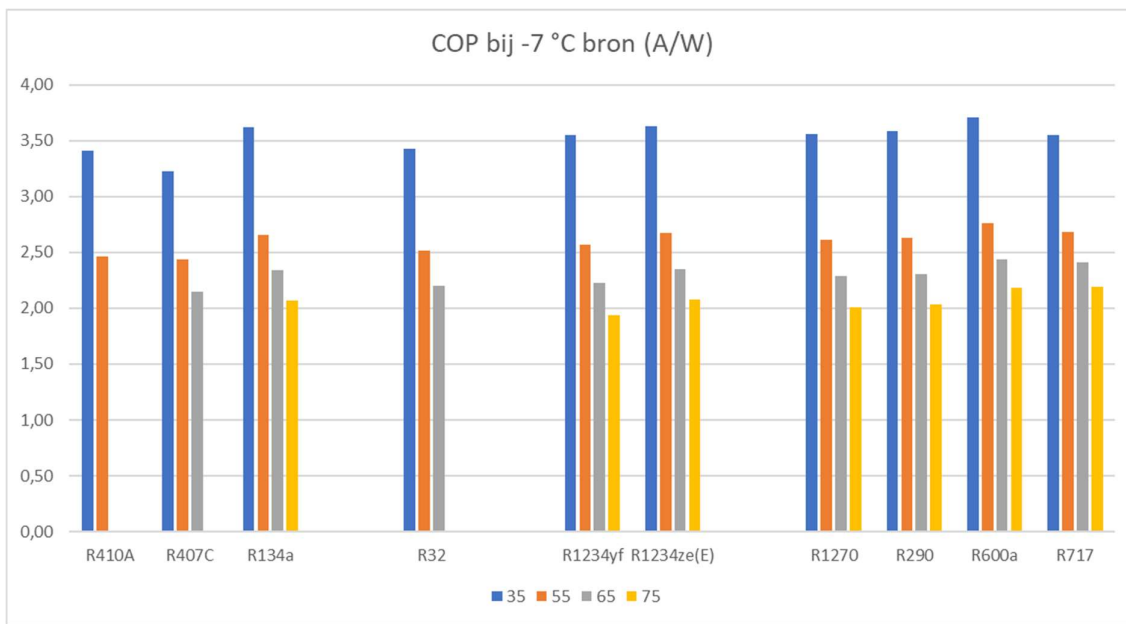
Bron Afgifte Temperatuur [°C]	35	55	65	75
-7	A-7/W35	A-7/W55	A-7/W65	A-7/W75
0	B0/W35	B0/W55	B0/W65	B0/W75
7	A7/W35	A7/W55	A7/W65	A7/W75
10	W10/W35	W10/W55	W10/W65	W10/W75
20	W20/W35	W20/W55	W20/W65	W20/W75

Voor de volledigheid hierbij ook (nogmaals) de scheikundige namen van de natuurlijke koudemiddelen:

- R1270: propane
- R290: propaan
- R600a: isobutaan
- R717: ammoniak

Uitgangspunten A-7/W35 tot A-7/W75

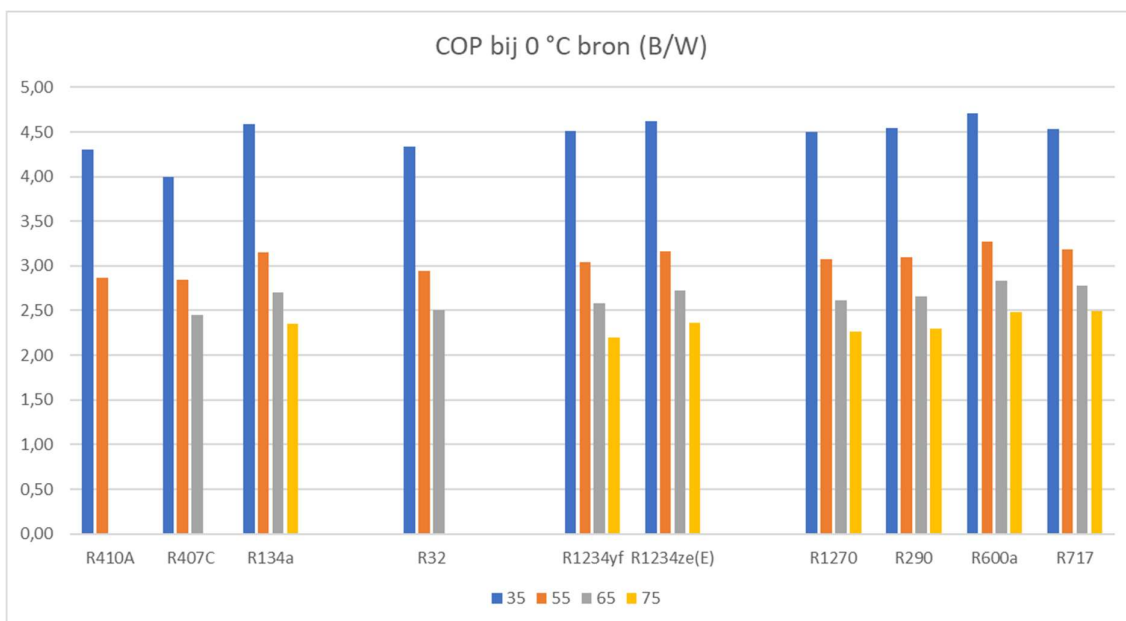
Verdamper		CoolTools	Condensor					CoolTools
primair-uit [°C]	-12	(punt 7)	primair-uit [°C]	35	55	65	75	(punt 4)
T-Evap [°C]	-16	(punt 6)	T-Cond [°C]	37	57	67	77	
sec-in [°C]	-7		sec-in [°C]	30	47	55	65	
sec-uit [°C]	-11		sec-uit [°C]	35	55	65	75	



Figuur B12-1: COP per koudemiddel bij buitenlucht van -7 °C als bron

Uitgangspunten B0/W35 tot B0/W75

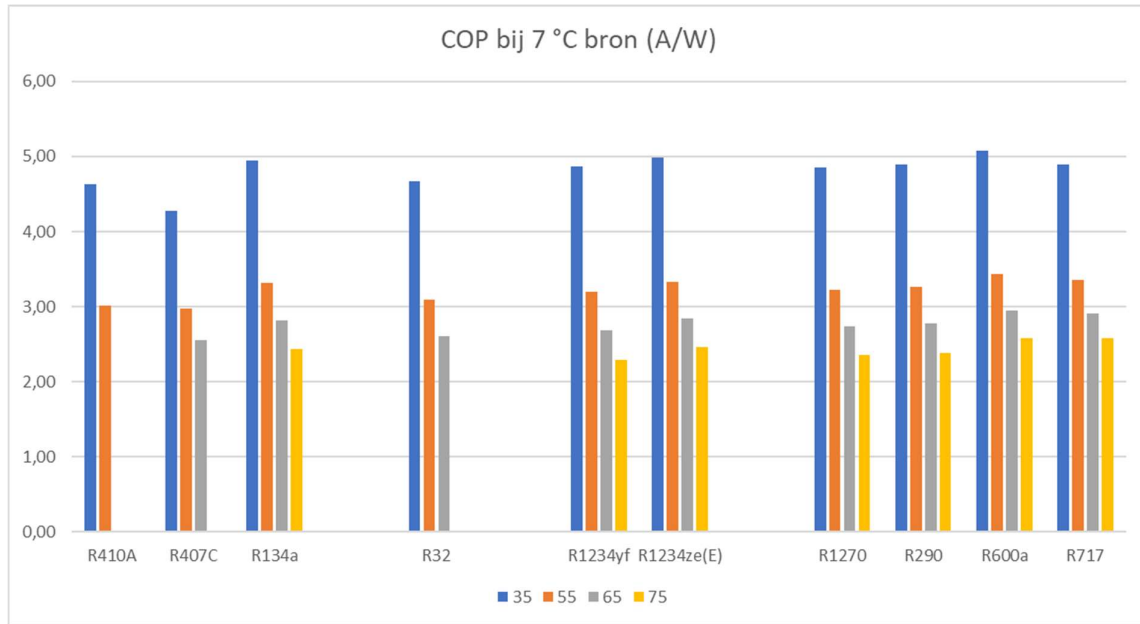
Verdamper	CoolTools	Condensor					CoolTools
primair-uit [°C]	-1 (punt 7)	primair-uit [°C]	35	55	65	75	(punt 4)
T-Evap [°C]	-5 (punt 6)	T-Cond [°C]	37	57	67	77	
sec-in [°C]	0	sec-in [°C]	30	47	55	65	
sec-uit [°C]	-3	sec-uit [°C]	35	55	65	75	



Figuur B12-2: COP per koudemiddel bij gesloten bodemsysteem (Brine) van 0 °C als bron

Uitgangspunten A7/W35 tot A7/W75

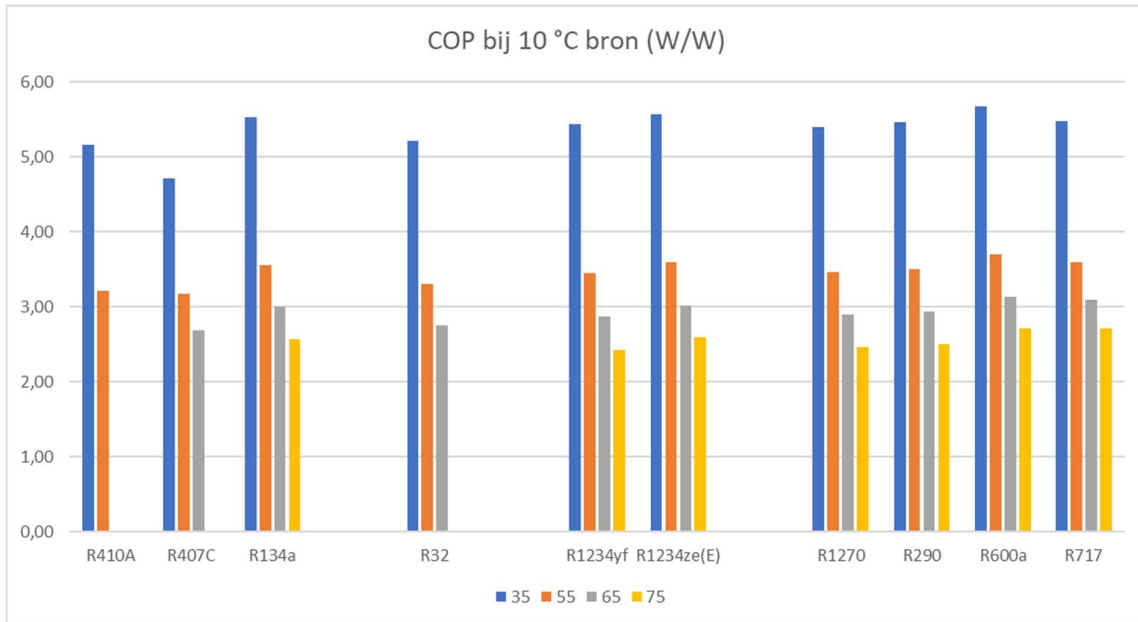
Verdamper		CoolTools	Condensor				CoolTools
primair-uit [°C]	2	(punt 7)	primair-uit [°C]	35	55	65	75 (punt 4)
T-Evap [°C]	-2	(punt 6)	T-Cond [°C]	37	57	67	77
sec-in [°C]	7		sec-in [°C]	30	47	55	65
sec-uit [°C]	3		sec-uit [°C]	35	55	65	75



Figuur B12-3: COP per koudemiddel bij buitenlucht van +7 °C als bron

Uitgangspunten W10/W35 tot W10/W75

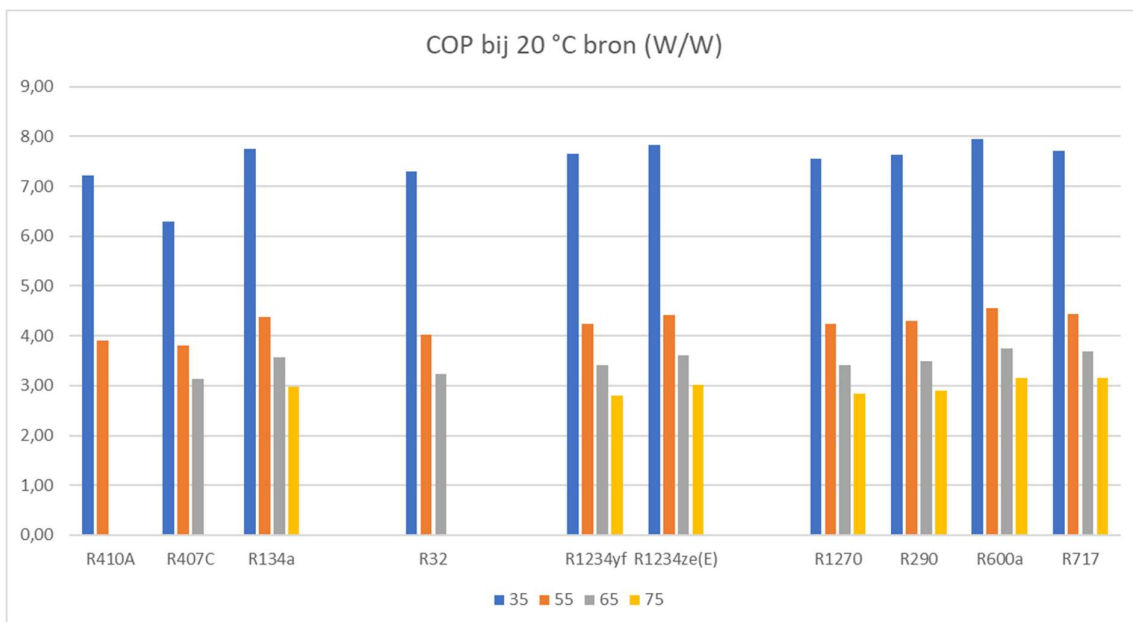
Verdamper		CoolTools	Condensor				CoolTools
primair-uit [°C]	6	(punt 7)	primair-uit [°C]	35	55	65	75 (punt 4)
T-Evap [°C]	2	(punt 6)	T-Cond [°C]	37	57	67	77
sec-in [°C]	10		sec-in [°C]	30	47	55	65
sec-uit [°C]	4		sec-uit [°C]	35	55	65	75



Figuur B12-4: COP per koudemiddel bij open bodemsysteem (Water) van 10 °C als bron

Uitgangspunten W20/W35 tot W20/W75

Verdamper		CoolTools	Condensor				CoolTools
primair-uit [°C]	16	(punt 7)	35	55	65	75	(punt 4)
T-Evap [°C]	12	(punt 6)	37	57	67	77	
sec-in [°C]	20		30	47	55	65	
sec-uit [°C]	14		35	55	65	75	



Figuur B12-5: COP per koudemiddel bij systeemwater van 20 °C als bron