

LCA warmteconfiguraties

Vervolgstudie vergelijking

warmtenetconfiguraties door Deltares

Opdrachtgever

Rijksdienst voor Ondernemend Nederland

Contactpersoon

Peter van Vugt

Kenmerk

R001_01_056111aa

Versie

01

Datum

6 juli 2023

Auteurs

Benthe Vermaas

ing. H.C. (Hilko) van der Leij MSc

Jeannette Levels-Vermeer

Inhoudsopgave

Normen.....	4
Literatuurlijst.....	5
Managementsamenvatting	8
1 Inleiding	14
1.1 Probleemstelling	14
1.2 Doelstelling en doelgroep.....	14
1.3 Verantwoording	15
1.4 Leeswijzer.....	15
2 Methode	16
2.1 Levenscyclusanalyse	16
2.2 Scope.....	18
2.3 Systeemgrenzen.....	24
2.4 Criteria voor het buiten beschouwing laten van input en output.....	25
3 Levenscyclusinventarisatie (LCI) en tussenresultaat per onderdeel warmtenet	26
3.1 Dataverzameling en datavalidatie.....	26
3.1.1 Dataverzameling.....	26
3.1.2 Datavalidatie	26
3.2 Opbouw warmtenetconfiguraties	27
3.2.1 Warmtecentrale.....	30
3.2.2 Distributienet	42
3.2.3 Warmtepomp.....	48
3.2.4 Elektrische ketel	59
3.2.5 Tapwaterbuffervat.....	62
3.2.6 Airconditioningunit.....	64
3.2.7 Elektriciteitsverbruik.....	68
4 Resultaten.....	70
4.1 Berekenen milieuprofiel	70
4.2 LCA-rekenresultaten en schaduw prijzen.....	70
4.3 Duiding van resultaten (Zwaartepuntanalyse)	77
4.3.1 Relevante milieueffecten.....	77
4.3.2 Relevante onderdelen en deelproducten van de warmtenetten	78
4.4 Gevoeligheidsanalyse, aanbevelingen en discussiepunten	83
4.4.1 Gevoeligheidsanalyse - vergelijking alternatief scenario: individuele lucht-water warmtepomp (S7 – LW warmtepomp).....	83

4.4.2	Gevoeligheidsanalyse - aandeel hernieuwbare stroom.....	87
4.4.3	Aanbevelingen en discussiepunten	89
Bijlage I	Nieuw verwerking-scenario einde leven van elektronica	92
Bijlage II	LCI-LCA warmtenetconfiguraties	97
Bijlage III	Lucht-water warmtepomp.....	98

ENDCONCEPT

Verklarende woordenlijst

EPD	Environmental Product Declaration/Milieuverklaring voor producten
NMD	Nationale Milieudatabase
Bepalingsmethode	De Bepalingsmethode 'Milieuprestatie Bouwwerken' versie 1.1, maart 2022. Dit is de geïntegreerde versie van versie 1.0 inclusief de bijbehorende wijzigingsbladen.
Toetsingsprotocol	Toetsingsprotocol versie 1.0, juli 2020. Wijzigingsblad Amendement 1 (februari 2021) NMD-Toetsingsprotocol.

Bronnen

Normen

EN15804+A1	NEN-EN 15804:2012 + A1 (2013) <i>"Duurzaamheid van bouwwerken - Milieuverklaringen van producten - Basisregels voor de productgroep bouwproducten"</i>
EN15804+A2	NEN-EN 15804:2012 + A2 (2019) <i>"Duurzaamheid van bouwwerken - Milieuverklaringen van producten - Basisregels voor de productgroep bouwproducten"</i>
ISO 14025	ISO 14025:2010 <i>"Environmental labels and declarations - Type III environmental declarations - Principles and procedures"</i>
ISO 14040	ISO 14040:2006 <i>"Environmental management – Life cycle assessments – Principles and framework"</i>
ISO 14044	ISO 14044:2006 <i>"Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines"</i>
Bepalingsmethode	De Bepalingsmethode 'Milieuprestatie Bouwwerken' versie 1.1, maart 2022. Dit is de geïntegreerde versie van versie 1.0 inclusief de bijbehorende wijzigingsbladen.

Literatuurlijst

- 2-improve. (2018). *Verswater-, combinatie- en bufferopslag*. Retrieved March 7, 2023, from <https://2-improve.com/wp-content/uploads/2019/11/Specificaties-garantievoorwaarden-hygiene-en-buffervaten.pdf>
- Almutairi, K., Thoma, G., Burek, J., Algarni, S., & Nutter, D. W. (2015). Life cycle assessment and economic analysis of residential air conditioning in Saudi Arabia. *Energy and Buildings*, *102*, 370–379. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.004>
- Antifreeze recycling – HVAC and coolant ecological disposal* | MEGA. (n.d.). Retrieved February 14, 2023, from <https://www.mega.cz/antifreeze-recycling/>
- Atlantic, K. N. (2018, May 11). *Safe Refrigerant Disposal*. Keyes North Atlantic, Inc. - Electrical and Mechanical Contractors. Retrieved February 14, 2023, from <https://www.keyesweb.com/safe-refrigerant-disposal/>
- Baldé, C. P., Van den Brink, S., Forti, V., Van der Schalk, A., & Hopstaken, F. (2020). The Dutch WEEE Flows 2020. In *NVMP*. Retrieved February 14, 2023, from https://www.nvmp.nl/uploads/pdf/research/2020%2010%2016%20Dutch_WEEE_flows_ENG+NL.pdf
- Bepalingsmethode Milieuprestatie Bouwwerken. (2022). In *Nationale MilieuDatabase* (versie 1.1). https://milieudatabase.nl/wp-content/uploads/2022/04/Bepalingsmethode_Milieuprestatie_Bouwwerken_maart_2022.pdf
- BMC (BULK MOULDING COMPAUND)*. (n.d.). Federal Electric. Retrieved February 14, 2023, from <https://federal.com.tr/en/bmc-2/>
- BouwTotaal. (2017, October 24). *Bouwkosten ontgraven bouwput of kelder*. Retrieved February 14, 2023, from <https://www.bouwtotaal.nl/2014/08/bouwkosten-ontgraven-bouwput-of-kelder/>
- BRUGG Pipes. (2022). *CALPEX PUR-KING / CALPEX SANITARY* [Dataset]. Weijers Waalwijk. http://www.weijers-waalwijk.nl/sites/default/files/bestanden/CALPEX%20PUR%20King%20Technische%20documentatie%20Engels%2020-160mm%20-%20Weijers%20Waalwijk%20BV%20-%202022.02.2022_0.pdf
- Caduff, M., Huijbregts, M. a. J., Koehler, A., Althaus, H., & Hellweg, S. (2014). Scaling Relationships in Life Cycle Assessment. *Journal of Industrial Ecology*, *18*(3), 393–406. <https://doi.org/10.1111/jiec.12122>
- Deltares. (2020). *Memo Ramplaankwartier* (No. 11203199-000-HYE-0001).
- Deltares. (2022). *Criteria voor onderlinge vergelijking van warmtenet configuraties* (11207638 001 HYE 0001, versie 3).
- Ecoinvent. (n.d.). Ecoinvent 3.6 dataset documentation: treatment of used refrigerant R134a, reclamation - GLO. In *Ecoinvent 3.6*.
- EcoInvent Database* (3.6). (n.d.). [Dataset].
- EHS Support. (2021). Diethylene glycol. In *Santos*. Retrieved February 14, 2023, from <https://www.santos.com/wp-content/uploads/2021/08/Diethylene-glycol-July-2021.pdf>
- Greening, B., & Azapagic, A. (2012). Domestic heat pumps: Life cycle environmental impacts and potential implications for the UK. *Energy*, *39*(1), 205–217. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.01.028>
- Grosser Unterschied zwischen EN 14511 und EN 255 [Large differences between EN 14511 and EN 255]. (2009). In *WPZ (Wärmepumpen-Testzentrum)*. WPZ-bulletin no. 1. Buchs, Switzerland: Wärmepumpen-Testzentrum Buchs.
- Hagelüken, C. & Umicore Precious Metals Refining. (n.d.). *Metals Recovery from e-scrap in a global environment: Technical capabilities, challenges & experience gained* [Slide show]. <https://docplayer.net/7250504-Metals-recovery-from-e-scrap-in-a-global-environment-technical-capabilities-challenges-experience-gained.html>

Itho Daalderop. (n.d.). *Installatie & Gebruik*.

[https://ithodaalderop.compano.com/Data/Environments/000001/Attachment/Bijlage/A05_Warm%20water/A05_02_Boilers%20Klein/B01_06_MTE/01-00785-006%20%20Installatie_Gebruik%20Close-in_up_hotfill%20\(nl\).pdf](https://ithodaalderop.compano.com/Data/Environments/000001/Attachment/Bijlage/A05_Warm%20water/A05_02_Boilers%20Klein/B01_06_MTE/01-00785-006%20%20Installatie_Gebruik%20Close-in_up_hotfill%20(nl).pdf)

ISO. (2006). ISO 14044:2006(en) Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14044:ed-1:v1:en>

Jaramillo, M. (2022, April 26). *Recovery, Recycling and Regeneration of Refrigerant Gas | ACR Latinoamérica*. Retrieved February 14, 2023, from <https://www.acrlatinoamerica.com/en/2010120418129/news/from-the-source/recovery-recycling-and-regeneration-of-refrigerant-gas.html>

KWR. (2022). *Drinkwaternetten en (Z)LT-warmtenetten* (2022.092). <https://edepot.wur.nl/584606>

Letcher, D. L. (2011). *United States Patent*. Retrieved February 14, 2023, from <https://patentimages.storage.googleapis.com/24/cc/26/2f2dbb88204344/US8029650.pdf>

Loverdou, L. (2020). Memo Ramplaankwartier. In *Deltares*.

MEGA. (n.d.). *Antifreeze recycling – HVAC and coolant ecological disposal*. Retrieved February 14, 2023, from <https://www.mega.cz/antifreeze-recycling/>

Midea. (2022). Environmental Product Declaration: In accordance with ISO 14025 for Split-type Room Air Conditioner. In *Environdec*. Retrieved February 14, 2023, from <https://api.environdec.com/api/v1/EPDLibrary/Files/3178f9fe-1ea9-40ed-6f20-08daa1df3a2c/Data>

Nemecek, T., & Kägi, T. (2007). Life Cycle Inventories of Agricultural Production Systems. *Swiss Centre for Life Cycle Inventories*.

NextChapter Software B.V. (n.d.). *Is mijn circulatiepomp kapot? Doe de check | COMWO.nl*. Copyright © NextChapter Software B.V. - All Rights Reserved. Retrieved February 14, 2023, from <https://www.comwo.nl/nl/blog/artikel/mijn-circulatiepomp-geeft-problemen-is-de-pomp-kapot/>

Premium R134a Refrigerant Recover, Recycle, Recharge Machine, 230V | Robinair. (n.d.). Retrieved February 14, 2023, from <https://www.robinair.com/products/premium-r134a-refrigerant-recover-recycle-recharge-machine-230v>

Processendatabase (Nationale Milieu Database) (3.6). (n.d.). [Dataset]. NMD. <https://milieudatabase.nl/nl/database/processendatabase/>

Rath, S. (2017). Introduction to Refrigeration Standard EN 378. In *AREA*. Retrieved February 14, 2023, from <https://www.nvkl.nl/wp-content/uploads/2021/01/AREA-Introduction-to-EN-378-for-Publication.pdf>

Roosjen, R., Van der Brugge, R., De Fockert, A., & Van der Veen, B. (2021). Grootchalige aquathermie: realistische warmteoptie?: Casus Nijmegen. In *WarmingUp*. Retrieved February 14, 2023, from <https://www.warmingup.info/resultaten?Query=2B&Themalds=2&SoortPublicatielids=1&Deelnemerlid=0>

Solvari. (2020, April 30). *Cv-pomp: info, tips & prijzen*. Verwarminginfo.nl. Retrieved February 14, 2023, from <https://www.verwarminginfo.nl/cv-ketel/cv-pomp>

T1 Wärmepumpenheizungsanlage mit Erdwärmesonden Technische Merkblätter AWP. [Heating systems with ground source heat pumps.]. (2009). In *AWP (Arbeitsgemeinschaft Wärmepumpen) [Working Group Heat Pumps.]*. Retrieved February 23, 2023, from https://www.dimplex-partner.de/fileadmin/dimplex/downloads/projektierungshandbuecher/de/18-phb_heizen_de_072009.pdf

Technical Data Tamper BT 60, BT 65. (n.d.). BOMAG. <https://www.meerman.nl/content/uploads/2019/10/BT-60-BT-65.pdf>

- Tomei water solutions. (n.d.). *submersible Deep Well BOREHOLE water pump Pedrollo 6HR 64/6-PSR 3ph 13kW Domestic Industrial HIGH FLOW motor profesional 6 "*.
https://www.tomeiwatersolutions.com/en/home/water-pumps/pedrollo/submersible/6-borehole/submersible-deep-well-borehole-water-pump-pedrollo-6hr-64-6-psr-3ph-13kw-domestic-industrial-high-flow-motor-profesional-6-.2.5.221_gp.39005.uw
- Van Schie, N., Van Erp, D., Van Ballegooijen, R., De Jong, B., & Matijssen, M. (n.d.). WarmingUp thema 2B: Slimme aanlegmethodes. In *WarmingUp*. Retrieved February 14, 2023, from <https://www.warmingup.info/resultaten?Query=2B&Themalds=2&SoortPublicatieids=1&DeelnemerId=0>
- Viclima. (2022, December 21). *Климатик Midea Xtreme Save Pro MSAGBU-12HRFN8 с монтаж*. Viclima.bg. Retrieved February 14, 2023, from <https://www.viclima.bg/produkt/invertoren-klimatik-midea-xtreme-save-pro-msagbu-12hrfn8-qrd0gw-mox230-12hrfn8-qrd5gw-12-000-btu-klas-a/>
- WarmingUP. (2022). Gedetailleerde kostenberekening aquathermie. In *Varianten Onderzoek En Gedetailleerde Kostenberekeningen* (Projectnummer 11205156/TEUE819001). <https://www.warmingup.info/documenten/gedetailleerde-kostenberekening-aquathermie.pdf>
- Weijers Waalwijk. (2010). *PRINS-PIPE - inhoudsopgave Starre leidingen ondergronds* [Dataset]. <http://www.weijers-waalwijk.nl/sites/default/files/bestanden/PRINSPIPE%20Technische%20Documentatie%20Nederlands%20DN20-DN500%20-%20Weijers%20Waalwijk%201-1-2010%20klein.pdf>
- Whiteley, K. S. (2011). Polyethylene. *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. https://doi.org/10.1002/14356007.a21_487.pub2

Managementsamenvatting

Inleiding

In deze studie is het milieuprofiel opgesteld van zes warmteconfiguraties. Het betreft een cradle-to-grave levenscyclusanalyse (LCA) van de door Deltares opgestelde configuraties van warmtenetten, waarin enerzijds onderscheid is gemaakt tussen gestapelde/grondgebonden bouw (hoogbouw/laagbouw), en anderzijds tussen een warmtenet op midden-temperatuur (MT), lage-temperatuur (LT) en zeer lage-temperatuur (ZLT). Het doel van deze studie is om warmtebedrijven en beleidsmedewerkers van gemeenten en provincies te helpen in de afweging tussen de verschillende configuratiekeuzes en daarin bewoners(collectieven) mee te nemen.

De LCA is uitgevoerd door LBP|SIGHT in de periode van oktober 2022 tot en met april 2023. De LCA-uitvoerders zijn Benthe Vermaas, Hilko van der Leij en Jeannette Levels-Vermeer. Alle conclusies in deze rapportage zijn nadrukkelijk conclusies gebaseerd op de genoemde uitgangspunten en gehanteerde configuraties in deze studie en niet zonder meer te veralgemeniseren.

Functionele eenheid

De functionele eenheid is als volgt omschreven:

Opwekking en levering van koude- en warmte aan 1000 woningen over een periode van 50 jaar.

Onderdelen warmtenet

De warmtenetconfiguraties bestaan uit ten minste de volgende onderdelen:

- De *warmtecentrale* waarin de opwekking van de warmte/koude plaatsvindt. De warmtenetconfiguraties zijn, ten behoeve van de onderlinge vergelijkbaarheid, gemodelleerd op basis van één brontype Thermische Energie uit Oppervlaktewater (TEO) met één gestandaardiseerd Open Bodem Energie Systeem (OBES)/Warmte-Koude-Opslag (WKO) als opslag voor de warmte en koude. De warmtecentrale is samengesteld uit de benodigde distributiepompen en distributieleidingen voor de TEO en OBES en de techniekruimte.
- Het *distributienet*, welke de distributie van de warmte/koude van de warmtecentrale naar de woningen verzorgt. Het distributienet is samengesteld uit verschillende typen distributieleidingen, distributiepompen, techniekruimte en afleversets. Het distributienet is gemodelleerd tot aan het blok of de woning. Eventuele benodigde aanpassingen in de woning of het blok, zoals een extra circuit voor gelijktijdig verwarmen en koelen, zijn daarom niet meegenomen in deze studie.

- De *warmtepompen* en *elektrische ketels*, welke zorgen voor de opwaardering van de warmte van de OBES tot respectievelijk de basislast en pieklast.

En afhankelijk van de configuratie zijn de volgende onderdelen benodigd:

- De *airconditioning unit* welke voorziet in de koudevraag van de woningen als deze niet rechtstreeks geleverd kan worden door het warmtenet.
- Een *tapwaterbuffervat*, welke het benodigde piekvermogen verlaagt door middel van het opslaan van water.

Uitgangspunten

De volgende uitgangspunten zijn van toepassing op alle configuraties:

- Er zijn twee wijktypen beschouwd: gestapelde en grondgebonden bouw, beide met 1000 woningen.
- De thermische vraag staat vast en wordt gespecificeerd per woningequivalent in een categorie voor ruimteverwarming (7.000 kWh/jaar), tapwaterbereiding (3.000 kWh/jaar) en koudelevering (430 kWh/jaar).
- In alle woningen is er een koudevraag en wordt er koude geleverd. In de zeer-lage-temperatuur (ZLT) netten wordt koude door het net zelf geleverd middels passieve koeling, en in de midden-temperatuur (MT) en lage-temperatuur (LT) netten wordt koude door middel van een airconditioningunit geleverd.
- Alle eventuele aanpassingen in de woning of het blok zijn buiten beschouwing gelaten.

Onderscheid in de zes warmtenetconfiguraties

Er is onderscheid gemaakt in de zes configuraties tussen enerzijds gestapelde/grondgebonden bouw (hoogbouw/laagbouw), en anderzijds tussen een warmtenet op MT, LT en ZLT.

Tabel 0.1

Overzicht van alle uitgangspunten en samenstelling per warmtenetconfiguratie

	Eenheid	S1 MT-net, gestapeld	S2 MT-net, grondgebonden	S3 LT-net, gestapeld	S4 LT-net, grondgebonden	S5 ZLT-net, gestapeld	S6 ZLT-net, grondgebonden
Levensduur warmtenet	Jaar	50	50	50	50	50	50
Thermisch vermogen	MW	7,3	7,8	5,8	6,2	3,1	2,7
Thermische vraag; totaal	MWh/ jaar	10.430	10.430	10.430	10.430	10.430	10.430
Thermische vraag; ruimteverwarming	MWh/ jaar	7.000	7.000	7.000	7.000	7.000	7.000
Thermische vraag; tapwaterbereiding	MWh/ jaar	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000
Thermische vraag; koude	MWh/ jaar	430	430	430	430	430	430

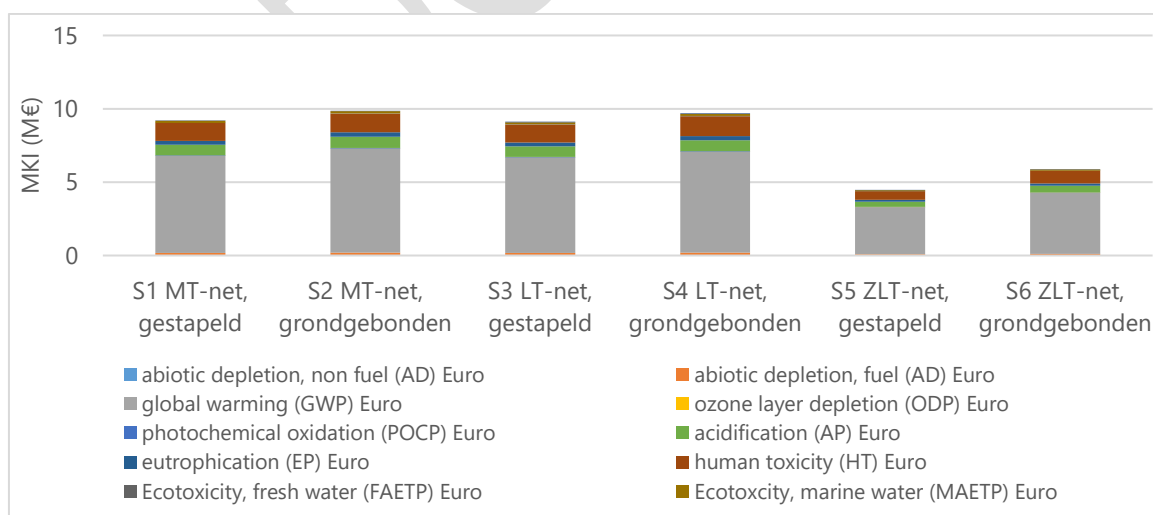
Warmtecentrale (Wijkniveau)	Levensduur deelproduct	Eenheid						
Leidingen TEO naar techniekruimte, VPS: leidinglengte en diameter	50 jaar	m	500	500	500	500	500	500
		mm	219	219	219	219	219	219
Distributiepomp TEO	20 jaar	kW	13	13	7	7	13	13
Leidingen OBES naar techniekruimte, VPS: leidinglengte en diameter	50 jaar	m	500	500	500	500	500	500
		mm	273	273	219	219	219	219
Distributiepomp OBES	20 jaar	kW	14	14	8	8	13	13
Techniekruimte	50 jaar	m ²	400	400	375	375	60	60
Warmtepomp	15 jaar	kW _{th}	2.220	2.590	1.960	1.960		
Elektrische ketel	20 jaar	kW _{el}	7.350	7.950	5.850	6.150		
Distributienetwerk	Levensduur deelproduct	Eenheid						
Distributiepompen	20 jaar	kW	146	156	116	124	62	54
Overige techniekruimte	50 jaar	m ²	13	17	13	13	5	5
Afleverzet, <u>inclusief</u> voorziening tapwater	15 jaar	stuks	1.000	1.000	1.000		1.000	
Afleverzet, <u>exclusief</u> voorziening tapwater	15 jaar	stuks				1.000		
Leidingnetwerk, totaal		m	20.000	30.000	20.000	30.000	20.000	30.000
<i>MT-, LT-net: Calpex; ZLT-net: HDPE</i>								
Leidingen, diameter 25 mm	50 jaar	m	0	14.040	0	14.040	0	14.040
Leidingen, diameter 40 & 50 mm	50 jaar	m	3.302	2.635	3.302	2.635	3.302	2.635
Leidingen, diameter 63 & 75 mm	50 jaar	m	5.280	4.213	5.280	4.213	5.280	4.213
<i>MT-, LT-net: VPS; ZLT-net: HDPE</i>								
Leidingen, diameter 90 & 110 & 125 mm	50 jaar	m	7.114	5.677	7.114	5.677	7.114	5.677
Leidingen, diameter 140 & 160 & 180 mm	50 jaar	m	3.465	2.765	3.465	2.765	3.465	2.765
Leidingen, diameter 220 & 225 & 250 mm	50 jaar	m	839	669	839	669	839	669
Blokniveau	Levensduur deelproduct	Eenheid						
Combinatie-warmtepomp, warmtepomp ¹	15 jaar	kW _{th}					2.940	
Combinatie-warmtepomp, elektrische ketel ⁴	20 jaar	kW _{th}					980	
Elektrische ketel	20 jaar	kW _{el}			450			
Tapwaterbuffervat	20 jaar	m ³			134		120	

- 1 ¹ In de studie van Deltares is in de ZLT-netten uitgegaan van een combinatie warmtepomp, welke zowel de opwaardering voor de basislast en pieklast voorziet. Voor het doel van deze studie, wordt aangenomen dat de materialisatie van een combinatie-warmtepomp vergelijkbaar is met die van een reguliere warmtepomp en elektrische ketel samen. De uitwerking van deze aanname is omschreven in Sectie 3.2.3 en 3.2.4.

Woningniveau (1,000 woningen)	Levensduur deelproduct	Eenheid							
Combinatie-warmtepomp, warmtepomp ⁴	15 jaar	kW _{th}							2.960
Combinatie-warmtepomp, elektrische ketel ⁴	20 jaar	kW _{th}							740
Elektrische ketel	20 jaar	kW _{el}							300
Tapwaterbuffervat	20 jaar	m ³							120
Airconditioningunit	20 jaar	kW _{th}	1,9	1,9	1,9	1,9			
Verbruik		Eenheid							
Elektriciteitsverbruik - warmtenet		MWh	239.979	258.874	235.974	210.525	123.060	25.124	
waarvan grijs ²		%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
waarvan hernieuwbaar ⁵		%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
Elektriciteitsverbruik – consument		MWh	7.167	7.167	7.167	47.087	0	131.730	

Relevante milieueffecten

In Figuur 0.1 is de MKI van de volledige levenscyclus van de zes warmtenetconfiguraties opgesplitst per milieueffectcategorie. In deze figuur is te zien dat alle warmtenetconfiguraties de milieueffecten *Global warming potential* (70-72%), *Human toxicity* (13-15%) en *Acidification* (8%) het meeste bijdragen aan de milieuprofielen met een cumulatieve bijdrage van 93%. De relatieve bijdragen van de milieueffectcategorieën aan de MKI zijn nagenoeg gelijk voor de zes configuraties. De hoge bijdrage aan de MKI van global warming potential is te verklaren door het hoge aandeel in de MKI voor alle configuraties van het elektriciteitsverbruik (zie sectie 4.3.2), welke relatief hoog scoort op global warming potential.

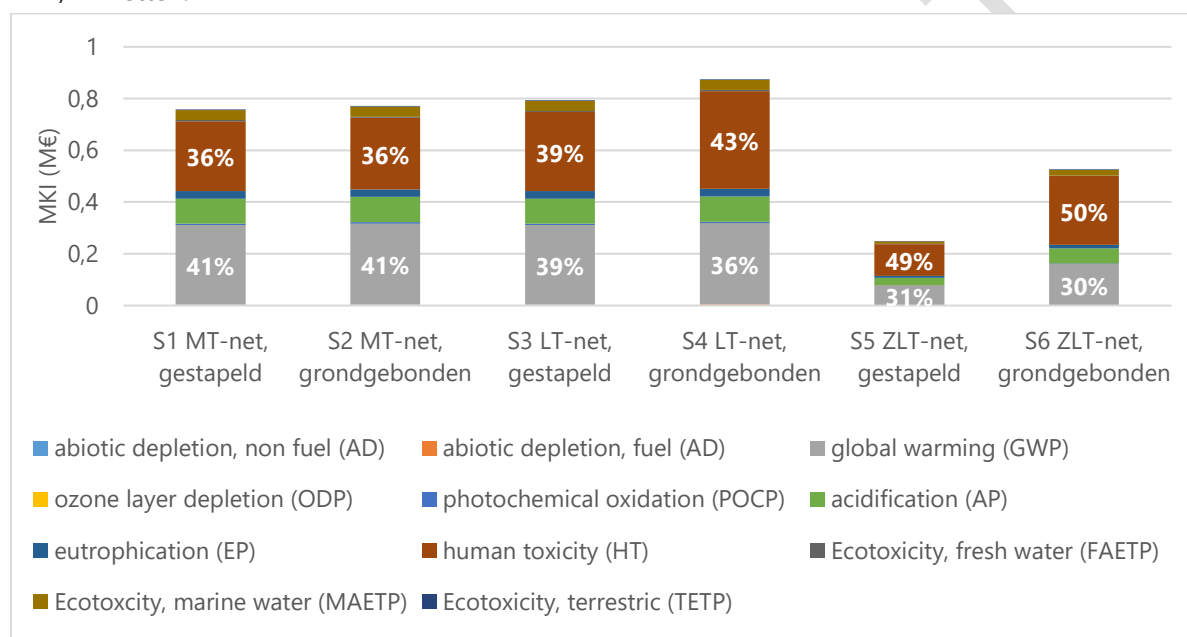


Figuur 0.1

2 ² Er is uitgegaan van 100% grijze stroom in het basisscenario (zie Sectie **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.**). In Sectie 4.4 is middels een gevoeligheidsanalyse bepaald wat de invloed is van het gebruik van (deels) hernieuwbare stroom.

Zwaartepuntanalyse, relevante milieueffecten voor de zes warmtenetconfiguraties, volledige levenscyclus

In Figuur 0.2 is de MKI van de levenscyclus zonder elektriciteitsverbruik uiteengezet per milieueffectcategorie. In deze figuur is te zien dat zonder het elektriciteitsverbruik het aandeel van global warming potential van de MKI aanzienlijk lager ligt (30-41%). Daarentegen is het aandeel van human toxicity een stuk hoger (36-50%). Tevens is er een groter onderling verschil tussen de configuraties in de relatieve bijdragen van de milieueffectcategorieën, vooral tussen de MT-/LT- en de ZLT-netten. De oorzaak van dit onderlinge verschil is afkomstig van de verschillende onderdelen die nodig zijn voor de warmtenetconfiguraties, zoals de airconditioningunit die alleen nodig is in de MT-/LT-netten.



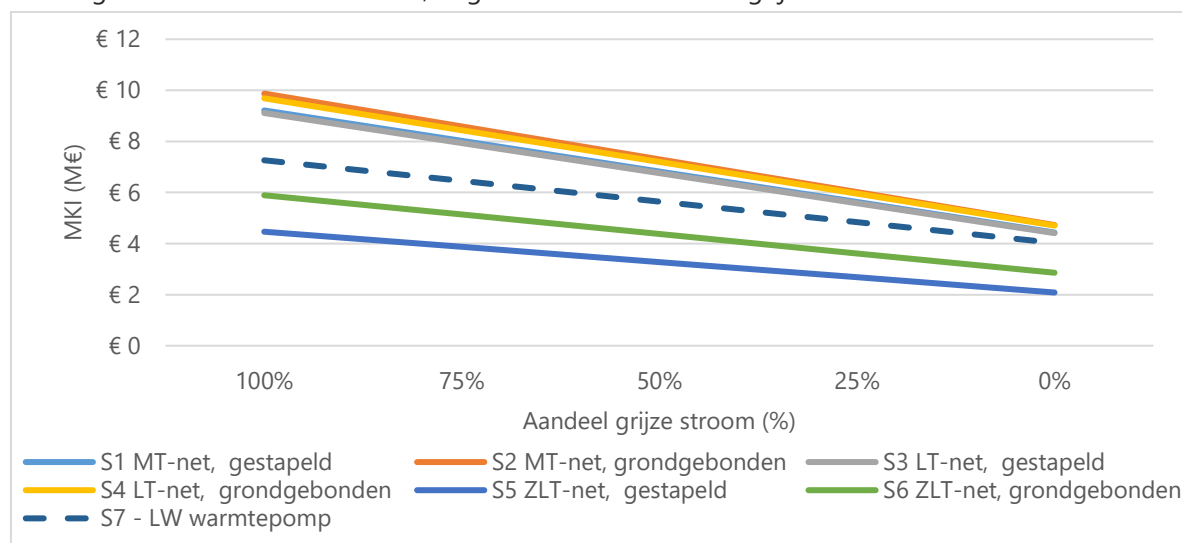
Figuur 0.2

Zwaartepuntanalyse, relevante milieueffecten voor de zes warmtenetconfiguraties, levenscyclus zonder elektriciteitsverbruik

Gevoeligheidsanalyse variatie aandeel hernieuwbare stroom – aandeel warmtenetbeheerder + consument

Het aandeel grijze stroom van het totaalverbruik (aandeel warmtenetbeheerder + consument) is gevarieerd tussen de 100 en 0%. Hierbij is dus wel uitgegaan van gebruik van hernieuwbare elektriciteit door de consument. De MKI van de volledige warmtenetconfiguraties, en het alternatieve scenario, onder deze variatie is weergegeven in Figuur 0.3. In deze figuur is te zien dat de variatie in het aandeel grijze stroom een significante impact heeft op het alternatieve scenario en alle warmtenetconfiguraties, het ZLT-net met grondgebondenbouw inbegrepen. Naarmate het aandeel grijze stroom afneemt, convergeert de MKI van de MT- en LT-netten, waarbij de configuraties met gestapelde bouw een kleine afname behouden ten opzichte van de grondgebondenbouw. De ZLT-netten hebben een aanzienlijk lagere MKI dan de MT- en LT-netten, waarbij de netten met gestapelde bouw weer een lagere MKI heeft dan de netten met

grondgebonden bouw. Het alternatieve scenario heeft een lagere MKI dan de MT- en LT-netten en een hogere MKI dan de ZLT-netten, ongeacht wat het aandeel grijze stroom is.



Figuur 0.3

Gevoeligheidsanalyse, MKI levenscyclus warmtenetten en het alternatieve scenario (S7) bij variatie in het aandeel grijze stroom van het totale elektriciteitsverbruik

In deze grafiek is het aandeel grijze stroom van zowel het verbruik van de warmtenetbeheerder als van de consument gevarieerd.

Conclusie gevoeligheidsanalyse hernieuwbare stroom

De gevoeligheidsanalyse laat het belang zien van het gebruiken van hernieuwbare stroom voor alle warmtenetconfiguraties en het alternatieve scenario. Om een significante reductie te behalen van de MKI, is het voor het ZLT-net met grondgebonden woningen en het alternatieve scenario van belang dat (ook) de consument gebruikmaakt van hernieuwbare stroom. Voor de andere configuraties is een significante reductie al mogelijk met enkel het gebruik van hernieuwbare stroom van de warmtenetbeheerder.

1 Inleiding

1.1 Probleemstelling

Het verwarmen van de gebouwde omgeving verbruikt ongeveer een kwart van het finale energieverbruik in Nederland. Bijna 90% van deze warmte wordt momenteel opgewekt door de verbranding van aardgas. Verduurzaming van de warmtevoorziening van de gebouwde omgeving is cruciaal voor de energietransitie, en warmtenetten op midden- of lage-temperatuur kunnen hier een rol in spelen. Deze netten lijken vooral interessant in gebieden met een hoge bouwdichtheid en relatief homogene woningtypen, in combinatie met duurzame en robuuste warmtebronnen in de buurt.

De laatste jaren is er veel onderzoek gedaan naar configuraties van warmtenetten. Echter ontbreken er vaak onderdelen, zoals koudelevering en warmteopslag, of is er enkel gekeken naar de kosten. Er ontbreekt inzicht in de verschillen tussen de mogelijke warmtevoorzieningskeuzes. Om een integrale afweging tussen de configuraties mogelijk te maken, is er door Deltares een studie naar warmtenetconfiguraties uitgevoerd (*Criteria voor onderlinge vergelijking van warmtenetconfiguraties*, referentienummer 11207638-001-HYE-0001, versie 3, 19-07-2022). In deze studie is gewerkt aan een gestandaardiseerd, onafhankelijk en vergelijkbaar overzicht van de prestaties van verschillende warmtenetconfiguraties. Hierbij is gekeken naar het energieverbruik, kosten, ruimtebeslag, gevolgen voor de eindgebruiker, flexibiliteit en uitbreidbaarheid en de impact op het elektriciteitssysteem.

Het doel van deze studie is om het overzicht van Deltares aan te vullen met criteria gerelateerd aan de milieu-impact van de systemen. De impact wordt veroorzaakt door materiaal- en energiestromen in de gehele levenscyclus van het systeem. Het systeem omvat hierbij de gehele voorketen van de opwekking, alle infrastructuur, installaties bij de consument, het verbruik, processen eindeleven/afdeling. Om een integrale beoordeling te maken, is het van belang dat de impact van beide stromen op een gelijke manier in beeld worden gebracht. Er is behoefte aan inzicht in de materiaal-massabalansen, de milieukosten indicator (MKI), maar ook in de losse indicatoren voor klimaatverandering en uitputting.

1.2 Doelstelling en doelgroep

In deze studie is het milieuprofiel opgesteld van zes warmteconfiguraties. Het betreft een cradle-to-grave levenscyclusanalyse (LCA) van de door Deltares opgestelde configuraties van warmtenetten, waarin enerzijds onderscheid is gemaakt tussen gestapelde/grondgebonden bouw (hoogbouw/laagbouw), en anderzijds tussen een warmtenet op midden-temperatuur (MT), lage-temperatuur (LT) en zeer-lage-temperatuur (ZLT).

Het doel van deze studie is om warmtebedrijven en beleidsmedewerkers van gemeenten en provincies te helpen in de afweging tussen de verschillende configuratiekeuzes en daarin bewoners(collectieven) mee te nemen.

De doelgroepen voor de resultaten van deze studie zijn als volgt:

- Rijkdienst voor Ondernemend Nederland (RVO), als opdrachtgever van deze LCA-studie;
- Partijen die actief zijn bij het opstellen van uitvoeringsplannen: (beleids)medewerkers en wethouders/raadsleden bij gemeentes en provincies, warmtebedrijven, woningcorporaties en energie- en bewonerscoöperaties, welke inzicht nodig hebben in de milieu-impact van de verschillende warmteconfiguraties.

1.3 Verantwoording

De LCA is uitgevoerd door LBP|SIGHT in de periode van oktober 2022 tot en met april 2023. De LCA-uitvoerders zijn Benthe Vermaas, Hilko van der Leij en Jeannette Levels-Vermeer. Alle conclusies in deze rapportage zijn nadrukkelijk conclusies gebaseerd op de genoemde uitgangspunten en gehanteerde configuraties in deze studie en niet zonder meer te veralgemeniseren.

1.4 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 wordt de methode voor de LCA beschreven. Hierin zijn onder andere de scope, systeemgrenzen en de functionele eenheid vastgelegd.

In hoofdstuk 3 staat de levenscyclusinventarisatie. De opbouw van de warmtenetconfiguraties en de tussenresultaten per onderdeel van de warmtenetten komen hierin aan bod.

In hoofdstuk 4 zijn de resultaten, zwaartepuntanalyse, gevoeligheidsanalyse en aanbevelingen en discussiepunten beschreven.

2 Methode

In opdracht van Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO), is verkennend onderzoek gedaan naar de milieu-impact van zes warmtenetconfiguraties. Deze studie bouwt voort op de resultaten van de studie van Deltares (zie sectie 1.1). Tevens is gebruikgemaakt van aanvullende informatie verstrekt door Deltares en van informatie verworven door middel van desk research. Bij het uitvoeren van deze LCA zijn de eisen en richtlijnen uit de *Bepalingsmethode 'Milieuprestatie Bouwwerken' versie 1.1, maart 2022* zo goed mogelijk gevolgd. De Bepalingsmethode is gebaseerd op de *ISO 14040 - ISO14044*³, de *EN 15804+A1(2013)* de *EN 15804+A2 (2019)*.

2.1 Levenscyclusanalyse

De milieu-impact van de warmtenetconfiguraties is in deze studie bepaald met behulp van levenscyclusanalyse. In deze sectie is de methode kort toegelicht.

Methodologische fasen van levenscyclusanalyse

Levenscyclusanalyse is een methode om de milieu-impact van een product, proces of systeem gedurende zijn volledige levenscyclus te beoordelen (ISO, 2006). De LCA methodiek bestaat uit vier fasen: de definitie van het doel en de scope, de levenscyclusinventarisatie (LCI), de levenscyclus-impactanalyse (LCIA) en de interpretatie. In de doel- en scopedefinitie wordt de beoogde toepassing toegelicht en wordt de systeemgrens gedefinieerd. In de LCI worden alle relevante gegevens voor de LCIA verzameld en aangepast aan de functionele eenheid, zoals gedefinieerd in het doel en de scope. In de LCIA-fase wordt de milieu-impact van alle in de LCI-fase gedefinieerde elementaire stromen gekwantificeerd. In de interpretatiefase worden de uitkomsten van de LCI en LCIA geïnterpreteerd, gekwantificeerd en geëvalueerd. Dit omvat het evalueren van de consistentie, volledigheid en robuustheid van het onderzoek.

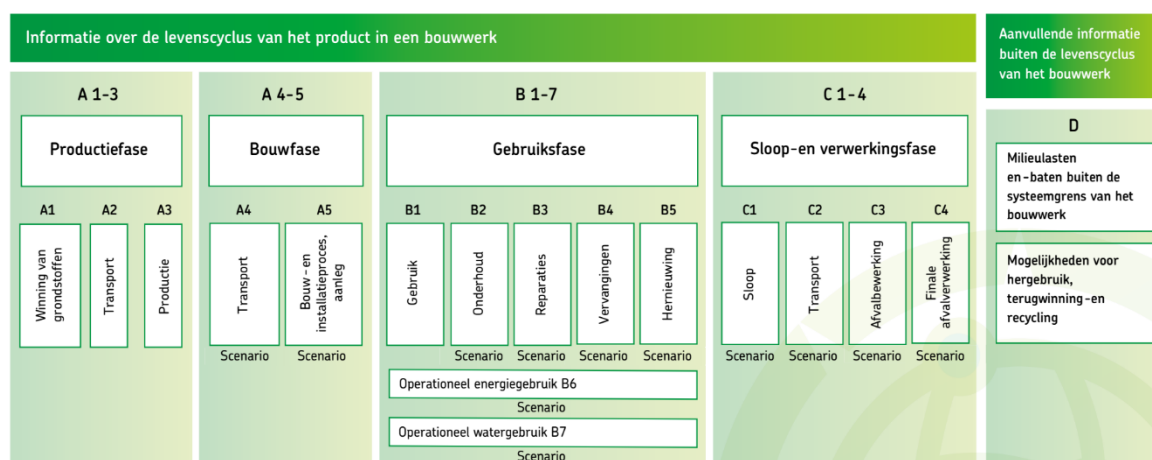
Levenscyclusinventarisatie en levenscyclus-impactanalyse

Tijdens de levenscyclusinventarisatie wordt, van alle levensfasen zoals gedefinieerd in de scope, de milieu-input en output gekwantificeerd. In Figuur 2.1 zijn alle levensfasen weergegeven, zoals omschreven door de Bepalingsmethode. Vervolgens worden er aan de input- en outputstromen processen toegekend uit een database, zoals de Ecoinvent of Nationale Milieudatabase (NMD). De processen uit de database bevatten het bijbehorende milieuprofiel, zoals bijvoorbeeld de hoeveelheid CO₂ die bij een proces vrijkomt. Op basis van de gekozen methode voor de impactanalyse, worden de emissies toegekend aan effectcategorieën⁴. Zo wordt klimaatverandering (ofwel *global warming potential*) gemeten in CO₂ equivalenten.

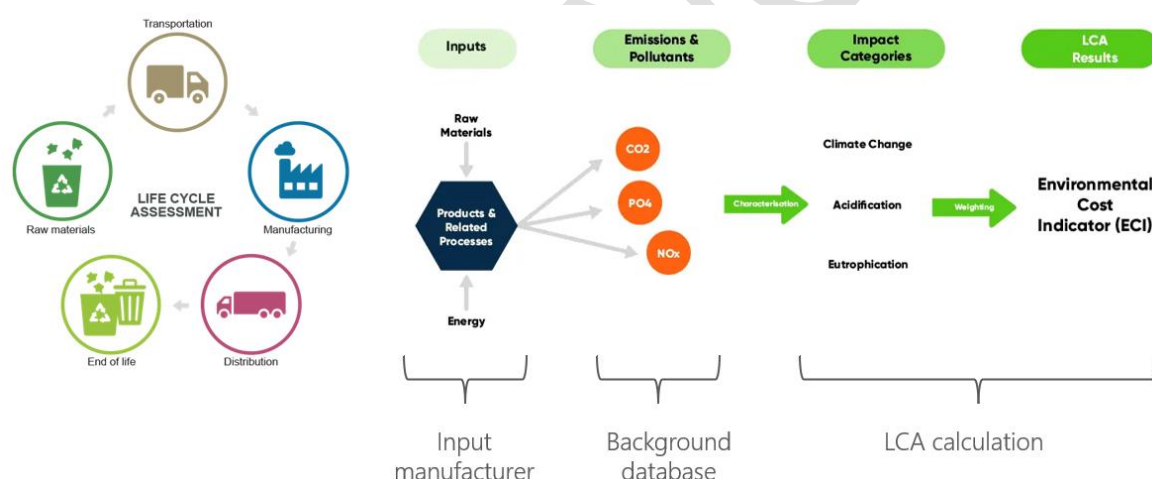
3 Alleen het optellen van milieu-impactscores tot een totaalscore (de MKI, zie hoofdstuk 4) valt buiten de ISO14044.

4 Voor een overzicht van de effectcategorieën die, in overeenstemming met de Bepalingsmethode, gebruikt worden in o.a. Nederland, zie bijvoorbeeld: <https://ecochain.com/nl/knowledge-nl/impact-categorieen-lca-overzicht/>.

Als laatste kunnen de individuele categorieën samengevoegd worden in een één-punt-score, zoals de MilieuKostenIndicator (MKI). De MKI is toegelicht in de volgende sectie.



Figuur 2.1
Levensfasen, zoals gedefinieerd in de Bepalingsmethode



Figuur 2.2
Levenscyclusinventarisatie en impactanalyse

MilieuKostenIndicator

De resultaten van de individuele impactcategorieën kunnen samen worden gevoegd tot een één-punt-score. In Nederland wordt veel gebruikgemaakt van de MKI (MilieuKostenIndicator) die de schaduwprijs van een project of product weergeeft. De schaduwprijs geeft de hoogste preventiekosten weer die voor de overheid acceptabel zijn per eenheid uitstoot. Daarom is er per effectcategorie een wegingsfactor, in € per eenheid emissie. Door het product van de waarde van elke impactcategorie met hun wegingsfactor bij elkaar op te tellen, wordt de MKI van een product of project verkregen als een één-punt-score.

Een overzicht van alle effectcategorieën en hun weegfactoren is weergegeven in Tabel 2.1. De MKI maakt het eenvoudig om meerdere opties tegelijk met elkaar te vergelijken en duidelijke aanbevelingen te doen aan beleidsmakers zonder de complexe uitleg van elke individuele effectcategorie. De schaduwprijs is echter gebaseerd op een waardeoordeel en heeft daardoor invloed op de resultaten en conclusies van de LCA. Om transparant te blijven, kan een combinatie van gewogen en niet-gewogen resultaten worden gebruikt.

Tabel 2.1

MilieuKostenIndicator

Effectcategorie	Eenheid	Wegingsfactor (€/eq.)
Abiotic depletion, non fuel	kg Sb eq.	7,02
Abiotic depletion, fuel	kg Sb eq.	0,56
Global warming	kg CO ₂ eq.	0,76
Ozone layer depletion	kg CFK-11 eq.	1,27
Photochemical oxidation	kg ethyleen eq.	0,83
Acidification	kg SO ₂ eq.	1,01
Eutrophication	kg PO ₄ - eq.	1,14
Human toxicity	kg 1,4-DCB eq.	0,69
Ecotoxicity, fresh water	kg 1,4-DCB eq.	0,41
Ecotoxicity, marine water	kg 1,4-DCB eq.	0,65
Ecotoxicity, terrestic	kg 1,4-DCB eq.	0,32

2.2 Scope

Functionele eenheid

De functionele eenheid is als volgt omschreven:

Opwekking en levering van koude- en warmte aan 1000 woningen over een periode van 50 jaar.

Onderdelen warmtenet

De warmtenetconfiguraties bestaan uit tenminste de volgende onderdelen:

- De *warmtecentrale* waarin de opwekking van de warmte/koude plaatsvindt. De warmtenetconfiguraties zijn, ten behoeve van de onderlinge vergelijkbaarheid, gemodelleerd op basis van één brontype Thermische Energie uit Oppervlaktewater (TEO) met één gestandaardiseerd Open Bodem Energie Systeem (OBES)/Warmte-Koude-Opslag (WKO) als opslag voor de warmte en koude. De warmtecentrale is samengesteld uit de benodigde distributiepompen en distributieleidingen voor de TEO en OBES en de techniekruimte.
- Het *distributienet*, welke de distributie van de warmte/koude van de warmtecentrale naar de woningen verzorgt. Het distributienet is samengesteld uit verschillende typen distributieleidingen, distributiepompen, techniekruimte en afleversets. Het distributienet is gemodelleerd tot aan het blok of de woning.

Eventuele benodigde aanpassingen in de woning of het blok, zoals een extra circuit voor gelijktijdig verwarmen en koelen, zijn daarom niet meegenomen in deze studie.

- De *warmtepompen* en *elektrische ketels*, welke zorgen voor de opwaardering van de warmte van de OBES tot respectievelijk de basislast en pieklast.

En afhankelijk van de configuratie zijn de volgende onderdelen benodigd:

- De *airconditioning unit* welke voorziet in de koudevraag van de woningen als deze niet rechtstreeks geleverd kan worden door het warmtenet.
- Een *tapwaterbuffervat*, welke het benodigde piekvermogen verlaagt door middel van het opslaan van water.

Uitgangspunten

De volgende uitgangspunten zijn van toepassing op alle configuraties:

- Er zijn twee wijktypen beschouwd: gestapelde en grondgebonden bouw, beide met 1000 woningen.
- De thermische vraag staat vast en wordt gespecificeerd per woningequivalent in een categorie voor ruimteverwarming (7.000 kWh/jaar), tapwaterbereiding (3.000 kWh/jaar) en koudelevering (430 kWh/jaar).
- In alle woningen is er een koudevraag en wordt er koude geleverd. In de zeer-lage-temperatuur (ZLT) netten wordt koude door het net zelf geleverd middels passieve koeling, en in de midden-temperatuur (MT) en lage-temperatuur (LT) netten wordt koude door middel van een airconditioningunit geleverd.
- Alle eventuele aanpassingen in de woning of het blok zijn buiten beschouwing gelaten.

Onderscheid in de zes warmtenetconfiguraties

Er is onderscheid gemaakt in de zes configuraties tussen enerzijds gestapelde/grondgebonden bouw (hoogbouw/laagbouw), en anderzijds tussen een warmtenet op MT, LT en ZLT. De zes beschouwde warmtenetconfiguraties zijn als volgt gedefinieerd:

- **S1 MT-gestapeld (Figuur 2.3)**; midden-temperatuur distributienet in een hoogbouw wijk. In de warmtecentrale wordt de warmte onttrokken uit het TEO/OBES systeem. In deze configuratie wordt de warmte in de *warmtecentrale* opgewaardeerd tot de basislast met behulp van een warmtepomp en tot de pieklast met behulp van een elektrische ketel. Via het distributienet wordt de warmte geleverd op *blokniveau*. Door de relatief hoge aanvoertemperatuur is een buffervat niet nodig. De koudevraag wordt geleverd met behulp van een airconditioningunit op *woningniveau*.

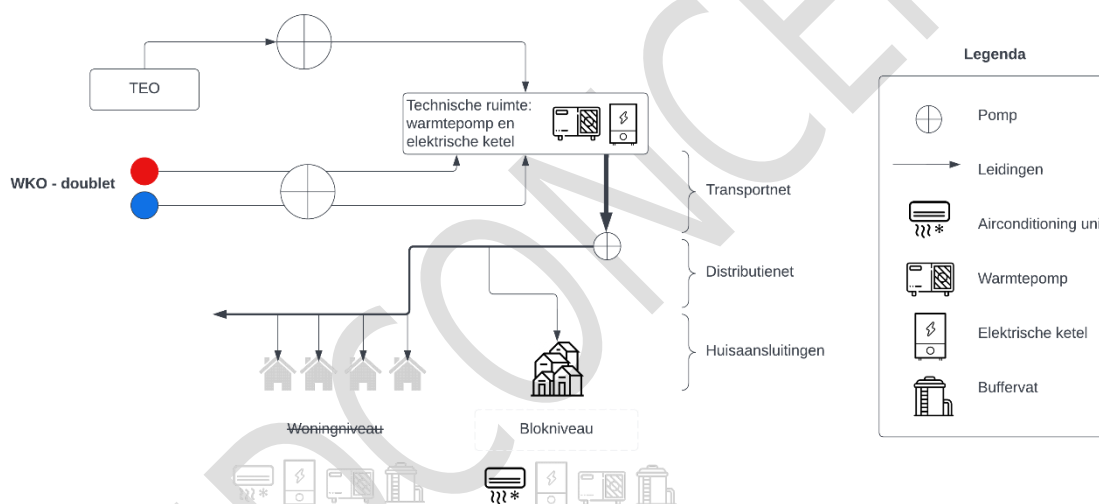
- **S2 MT-grondgebonden (Figuur 2.4);** midden-temperatuur distributienet in een laagbouw wijk.
In de warmtecentrale wordt de warmte onttrokken uit het TEO/OBES systeem. In deze configuratie wordt de warmte in de *warmtecentrale* opgewaardeerd tot de basislast m.b.v. een warmtepomp en tot de pieklast m.b.v. een elektrische ketel. Via het distributienet wordt de warmte geleverd op *woningniveau*. Door de relatief hoge aanvoertemperatuur is een buffervat niet nodig. De koudevraag wordt geleverd met behulp van een airconditioningunit op *woningniveau*.
- **S3 LT-gestapeld (Figuur 2.5);** lage-temperatuur distributienet in een hoogbouw wijk.
In de warmtecentrale wordt de warmte onttrokken uit het TEO/OBES systeem. In deze configuratie wordt de warmte eerst in de warmtecentrale opgewaardeerd tot de basislast met behulp van een warmtepomp en tot de pieklast met behulp van een elektrische ketel. Via het distributienet wordt de warmte geleverd op *blokniveau*. De aanvoertemperatuur is enkel hoog genoeg voor het voorzien van de ruimteverwarming. Om te voorzien in tapwater, wordt de aanvoertemperatuur opgewaardeerd met een elektrische ketel op *blokniveau*. Een buffervat op *blokniveau* helpt de piekvraag op te vangen. De koudevraag wordt geleverd met behulp van een airconditioningunit op *woningniveau*.
- **S4 LT-grondgebonden (Figuur 2.6);** lage-temperatuur distributienet in een laagbouw wijk.
In de warmtecentrale wordt de warmte onttrokken uit het TEO/OBES systeem. In deze configuratie wordt de warmte eerst in de *warmtecentrale* opgewaardeerd tot de basislast met behulp van een warmtepomp en tot de pieklast met behulp van een elektrische ketel. Via het distributienet wordt de warmte geleverd op *woningniveau*. De aanvoertemperatuur is enkel hoog genoeg voor het voorzien van de ruimteverwarming. Om te voorzien in tapwater, wordt de aanvoertemperatuur opgewaardeerd met een elektrische ketel op *woningniveau*. Een buffervat op *woningniveau* helpt de piekvraag op te vangen. De koudevraag wordt geleverd met behulp van een airconditioningunit op *woningniveau*.
- **S5 ZLT-gestapeld (Figuur 2.7);** zeer-lage-temperatuur distributienet in een hoogbouw wijk.
In de warmtecentrale wordt de warmte onttrokken uit het TEO/OBES systeem. In deze configuratie wordt de warmte niet in de *warmtecentrale* opgewaardeerd. Via het distributienet wordt de warmte geleverd op *blokniveau*. De warmte wordt tevens op *blokniveau* opgewaardeerd tot de basislast met behulp van een warmtepomp en tot de pieklast met behulp van een elektrische ketel⁵. Een buffervat op *blokniveau* helpt de piekvraag op te vangen. De koudevraag wordt rechtstreeks geleverd vanuit het warmtenet middels passieve koeling, waardoor er geen airconditioningunit nodig is.

5 ⁵ In de studie van Deltares wordt de warmte in de ZLT-netten opgewaardeerd tot basis/peiklast met behulp van een combinatiewarmtepomp. In deze studie gaan wij uit van een aparte warmtepomp en elektrische ketel. Deze keuze wordt nader toegelicht in Sectie 3.2.3.

- **S6 ZLT-grondgebonden (Figuur 2.8)**; zeer-lage-temperatuur distributienet in een laagbouw wijk.

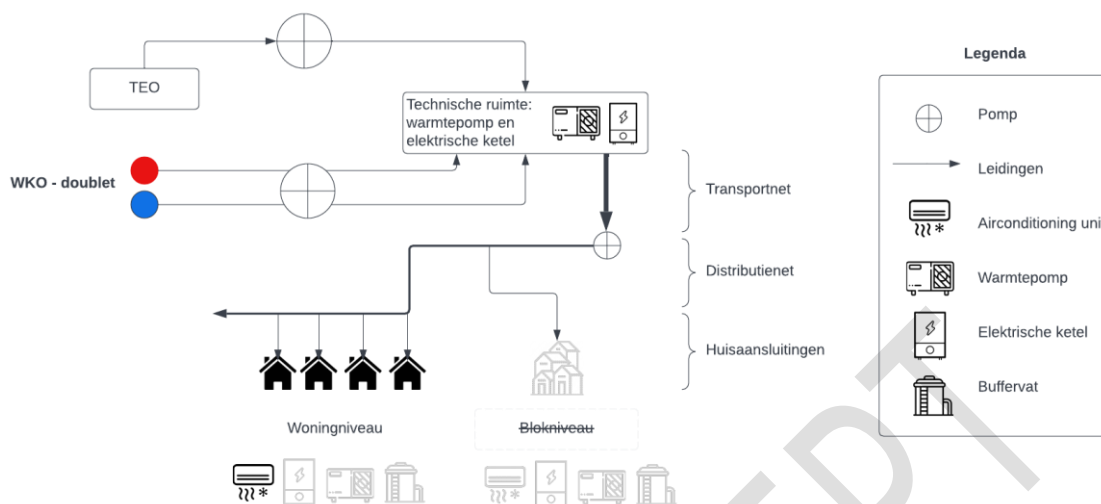
In de warmtecentrale wordt de warmte onttrokken uit het TEO/OBES systeem. In deze configuratie wordt de warmte niet in de *warmtecentrale* opgewaardeerd. Via het distributienet wordt de warmte geleverd op *woningniveau*. De warmte wordt tevens op *woningniveau* opgewaardeerd tot de basislast met behulp van een warmtepomp en tot de pieklast met behulp van een elektrische ketel. Een buffervat op *woningniveau* helpt de piekvraag op te vangen. De koudevraag wordt rechtstreeks geleverd vanuit het warmtenet middels passieve koeling, waardoor er geen airconditioningunit nodig is.

Een schematisch overzicht van de opbouw van de configuraties is weergegeven in **Fout!**
Verwijzingsbron niet gevonden. t/m **Fout!** **Verwijzingsbron niet gevonden.**



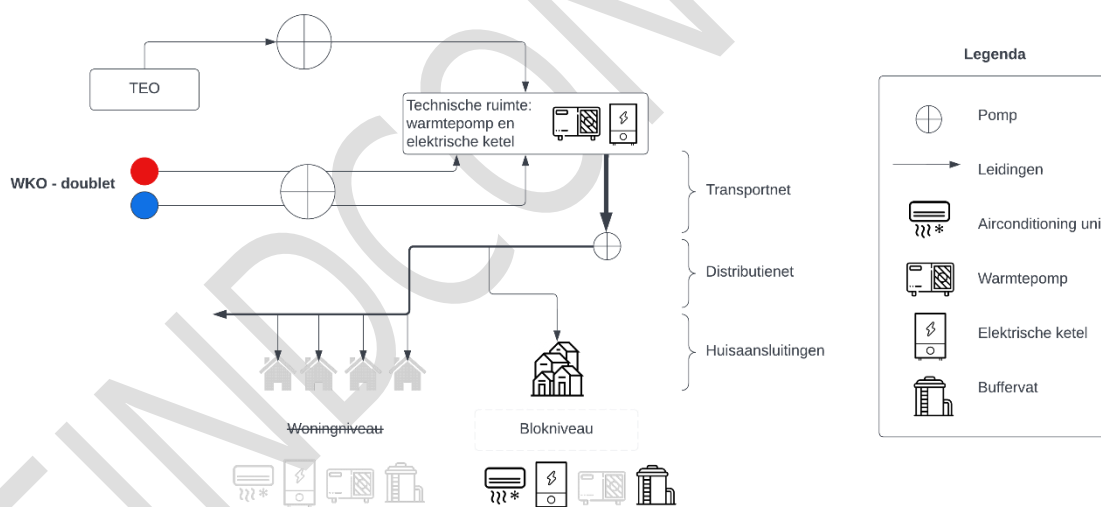
Figuur 2.3

Opbouw warmtenetconfiguratie S1- midden-temperatuur met gestapelde bouw



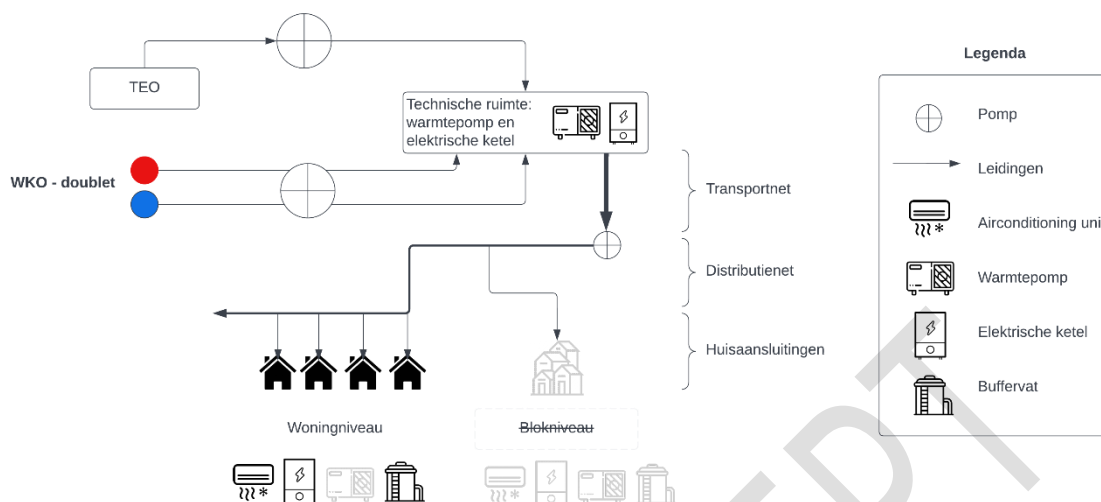
Figuur 2.4

Opbouw warmtenetconfiguratie S2- midden-temperatuur met grondgebonden bouw



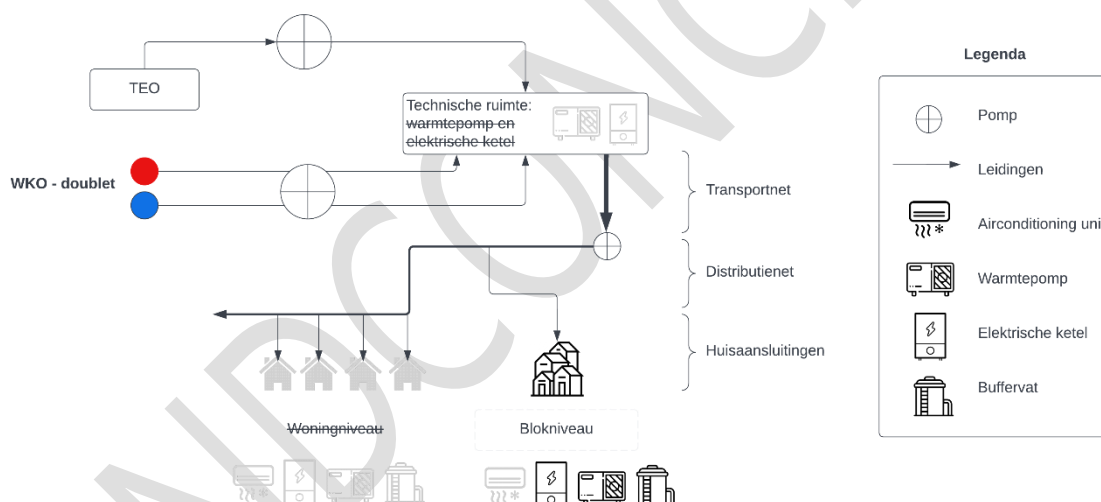
Figuur 2.5

Opbouw warmtenetconfiguratie S3- lage-temperatuur met gestapelde bouw



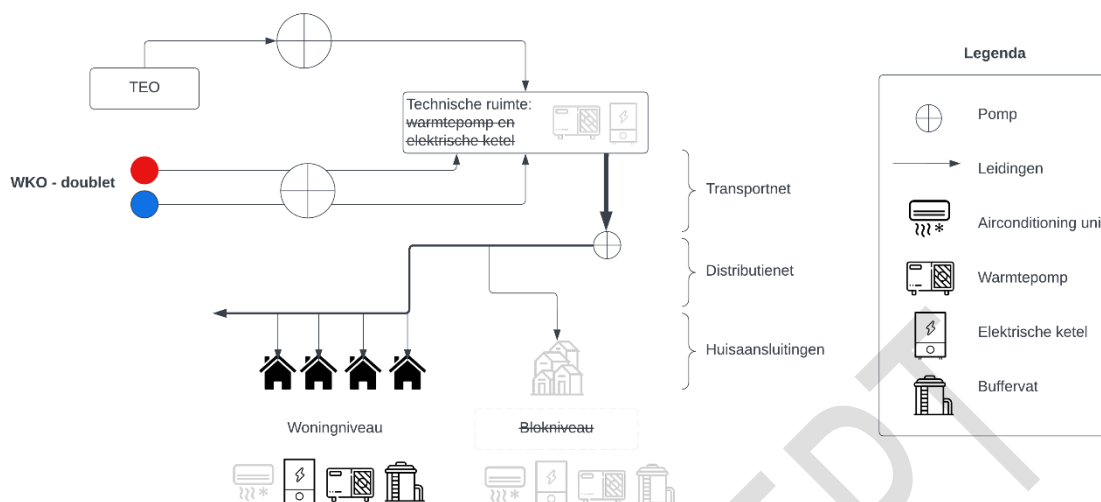
Figuur 2.6

Opbouw warmtenetconfiguratie S4- lage-temperatuur met grondgebonden bouw



Figuur 2.7

Opbouw warmtenetconfiguratie S5- zeer-lage-temperatuur met gestapelde bouw



Figuur 2.8

Opbouw warmtenetconfiguratie S6- zeer-lage-temperatuur met grondgebonden bouw

2.3 Systemegrenzen

De processen die binnen de LCA worden bekeken, zijn afgebakend met zogenaamde systeemgrenzen. De systeemgrenzen bepalen welke fasen en processen van de levenscyclus worden meegenomen in de LCA. In Tabel 2.2, volgend uit de EN 15804 en de Bepalingsmethode, staat vastgelegd welke informatie er per levenscyclusfase beschouwd moet worden.

Tabel 2.2

Levenscyclusfasen (☒ Module meegenomen in de LCA studie, ☐: Module niet gedeclareerd)

A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	C1	C2	C3	C4	D
Winning van grondstoffen	Transport	Productie	Transport	Bouw- en installatieproces / aanleg	Gebruik	Onderhoud	Reparaties	Vervangingen	Verbouwingen	Operationeel energieverbruik	Sloop	Transport	Afvalverwerking	Finale afvalverwerking	Mogelijkheden voor hergebruik, terugwinning en recycling
☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒

In de gebruikte achtergrondprocessen zijn ten minste de volgende ingrepen meegenomen in de analyse:

- emissies naar de lucht bij het gebruik van thermische energie van CO₂, CO, NO_x (N₂), SO₂, C_xH_x en fijnstof (PM10 deeltjes < 10 µm);
- emissies naar water van CVZ, BZV, P-totaal, N-totaal en vaste stoffen (PM10: deeltjes < 10 µm);
- emissies naar bodem van PAK en zware metalen.

2.4 Criteria voor het buiten beschouwing laten van input en output

In overeenstemming met de *EN 15804* en de aanvulling vanuit de *Bepalingsmethode* zijn de volgende procedures gehanteerd.

- Alle input- en outputstromen van een proces waarvan informatie beschikbaar was is meegenomen in de berekening.
- Wanneer onvoldoende gegevens beschikbaar waren, zijn de criteria voor het buiten beschouwing laten een maximum van 1% voor (niet)hernieuwbare primaire energieconsumptie en 1% van de totale massa-input van het proces. Voorwaarde hierbij is dat het buiten beschouwing laten van deze stromen niet meer dan 5% bedraagt in één van de milieueffecten per module.
- Het totaal van buiten beschouwing gelaten input stromen is maximaal 5% van energieverbruik en massa.

3 Levenscyclusinventarisatie (LCI) en tussenresultaat per onderdeel warmtenet

3.1 Dataverzameling en datavalidatie

3.1.1 Dataverzameling

Deze studie bouwt voort op de resultaten van de studie van Deltares (zie sectie 1.1). Tevens is gebruikgemaakt van aanvullende informatie verstrekt door Deltares, en van publieke data, zoals Environmental Product Declarations (EPDs) en wetenschappelijke artikelen, verworven door middel van desk research. Hierbij is in de uitwerking aandacht besteed aan de precisie, compleetheid, representativiteit, consistentie en reproduceerbaarheid van de gegevens. Bij het uitvoeren van deze LCA zijn de eisen en richtlijnen uit de *Bepalingsmethode 'Milieuprestatie Bouwwerken' versie 1.1, maart 2022* zo goed mogelijk gevolgd.

Voor het modeleren van materialen en processen is gebruikgemaakt van categorie 3 data van de NMD-processendatabase, versie 3.6 (gebaseerd op Ecoinvent 3.6), of de Ecoinvent 3.6 processendatabase. Tevens is er, na het aanbrengen van verbeteringen, gebruikgemaakt van categorie 3 productkaarten. Vanuit de processendatabase geeft de NMD-bepalingsmethode ook forfaitaire waarden voor de meest belangrijke achtergrondprocessen waarmee gerekend moet worden als specifieke gegevens niet beschikbaar zijn. Het betreft hierbij voornamelijk de processen voor energieopwekking en transport.

3.1.2 Datavalidatie

Specifieke gegevens

Specifieke gegevens zijn afkomstig van de resultaten van de studie van Deltares (zie sectie 1.1). Tevens is gebruikgemaakt van aanvullende informatie verstrekt door Deltares, en van publieke data, zoals Environmental Product Declarations (EPDs) en wetenschappelijke artikelen, verworven door middel van desk research.

Om aannames te verifiëren omtrent de levenscyclus van warmtepompen en de opbouw van distributienetten, is er gesproken met experts op het gebied van warmtepompen en distributienetten. Daarnaast is de studie voorgelegd aan een klankbordgroep. De deelnemers van de klankbordgroep hebben een conceptversie van de studie ingezien en voorzien van commentaar. Daarna is het onderzoek door LBP|SIGHT toegelicht in een overleg met de klankbordgroep en zijn de aannames en resultaten bediscussieert. De suggesties en verbeteringen die uit dit overleg zijn voortgekomen zijn verwerkt in de laatste versie van dit rapport. De deelnemers van de klankbordgroep zijn weergegeven in tabel 3.1.

Tabel 3.1

Deelnemers klankbordgroep

Naam	Functie	Organisatie
Peter van Vugt	Senior adviseur/expert warmtetechniek	RVO
Max Brouwer	Adviseur warmtenetten	RVO
David van Petersen	Innovation Analyst for Heat & Cold Technologies and Human Capital Agenda Coordinator	TKI Urban Energy
Robert Jan van Egmond	Programmamanager Duurzame Warmte en Koude	TKI Urban Energy
Jentse Hoekstra	Senior beleidsmedewerker	Ministerie EZK
Sabine Janssen	Senior policy officer energy transition/national programma aardgasvrije wijken	Ministerie BKZ
Ivo Pothof	Specialist Renewable Energy and Industrial Flows	Deltares
Mike van Meerkerk	Adviseur/researcher water en energie	Deltares

Generieke gegevens

Conform Bepalingsmethode hebben we de NMD-processendatabase, versie 3.6 (gebaseerd op Ecoinvent 3.6) en de Ecoinvent 3.6 processendatabase gebruikt. De gegevens uit beide databases zijn niet ouder dan tien jaar, of zijn binnen deze periode geüpdatet.

Bij de keuze is ook rekening gehouden met de technologische en geografische representativiteit van het gekozen achtergrondproces. Over het algemeen is het niet bekend wat de afkomst zal zijn van de materialen die benodigd zijn voor de aanleg van de warmtenetten. Daarom is veelal gekozen voor processen met een brede geografische scope, zoals de productie van materialen in Europa (weergegeven als {RER} in de Ecoinvent/NMD database) of mondiale gemiddelden (weergegeven als {GLO}).

Een overzicht van de representatieve achtergrondprocessen per deelproduct die in deze LCA zijn toegepast zijn weergegeven in bijlage II: LCI-LCA warmtenetconfiguraties.

3.2 Opbouw warmtenetconfiguraties

In deze sectie is omschreven uit welke deelproducten de warmtenetconfiguraties zijn opgebouwd en hoe de deelproducten zijn gemodelleerd.

Deze sectie is opgedeeld in de zeven onderdelen van het warmtenet:

1. Warmtecentrale
2. Distributienet
3. Warmtepomp
4. Elektrische ketel
5. Tapwaterbuffervat
6. Airconditioningunit
7. Elektriciteitsverbruik

Voor elk onderdeel is eerst toegelicht waar dit onderdeel voor dient, en welke productonderdelen nodig zijn voor elk van de zes warmtenetconfiguraties. Daarna is de modellering en zwaartepunt-analyse van de betreffende productonderdelen beschreven. Een compleet overzicht van de benodigde deelproducten per warmtenetconfiguratie is weergegeven in Tabel 3.2.

In hoofdstuk 4 zijn de resultaten weergegeven van de uitgewerkte warmtenetconfiguraties. Voor het grootste deel van de deelproducten geldt dat de levensduur korter is dan de levensduur van de warmtenetten (50 jaar). Voor het samenvoegen van de deelproducten tot de volledige warmtenetconfiguraties, zijn daarom de rekenregels van de Bepalingsmethode omtrent vervangingen van deelproducten gehanteerd⁶.

Tabel 3.2

Overzicht van alle benodigde deelproducten per warmtenetconfiguratie

	Eenheid	S1 MT-net, gestapeld	S2 MT-net, grondgebonden	S3 LT-net, gestapeld	S4 LT-net, grondgebonden	S5 ZLT-net, gestapeld	S6 ZLT-net, grondgebonden
Levensduur warmtenet	Jaar	50	50	50	50	50	50
Thermisch vermogen	MW	7,3	7,8	5,8	6,2	3,1	2,7
Thermische vraag; totaal	MWh/ jaar	10.430	10.430	10.430	10.430	10.430	10.430
<i>Thermische vraag; ruimteverwarming</i>	MWh/ jaar	7.000	7.000	7.000	7.000	7.000	7.000
<i>Thermische vraag; tapwaterbereiding</i>	MWh/ jaar	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000
<i>Thermische vraag; koude</i>	MWh/ jaar	430	430	430	430	430	430
Warmtecentrale (Wijkniveau)	Levensduur deelproduct	Eenheid					
Leidingen TEO naar techniekruimte, VPS: leidinglengte en diameter	50 jaar	m	500	500	500	500	500
		mm	219	219	219	219	219
Distributiepomp TEO	20 jaar	kW	13	13	7	7	13
Leidingen OBES naar techniekruimte, VPS: leidinglengte en diameter	50 jaar	m	500	500	500	500	500
		mm	273	273	219	219	219
Distributiepomp OBES	20 jaar	kW	14	14	8	8	13
Techniekruimte	50 jaar	m ²	400	400	375	375	60
Warmtepomp	15 jaar	kW _{th}	2.220	2.590	1.960	1.960	
Elektrische ketel	20 jaar	kW _{el}	7.350	7.950	5.850	6.150	

6 ⁶ Het aantal vervangingen wordt volgens de Bepalingsmethode berekend door de functieduur te delen door de levensduur minus één (de initiële productie). Het aantal vervangingen kan daarbij nooit kleiner dan 0 zijn en wordt uitgedrukt in minimaal 2 cijfers significant. Voor de initiële productie wordt altijd uitgegaan van een hele productie; deze kan nooit kleiner zijn dan 1, ook al is de levensduur van het product groter dan de functieduur. Bij vervangingen wordt geen rekening gehouden met mogelijke verbeteringen betreft de milieuprestatie. Elke vervanging heeft daarom een gelijke milieulast aan dat van het originele product.

Distributienetwerk	Levensduur deelproduct	Eenheid						
Distributiepompen	20 jaar	kW	146	156	116	124	62	54
Overige techniekruimte	50 jaar	m ²	13	17	13	13	5	5
Afleverzet, <u>inclusief</u> voorziening tapwater	15 jaar	stuks	1.000	1.000	1.000		1.000	
Afleverzet, <u>exclusief</u> voorziening tapwater	15 jaar	stuks				1.000		
Leidingnetwerk, totaal		m	20.000	30.000	20.000	30.000	20.000	30.000
<i>MT-, LT-net: Calpex; ZLT-net: HDPE</i>								
Leidingen, diameter 25 mm	50 jaar	m	0	14.040	0	14.040	0	14.040
Leidingen, diameter 40 & 50 mm	50 jaar	m	3.302	2.635	3.302	2.635	3.302	2.635
Leidingen, diameter 63 & 75 mm	50 jaar	m	5.280	4.213	5.280	4.213	5.280	4.213
<i>MT-, LT-net: VPS; ZLT- net: HDPE</i>								
Leidingen, diameter 90 & 110 & 125 mm	50 jaar	m	7.114	5.677	7.114	5.677	7.114	5.677
Leidingen, diameter 140 & 160 & 180 mm	50 jaar	m	3.465	2.765	3.465	2.765	3.465	2.765
Leidingen, diameter 220 & 225 & 250 mm	50 jaar	m	839	669	839	669	839	669
Blokniveau	Levensduur deelproduct	Eenheid						
Combinatie- warmtepomp, warmtepomp ⁷	15 jaar	kW _{th}					2.940	
Combinatie- warmtepomp, elektrische ketel ⁴	20 jaar	kW _{th}					980	
Elektrische ketel	20 jaar	kW _{el}			450			
Tapwaterbuffervat	20 jaar	m ³			134		120	
Woningniveau (1,000 woningen)	Levensduur deelproduct	Eenheid						
Combinatie- warmtepomp, warmtepomp ⁴	15 jaar	kW _{th}						2.960
Combinatie- warmtepomp, elektrische ketel ⁴	20 jaar	kW _{th}						740
Elektrische ketel	20 jaar	kW _{el}				300		
Tapwaterbuffervat	20 jaar	m ³					143	120
Airconditioningunit	20 jaar	kW _{th}	1,9	1,9	1,9	1,9		

7 ⁷ In de studie van Deltares is in de ZLT-netten uitgegaan van een combinatie warmtepomp, welke zowel de opwaardering voor de basislast en pieklast voorziet. Voor het doel van deze studie, wordt aangenomen dat de materialisatie van een combinatiewarmtepomp vergelijkbaar is met die van een reguliere warmtepomp en elektrische ketel samen. De uitwerking van deze aanname is omschreven in Sectie 3.2.3 en 3.2.4.

Verbruik	Eenheid						
Elektriciteitsverbruik - warmtenet	MWh	239.979	258.874	235.974	210.525	123.060	25.124
waarvan grijs ⁸	%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
waarvan hernieuwbaar ⁵	%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Elektriciteitsverbruik – consument	MWh	7.167	7.167	7.167	47.087	0	131.730

3.2.1 Warmtecentrale

3.2.1.1 Opbouw warmtenetconfiguraties

De warmtecentrale is opgedeeld in de volgende drie onderdelen:

1. Thermische Energie uit Oppervlaktewater (TEO); *leidingwerk en distributiepomp*
2. Open Bodem Energie Systeem (OBES); *leidingwerk en distributiepomp*
3. Techniekruimte

De inputdata voor deze drie onderdelen is overgenomen uit een vergelijkende studie van WarmingUP (2022) naar aquathermie⁹ varianten. Op advies van Deltares is daarbij variant 1 gebruikt voor het modelleren van de MT-netten, variant 2 (met 5 MW_{th} i.p.v. 20 MW_{th}¹⁰) voor de LT-netten en variant 7 voor de ZLT-netten.

Thermische Energie uit Oppervlaktewater

Alle warmtenetconfiguraties in deze studie maken gebruik van TEO als brontype. In deze studie¹¹ is de TEO opgebouwd uit het *leidingwerk* van de bron naar de techniekruimte, en een *distributiepomp*. De lengte van het leidingwerk tussen de bron en de techniekruimte is 500 m en de leidingdiameter is 219 mm voor alle warmtenetconfiguraties¹². Het leidingtype is Staal-PUR-PE, zoals omschreven in Sectie 3.2.1.2.1. Het pompvermogen is 13 kW_e voor de MT- en ZLT-netten en 7 kW_e voor de LT-netten.

8 ⁸ Er is uitgegaan van 100% grijze stroom in het basisscenario (zie Sectie **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.**). In Sectie 4.4 is middels een gevoeligheidsanalyse bepaald wat de invloed is van het gebruik van (deels) hernieuwbare stroom.

9 ⁹ Aquathermie is een verzamelnaam voor duurzaam verwarmen en koelen met water. De warmte en koude kan geleverd worden door oppervlaktewater (TEO), afvalwater (TEA) en drinkwater (TED).

10 ¹⁰ Het geleverde thermische vermogen van deze variant betreft 20 MW. Om de inputdata om te zetten naar 5 MW om de LT-netten beter te representeren, zijn de vermogens van de pompen en de oppervlakte van de techniekruimte door 4 gedeeld. De diametermaat is verlaagd van 356 mm naar 219 mm.

11 ¹¹ In realiteit zijn er meer onderdelen nodig om thermische energie uit oppervlaktewater te verkrijgen, zoals regeltechniek, filtering, bemetering en onderhoud.

12 ¹² De leidingdiameter uit het rapport van WarmingUP is weergegeven in DN-maat, in plaats van in millimeters. De hierboven beschreven diameters in mm, voor zowel de TEO als de OBES, zijn de diameters die voor de gemodelleerde VPS leidingen overeenkomen met de opgegeven DN-maat uit het WarmingUP rapport.

Open Bodem Energie Systeem

De warmte en koude opslag wordt in alle configuraties geleverd door het OBES. De materialisatie van het OBES bestaat uit het *leidingwerk* van de bron naar de techniekruimte, en een *distributiepomp*. De lengte van het leidingwerk tussen de bron en de techniekruimte is 500 m, en leidingdiameter is 219 mm voor de LT- en ZLT-netten en 273 mm voor de MT-netten. Het leidingtype is tevens Staal-PUR-PE, zoals omschreven in Sectie 3.2.1.2.1. Het pompvermogen is 14 kW_e voor de MT-netten, 13 kW_e voor de ZLT-netten en 8 kW_e voor de LT-netten.

Techniekruimte

In de techniekruimte bevinden zich de warmtepomp (zie Sectie 3.2.3) en elektrische ketel (zie sectie 3.2.4) voor de opwaardering in de warmtecentrale (met uitzondering van de ZLT-netten), en de distributiepompen. In deze studie is de techniekruimte aangeduid als het enkel het gebouw waar deze productonderdelen zich in bevinden. De oppervlakte van de techniekruimte is 400 m² voor de MT-netten, 375 m² voor de LT-netten en 60 m² voor de ZLT-netten.

3.2.1.2 Modelling en zwaartepuntanalyse deelproducten

In deze sectie is de modellering en zwaartepuntanalyse van de deelproducten waarmee de warmtecentrale is opgebouwd omschreven: *Leidingen, Distributiepompen en Techniekruimte*.

Per deelproduct worden de volgende onderdelen besproken:

1. Productomschrijving
2. Toelichting levensfasen
3. Schaling, wanneer van toepassing
4. Zwaartepuntanalyse

3.2.1.2.1 *Leidingen (voor OBES/TEO en distributienet)*

Productomschrijving

Voor dit onderzoek is een LCA model opgesteld van 1 m Staal-PUR-PE (ook wel 'verbonden pijpsysteem'; VPS), 1 m PEX-PUR-PE en 1 m niet geïsoleerde HDPE leidingen. Het leidingwerk voor de OBES en TEO bestaat volledig uit VPS. Het leidingwerk voor het distributienet kan bestaan uit VPS, PEX-PUR-PE en/of HDPE leidingen (zie Sectie 3.2.2). De modellering van alle drie de leidingtypen is in deze sectie omschreven.

De levensduur van de leidingen is 50 jaar (BRUGG Pipes, 2022; Weijers Waalwijk, 2010). Er zijn vier maten van de VPS leidingen gemodelleerd, waarbij de mediumbuis een diameter heeft van 114, 168, 219 of 273 mm. Voor PEX-PUR-PE gaat het om drie maten met een mediumbuisdiameter van 25, 50 en 63 mm, en de HDPE leidingen zijn gemodelleerd op basis van een diameter van 27, 42, 76, 114, 168 en 219 mm.

Toelichting levensfasen

In de onderstaande secties is beschreven welke aannames gemaakt zijn voor de modellering van de leidingen. Het decompositietabel van de VPS, PEX-PUR-PE en niet geïsoleerde HDPE leidingen is weergegeven bijlage II: LCI-LCA warmtenetconfiguraties, *tabblad Leidingen*.

Productiefase (A1-A3)

De afmetingen en materiaalkenmerken zijn overgenomen vanuit een rapport van producent Weijers Waalwijk B.V. voor zowel Staal-PUR-PE (Weijers Waalwijk, 2010), als voor PEX-PUR-PE (hierna benoemd met productnaam 'Calpex')(BRUGG Pipes, 2022). Hierbij is de data overgenomen bijbehorend aan de standaard isolatiedikte (klasse 1). Dit is tevens de isolatieklasse die gehanteerd is door Deltares.

Voor alle leidingtypen wordt uitgegaan van rechte buizen, dat wil zeggen geen gebogen onderdelen en koppelstukken. Daarnaast worden de moffen, eindmanchetten, expansies en muurdoorvoeringen buiten beschouwing gelaten.

Staal-PUR-PE (VPS)

VPS leidingen bestaan uit een stalen mediumbuis (P235 GH, TR1 or TR2) en een high density polyethyleen (HDPE) buitenmantel. De mediumbuis en buitenmantel zijn verbonden met een isolatielaag van polyurethaan (PUR). In de isolatielaag bevinden zich twee koperen lekdetectiedraden (1,5 mm²), welke verbonden zijn met een elektronische lekdetectie-unit (Weijers Waalwijk, 2010). Voor dit onderzoek is een model gemaakt van de UNO variant, waardoor de aanvoer- en retourleidingen apart gemodelleerd moeten worden.

De massa van de stalen mediumbuis en de HDPE buitenmantel zijn berekend met behulp van de afmetingen en dichtheden zoals opgegeven door de producent. Omdat voor de dichtheid van de PUR-isolatie enkel een minimale waarde is opgegeven door de producent, is de massa van de PUR-isolatie berekend door de berekende massa van het staal en HDPE af te trekken van de opgegeven massa van de totale leiding.

De productieprocessen van de stalen- en HDPE-buizen zijn inbegrepen in de gekozen NDM-processen. De processen die nodig zijn voor het samenvoegen van deze materialen tot een VPS leiding, zijn niet bekend. Bij gebrek aan betere informatie, wordt het energieverbruik van de montageprocessen van het Ecoinvent (3.6) proces *Polyethylene pipe, DN 200, SDR 41 {RoW}* | *production* | *Cut-off, U*, overgenomen van 0,33 kWh elektriciteit en 8,26 MJ aardgas per meter leiding. Daarnaast nemen wij het proces *Plastic processing factory {GLO}* | *market for* | *Cut-off, U* over met 2,22E-09 stuks per meter leiding.

Niet geïsoleerde HDPE

De niet geïsoleerde HDPE-leidingen bestaan enkel uit een buis van HDPE. De afmetingen van deze leidingen zijn gemodelleerd op basis van de afmetingen van de mediumbuis van de VPS-leidingen. Voor de montageprocessen van de HDPE-leidingen zijn dezelfde aannames gebruikt als voor de VPS-leidingen. Voor dit onderzoek is een model gemaakt van de UNO-variant, waardoor de aanvoer- en retourleidingen apart gemodelleerd moeten worden.

Calpex

Calpex-leidingen bestaan uit cross-linked polyethylene (PEX) mediumbuis en een lineair low density polyethylene (LLD-PE) buitenmantel. De mediumbuis en buitenmantel zijn verbonden met een PUR-isolatielaag. Voor dit onderzoek is een model gemaakt van de UNO variant, waardoor de aanvoer- en retourleidingen apart gemodelleerd moeten worden.

De mediumbuis van PEX is gemaakt met behulp van het *Engel process* (PE-Xa) waarbij een mengsel van HDPE en 2% peroxide wordt gemixt op lage-temperatuur in een extrudeermachine (Whiteley, 2011). Daarna vindt op hoge temperatuur het vormen van de kruisverbindingen plaats. De PEX-buis is daarom gemodelleerd met de NMD-processen voor het extruderen van kunststof buizen en HDPE-granulaat en het Ecoinvent (3.6) proces *2,5-dimethylhexane-2,5-dihydroperoxide {GLO}* *market for 2,5-dimethylhexane-2,5-dihydroperoxide | Cut-off, U* voor de peroxide.

De massa van de mediumbuis en de buitenmantel zijn berekend met behulp van de afmetingen en dichtheden zoals opgegeven door de producent. Omdat voor de dichtheid van de PUR-isolatie enkel een minimale waarde is opgegeven door de producent, is de massa van de PUR-isolatie berekend door de berekende massa van de mediumbuis, buitenmantel en de PE-folie af te trekken van de opgegeven massa van de totale leiding. Uit het materiaaloverzicht van de producent is tevens geen informatie genoemd over de dikte van de PE-folie. Om de minimale dichtheid van 50 kg/m³ te halen van de PUR-isolatie, is gekozen voor een relatief lage dikte van 0.5 mm.

Voor de montageprocessen van Calpex-leidingen zijn dezelfde aannames gebruikt als voor de VPS-leidingen.

Transportfase (A4, C2)

Forfaitaire transportafstanden volgens de bepalingsmethode zijn toegepast:

- 50 km bulktransport naar werk (A4); toegepast voor zand benodigd voor de aanleg
- 150 km overig transport naar werk (A4); toegepast voor de leidingen
- 50 km transport voor einde-leven naar sorteerlocatie/recycling (C2)
- 100 km transport totaal voor einde-leven naar stort (C2)
- 150 km transport totaal voor einde-leven naar afvalverbrandingsinstallatie (AVI)

Constructiefase (A5)

Om de leidingen te monteren, moet een ruime sleuf gegraven worden met een graafmachine. De leidingen moeten in minimaal 200 mm schoonzand liggen. De dekking boven de buitenbuis moet minimaal 800 mm bedragen. Het volume schoonzand dat nodig is om de te storten in de gleuf en het volume van de af te graven grond, is overgenomen van producent Weijers Waalwijk (Weijers Waalwijk, 2010) en is weergegeven in bijlage II: LCI-LCA warmtenetconfiguraties, *tabblad Afmetingen leidingen*. Dit volume wordt omgezet naar gebruik van een graafmachine per uur met de aanname dat een graafmachine ongeveer 75 m³ per uur af kan graven (BouwTotaal, 2017). Dit volume wordt vermenigvuldigd met twee omdat het gat afgegraven en gedicht moet worden en gedeeld door twee omdat er twee leidingen per gat gelegd worden.

Op de bouwplaats moeten de producten op maat gemaakt worden. In overeenstemming met de Bepalingsmethode, nemen wij aan dat er 5% van de materialen verloren gaat.

De VPS (Weijers Waalwijk, 2010) en niet geïsoleerde HDPE buiselementen (KWR, 2022) moeten aan elkaar gelast worden. De buiselementen hebben een gemiddelde lengte van 12 meter. De afstand die gelast moet worden, wordt daarom benaderd door de omtrek (in m) van de buitmantel te delen door 12 m. De Calpex leidingen worden met handgereedschap geïnstalleerd, welke buiten beschouwing worden gelaten door de verwaarloosbare milieu-impact.

Voor een optimale hechting van de zandkorrels rondom de buitenbuizen, dient elke zandlaag (5 lagen) laag voor laag aangestampt te worden met een hydraulische stamper. Dit proces modelleren wij met het NMD proces *0125-pro&Hydraulisch trilblok, per vermogen, per uur (o.b.v. 2,2 kWh Diesel, burned in building machine {GLO}| market for | Cut-off, U)*. Wij nemen aan dat er 276 m² zand per uur aangestampt kan worden (*Technical Data Tamper BT 60, BT 65, n.d.*). Het oppervlak dat aangestampt moet worden, is overgenomen uit de technische documentatie van Weijers Waalwijk (Weijers Waalwijk, 2010).

Gebruiksfase (B1-B5)

Om de levensduur van het VPS leidingsysteem te waarborgen, moet het lekdetectiesysteem jaarlijks doorgemeten worden. Dit gebeurt met behulp van het elektronische lekdetectiesysteem, waardoor de impact van deze stap verwaarloosbaar is. Verder is er voor zowel de VPS, als de Calpex en de niet geïsoleerde HDPE leidingen geen voorzien onderhoud/reparaties onder normale omstandigheden.

Sloopfase (C1)

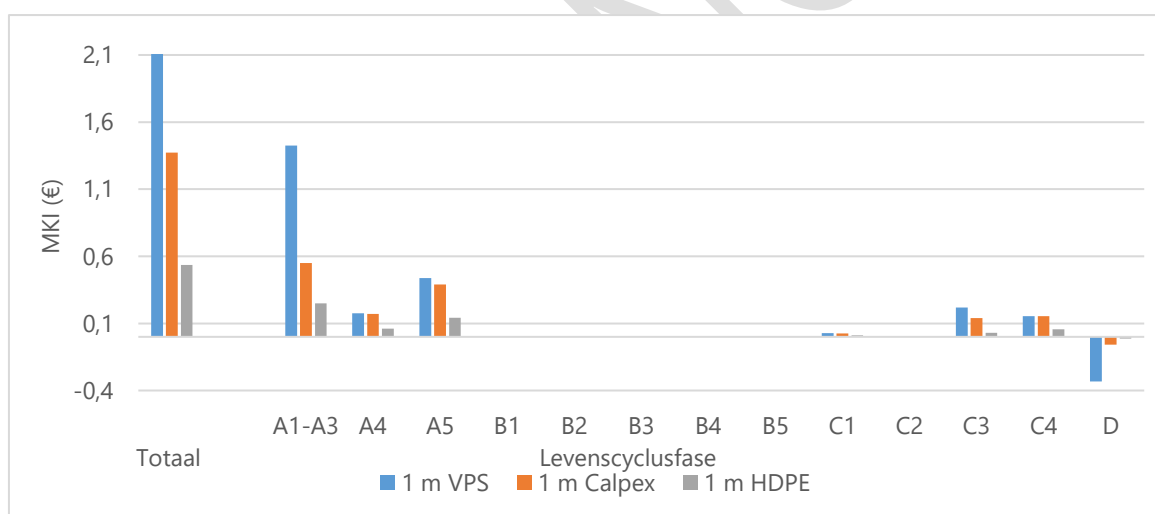
Er wordt aangenomen dat de sloopfase vergelijkbare processen vereist als de installatiefase, met uitzondering van het hydraulisch aanstampen van de zandlagen.

Einde levensduur, afvalscenario en baten en lasten buiten de systeemgrenzen (C3, C4 en D)

Aan het einde van de levensduur, worden de producten gedemonteerd en verzameld. De producten worden vervolgens getransporteerd naar een sorteerlocatie, waar ze ontmanteld worden en de individuele materialen gesorteerd worden. De individuele materialen kunnen gerecycled worden, verbrand (AVI) of gestort worden. De materialen die worden gerecycled, worden gemodelleerd totdat het einde van de afvalfase is bereikt. De materialen die worden verbrand, worden verwerkt in afvalverbrandingsinstallaties met energierugwinning. Voor het modelleren van deze fasen wordt gebruik gemaakt van de forfaitaire waarden voor verwerking-scenario's einde leven van de Bepalingsmethode (versie mei 2022). Verder is voor de elektronische componenten gebruik gemaakt van het nieuwe verwerking-scenario einde leven van elektronica, zoals beschreven in sectie 3.2.3.2.

Zwaartepuntanalyse

In Figuur 3.1 in de MKI van 1 m VPS, 1 m Calpex en 1 m HDPE leiding uitgezet tegen de levenscyclusfasen. Alle leidingtypen hebben een nominale diameter van 20 in deze figuur, de kleinste diameter beschouwd in deze studie. De VPS leidingen hebben voor deze diameter de hoogste MKI per meter (€2,11), gevolgd door Calpex (€1,37) en HDPE (€0,53).



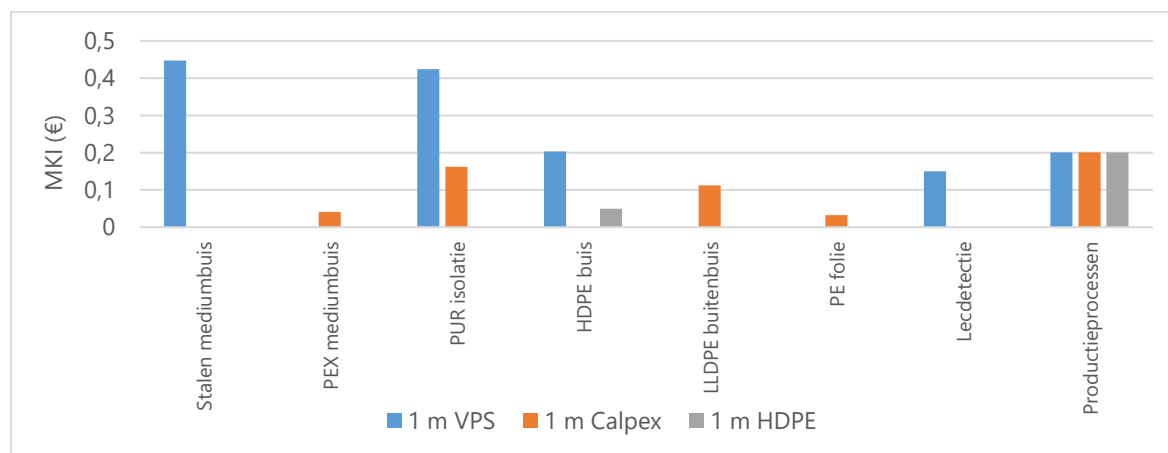
Figuur 3.1

Zwaartepuntanalyse leidingen, MKI per levensfase voor 1 m VPS, 1 m Calpex en 1 m HDPE

Alle leidingtypen hebben een nominale diameter van 20.

Bij alle drie de leidingtypen heeft de productiefase (A1-A3) de grootste bijdrage aan de MKI. In Figuur 3.2 is de MKI van de productiefase uitgezet tegen de processen/materialen. In deze figuur is te zien dat voor VPS de hoogste milieu-last afkomstig is van de stalen mediumbuis en de PUR isolatie.

De HDPE-buitenbuis, het lekdetectiesysteem en de productieprocessen hebben tevens een hoge impact. Voor Calpex is de hoogste milieulast afkomstig van de productieprocessen, gevolgd door de PUR-isolatie en de LLD-PE buitenbuis. De milieulast van de HDPE-leiding bestaat enkel uit dat afkomstig van de productieprocessen en de HDPE buis.



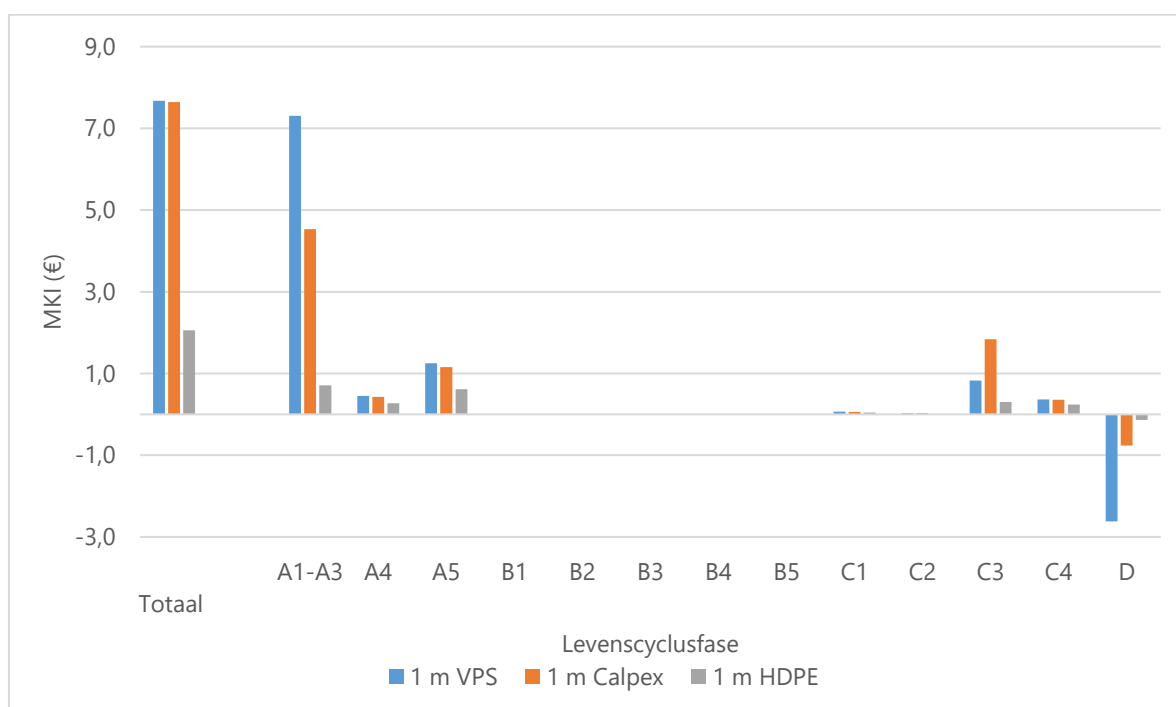
Figuur 3.2

Zwaartepuntanalyse leidingen, MKI per proces/product in de productiefase (A1-A3) voor 1 m VPS, 1 m Calpex en 1 m HDPE

Alle leidingtypen hebben een nominale diameter van 20.

In Figuur 3.3 is de MKI van 1 m van de drie leidingtypen uitgezet per levensfase voor een nominale diameter van 150, de grootste diameter die beschouwd is in deze studie voor Calpex. In deze figuur is te zien dat een grotere diameter zorgt voor een relatief gunstigere MKI van VPS ten opzichte van Calpex. Tevens is HDPE iets gunstiger ten opzichte van zowel VPS als Calpex.

Dit verschil is te verklaren door de relatieve verandering van de afmetingen en dichtheden van de onderlinge materialen per leidingtype. Bij VPS neemt het massa-aandeel van staal toe (54% naar 71%) bij een nominale diameter van 20 naar 150, voornamelijk ten koste van HDPE. Bij Calpex wordt het massa-aandeel aanzienlijk hoger van PEX (17 – 53%) bij een nominale diameter van 20 naar 150, voornamelijk ten koste van de PE-folie en LLD-PE folie. Tevens heeft VPS een hogere MKI afkomstig van onderdelen die onafhankelijk zijn van de diameter, zoals de lekdetectie-unit en de productieprocessen, welke schalen per meter.



Figuur 3.3

Zwaartepuntanalyse leidingen, MKI per levensfase voor 1 m VPS, 1 m Calpex en 1 m HDPE

Alle leidingtypen hebben een nominale diameter van 150.

3.2.1.2.2 Distributiepompen (voor OBES/TEO en distributienet)

Productomschrijving

Voor dit onderzoek is een LCA model opgesteld van distributiepompen. In dit model is de pomp schaalbaar naar het geleverde vermogen tussen de 4 – 37 kW_e. Het vermogen van de het referentieproduct is 22 kW_e. De levensduur van de pomp betreft 20 jaar (NextChapter Software B.V., n.d.; Solvari, 2020).

Toelichting levensfasen

In de onderstaande secties is beschreven welke aannames gebruikt zijn voor het maken van het distributiepompmodel. Het decompositietabel van de distributiepomp is weergegeven bijlage II: LCI-LCA warmtenetconfiguraties, *tabblad Distributiepomp*.

Productiefase (A1-A3)

De materialen en bijbehorend massa-aandeel van de distributiepomp is overgenomen van het Ecoinvent (3.6) proces *Pump, 40W {RoW} | production | Cut-off, U*, welke gebaseerd is op een *Grundfos UP 15-35x20 water pump (40W)*. De totale massa van de pomp is overgenomen van de PEDROLLO 6HR, R34 series distributiepompen, waar de schaling op gebaseerd is (zie alinea **schaling**). In overeenstemming met het model voor de warmtepomp en Caduff, M. *et al.* (2014), nemen wij aan dat de helft van de koper gevormd wordt tot platen en de andere helft tot draden.

Om het energieverbruik van de productieprocessen te benaderen, is dezelfde aanname gebruikt als voor het Ecoinvent (3.6) proces *Water pump, 22kW {GLO}| water pump production, 22kW | Cut-off, U*. Hierin wordt het energieverbruik benaderd met het verbruik van het Ecoinvent (3.6) proces *heat pump production, brine-water, 10kW, CH*.

Transportfase (A4, C2)

Forfaitaire transportafstanden volgens de bepalingsmethode zijn toegepast:

- 50 km bulktransport naar werk (A4)
- 150 km overig transport naar werk (A4)
- 50 km transport voor einde-leven naar sorteerlocatie/recycling (C2)
- 100 km transport totaal voor einde-leven naar stort (C2)
- 150 km transport totaal voor einde-leven naar afvalverbrandingsinstallatie (AVI)

Constructiefase (A5)

Het installeren van de pomp vereist minimaal werk. Het gaat met name om manueel werk, en elektriciteitsgebruik voor monteren (bijvoorbeeld met een boormachine) en testen. Deze impact is daarom verwaarloosbaar en niet meegenomen in dit model.

Gebruiksfase (B1-B5)

Onder normale omstandigheden zijn geen reparaties, vervangingen en vernieuwingen voorzien tijdens de levensduur van de pomp.

Sloopfase (C1)

Er wordt aangenomen dat de sloopfase vergelijkbare processen vereist als de installatiefase.

Einde levensduur, afvalscenario en baten en lasten buiten de systeemgrenzen (C3, C4 en D)

Aan het einde van de levensduur, worden de producten gedemonteerd en verzameld. De producten worden vervolgens getransporteerd naar een sorteerlocatie, waar ze ontmanteld worden en de individuele materialen gesorteerd worden. De individuele materialen kunnen gerecycled worden, verbrand (AVI) of gestort worden. De materialen die worden gerecycled, worden gemodelleerd totdat het einde van de afvalfase is bereikt. De materialen die worden verbrand, worden verwerkt in afvalverbrandingsinstallaties met energierugwinning. Voor het modelleren van deze fasen wordt gebruikgemaakt van de forfaitaire waarden voor verwerking-scenario's einde leven van de Bepalingsmethode (versie mei 2022).

Schaling

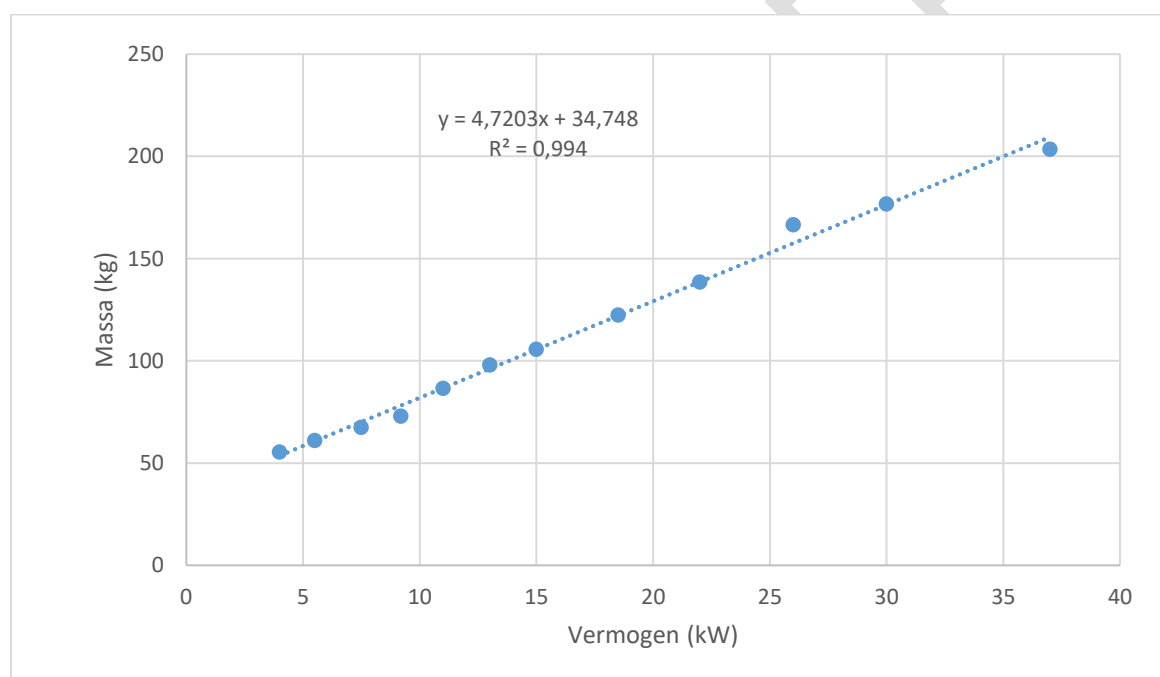
De distributiepomp is schaalbaar naar het geleverde vermogen. De pomp is schaalbaar tussen de 4 en 37 kW_e en het referentievermogen is 22 kW_e. De schalingsformule is gemaakt met behulp van de massa/vermogen verhouding van PEDROLLO 6HR, R34 series met vermogens tussen de 4 en 37 kW_e (Tomei water solutions, n.d.).

In Figuur 3.4 is het vermogen geplot tegenover de massa van de pomptypen. De massa van de (onderdelen van de) pomp is schaalbaar met de formule $m = 4,7203 P + 34,748$, waarbij m de massa is in kg en P het vermogen in kW_e. De productieprocessen schalen we lineair mee met de massa van de pomp.

Tabel 3.3

MKI distributiepomp bij minimaal-, referentie- en maximaalvermogen

Vermogen (kW _e)	MKI (€)
4	172
22	444
37	671

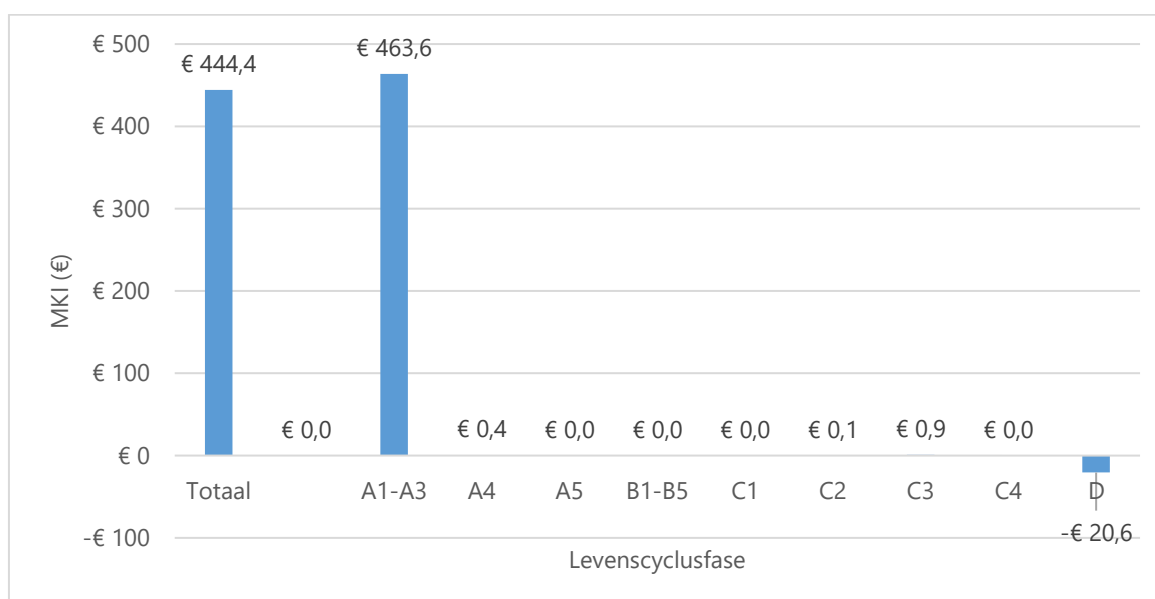


Figuur 3.4

Schaling massa distributiepomp op basis van vermogen

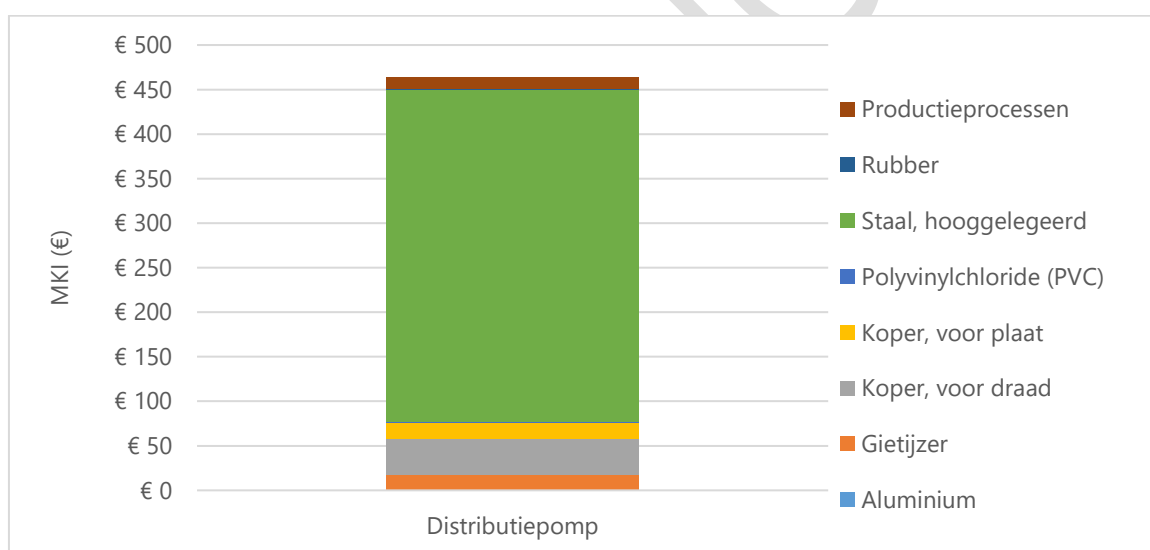
Zwaartepuntanalyse

In Figuur 3.5 is de MKI van een distributiepomp met een vermogen van 22 kW uitgezet tegenover de levenscyclusfasen. In deze figuur is te zien dat verreweg de grootste milieulast afkomstig is van de productiefase (A1-A3). De baten behaald in module D zijn gering. In Figuur 3.6 is de MKI van de productiefase opgesplitst per proces/product. Het hoogste aandeel in milieulast komt van RVS (Staal, hooggelegeerd), met een bijdrage van 80% aan de MKI in deze fase. De hoge milieulast van RVS heeft als oorzaak het massa-aandeel van 38% van de pomp massa en de relatief hoge MKI per massa-eenheid.



Figuur 3.5

Zwaartepuntanalyse distributiepomp, MKI per levensfase voor referentievermogen van 22 kW



Figuur 3.6

Zwaartepuntanalyse distributiepomp, MKI per proces/product in de productiefase (A1-A3) voor referentievermogen van 22 kW

3.2.1.2.3 Techniekruimte

Productomschrijving

Voor dit onderzoek is een LCA model opgesteld voor techniekruimte, per 1 m². De techniekruimte heeft een levensduur van 50 jaar.

Toelichting levensfasen

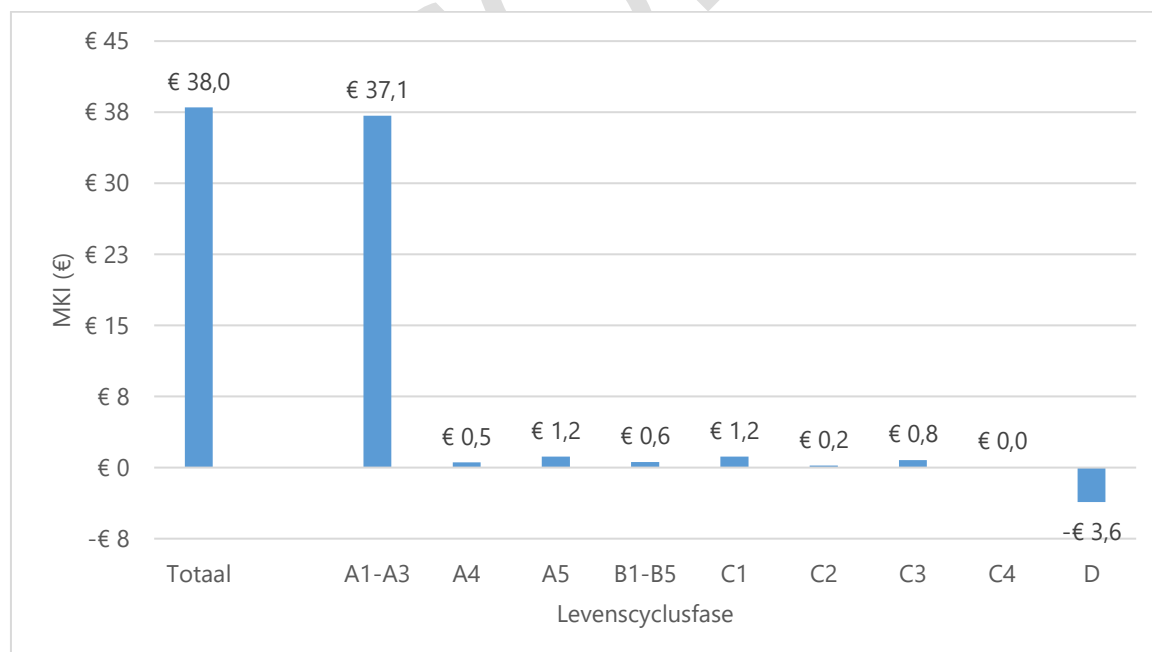
De techniekruimte modelleren wij met het materiaal-(A1-A3) en energiegebruik (A5, B2, C1) van het Ecoinvent proces *Building, hall, steel construction {RoW} | building construction, hall, steel construction | Cut-off, U* (per m²). Daarnaast zijn de forfaitaire waarden van de Bepalingsmethode gebruikt voor het modelleren van het transport (A4, C2) en einde levensduur, afvalscenario en baten en lasten buiten systeemgrenzen (C3, C4 en D).

Het decompositietabel van de techniekruimte is weergegeven bijlage II: LCI-LCA warmtenetconfiguraties, *tabblad techniekruimte*.

Zwaartepuntanalyse

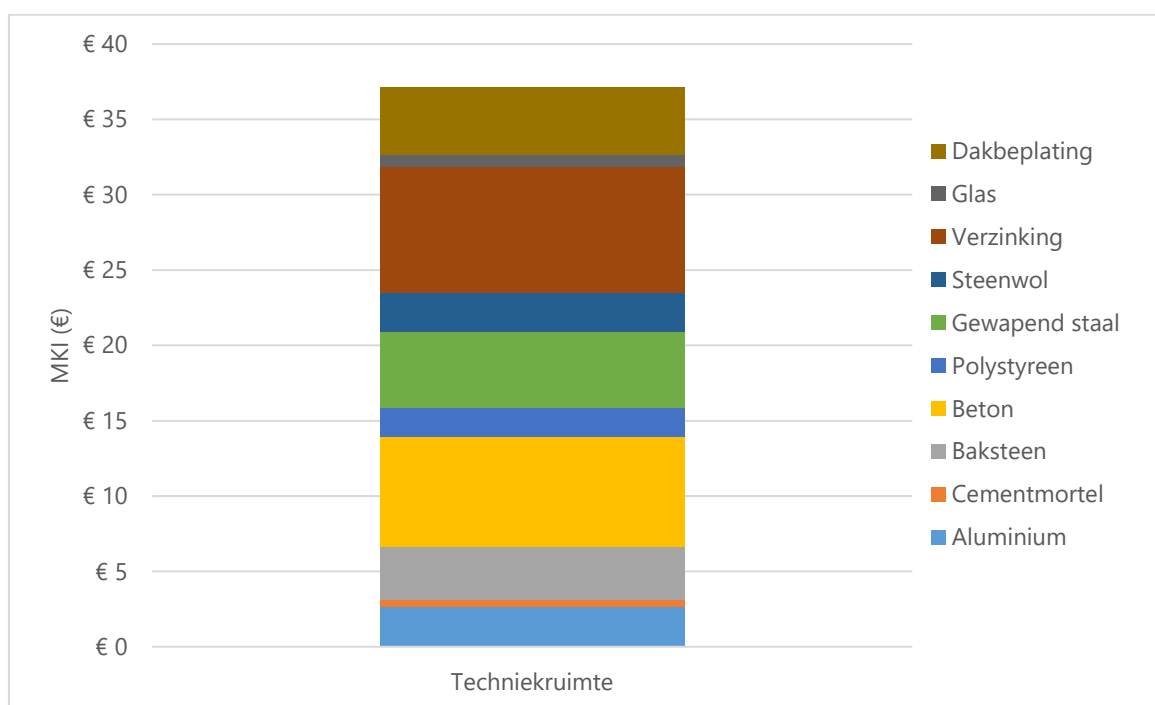
In Figuur 3.7 is de MKI van 1 m² techniekruimte uitgezet tegenover de levenscyclusfasen. In deze figuur is te zien dat de grootste milieulast afkomstig is van de productiefase (A1-A3). De transport (A4/C2), (de-)installatie (A5/C1) en afvalbewerking/verwerking fasen (C3/C3) hebben allen een kleine bijdrage aan de MKI. De baten uit module D compenseren bijna 10% van de MKI van de productiefase.

In Figuur 3.8 is de MKI van de productiefase opgesplitst per proces/product. De hoogste milieulast is afkomstig van de verzinking, gevolgd door het beton, de dakbeplating en het gewapend staal. Er zijn geen uitschieters in deze fase.



Figuur 3.7

Zwaartepuntanalyse techniekruimte per m², MKI per levensfase



Figuur 3.8

Zwaartepuntanalyse techniekruiimte per m², MKI per proces/product in de productiefase (A1-A3)

3.2.2 Distributienet

3.2.2.1 Opbouw warmtenetconfiguraties

Het distributienet is opgedeeld in de volgende vier deelproducten:

1. Distributieleidingen
2. Distributiepompen
3. Techniekruiimte
4. Afleverset

Distributieleidingen

In deze sectie is beschreven hoe het leidingwerk van de distributienetten is opgebouwd en welke aannames zijn gemaakt. Eerst is de leidinglengte toegelicht, daarna de diameterverdeling en de leidingtypen.

In overeenstemming met het onderzoek van Deltares, gaan we uit van een leidinglengte van 10 m per aansluiting voor gestapelde bouw en 15 m voor grondgebonden bouw. Omdat het net bestaat uit aanvoer- en retourleidingen, is de totale afstand van het net twee keer zo lang. In overeenstemming met de studie van Deltares, is de leidinglengte gemeten vanaf de warmtecentrale tot aan de woning of het woningblok. Eventuele benodigde aanpassingen in het leidingwerk in de woning/blok zijn daarom niet meegenomen in deze studie.

De diameters van de leidingen, en dus de hoeveelheid materiaal, zijn afhankelijk van het toegepaste temperatuurregime. Bij een hogere temperatuur is in principe een kleiner debiet nodig en daarmee een kleinere leidingdiameter (Loverdou, 2020). De verschillen in de diameters van het distributienet zijn voor de huidige configuraties minimaal.

Hiervoor zijn 3 oorzaken aan te wijzen (Deltares, 2022):

1. De distributieverliezen zijn lager voor systemen met een lagere aanvoertemperatuur.
2. In ZLT netten wordt meer gebruik gemaakt van decentrale warmtebuffering met lagere piekwarmtevraag, waardoor er voor warmtenetconfiguratie S1 tot en met S4 een grotere diameter benodigd is voor het distributienet.
3. Tenslotte zitten de warmtepompen decentraal in de ZLT netten.

In deze studie is daarom geen onderscheid gemaakt tussen de pijpdiameter van de MT-, LT- en ZLT-netten.

In de studie van Deltares is enkel de maximale diameter beschouwd op basis van de benodigde transportcapaciteit bij piekwarmtevraag. In realiteit wordt de diameter van de leidingen steeds kleiner naarmate deze dichter bij de woningen liggen. Tevens verschilt het gebruikelijke leidingtype per leidingdiameter. Om een grove overschatting te voorkomen, is daarom een diameterverdeling voor de distributienetten opgesteld.

Om de diameterverdeling van het de distributienetten te bepalen, is gebruikgemaakt van een rapport van Deltares (2020) waarin de diameterverdeling van een ZLT-net is berekend. In dit rapport is het aandeel (in meters) van diameters tussen de 25-250 mm voor het net uiteengezet. De wijk die voor deze studie gemodelleerd is, heeft relatief lange voortuinen, waardoor het aandeel aansluitleidingen (met een diameter van 25 mm) hoger is dan gemiddeld. Om de betreffende diameterverdeling representatiever te maken voor een gemiddelde wijk, is het aandeel aansluitleidingen voor grondgebonden woningen aangepast naar 46,8% (Roosjen et al., 2021).

De overige diameters zijn naar ratio verdeeld over de overige 53,2%. Voor de gestapelde bouw is het percentage aansluitleidingen op 0% gezet, omdat de aanvoerleiding op blokniveau binnenkomt met een diameter van 40 mm (uit interview met expert). De berekende diameterverdeling van de distributieleidingen voor grondgebonden en gestapelde woningen is weergegeven in Tabel 3.4.

Tabel 3.4

Berekende diameterverdeling distributieleidingen van ZLT-net met gestapelde en grondgebondenwoningen.

Diameter	Gestapelde woningen	Grondgebonden woningen
D [mm]	L [m]	L [m]
25	0,00	7,02
40	0,70	0,56
50	0,95	0,76
63	1,59	1,27
75	1,04	0,83
90	1,26	1,01
110	1,43	1,14
125	0,86	0,69
140	0,52	0,41
160	0,82	0,65
180	0,40	0,32
200	0,10	0,08
225	0,27	0,21
250	0,05	0,04
Totale lengte	10	15

In deze studie is gebruik gemaakt van drie type leidingen om het distributienet te modelleren. Door de lage aanvoertemperatuur van de ZLT-netten is geen isolatie vereist, en daarom is enkel gebruik gemaakt van niet geïsoleerde HDPE leidingen. Voor de MT- en LT-netten is isolatie vereist. De leidingen met een diameter lager dan 80 mm zijn gemaakt van PEX-PUR-LLD-PE (Calpex) leidingen, de leidingen met een diameter vanaf 80 mm zijn gemaakt van Staal-PUR-PE (VPS) leidingen.

In Tabel 3.5 is weergegeven welke diameterverdeling is gebruikt voor deze studie, de gekozen diameter per type leiding en de leidinglengte die is gebruikt. Om de berekeningen te vereenvoudigen, zijn een aantal diameters samengevoegd.

Tabel 3.5

Diameterverdeling, leidingtype en leidinglengte

	MT- en LT-netten		ZLT-netten	Grondgeboden woningen	Gestapelde woningen
	Calpex	VPS	HDPE	Lengte	Lengte
Diameterverdeling	mm	mm	mm	m	m
25	25		27	7,0	0,0
40 + 50	50		42	1,3	1,7
63 + 75	63		76	2,1	2,6
90 + 110 + 125		114	114	2,8	3,6
140 + 160 + 180		168	168	1,4	1,7
220 + 225 + 250		219	219	0,3	0,4
Totaal				15	10

Distributiepompen en techniekruimte

Het vermogen dat de distributiepompen moeten leveren, is in de orde van 2% van het geleverde thermische vermogen (Deltares, 2022). Het benodigde pompvermogen per warmtenetconfiguratie is weergegeven in Tabel 3.6.

In deze studie is een distributiepomp gemodelleerd met een schaalbaar vermogen tussen de 4-37 kW_e (zie Sectie 3.2.1.2.2). De distributie is daarom verzorgd door een zo'n groot mogelijk aantal pompen met een vermogen van 37 kW_e, en een enkele unit die het 'restvermogen' levert¹³. Voor de warmtenetten in deze studie, is dit een conservatieve keuze. Een gebruikelijk aantal distributiepompen is voor degelijke netten 1 à 2 (uit interview met expert).

Voor het situeren van de distributiepompen en eventuele andere benodigde apparatuur, is een oppervlakte van 4 m² aan technische ruimte gerekend per distributiepomp. De technische ruimte is gemodelleerd zoals omschreven in sectie 3.2.1.

Tabel 3.6

Overzicht benodigde vermogens van de distributiepompen

Warmtenetconfiguraties	Benodigd pompvermogen (kW _e)	Units van 37 kW _e (aantal)	1 unit van vermogen (kW _e)	Oppervlakte techniekruimte (m ²)
S1 MT-net, gestapeld	146	3	35	13
S2 MT-net, grondgebonden	156	4	8	17
S3 LT-net, gestapeld	116	3	5	13
S4 LT-net, grondgebonden	124	3	13	13
S5 ZLT-net, gestapeld	62	1	25	5
S6 ZLT-net, grondgebonden	54	1	17	5

¹³ Voorbeeld: in het MT-net met grondgebonden bouw moet een vermogen van 146 kW geleverd worden. Het aantal distributiepompen van 37 kW is dan 3 (146/37 = 3,9). Het 'restvermogen' is dan 146 - 37*3 = 35 kW. Het vermogen in deze configuratie wordt daarmee geleverd door 3 units van 37 kW en 1 unit van 35 kW.

Afleverset

De afleverset is de schakel tussen het warmtenet en de verwarmingen/warmwaterkraan in de woningen. Voor de MT-netten en de LT- en ZLT-netten met gestapelde bouw zijn afleversets nodig met tapwatervoorziening. In het LT-net met grondgebonden bouw voorziet de elektrische ketel in de tapwatervoorziening in de woning. In deze configuratie is daarom enkel een afleverset zonder tapwatervoorziening nodig. Voor het ZLT-net met grondgebonden bouw is helemaal geen afleverset nodig, omdat de warmtepomp in de woning deze functie overneemt. Een overzicht van het type en aantal afleversets per warmtenetconfiguratie is weergegeven in Tabel 3.7.

Tabel 3.7

Afleverset: type en aantal stuks per warmtenetconfiguratie.

Afleverset	Eenheid	S1 MT-net, gestapeld	S2 MT-net, grondgebonden	S3 LT-net, gestapeld	S4 LT-net, grondgebonden	S5 ZLT-net, gestapeld	S6 ZLT-net, grondgebonden
Afleverset, <u>inclusief</u> voorziening tapwater	Stuks	1000	1000	1000		1000	
Afleverset, <u>exclusief</u> voorziening tapwater	Stuks				1000		

3.2.2.2 Modelling en zwaartepuntanalyse deelproducten - afleverset

Productomschrijving

Voor dit onderzoek is een LCA model opgesteld van 1 afleverset met tapwatervoorziening en 1 afleverset zonder tapwatervoorziening. De afleversets hebben een levensduur van 15 jaar.

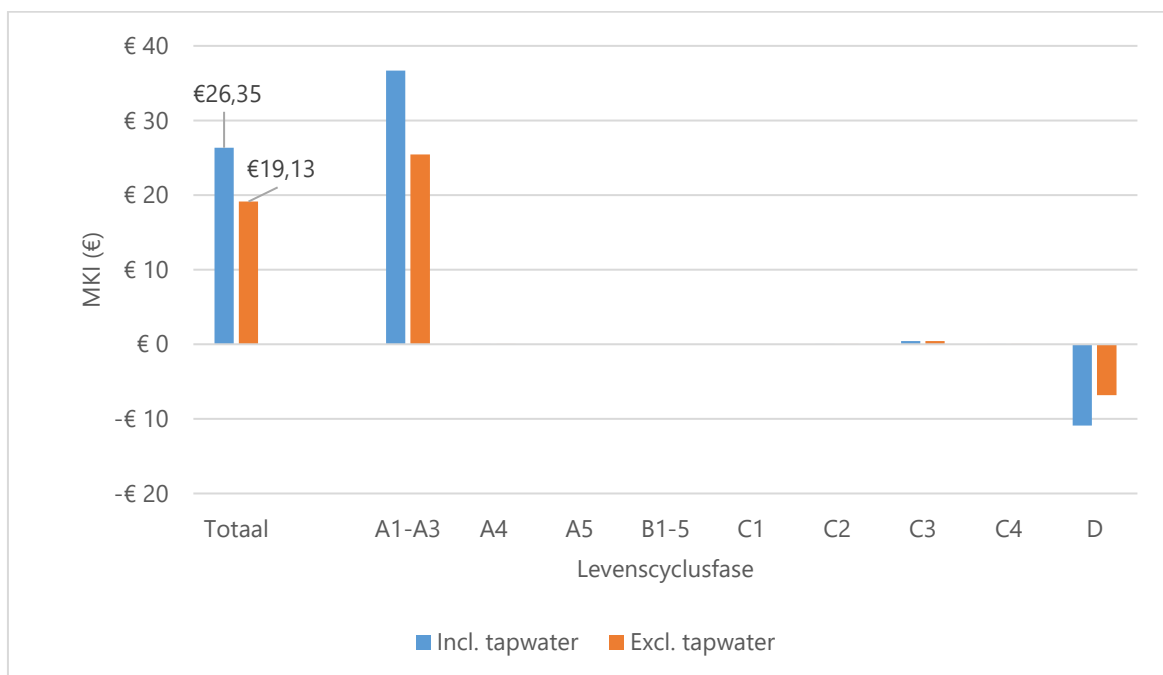
Toelichting levensfasen

De afleversets zijn gemodelleerd op basis van de NMD-productkaarten *Externe warmtelevering, afleverset* en *Externe warmtelevering; toeslag op afleverset*. Tevens zijn de forfaitaire waarden van de Bepalingsmethode zijn gebruikt voor het modelleren van het transport (A4, C2) en einde levensduur, afvalscenario en baten en lasten buiten systeemgrenzen (C3, C4 en D). Verder is voor de elektronische componenten gebruikgemaakt van het nieuwe verwerking-scenario einde leven van elektronica, zoals beschreven in sectie 3.2.3.2.

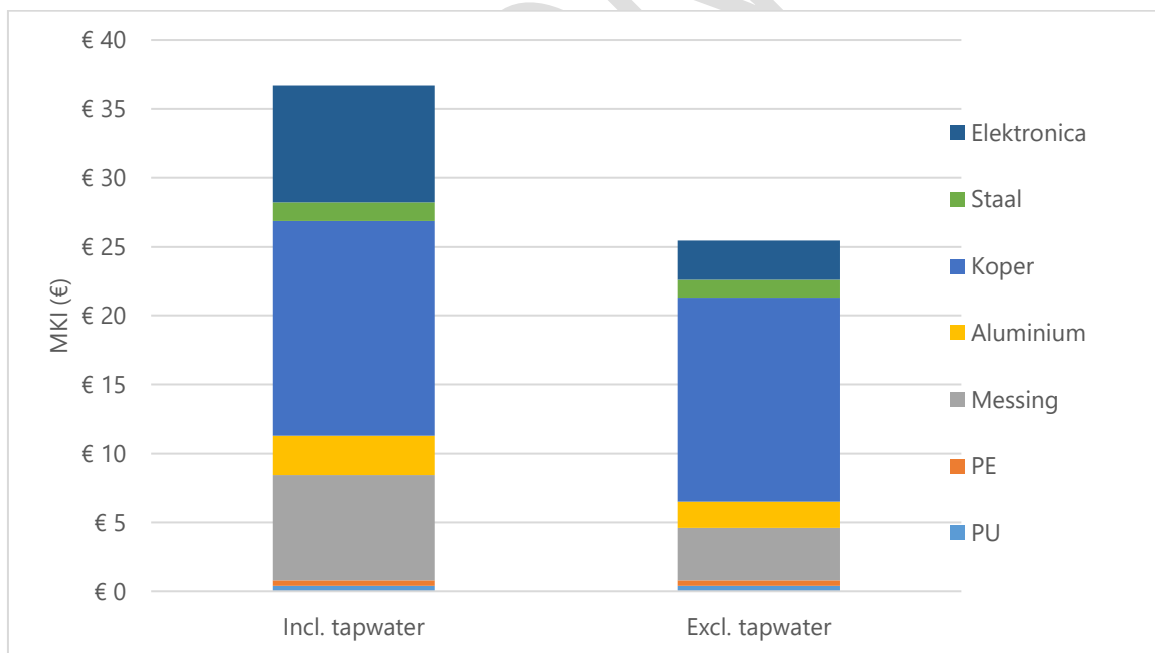
Het decompositietabel van de afleverset is weergegeven bijlage II: LCI-LCA warmtenetconfiguraties, *tabblad afleverset*.

Zwaartepuntanalyse

In Figuur 3.9 is de MKI van de afleverset, inclusief en exclusief tapwatervoorziening, uitgezet tegenover de levensfasen. De productiefase (A1-A3) heeft voor zowel de afleverset inclusief tapwatervoorziening (139%) als voor exclusief tapwatervoorziening (133%) het hoogste aandeel van de MKI. In Figuur 3.10 is te zien dat de hoogste milieulast van de productiefase afkomstig is van koper, gevolgd door messing en de elektronische componenten. De baten uit module D zijn grotendeels afkomstig van het uitsparen (door middel van recycling) van messing, koper, aluminium en goud (uit elektronische componenten).



Figuur 3.9
Zwaartepuntanalyse afleverzet inclusief en exclusief tapwatervoorziening, MKI per levensfase.



Figuur 3.10
Zwaartepuntanalyse afleverzet inclusief en exclusief tapwatervoorziening, MKI per proces/product in de productiefase (A1-A3)

3.2.3 Warmtepomp

3.2.3.1 Opbouw warmtenetconfiguraties

De opwaardering van de warmte, om te voorzien in de basislast, wordt geleverd door warmtepompen. Het vermogen dat de warmtepompen moeten leveren en het aantal units dat nodig zijn, varieert per configuratie. In de MT- en LT-netten vindt enkel opwaardering plaats in de *warmtecentrale*. In de ZLT-netten vindt enkel opwaardering plaats op *blok-/woningniveau*.

In de studie van Deltares is in de ZLT-netten uitgegaan van een combinatie warmtepomp, welke zowel de opwaardering voor de basislast en pieklast voorziet. Er is geen toereikende data beschikbaar omtrent de materialisatie van een combinatiewarmtepomp, waardoor deze niet gemodelleerd kan worden. Voor het doel van deze studie, is daarom aangenomen dat de materialisatie van een combinatiewarmtepomp vergelijkbaar is met die van een reguliere warmtepomp en elektrische ketel samen.

Om de materialisatie van de elektrische ketel en warmtepomp te bepalen, moet het vermogen van de twee afzonderlijke apparaten bepaald worden. Het vermogen dat de combinatieketel zou leveren, is daarom opgesplitst in een vermogen te leveren door de warmtepomp en door de elektrische ketel. Daarbij levert de warmtepomp de opwaardering tot basislast en de elektrische ketel de pieklast. In Tabel 3.8 is te zien hoe het totale vermogen dat door de combinatiepomp geleverd zal worden, is opgedeeld in het vermogen van een afzonderlijke elektrische ketel en warmtepomp. Deze vermogens zijn enkel gebruikt voor het bepalen van de materialisatie, niet voor het elektriciteitsverbruik¹⁴. Vanaf hier zal de combinatie warmtepomp weergegeven worden als een reguliere warmtepomp (in deze sectie) en een elektrische ketel (in sectie 3.2.4).

Tabel 3.8

Bepaling vermogen van warmtepomp en ketel voor ZLT-netten

Configuratie	Vereist vermogen Totaal (kW _e)	Vereist vermogen basislast (kW _e)	Vereist vermogen pieklast (kW _e)	Vermogen geleverd door Warmtepomp (KW _{th} ; COP S5 = 4,9, COP S6 = 3,7)	Vermogen geleverd door ketel (kW _e ; COP = 1)
S5 ZLT-net, gestapeld	800	600	200	2940	200
S6 ZLT-net, grondgebonden	1000	800	200	2960	200

In deze Tabel 3.8 is het totale vermogen, dat in de studie van Deltares geleverd wordt door een combinatiewarmtepomp, opgedeeld in het vermogen dat geleverd moet worden door een afzonderlijke warmtepomp en elektrische ketel. Deze vermogens zijn gebruik voor het bepalen van de materialisatie, maar hebben geen invloed op het berekende elektriciteitsverbruik.

14 ¹⁴ Het elektriciteitsverbruik van de warmtenetten 1 op 1 overgenomen uit de studie van Deltares, zie sectie 3.2.7.

De warmtepompen in de *warmtecentrale* en op *blokniveau* voorzien de opwaardering voor 1000 woningen en leveren daarom individueel een hoog vermogen. De warmtepompen op *woningniveau* voorzien de opwaardering van een enkele woning en leveren daarom een laag vermogen.

In deze studie is een warmtepomp opgenomen met een schaalbaar thermisch vermogen tussen de 3-162 kW_{th}. De opwaardering in de *warmtecentrale* en op *blokniveau* wordt daarom geleverd door een aantal units van 162 kW_{th} en een enkele unit die het 'restvermogen' levert¹⁵. De opwaardering op *woningniveau* wordt geleverd door duizend units van 2,96 kW_{th}.

Een overzicht van de opwaardering tot basislast met behulp van warmtepompen is weergegeven in Tabel 3.9. Het vereiste vermogen voor het leveren van de basislast is overgenomen uit de studie van Deltares (2022).

Tabel 3.9

Opwaardering tot basislast met warmtepompen

Configuratie	Locatie	Vereist vermogen basislast (kW _{th}) ¹⁶	Units van 162 kW _{th} (aantal)	1 unit van vermogen (kW _{th})	1000 units van vermogen (kW _{th})
S1 MT-net, gestapeld	Warmtecentrale	2200	13	114	0
S2 MT-net, grondgebonden	Warmtecentrale	2590	15	160	0
S3 LT-net, gestapeld en S4 LT-net, grondgebonden	Warmtecentrale	1960	12	16	0
S5 ZLT-net, gestapeld	Blokniveau	2940	18	24	0
S6 ZLT-net, grondgebonden	Woningniveau	2960	0	0	2,96

3.2.3.2 Modelleren en zwaartepuntanalyse deelproduct – Warmtepomp

In deze sectie is de modellering en zwaartepuntanalyse van het deelproduct *Warmtepomp* omschreven.

De volgende onderdelen zijn beschreven:

1. Productomschrijving
2. Toelichting levensfasen
3. Nieuwe verwerking-scenario's einde leven
4. Schaling
5. Zwaartepuntanalyse

15 ¹⁵ Voorbeeld: in het MT-net met gestapelde bouw moet een vermogen van 2200 kW_{th} geleverd worden. Het aantal warmtepompen van 162 kW_{th} is dan 13 (2200/162 = 13,6). Het 'restvermogen' is dan 2200 – 162*13 = 114 kW_{th}. Het vermogen in deze configuratie wordt daarmee geleverd door 13 units van 162 kW_{th} en 1 unit van 114 kW_{th}.

16 ¹⁶ Het vereiste vermogen voor het leveren van de basislast is overgenomen uit de studie van Deltares (2022).

Productomschrijving

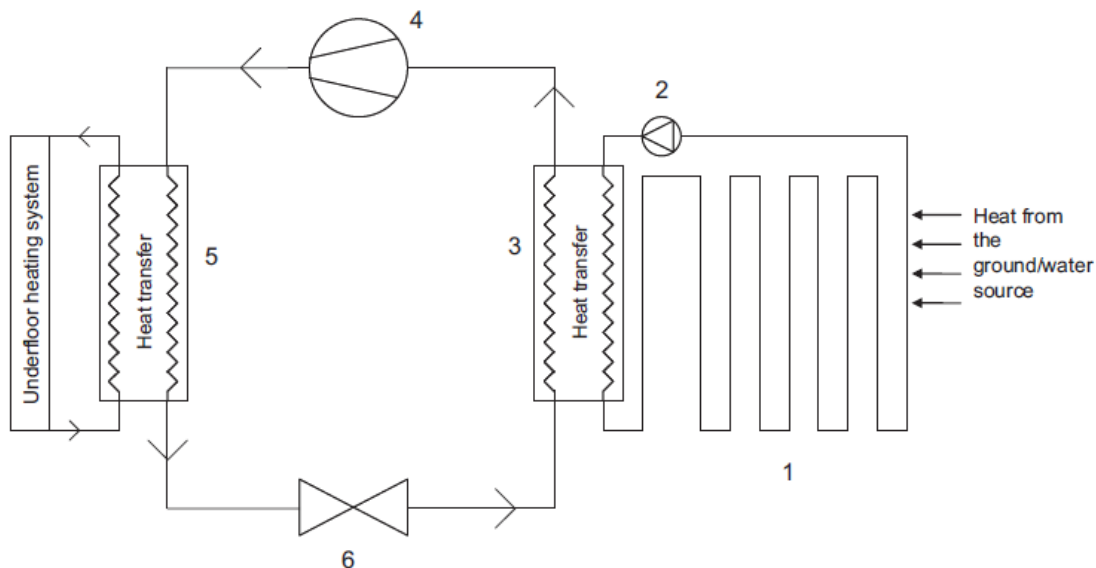
Voor dit onderzoek is de huidige categorie 3 NMD warmtepomp productkaart verbeterd voor het berekenen van de milieu-impact van water-water warmtepompen. In tegenstelling tot de huidige productkaart, is dit model van de warmtepomp schaalbaar op basis van het geleverde thermische vermogen. Het referentieproduct heeft een vermogen van 10 kW_{th} en de productkaart is schaalbaar van 3 tot 162 kW_{th}. De levensduur van de warmtepomp is 15 jaar.

Een schematische weergave van een water-water warmtepompsysteem is weergegeven in Figuur 3.11.

In deze figuur zijn de volgende onderdelen te zien:

- een *warmtepompunit*, welke bestaat uit een compressor, verdamper en condensor;
- een *warmtebron* met warmtewisselaar;
- een *vloerverwarming-systeem* (underfloor heating system).

Het vloerverwarming-systeem is geen onderdeel van het warmtepompsysteem, en is daarom niet meegenomen in deze studie. De warmtebron in deze studie betreft de OBES (in het figuur weergegeven als *water source*) en is daarom, geen onderdeel van dit model van de warmtepomp. Dit geldt ook voor de circulatiepomp.



Figuur 3.11

Schematische weergave van een water-water warmtepompsysteem

Onderdelen: 1. Warmtebron; 2. Circulatiepomp; 3. Verdamper; 4. Compressor; 5. Condensor; 6. Expansieklep [Afbeelding van Greening, B. en Azapagic, A. (2012)].

Toelichting levensfasen

In onderstaande secties zijn alle levensfasen toegelicht. Het decompositietabel van de warmtepomp is weergegeven bijlage II: LCI-LCA warmtenetconfiguraties, *tabblad warmtepomp - WW*.

Productiefase (A1-3)

Warmtepompunit

De hoofdelementen van een warmtepomp zijn de behuizing, verdamper, compressor, condensor en koelvloeistof. De compressor, behuizing, verdamper en condensor zijn gemaakt van staal. De buizen, elektrische kabels en expansieklep zijn gemaakt van koper. De kabels zijn geïsoleerd met polyvinylchloride (PVC). Er wordt aangenomen dat de helft van het staal gevormd wordt tot platen, en de andere helft tot buizen (Caduff et al., 2014). Tevens nemen wij voor koper aan dat de helft gevormd wordt tot platen, en de andere helft tot draden.

De toegepaste koelvloeistof is R-134a. De koelsystemen worden in de fabriek gevuld. Tijdens de fabricage van de warmtepompunit vindt een verlies plaats van 3% van de koelvloeistof. Aangenomen wordt dat de assemblage van de warmtepomp een verbruik vereist van 337 MJ elektriciteit en 875 MJ aardgas. De benodigde hoeveelheden van de processen en materialen zijn overgenomen uit de warmtepomp LCA van Greening en Azapagic (2012).

Voor het verlies van 3% van de koelvloeistof (tijdens de fabricage), wordt aangenomen dat deze hoeveelheid verdampt. Om de verdamping te modelleren, is het Ecoinvent (3.6) proces *Used refrigerant R134a {GLO} | treatment of used refrigerant R134a, venting | Cut-off, U* gebruikt voor koelvloeistof R-134a, welke de emissie naar lucht bevat van 1 kg *Ethane, 1,1,1,2-tetrafluoro-, HFC-134a*. Voor de verdamping van 1 kg propaan is een nieuw proces gemaakt (in SimaPro, database Ecoinvent 3.6), welke enkel de emissie naar lucht bevat van 1 kg propaan (C₃H₈).

Elektronica

Wij nemen aan dat de elektronische componenten in een warmtepomp vergelijkbaar zijn met die van een split-type airconditioningunit. Bij gebrek aan gegevens over elektronica bij grotere vermogens, nemen wij aan dat de elektronica voor de besturing van de warmtepomp onafhankelijk is van de grootte van het apparaat, binnen het vermogensbereik dat hier onderzocht is.

De massa en de typen elektronische componenten nemen wij daarom over van de MIDEA split-type airconditioner, type MSAGBU-12HRFN8-QRD0GW (Midea, 2022). Hierbij is onderscheid gemaakt tussen de elektronica voor de indoor en outdoor unit. Enkel de elektronica van de indoorunit is meegenomen in de materialisatie van de warmtepompunit.

De beschreven elektronische componenten zijn: *elektrolytische condensator, spoel en anders*. De elektrolytische condensator en de spoel modelleren wij met het NMD proces *0303-fab&Elektronica, passieve componenten (o.b.v. Electronic component, passive, unspecified {GLO}) market for | Cut-off, U* en de categorie *anders* is gemodelleerd met het proces *0405-fab&Elektronica, printplaat, inclusief elektronische componenten (o.b.v. Printed wiring board, surface mounted, unspecified, Pb free {GLO}) market for | Cut-off, U*.

Vanwege de grote invloed op het resultaat is de hoeveelheid elektronica voorgelegd aan experts en fabrikanten verbonden aan de Vereniging Warmtepompen (branchevereniging). Er bleken over dit onderwerp slechts beperkt gegevens beschikbaar te zijn, maar de weinige gegevens die konden worden verstrekt over de hoeveelheid elektronica, gaven een vergelijkbare hoeveelheid aan. Ook is aangegeven dat de hoeveelheid elektronica vrijwel gelijk blijft bij grotere vermogens en dat enkel de spoelen/transformatoren iets groter kunnen worden. Dit valt onder passieve componenten, die relatief beperkte invloed hebben op het resultaat. Op basis van deze expertopinie worden de gehanteerde uitgangspunten en hoeveelheden representatief geacht.

Transportfase (A4, C2)

Forfaitaire transportafstanden volgens de bepalingsmethode zijn toegepast:

- 50 km bulktransport naar werk (A4)
- 150 km overig transport naar werk (A4)
- 50 km transport voor einde-leven naar sorteerlocatie/recycling (C2)
- 100 km transport totaal voor einde-leven naar stort (C2)
- 150 km transport totaal voor einde-leven naar afvalverbrandingsinstallatie (AVI) (C2)

Constructiefase (A5)

Het installeren van de warmtepompunit zonder warmte-extractiesysteem vereist minimaal werk. Het gaat met name om manueel werk, en elektriciteitsgebruik voor monteren (bijvoorbeeld met een boormachine) en testen. Deze impact is daarom verwaarloosbaar en niet meegenomen in dit model.

Gebruiksfase (B1-B5)

Gebruik (B1)

Tijdens de gebruiksfase vindt er verdamping plaats van lekkende koelvloeistof uit het circuit van de warmtepompunit. Het verlies is gesteld op 2% per jaar.

Dit lekpercentage was in het verleden een stuk hoger, er wordt bijvoorbeeld in de gehanteerde literatuur Caduff et al. (2014) en Greening & Azapagic (2012) een percentage van 6% aangehouden. Vanwege de grote invloed op het milieuprofiel van deze lekkage is over dit percentage tevens navraag gedaan bij experts en fabrikanten verbonden aan de Vereniging Warmtepompen. Daarbij werd aangehaald dat hier circa 10 jaar geleden onderzoek naar is gedaan waarbij destijds bleek dat per jaar gemiddeld 7% van de koelvloeistof wegloopt.

Het bleek dat als er een lekkage ontstaat in kleine systemen veelal de volledige inhoud verdwijnt tegenover gemiddeld 25% van de inhoud bij grotere, op maat gemaakte installaties. Dit zijn incidentele lekkages, 10% van de installaties zorgen daarbij voor het volledige verlies.

Sindsdien is de regelgeving aangescherpt en schrijft de EN378 (2016) o.a. voor dat bij de productie van apparatuur tot 5 kg koudemiddelvulling een lekttest verplicht is, met een maximaal lekverlies van 3 of 5 gram/jaar. Daarom wordt een gemiddeld lekpercentage van 2% aannemelijk geacht voor de huidige generatie warmtepompen. Er wordt aangenomen dat de verloren koelvloeistof door lekkage jaarlijks wordt bijgevuld, waardoor het lekverlies constant is.

Onderhoud (B2), Reparaties (B3) en Hernieuwing (B4)

Onder normale omstandigheden zijn geen onderhoudsprocessen, reparaties en hernieuwingen voorzien tijdens de levensduur van de warmtepompen. De impact van deze fasen is daarom nul.

Sloopfase (C1)

Er wordt aangenomen dat de sloopfase vergelijkbare processen vereist als de installatiefase. Daarnaast wordt er aangenomen dat de koelvloeistof in deze fase uit de koelsystemen opgenomen wordt (zie nieuwe einde leven scenario's in onderstaande sectie).

Einde levensduur, afvalscenario en baten en lasten buiten de systeemgrenzen (C3, C4 en D)

Aan het einde van de levensduur, worden de producten gedemonteerd en verzameld. De producten worden vervolgens getransporteerd naar een sorteerlocatie, waar ze ontmanteld worden en de individuele materialen gesorteerd worden. De individuele materialen kunnen gerecycled worden, verbrand (AVI) of gestort worden. De materialen die worden gerecycled, worden gemodelleerd totdat het einde van de afvalfase is bereikt. De materialen die worden verbrand, worden verwerkt in afvalverbrandingsinstallaties met energierugwinning. Voor het modelleren van deze fasen wordt gebruik gemaakt van de forfaitaire waarden voor verwerking-scenario's einde leven van de Bepalingsmethode (versie mei 2022). Voor koelvloeistof R-134 en de elektronische componenten zijn nieuwe verwerking-scenario's einde leven gemaakt. De nieuwe scenario's worden in de volgende sectie toegelicht.

Nieuwe verwerking-scenario's einde leven

Voor de **koelvloeistof R-134a** is, bij gebrek aan een passend forfaitair scenario, een nieuw verwerking-scenario einde leven gemaakt. De NEN EN 378 schrijft voor dat koelvloeistoffen niet vermengd mogen worden, en gescheiden moeten worden bewaard (Rath, 2017). Daarom wordt aangenomen dat de koelvloeistof in de sloopfase (C1) opgenomen worden uit de koelsystemen. Om de koelvloeistof uit het koelsysteem te krijgen, is speciale apparatuur nodig. Deze apparatuur verbruikt elektriciteit. Het duurt ongeveer 20 minuten om 10 kg aan koelvloeistof op te nemen uit het koelsysteem met de *Robinair 34988NI-230 Premium A/C Machine* met een verbruik van 1380 W (Robinair, z.d.). Hierbij kan 98,5% van de koelvloeistof teruggewonnen worden. Andere apparaten met dezelfde functie van Robinair hebben vergelijkbare vermogens, vultijden en efficiëntie.

In overeenstemming met het Ecoinvent (3.6) proces *Used refrigerant R134a {GLO} | market for | Cut-off, U*, wordt ervan uitgegaan dat, na opname uit de koelsystemen, 40% van de koelvloeistof verbrand wordt en 60% geregenereerd wordt. Koelvloeistof R-134a kan geregenereerd worden bij gespecialiseerde locaties. De koelvloeistof heeft na de regeneratiebewerkingen dezelfde kwaliteit als het originele product (Jaramillo, 2022; Ecoinvent, z.d.). Hiervoor is een regeneratiemachine nodig, welke elektriciteit verbruikt. Tijdens dit proces verdampt 0,1% van de vloeistof, en 10% moet als restafval verbrand worden in een Afvalverbrandingsinstallatie (AVI) (Ecoinvent, z.d.). Om dit proces te modelleren, gebruiken wij het Ecoinvent (3.6) proces *Used refrigerant R134a {GLO} | treatment of used refrigerant R134a, reclamation | Cut-off, U*. Wanneer de koelvloeistof te sterk vervuild is, kan deze niet meer geregenereerd worden en zal deze vernietigd moeten worden door middel van verbranding (Atlantic, 2018). Hiervoor gebruiken wij het Ecoinvent (3.6) proces *Used refrigerant R134a {GLO} | treatment of used refrigerant R134a, final disposal | Cut-off, U*.

De opbouw van het verwerking-scenario einde leven van R-134a is weergegeven in Tabel 3.10.

Tabel 3.10

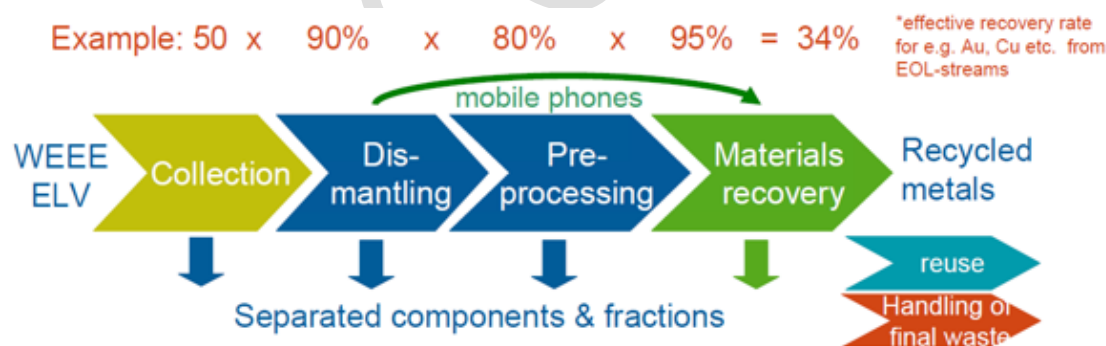
Verwerking-scenario einde leven van R-134a

Verwerking-scenario einde leven R-134a – 1 kg					
Fase	Proces	Milieu-profiel	Hoeveelheid	Eenheid	Uitgangspunten
C1	Opnemen koelvloeistof uit koelsysteem	0494-pro&Elektriciteit, Grijs, bij consument, per kWh	0,046	kWh	Het opnemen van de koelvloeistof uit het koelsysteem duurt ongeveer 20 minuten voor 10 kg koelvloeistof, en gebeurt met behulp van een machine met een vermogen van 1380 W.
C1	Verlies tijdens opnemen koelvloeistof	Used refrigerant R134a {GLO} treatment of used refrigerant R134a, venting Cut-off, U	0,015	kg	De opname van de koelvloeistof heeft een efficiëntie van 98,5%, d.w.z. dat 1,5% verdampt.
C4	AVI	Used refrigerant R134a {GLO} treatment of used refrigerant R134a, final disposal Cut-off, U	0,394	kg	40% van de van de opgenomen koelvloeistof (0,985 kg) gaat naar de AVI. Dit proces bevat verdamping tijdens afvalverwerking (0,1%) en verbranding van gevaarlijk afval.
D	Regeneratie processen	Used refrigerant R134a {GLO} treatment of used refrigerant R134a, reclamation Cut-off, U	0,591	kg	60% van de opgenomen koelvloeistof (0,985 kg) kan geregenereerd worden. Dit proces bevat het elektriciteitsverbruik, 0,1% verdamping tijdens regeneratie en 10% verbranding van gevaarlijk afval.
D	Uitgespaard product	0489-fab&Koudemiddel-R134a (o.b.v. "Refrigerant R134a {GLO} market for Cut-off, U")	-0,553	kg	Het geregenereerde product heeft dezelfde kwaliteit als het originele product. 10,1% is verloren tijdens regeneratie.

Voor de **elektronische componenten** (*Printed wiring board (PWB)* en *passieve componenten*) is, bij gebrek aan een passend forfaitair scenario, een nieuw verwerking-scenario einde leven gemaakt.

De representativiteit van het forfaitaire afvalscenario *metalen, overig/gemengd* (5% stort, 5% AVI, 90% recycling), is beoordeeld binnen de context van elektronische apparatuur. Hiertoe zijn de verwerkingscijfers uit het onderzoek "De Nederlandse AEEA-stromen 2020" (Baldé et al., 2020) toegepast. Uit de cijfers blijkt, op product niveau, voor 'grote apparatuur (excl. PV) en 'kleine apparatuur', dat de gezamenlijke fractie die is ingezameld en wordt geëxporteerd voor hergebruik, uitkomt op $\approx 85\%$. Van het overige deel stromen is onbekend hoe deze is verwerkt, of worden afgedankt in afvalbakken. Op materiaal niveau beschouwd zijn de forfaitaire percentages voor recycling van 90% aannemelijk en voor de huidige toepassing in categorie 3 productkaarten acceptabel.

Tijdens de recyclingprocessen vinden verliezen plaats, waardoor het effectieve recyclingpercentage van bruikbare materialen, zoals koper en goud, in feite lager ligt dan 90%. In Figuur 3.12 is een voorbeeld te zien van de recycling van mobiele telefoons, zoals onderzocht door Hagelüken en Umicore Precious Metals Refining (2007). Hierin is te zien dat een verzamelingspercentage van 50% voor recycling, resulteert in een effectief recyclingpercentage van 34%. Wij gaan uit van dezelfde verliezen tijdens de recyclingprocessen. Als resultaat verkrijgen wij, bij een verzamelingspercentage van 90% voor recycling, een effectief recyclingpercentage van 61,6%, welke wij afronden naar 60%. De verliezen die plaatsvinden tijdens recycling, tellen wij op bij het percentage AVI. Het resultaat is 5% stort, 35% AVI en 60% recycling.



Figuur 3.12

Voorbeeld van berekening effectief recyclingpercentage

Bron: Hagelüken, C. & Umicore Precious Metals Refining. (2007). *Metals Recovery from e-scrap in a global environment: Technical capabilities, challenges & experience gained* [Presentatieslides]. <https://docplayer.net/7250504-Metals-recovery-from-e-scrap-in-a-global-environment-technical-capabilities-challenges-experience-gained.html>

Om baten en lasten te kunnen declareren in module D, is voor de processen *0405-fab&Elektronica, printplaat, inclusief elektronische componenten (o.b.v. Printed wiring board, surface mounted, unspecified, Pb free {GLO}| market for | Cut-off, U)* en *0303-fab&Elektronica, passieve componenten (o.b.v. Electronic component, passive, unspecified {GLO}| market for | Cut-off, U)* het massa-aandeel van koper, goud, lood, nikkel, zilver, tin, zink en ruwijzer bepaald (zie Bijlage I). Vervolgens is er per materiaal berekend wat het aandeel is van de MKI. Voor het PWB proces hebben koper en goud samen een aandeel van 99% van de MKI, en voor het proces van passieve componenten een aandeel van 86%. Daarom worden enkel koper en goud meegenomen voor het modelleren van module D. Het massa-aandeel van koper is 67,5% van het PWB proces en 3% van het passieve componenten proces. Het massa-aandeel van goud is 0,2% van het PWB proces en 0,01% van het passieve componenten proces.

In Tabel 3.11 is de opbouw van het verwerking-scenario einde leven van elektronica weergegeven. Hierbij is een onderscheid gemaakt voor de *Printed wiring board* en *Passieve componenten* processen.

Tabel 3.11

Verwerking-scenario einde leven van elektronica

Verwerking-scenario einde leven elektronica (<i>Printed wiring board</i> en <i>passieve componenten</i>) – 1 kg						
Fase	Proces	Milieuprofiel	Hoeveelheid voor <i>Printed Wiring Board (PWS)</i>	Hoeveelheid voor <i>Passieve componenten</i>	Eenheid	Uitgangspunten
C3	Behandeling voor recycling	Waste electric and electronic equipment {GLO} treatment of, shredding Cut-off, U	0,90	0,90	kg	90% van de elektronica wordt ingezameld voor recycling. Bevat afvalverwerkingsfabriek, elektriciteitsverbruik en emissies naar lucht van recyclingprocessen
C4	AVI	Residue from mechanical treatment, industrial device {RoW} treatment of, municipal waste incineration Cut-off, U	0,35	0,35	kg	5% van de elektronica gaat rechtstreeks naar de AVI. Daarbovenop komt 30% afkomstig van de recyclingprocessen. Bevat energieverbruik, emissies naar lucht en afval van verbranding van industriële apparaten
C4	Stort	Waste plastic, consumer electronics {GLO} treatment of waste plastic, consumer electronics, sanitary landfill, wet infiltration class (500mm) Cut-off, U	0,05	0,05	kg	5% van de elektronica belandt op een stortplaats. Bevat o.a. stortplaats, energieverbruik en emissies naar lucht en water van consumentenelektronica

Verwerking-scenario einde leven elektronica (<i>Printed wiring board en passieve componenten</i>) – 1 kg						
Fase	Proces	Milieuprofiel	Hoeveelheid voor <i>Printed Wiring Board (PWS)</i>	Hoeveelheid voor <i>Passieve componenten</i>	Eenheid	Uitgangspunten
D	Uitgespaarde producten	0277-reD&Module D, koper, per kg NETTO geleverd schroot (vermeden: Copper {RER} production, primary Cut-off, U)	0,209374	0,009337	kg	o.b.v. 29% secundaire content en 67,5% massa-aandeel van PWB en 3,0% van passieve componenten
		Gold, unrefined {RoW} gold mine operation and gold production, unrefined Cut-off, U	-0,001217	-0,000041	kg	o.b.v. 0% secundaire content en 0,2% massa-aandeel van PWB en 0,01% van passieve componenten

Schaling

De warmtepomp is schaalbaar naar het thermische vermogen tussen de 3 – 162 kW_{th}, referentiewaarde is 10 kW_{th}.

De schalingformules om de warmtepomp te schalen, zijn overgenomen van Caduff, M. et al. (2014), welke empirische schalingsformules hebben afgeleid met behulp van data van 265 warmtepompen met een thermisch vermogen tussen de 3 en 162 kW_{th}. Er is onderscheid gemaakt tussen de schaling van de koelvloeistof, de elektronische componenten en de schaling van de overige componenten. Er is aangenomen dat de massa van de elektronische componenten niet mee schaal met het vermogen, omdat hier enerzijds geen informatie over is en anderzijds de aansturing van een groter model in principe met dezelfde hoeveelheid componenten zou moeten kunnen plaatsvinden. De gebruikte schalingsformules zijn weergegeven in Tabel 3.12 en de resulterende MKI voor de minimum-, maximum-, en referentiewaarde zijn weergegeven in Tabel 3.13. De totale massa van de warmtepompunit kan berekend worden met $M_{\text{totaal}} = M_{\text{schaalbaar}} + RF + M_{\text{elektronica}}$.

Tabel 3.12

Schalingsformules voor warmtepomp

Schalingsformule	B (95% CI)	a (95% CI)	R ²	SE
$M_{\text{schaalbaar}} = a * P^b$	0,55	39,81	0,79	0,09
$RF = a * P^b$	0,81	0,39	0,87	0,06
$M_{\text{elektronica}} = C$	De elektronische componenten hebben een constante massa			

De empirisch berekende schalingsfactoren zijn weergegeven als a en b , R^2 is de determinatiecoëfficiënt, $M_{\text{schaalbaar}}$ de massa van de schaalbare onderdelen van de warmtepomp, exclusief koelvloeistof, in kg, RF de massa van de koelvloeistof in kg, P het thermisch vermogen in kW, CI het betrouwbaarheidsinterval en SE de standaardfout. Bron: Caduff, M. et al. (2014).

Tabel 3.13

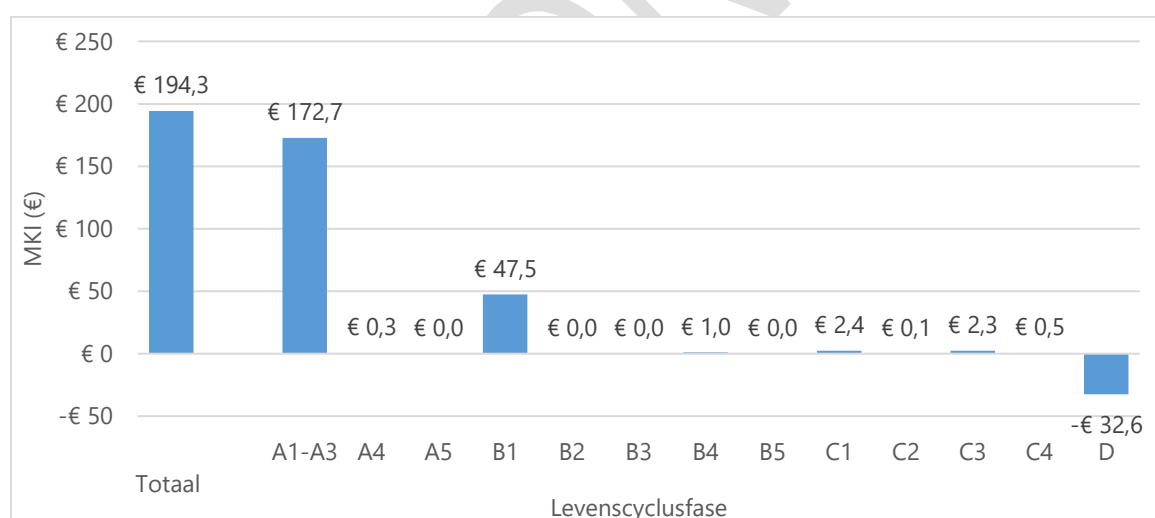
MKI warmtepomp bij minimaal-, referentie- en maximaalvermogen

Vermogen (kW _{th})	MKI (€)
3	102
10	194
162	1.109

Zwaartepuntanalyse

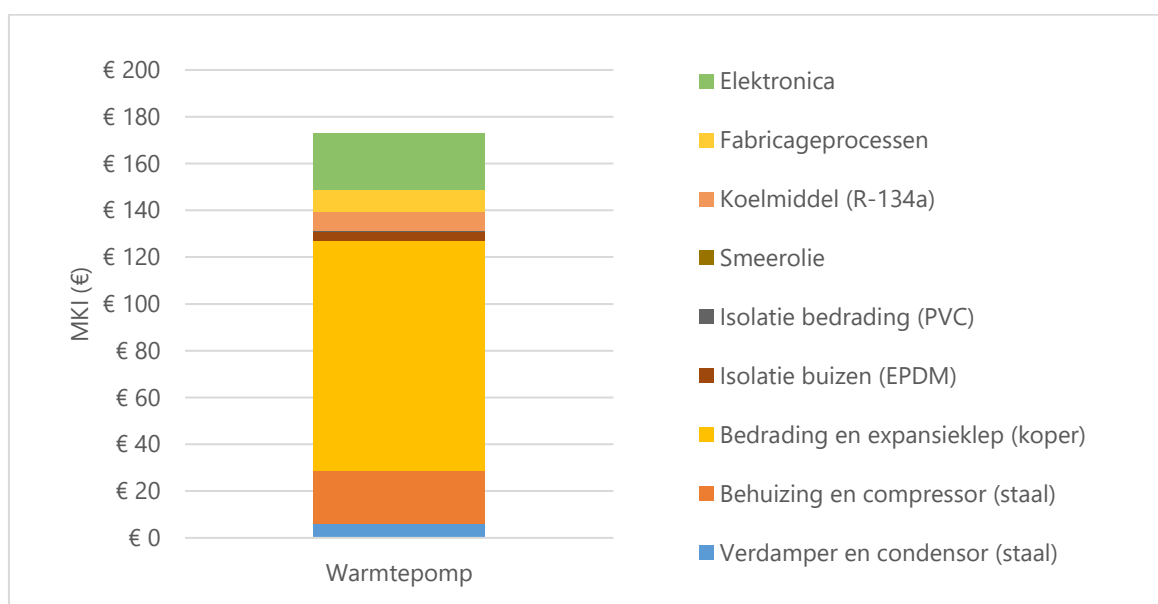
In Figuur 3.13 is de MKI van de warmtepomp met referentievermogen van 10 kW_{th} uitgezet tegenover de levenscyclusfasen. In deze figuur is te zien dat de hoogste milieulast afkomstig is van de productiefase (A1-A3), met aandeel van 89% van de MKI.

In Figuur 3.14 is te zien dat de impact van deze fase grotendeels afkomstig is van de koperen bedrading en expansieklep (57%), de elektronica (14%) en de stalen behuizing en compressor (13%). De gebruiksfase heeft tevens een hoge impact met 24% van de MKI. De milieulast van de gebruiksfase is volledig afkomstig van het lekken van de koelvloeistof. De baten behaald in module D zorgen voor een afname van 19% van de MKI van de productiefase. Deze baten zijn afkomstig van het uitsparen van staal (42%), koper (39%) en goud (uit elektronische componenten) (12%).



Figuur 3.13

Zwaartepuntanalyse warmtepomp met referentievermogen van 10 kW_{th}, MKI per levensfase



Figuur 3.14

Zwaartepuntanalyse warmtepomp met referentievermogen van 10 kW_{th}, MKI per proces/product in de productiefase (A1-A3)

3.2.4 Elektrische ketel

3.2.4.1 Opbouw warmtenetconfiguraties

De opwaardering van de warmte, om te voorzien in de pieklast, wordt geleverd door elektrische ketels. Het vermogen dat de elektrische ketels moeten leveren en het aantal units dat nodig zijn, varieert per configuratie. In de MT-netten vindt enkel opwaardering plaats in de *warmtecentrale*. In de LT-netten vindt zowel opwaardering plaats in de *warmtecentrale* als op *blok-/woningniveau*. In de ZLT-netten vindt enkel opwaardering plaats op *blok-/woningniveau*.

De ketels in de *warmtecentrale* en op *blokniveau* voorzien de opwaardering voor 1000 woningen en leveren daarom individueel een hoog vermogen. De ketels op *woningniveau* voorzien de opwaardering van een enkele woning en leveren daarom een laag vermogen.

In deze studie zijn twee elektrische ketels opgenomen, een met een vermogen van 2 kW_e en een van 100 kW_e. De opwaardering in de *warmtecentrale* en op *blokniveau* wordt geleverd door units van 100 kW_e (aantal units = vereist vermogen (kW_e)/ 100 kW_e naar boven afgerond). De opwaardering op *woningniveau* wordt geleverd door duizend units van 2 kW_e. Dit is onafhankelijk van de vraag naar vermogen op woningniveau (0,3 kW_e voor S4 en 0,2 voor S6), omdat deze waarden in praktijk uitkomen op ongeveer 2 kW_e.

Een overzicht van de opwaardering tot pieklast met behulp van elektrische ketels is weergegeven in Tabel 3.14. Het vereiste vermogen voor het leveren van de pieklast is overgenomen uit de studie van Deltares (2022). In deze tabel is voor de ZLT-netten uitgegaan van een elektrische ketel voor de piekvoorziening, i.p.v. een combinatie warmtepomp (zie sectie 3.2.3).

Tabel 3.14

Opwaardering tot pieklast met elektrische ketels

Configuratie	Locatie	Vereist vermogen pieklast (kW _e) ¹⁷	Aantal units van 2 kW _e	Aantal units van 100 kW _e
S1 MT-net, gestapeld	Warmtecentrale	7350	0	74
S2 MT-net, grondgebonden	Warmtecentrale	7950	0	80
S3 LT-net, gestapeld	Warmtecentrale	5850	0	59
S3 LT-net, gestapeld	Blokniveau	450	0	5
S4 LT-net, grondgebonden	Warmtecentrale	6150	0	62
S4 LT-net, grondgebonden	Woningniveau	300	1000	0
S5 ZLT-net, gestapeld	Blokniveau	200	0	2
S6 ZLT-net, grondgebonden	Woningniveau	200	1000	0

3.2.4.2 Modelling en zwaartepuntanalyse deelproduct – Elektrische ketel

Productomschrijving

Voor dit onderzoek is een LCA model opgesteld van een elektrische ketel met een vermogen van 10 kW_e en een met een vermogen van 100 kW_e. De elektrische ketels hebben een levensduur van 20 jaar.

Toelichting levensfasen

De elektrische ketels zijn gemodelleerd met het materiaal- en energiegebruik (A1-A3) van het Ecoinvent proces *Oil boiler, 10kW {RoW} | production | Cut-off, U* en *Oil boiler, 100kW {RoW} | production | Cut-off, U*.

Er is aangenomen dat de materialisatie voor een olie ketel vergelijkbaar is met die van een elektrische ketel, met uitzondering van de brander in de olie ketel. Tevens wordt aangenomen dat het soldeer en plaat/bandstaal gebuikt wordt voor de brander, en daarom zijn deze materialen buiten beschouwing gelaten. De massa van een 2 kW_e elektrische ketel is ongeveer 6,5 kg (Itho Daalderop, z.d.), de massa van de 10 kW_e olie ketel 25,7 kg. De materialisatie van de 10 kW_e ketel is daarom gedeeld door 4 om de materialisatie van de 2 kW_e elektrische ketel te verkrijgen.

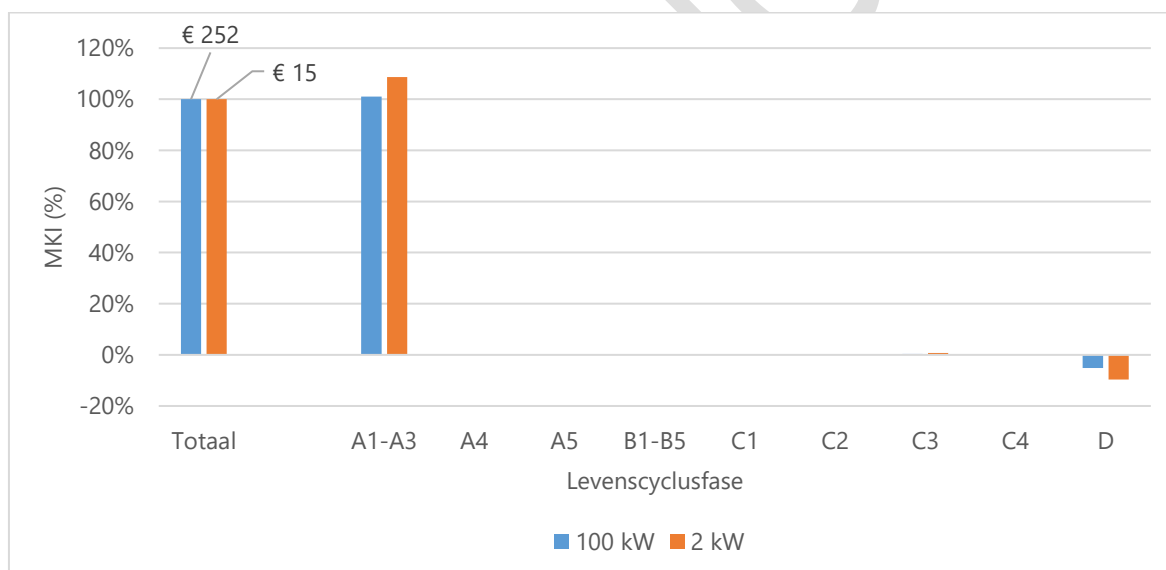
¹⁷ Het vereiste vermogen voor het leveren van de pieklast is overgenomen uit de studie van Deltares (2022).

De forfaitaire waarden van de Bepalingsmethode zijn gebruikt voor het modelleren van het transport (A4, C2) en einde levensduur, afvalscenario en baten en lasten buiten systeemgrenzen (C3, C4 en D).

Het decompositietabel van de elektrische ketel is weergegeven Bijlage II: LCI-LCA warmtenet-configuraties, *tabblad elektrische ketel*.

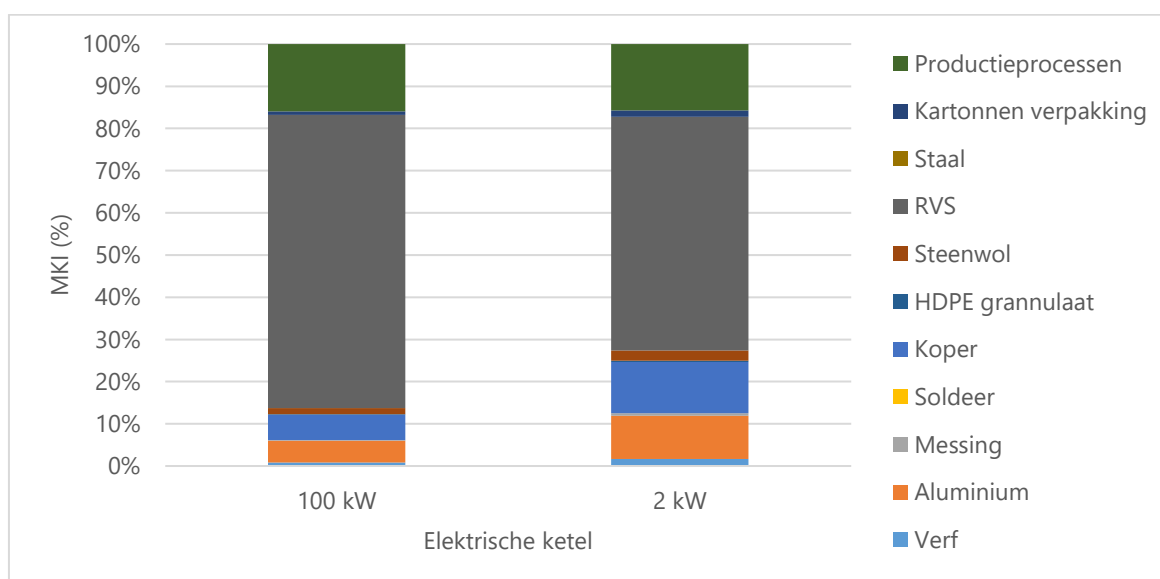
Zwaartepuntanalyse

In Figuur 3.15 is de MKI van de elektrische ketels met een vermogen van 100 kW_e en 2 kW_e uitgezet tegenover de levenscyclusfasen. De productiefase (A1-A3) weegt zwaarder mee voor de 2 kW versie (109%) dan voor de 100 kW versie (101%). De baten zijn tevens hoger voor de 2 kW_e versie (-10%) dan voor de 100 kW_e versie (-5%). In Figuur 3.16 is de MKI opgesplitst per proces/product. In deze figuur is te zien dat het aandeel aluminium en koper hoger is en RVS lager bij de 2 kW_e ketel. Dit verklaart de relatief hogere baten en tevens het hogere aandeel van de productiefase aan de MKI van de 2 kW_e ketel, omdat de baten per kg uitgespaard aluminium hoger is dan die van koper en RVS.



Figuur 3.15

Zwaartepuntanalyse elektrische ketels met een vermogen van 100 kW_e en 2 kW_e, MKI per levensfase



Figuur 3.16

Zwaartepuntanalyse elektrische ketels met een vermogen van 100 kW_e en 2 kW_e, MKI per proces/product in de productiefase (A1-A3)

3.2.5 Tapwaterbuffervat

3.2.5.1 Opbouw warmtenetconfiguraties

In LT- en ZLT-netten zijn tapwaterbuffers opgenomen. Het buffervat verlaagt het benodigde piekvermogen door spreiding van de warmtevraag over de dag. Een overzicht van het benodigde volume van de buffervaten is weergegeven in Tabel 3.15. Het vereiste volume van de buffervaten is overgenomen uit de studie van Deltares (2022).

Het benodigde volume is opgebouwd uit buffervaten met een volume van 2000, 150 en 120 liter. De buffervaten op blokniveau zijn gemodelleerd als de som van het benodigde aantal 2000 L vaten (naar boven afgerond). Het buffervat voor het ZLT-net met grondgebonden woningen, met benodigd volume van 143 L, is gemodelleerd met het vat van 150 L.

Tabel 3.15

Overzicht benodigd volume van buffervaten

Configuratie	Locatie	Volume (m ³) ¹⁸	Aantal units van 2000 L	Aantal units van 150 L	Aantal units van 120 L
S3 LT-net, gestapeld	Blokniveau	134	68	0	0
S4 LT-net, grondgebonden	Blokniveau	120	60	0	0
S5 ZLT-net, gestapeld	Woningniveau	143	0	1000	0
S6 ZLT-net, grondgebonden	Woningniveau	120	0	0	1000

18 ¹⁸ Het vereiste volume van de buffervaten is overgenomen uit de studie van Deltares (2022).

3.2.5.2 Modelling en zwaartepuntanalyse deelproduct – Tapwaterbuffervat

Productomschrijving

Voor dit onderzoek is een LCA model opgesteld van een tapwaterbuffervat van 120 L, 150 L en van 2.000 L. De buffervaten hebben een levensduur van 20 jaar.

Toelichting levensfasen

De buffervaten modelleren wij met het materiaal-(A1-A3) en energieverbruik (A1-A3) van het Ecoinvent proces *Heat storage, 2000l {RoW}| production | Cut-off, U*. Daarnaast zijn de forfaitaire waarden van de Bepalingsmethode gebruikt voor het modelleren van het transport (A4, C2) en einde levensduur, afvalscenario en baten en lasten buiten systeemgrenzen (C3, C4 en D).

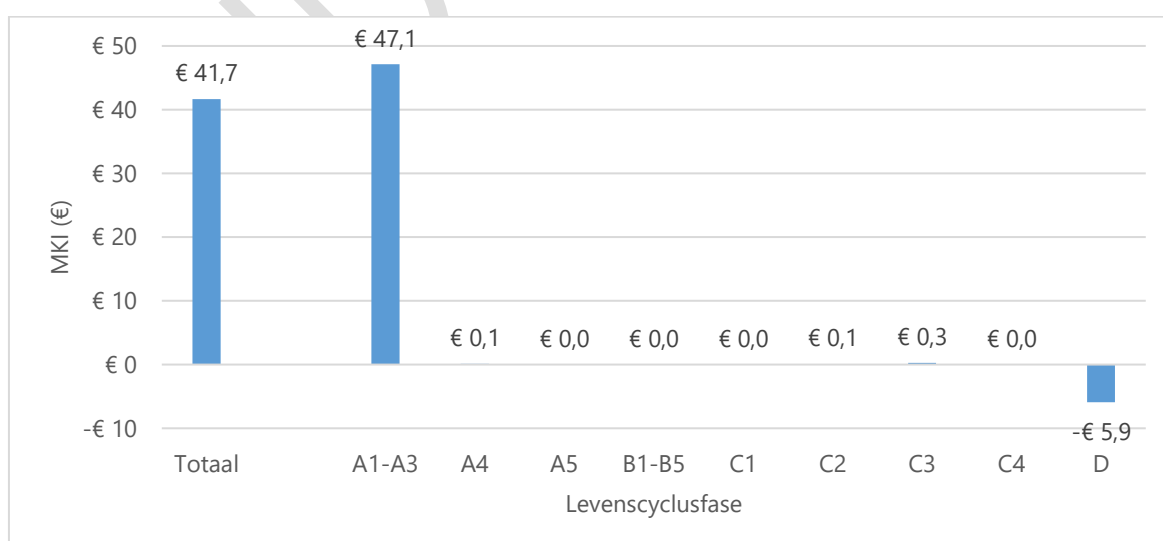
Het massa-aandeel van de materialen van het buffervat van 2000 L is gebruikt om de materialisatie van de 120 L en 150 L vaten te bepalen. Daarbij heeft het 120 L vat een massa van 49 kg en het 150 L vat een massa van 57 kg (2-improve, 2018).

Het decompositietabel van het tapwaterbuffervat is weergegeven bijlage II: LCI-LCA warmtenetconfiguraties, *tabblad buffervat*.

Zwaartepuntanalyse

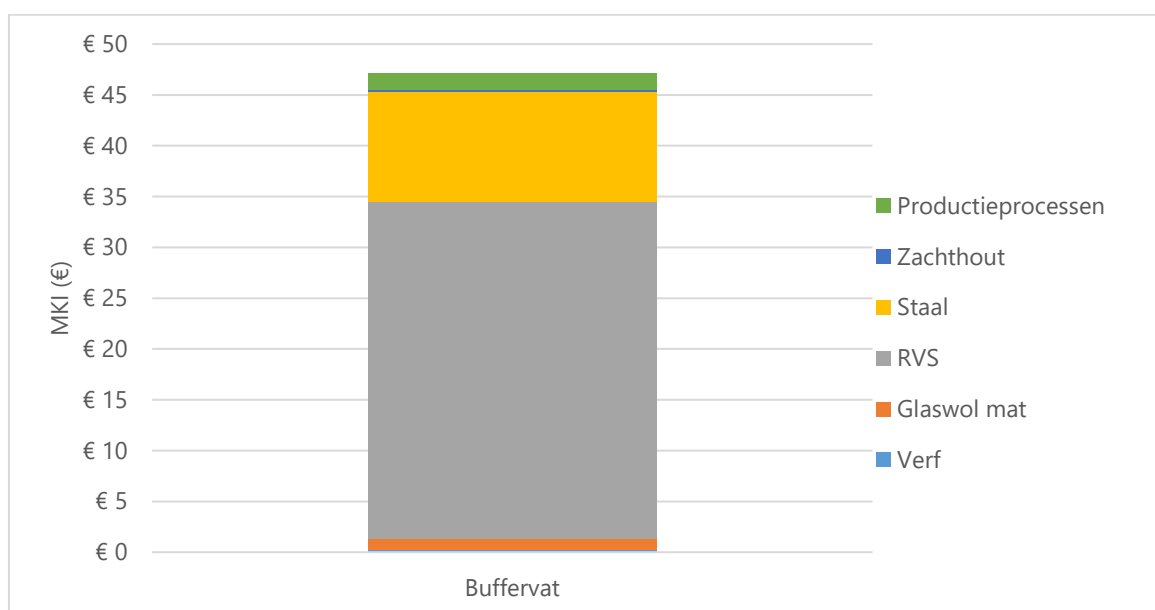
In Figuur 3.17 is de MKI van het buffervat van 120 L uitgezet tegenover de levensfasen. De levensfasen van de buffervaten van 150 L en 2.000 L hebben dezelfde MKI-aandelen als het vat van 120 L. De MKI is bijna volledig afkomstig van de productiefase (A1-A3).

In Figuur 3.18 is te zien dat de hoogste milieulast in deze fase komt van RVS, gevolgd door bandstaal. De baten in module D zijn voornamelijk afkomstig van het uitsparen van staal.



Figuur 3.17

Zwaartepuntanalyse buffervat van 120 L, MKI per levensfase



Figuur 3.18

Zwaartepuntanalyse buffervat van 120 L, MKI per proces/product in de productiefase (A1-A3)

3.2.6 Airconditioningunit

3.2.6.1 Opbouw warmtenetconfiguraties

In alle woningen is er een koudevraag en wordt er koude geleverd. In het ZLT-netten wordt koude door het net zelf geleverd en in de MT- en LT-netten wordt koude d.m.v. een airconditioningunit geleverd. De airconditioningunits moeten een thermisch vermogen van 1,9 kW_{th} leveren.

3.2.6.2 Modelleren en zwaartepuntanalyse deelproduct - Airconditioningunit

In deze sectie is de modellering en zwaartepuntanalyse van het deelproduct *Airconditioningunit* omschreven.

De volgende onderdelen zijn beschreven:

1. Productomschrijving
2. Toelichting levensfasen
3. Zwaartepuntanalyse

Productomschrijving

Voor dit onderzoek is een LCA model opgesteld van 1 airconditioningunit, welke een thermisch vermogen kan leveren tussen de 1,38 en 4,31 kW_{th}. De levensduur betreft 20 jaar.

Toelichting levensfasen

In onderstaande secties zijn alle levensfasen toegelicht. Een compleet overzicht van alle geïnventariseerde data is te vinden in Bijlage II: LCI-LCA warmtenetconfiguraties, *tabblad airco*.

Productiefase (A1-A3)

De airconditioningunits zijn gemodelleerd op basis van de Environmental Product Declaration (EPD) van MIDEA split-type airconditioners, type MSAGBU-12HRFN8-QRD0GW met een vermogen om koude te leveren tussen 1,38 en 4,31 kW_{th} (Midea, 2022). De productmassa is 37 kg, waarvan de indoor unit een massa heeft van 8,7 kg, de outdoor unit een massa van 26,7 kg en de verpakking een massa van 1,6 kg (Viclina, 2022).

De airconditioningunit bestaat uit een indoor en outdoor unit. Beide units zijn, in overeenstemming met de EPD, opgebouwd uit plastics, metalen, elektronica en koelmiddel. Daarnaast zijn de verpakkingsmaterialen meegenomen.

De EPD laat het percentage van de totale massa zien per materiaal en per indoor/outdoor unit en de verpakking. Echter is er ook bij de plastics, elektronica en het totaal een deel omschreven als *anders*. Bovendien tellen de percentages, met de categorie *anders* meegenomen, samen niet op tot 100%. De categorie *anders*, is bij de plastic materialen naar ratio verdeeld over de plastic materialen en bij de categorie elektronica heeft de categorie *anders* het NMD proces *0405-fab&Elektronica, printplaat, inclusief elektronische componenten (o.b.v. Printed wiring board, surface mounted, unspecified, Pb free {GLO}) market for | Cut-off, U* toegewezen gekregen. De categorie *anders* die van toepassing is op het totaal, en het ontbrekende percentage om op 100% uit te komen, zijn naar ratio verdeeld over de categorieën plastics en metalen.

Voor de plastics High Impact Polystyreen (HIPS), Bulk Moulding Compound (BMC) en Acrylonitrile Styrene (AS) zijn geen processen in de NMD of Ecoinvent database te vinden.

Daarom zijn de volgende aannames gemaakt:

- *HIPS* is een vorm van polystyreen. In de NMD staan twee polystyreen processen, 0007 en 0048. Het is onbekend welk proces het beste past en daarom is gekozen voor het proces *0007-fab&Polystyreen, EPS (o.b.v. Polystyrene foam slab {GLO}) market for | Cut-off, U; 87% primair, 13% secundair*, welke de hoogste MKI heeft.
- *BMC* is een polyester vormmateriaal dat versterkt is met glasvezels. BMC zit in de thermoset groep en wordt gemaakt met de *hot press moulding* methode (BMC (BULK MOULDING COMPAUND), n.d.). Daarom is gekozen voor het proces NMD proces *0075-fab&Polyester, glasvezelversterkt (o.b.v. Glass fibre reinforced plastic, polyester resin, hand lay-up {GLO}) market for | Cut-off, U*, welke uit dezelfde plasticgroep komt en met dezelfde methode is geproduceerd.
- *AS* komt uit dezelfde plastic familie als ABS, en daarom is ervoor gekozen om hier het NMD proces *0055-fab&ABS (o.b.v. Acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer {GLO}) market for | Cut-off, U* te gebruiken.

In overeenstemming met het model voor de warmtepomp en Caduff, M. et al. (2014), nemen wij aan dat de helft van het staal gevormd wordt tot platen en de andere helft tot buizen. Tevens nemen wij voor koper aan dat de helft gevormd wordt tot platen en de andere helft tot draden.

De gebruikte koelvloeistof is R-134a. Wij nemen aan dat er, in overeenstemming met het model van de warmtepomp (zie Sectie 3.2.3.2), er tijdens de fabricage van de airconditioningunit een verlies plaatsvindt van 3% van de koelvloeistof (Greening & Azapagic, 2012). Van dit verlies wordt aangenomen dat deze hoeveelheid verdampt. Om de verdamping te modelleren, is wederom het proces *Used refrigerant R134a {GLO} | treatment of used refrigerant R134a, venting | Cut-off, U* (1 kg) gebruikt.

Bij gebrek aan het energieverbruik tijdens de productie van de airco, nemen wij een energieverbruik aan van 19,7 MJ/kg van de airconditioningunit (Almutairi, K. et al., 2015). Daarbij nemen wij aan dat de verdeling van verbruik elektriciteit/aardgas gelijk is aan dat van de warmtepomp (28% elektriciteit en 72% aardgas).

Transportfase (A4, C2)

Forfaitaire transportafstanden volgens de bepalingsmethode zijn toegepast:

- 50 km bulktransport naar werk (A4);
- 150 km overig transport naar werk (A4);
- 50 km transport voor einde-leven naar sorteerlocatie/recycling (C2)
- 100 km transport totaal voor einde-leven naar stort (C2)
- 150 km transport totaal voor einde-leven naar afvalverbrandingsinstallatie (AVI)

Constructiefase (A5)

De installatie van de airco bestaat uit het plaatsen van de indoor en outdoor unit. Het installeren van de units vereist minimaal werk. Het gaat met name om manueel werk en elektriciteitsgebruik voor monteren (bijvoorbeeld met een boormachine) en testen. Deze impact is daarom verwaarloosbaar en niet meegenomen in dit model.

Gebruiksfase (B1-B5)

B1, Gebruik

Tijdens het gebruik van de airconditioningunit lekt er jaarlijks 6% van de koelvloeistof (Caduff et al., 2014). De verdamping van de koelvloeistof is meegenomen in het model.

B2, Onderhoud

De gelekte hoeveelheid van 6% koelvloeistof per jaar, moet tijdens de levensduur bijgevuld worden.

B3-B5, Reparatie, Vervangingen en Hernieuwing

In overeenstemming met de EPD van MIDEA, wordt de impact van reparaties, vervangingen en hernieuwing niet meegenomen, omdat deze niet voorzien zijn onder normale omstandigheden.

Sloopfase (C1)

Er wordt aangenomen dat er vergelijkbare handelingen vereist zijn voor de sloopfase als voor de constructiefase. Deze impact is tevens verwaarloosbaar en is niet meegenomen in dit model.

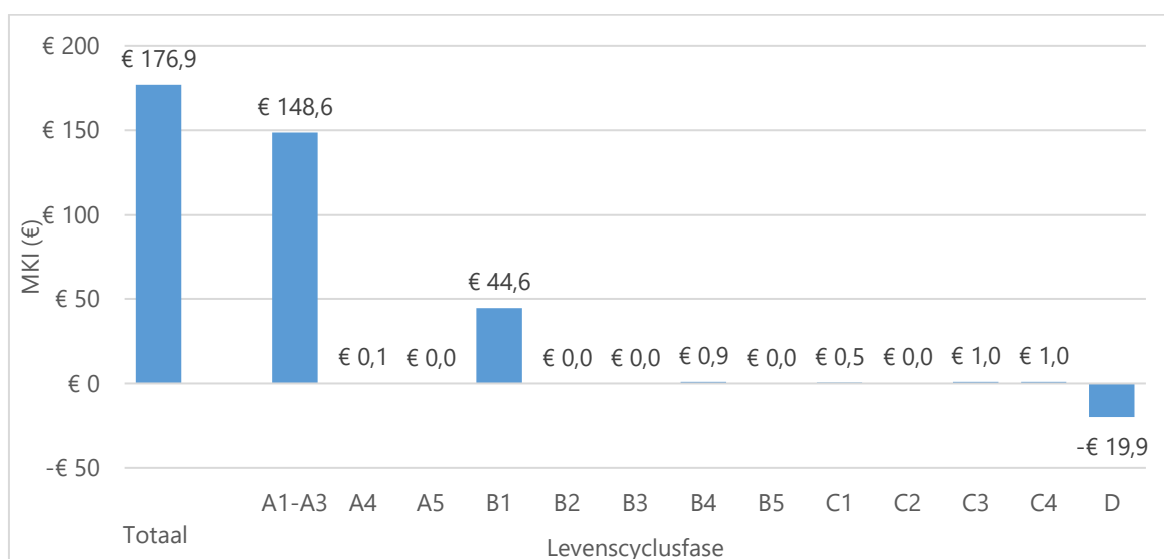
Einde levensduur, afvalscenario en baten en lasten buiten de systeemgrenzen (C3, C4 en D)

Aan het einde van de levensduur, worden de producten gedemonteerd en verzameld. De producten worden vervolgens getransporteerd naar een sorteerlocatie, waar ze ontmanteld worden en de individuele materialen gesorteerd worden. De individuele materialen kunnen gerecycled worden, verbrand (AVI) of gestort worden. De materialen die worden gerecycled, worden gemodelleerd totdat het einde van de afvalfase is bereikt. De materialen die worden verbrand, worden verwerkt in afvalverbrandingsinstallaties met energierugwinning. Voor het modelleren van deze fasen wordt gebruik gemaakt van de forfaitaire waarden voor verwerking-scenario's einde leven van de Bepalingsmethode (versie mei 2022). Verder is er, voor de koelvloeistof R-134a en de elektronische componenten, gebruik gemaakt van de nieuwe verwerking-scenario's einde leven, zoals beschreven in Sectie 3.2.3.2.

Zwaartepuntanalyse

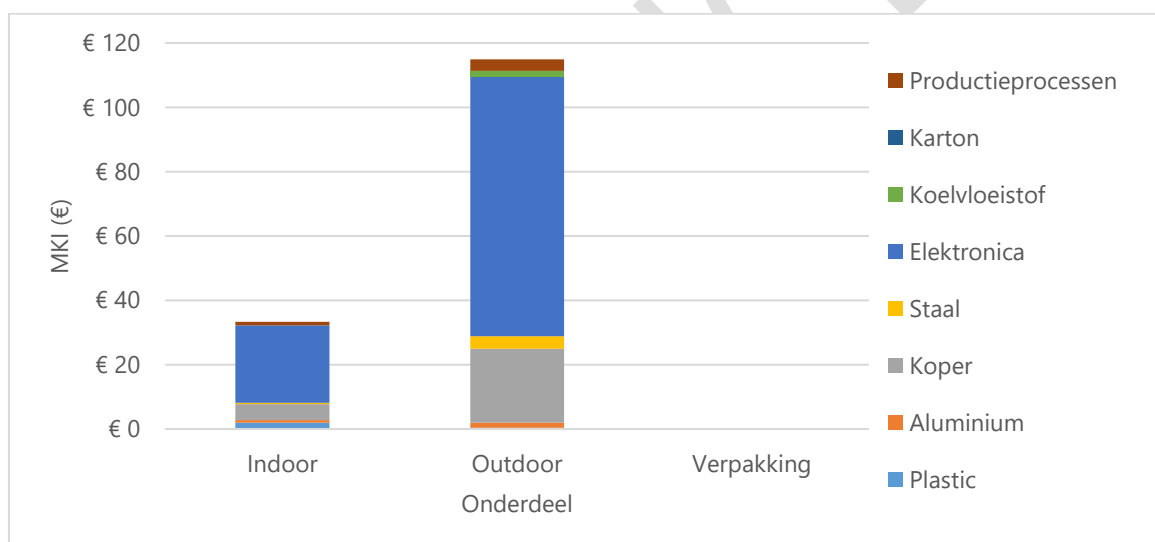
In Figuur 3.19 is de MKI van de airconditioningunit uitgezet tegenover de levensfasen. Het hoogste aandeel in MKI is afkomstig van de productiefase (A1-A3) (84%), gevolgd door de gebruiksfase (25%) en de baten behaald in module D (-11%).

In Figuur 3.20 is de MKI van de productiefase opgesplitst per proces en per onderdeel (indoorunit/outdoorunit/verpakking). De hoogste milieulast komt van de elektronica, zowel voor de indoorunit als de outdoorunit en de totale productiefase (71%). Tevens levert het gebruik van koper een significante bijdrage aan de MKI in deze fase (19%). De milieulast in de gebruiksfase (B1) is volledig afkomstig van het lekken van koelvloeistof R-134a. De baten behaald in module D zijn voornamelijk afkomstig van de uitsparing van goud (uit elektronische componenten) en koper.



Figuur 3.19

Zwaartepuntanalyse airconditioningunit, MKI per levensfase



Figuur 3.20

Zwaartepuntanalyse airconditioningunit, MKI per proces/product in de productiefase (A1-A3)

3.2.7 Elektriciteitsverbruik

Het elektriciteitsverbruik van de zes warmtenetten is in kaart gebracht door Deltares (2022) en is overgenomen voor deze studie. In Tabel 3.16 is een overzicht weergegeven van het verbruik per warmtenetconfiguratie. Om inzichtelijk te maken op welk aandeel van het verbruik de beheerder van het warmtenet invloed heeft, is er onderscheid gemaakt tussen het verbruik van de consument en het verbruik van het warmtenet. Er is uitgegaan van 100% grijze stroom in het basisscenario. In Sectie 4.4 is bepaald wat de invloed is van het gebruik van groene stroom. De grijze stroom is gemodelleerd met het NMD-proces 0494-pro&Elektriciteit, Grijs, bij consument, per kWh en de groene stroom met het NMD-proces 0496-pro&Elektriciteit, Hernieuwbaar, bij consument, per kWh.

Tabel 3.16

Elektriciteitsverbruik per warmtenetconfiguratie, opgedeeld in verbruik van consument en warmtenet.

Elektriciteits- verbruik	Eenheid	S1 MT-net, gestapeld	S2 MT-net, grondgebonden	S3 LT-net, gestapeld	S4 LT-net, grondgebonden	S5 ZLT-net, gestapeld	S6 ZLT-net, grondgebonden
Consument	MWh	7,167	7,167	7,167	47,087	0	131,730
Warmtenet	MWh	239,979	258,874	235,974	210,525	123,060	25,124
Totaal	MWh	247,146	266,040	243,140	257,612	123,060	156,854

EINDCONCEPT

4 Resultaten

4.1 Berekenen milieuprofiel

In deze LCA zijn de volgende rekenprocedures toegepast:

- De berekeningen in deze LCA zijn gemaakt volgens de eisen en richtlijnen van NEN-EN 15804+A2 (set 1).
- De milieu-ingrepen zijn berekend met de methoden die zijn omschreven in NEN-EN 15804+A2. Er is gebruik gemaakt van de Bepalingsmethode versie 1.1, NMD database versie 3.6, Ecoinvent database versie 3.6.
- Indien van toepassing zijn de regels voor allocatie bij Multi-input, -output, recycling- en hergebruikprocessen uit NEN-EN 15804 gevolgd, overeenkomstig de NEN-EN-ISO 14044.
- De LCA-berekeningen zijn uitgevoerd met SimaPro versie 9.3.0.3.
- Ecoinvent processen zijn doorgerekend inclusief infrastructuurprocessen en kapitaalgoederen.
- Ecoinvent processen zijn doorgerekend exclusief lange termijn (> 100 jaar) emissies.
- Conform paragraaf 3.5 van de Bepalingsmethode zijn deze effectcategorieën omgerekend naar een milieukosten indicator (MKI) in euro's.

4.2 LCA-rekenresultaten en schaduwrijzen

Het wegen van resultaten is een proces waarbij de resultaten van verschillende milieueffectcategorieën worden omgezet naar een 1 punt score zodat ze integraal beschouwd kunnen worden. In deze studie maken we, conform de Bepalingsmethode Milieuprestatie Bouwwerken gebruik van de MilieuKostenIndicator (MKI) om de verschillende effectcategorieën te wegen tot één eindpunt.

Tabel 4.1 tot en met 4.6 bevatten de rekenresultaten van de zes warmtenetconfiguraties in de gedeclareerde levenscyclusfasen. Tevens is de MKI opgenomen in de tabellen.

Tabel 4.1

Milieuprofiel van warmtenetconfiguratie S1, welke gedurende 50 jaar warmte en koude levert aan 1000 woningen met een distributienet op midden-temperatuur, aan gestapelde bouw (S1 MT-gestapeld).

		Totaal	Productiefase	Transport	Bouw- en installatieproces, aanleg	Gebruiksfas	Onderhoud	Reparaties	Vervangingen	Hernieuwing	Operationeel energieverbruik	Sloop	Transport	Afvalbewerking	Finale afvalverwerking	Milieulasten en -baten buiten systeemgrenzen	MilieukostenIndicator
S1 MT-gestapeld		Totaal	A1-A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	C1	C2	C3	C4	D	MKI
<u>Indicatoren Set 1</u>	Eenheid																
Abiotic depletion, non fuel	kg Sb eq.	1,2E+03	6,1E+02	1,6E+00	3,0E+00	0,0E+00	5,3E-03	0,0E+00	7,7E+02	0,0E+00	1,6E+02	2,3E-02	1,0E-01	4,8E-01	3,9E-01	-3,9E+02	1,9E+02
Abiotic depletion, fuel	kg Sb eq.	1,1E+06	1,4E+04	4,6E+02	7,4E+02	0,0E+00	1,7E+01	0,0E+00	1,2E+04	0,0E+00	1,1E+06	8,5E+01	3,0E+01	9,2E+01	5,7E+02	-4,9E+03	1,8E+05
Global warming	kg CO ₂ eq.	1,3E+08	1,9E+06	6,2E+04	1,0E+05	1,0E+06	2,5E+03	0,0E+00	3,5E+06	0,0E+00	1,3E+08	2,9E+04	4,1E+03	2,4E+05	4,7E+04	-7,4E+05	6,6E+06
Ozone layer depletion	kg CFK-11 eq.	1,5E+01	9,8E-01	1,1E-02	1,4E-02	0,0E+00	3,6E-04	0,0E+00	3,6E+00	0,0E+00	1,1E+01	2,0E-03	7,2E-04	3,8E-03	1,4E-02	-1,2E+00	4,4E+02
Photochemical oxidation	kg ethyleen eq.	2,1E+04	1,9E+03	3,8E+01	8,8E+01	0,0E+00	7,3E-01	0,0E+00	1,5E+03	0,0E+00	1,8E+04	9,1E+00	2,5E+00	9,6E+00	4,5E+01	-9,0E+02	4,2E+04
Acidification	kg SO ₂ eq.	1,8E+05	1,2E+04	2,7E+02	6,8E+02	0,0E+00	7,2E+00	0,0E+00	1,5E+04	0,0E+00	1,6E+05	7,1E+01	1,8E+01	1,1E+02	3,1E+02	-4,7E+03	7,2E+05
Eutrophication	kg PO ₄ - eq.	3,0E+04	1,8E+03	5,4E+01	1,2E+02	0,0E+00	1,1E+00	0,0E+00	1,9E+03	0,0E+00	2,7E+04	1,5E+01	3,5E+00	1,8E+01	5,9E+01	-7,1E+02	2,7E+05
Human toxicity	kg 1,4-DCB eq.	1,3E+07	1,5E+06	2,6E+04	4,3E+04	0,0E+00	7,3E+02	0,0E+00	2,0E+06	0,0E+00	1,0E+07	4,6E+03	1,7E+03	1,9E+04	2,8E+04	-6,2E+05	1,2E+06
Ecotoxicity, fresh water	kg 1,4-DCB eq.	3,9E+05	6,2E+04	7,6E+02	8,7E+02	0,0E+00	1,5E+01	0,0E+00	8,2E+04	0,0E+00	2,6E+05	7,2E+01	5,0E+01	2,0E+03	6,4E+02	-1,7E+04	1,2E+04
Ecotoxicity, marine water	kg 1,4-DCB eq.	1,4E+09	1,8E+08	2,8E+06	3,3E+06	0,0E+00	5,7E+04	0,0E+00	2,7E+08	0,0E+00	1,0E+09	2,7E+05	1,8E+05	3,9E+06	1,9E+06	-6,5E+07	1,4E+05
Ecotoxicity, terrestic	kg 1,4-DCB eq.	5,9E+05	1,1E+04	9,3E+01	1,8E+02	0,0E+00	6,8E+00	0,0E+00	1,1E+04	0,0E+00	5,5E+05	2,0E+01	6,1E+00	4,8E+01	4,9E+01	1,2E+04	3,5E+04
MKI	€	9,2E+06	3,2E+05	7,5E+03	1,4E+04	5,1E+04	2,4E+02	0,0E+00	4,6E+05	0,0E+00	8,5E+06	2,3E+03	4,9E+02	1,5E+04	7,0E+03	-1,3E+05	

Tabel 4.2

Milieuprofiel van warmtenetconfiguratie S2, welke gedurende 50 jaar warmte en koude levert aan 1000 woningen met een distributienet op midden-temperatuur, aan grondgebonden bouw (S2 MT-grondgebonden)

		Totaal	Productiefase	Transport	Bouw- en installatieproces, aanleg	Gebruiksfas	Onderhoud	Reparaties	Vervangingen	Hernieuwing	Operationeel energieverbruik	Sloop	Transport	Afvalbewerking	Finale afvalverwerking	Milieulasten en -baten buiten systeemgrenzen	Milieukostenindicator
S2 MT-grondgebonden		Totaal	A1-A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	C1	C2	C3	C4	D	MKI
<u>Indicatoren Set 1</u>	Eenheid																
Abiotic depletion, non fuel	kg Sb eq.	1,2E+03	6,2E+02	1,8E+00	3,5E+00	0,0E+00	5,3E-03	0,0E+00	7,7E+02	0,0E+00	1,8E+02	2,5E-02	9,9E-02	4,4E-01	4,7E-01	-3,9E+02	1,9E+02
Abiotic depletion, fuel	kg Sb eq.	1,2E+06	1,4E+04	5,3E+02	8,6E+02	0,0E+00	1,8E+01	0,0E+00	1,2E+04	0,0E+00	1,2E+06	9,4E+01	2,8E+01	8,6E+01	6,8E+02	-4,8E+03	2,0E+05
Global warming	kg CO ₂ eq.	1,4E+08	1,8E+06	7,2E+04	1,2E+05	1,0E+06	2,6E+03	0,0E+00	3,6E+06	0,0E+00	1,4E+08	3,1E+04	3,9E+03	2,4E+05	5,5E+04	-7,1E+05	7,1E+06
Ozone layer depletion	kg CFK-11 eq.	1,6E+01	1,0E+00	1,3E-02	1,7E-02	0,0E+00	3,7E-04	0,0E+00	3,8E+00	0,0E+00	1,2E+01	2,3E-03	6,9E-04	3,5E-03	1,7E-02	-1,3E+00	4,7E+02
Photochemical oxidation	kg ethyleen eq.	2,2E+04	1,8E+03	4,3E+01	1,0E+02	0,0E+00	7,4E-01	0,0E+00	1,5E+03	0,0E+00	2,0E+04	1,0E+01	2,3E+00	8,9E+00	5,3E+01	-8,4E+02	4,4E+04
Acidification	kg SO ₂ eq.	1,9E+05	1,2E+04	3,1E+02	8,0E+02	0,0E+00	7,3E+00	0,0E+00	1,5E+04	0,0E+00	1,7E+05	8,1E+01	1,7E+01	9,8E+01	3,6E+02	-4,7E+03	7,7E+05
Eutrophication	kg PO ₄ - eq.	3,2E+04	1,7E+03	6,2E+01	1,4E+02	0,0E+00	1,1E+00	0,0E+00	1,9E+03	0,0E+00	2,9E+04	1,7E+01	3,3E+00	1,7E+01	7,0E+01	-7,0E+02	2,9E+05
Human toxicity	kg 1,4-DCB eq.	1,4E+07	1,5E+06	3,0E+04	5,0E+04	0,0E+00	7,3E+02	0,0E+00	2,0E+06	0,0E+00	1,1E+07	5,1E+03	1,6E+03	1,8E+04	3,2E+04	-6,0E+05	1,3E+06
Ecotoxicity, fresh water	kg 1,4-DCB eq.	4,1E+05	6,1E+04	8,8E+02	1,0E+03	0,0E+00	1,5E+01	0,0E+00	8,3E+04	0,0E+00	2,8E+05	7,9E+01	4,8E+01	2,0E+03	7,3E+02	-1,7E+04	1,2E+04
Ecotoxicity, marine water	kg 1,4-DCB eq.	1,5E+09	1,8E+08	3,2E+06	3,9E+06	0,0E+00	5,8E+04	0,0E+00	2,7E+08	0,0E+00	1,1E+09	2,9E+05	1,7E+05	3,8E+06	2,2E+06	-6,5E+07	1,5E+05
Ecotoxicity, terrestric	kg 1,4-DCB eq.	6,3E+05	1,1E+04	1,1E+02	2,1E+02	0,0E+00	6,9E+00	0,0E+00	1,1E+04	0,0E+00	5,9E+05	2,1E+01	5,8E+00	4,5E+01	5,8E+01	1,1E+04	3,8E+04
MKI	€	9,9E+06	3,2E+05	8,6E+03	1,6E+04	5,2E+04	2,4E+02	0,0E+00	4,7E+05	0,0E+00	9,1E+06	2,6E+03	4,7E+02	1,5E+04	8,1E+03	-1,2E+05	

Tabel 4.3

Milieuprofiel van warmtenetconfiguratie S3, welke gedurende 50 jaar warmte en koude levert aan 1000 woningen met een distributienet op lage-temperatuur, aan grondgebonden bouw (S3 LT-gestapeld).

		Totaal	Productiefase	Transport	Bouw- en installatieproces, aanleg	Gebruiksfas	Onderhoud	Reparaties	Vervangingen	Hernieuwing	Operationeel energieverbruik	Sloop	Transport	Afvalbewerking	Finale afvalverwerking	Milieulasten en -baten buitensysteemgrenzen	Milieukostenindicator
S3 LT-gestapeld			A1-A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	C1	C2	C3	C4	D	MKI
<u>Indicatoren Set 1</u>	Eenheid	Totaal	A1-A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	C1	C2	C3	C4	D	MKI
Abiotic depletion, non fuel	kg Sb eq.	1,2E+03	6,1E+02	1,6E+00	2,9E+00	0,0E+00	4,9E-03	0,0E+00	7,7E+02	0,0E+00	1,6E+02	2,2E-02	1,1E-01	4,9E-01	3,9E-01	-3,9E+02	1,9E+02
Abiotic depletion, fuel	kg Sb eq.	1,1E+06	1,4E+04	4,5E+02	7,3E+02	0,0E+00	1,6E+01	0,0E+00	1,3E+04	0,0E+00	1,1E+06	8,2E+01	3,1E+01	9,2E+01	5,6E+02	-5,2E+03	1,8E+05
Global warming	kg CO ₂ eq.	1,3E+08	1,9E+06	6,2E+04	1,0E+05	1,0E+06	2,4E+03	0,0E+00	3,5E+06	0,0E+00	1,2E+08	2,8E+04	4,2E+03	2,4E+05	4,6E+04	-7,8E+05	6,5E+06
Ozone layer depletion	kg CFK-11 eq.	1,4E+01	9,4E-01	1,1E-02	1,4E-02	0,0E+00	3,4E-04	0,0E+00	3,5E+00	0,0E+00	1,1E+01	2,0E-03	7,4E-04	3,7E-03	1,4E-02	-1,2E+00	4,3E+02
Photochemical oxidation	kg ethyleen eq.	2,1E+04	1,9E+03	3,7E+01	8,7E+01	0,0E+00	6,9E-01	0,0E+00	1,6E+03	0,0E+00	1,8E+04	8,9E+00	2,5E+00	9,8E+00	4,5E+01	-1,0E+03	4,1E+04
Acidification	kg SO ₂ eq.	1,8E+05	1,3E+04	2,7E+02	6,7E+02	0,0E+00	6,8E+00	0,0E+00	1,5E+04	0,0E+00	1,5E+05	6,9E+01	1,8E+01	1,1E+02	3,0E+02	-4,9E+03	7,1E+05
Eutrophication	kg PO ₄ - eq.	3,0E+04	1,8E+03	5,3E+01	1,2E+02	0,0E+00	1,0E+00	0,0E+00	1,9E+03	0,0E+00	2,6E+04	1,5E+01	3,6E+00	1,9E+01	5,9E+01	-7,3E+02	2,7E+05
Human toxicity	kg 1,4-DCB eq.	1,4E+07	1,7E+06	2,6E+04	4,2E+04	0,0E+00	6,8E+02	0,0E+00	2,2E+06	0,0E+00	1,0E+07	4,5E+03	1,8E+03	1,9E+04	2,8E+04	-6,5E+05	1,2E+06
Ecotoxicity, fresh water	kg 1,4-DCB eq.	3,9E+05	6,2E+04	7,6E+02	8,6E+02	0,0E+00	1,4E+01	0,0E+00	8,3E+04	0,0E+00	2,6E+05	7,0E+01	5,1E+01	2,0E+03	6,3E+02	-1,7E+04	1,2E+04
Ecotoxicity, marine water	kg 1,4-DCB eq.	1,4E+09	1,8E+08	2,7E+06	3,3E+06	0,0E+00	5,4E+04	0,0E+00	2,7E+08	0,0E+00	1,0E+09	2,6E+05	1,8E+05	3,8E+06	1,9E+06	-6,4E+07	1,4E+05
Ecotoxicity, terrestric	kg 1,4-DCB eq.	5,8E+05	1,1E+04	9,2E+01	1,7E+02	0,0E+00	6,4E+00	0,0E+00	1,1E+04	0,0E+00	5,4E+05	1,9E+01	6,2E+00	4,8E+01	4,9E+01	1,5E+04	3,5E+04
MKI	€	9,1E+06	3,4E+05	7,5E+03	1,3E+04	5,0E+04	2,3E+02	0,0E+00	4,9E+05	0,0E+00	8,3E+06	2,3E+03	5,0E+02	1,5E+04	7,0E+03	-1,3E+05	

Tabel 4.4

Milieuprofiel van warmtenetconfiguratie S4, welke gedurende 50 jaar warmte en koude levert aan 1000 woningen met een distributienet op lage-temperatuur, aan grondgebonden bouw (S4 LT-grondgebonden).

		Totaal	Productiefase	Transport	Bouw- en installatieproces, aanleg	Gebruiksfas	Onderhoud	Reparaties	Vervangingen	Herinrichting	Operationeel energieverbruik	Sloop	Transport	Afvalbewerking	Finale afvalverwerking	Milieulasten en -baten buiten systeemgrenzen	MilieuKostenIndicator
S4 LT-grondgebonden			A1-A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	C1	C2	C3	C4	D	MKI
<u>Indicatoren Set 1</u>	Eenheid	Totaal	A1-A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	C1	C2	C3	C4	D	MKI
Abiotic depletion, non fuel	kg Sb eq.	1,1E+03	5,8E+02	1,8E+00	3,5E+00	0,0E+00	4,9E-03	0,0E+00	7,0E+02	0,0E+00	1,7E+02	2,4E-02	1,1E-01	4,9E-01	4,6E-01	-3,3E+02	1,8E+02
Abiotic depletion, fuel	kg Sb eq.	1,2E+06	1,5E+04	5,3E+02	8,5E+02	0,0E+00	1,6E+01	0,0E+00	1,3E+04	0,0E+00	1,2E+06	9,1E+01	3,2E+01	9,1E+01	6,7E+02	-5,4E+03	1,9E+05
Global warming	kg CO ₂ eq.	1,4E+08	1,9E+06	7,2E+04	1,2E+05	1,0E+06	2,4E+03	0,0E+00	3,6E+06	0,0E+00	1,3E+08	2,9E+04	4,3E+03	2,3E+05	5,4E+04	-8,1E+05	6,9E+06
Ozone layer depletion	kg CFK-11 eq.	1,5E+01	9,4E-01	1,3E-02	1,6E-02	0,0E+00	3,4E-04	0,0E+00	3,5E+00	0,0E+00	1,2E+01	2,2E-03	7,6E-04	3,6E-03	1,6E-02	-1,2E+00	4,5E+02
Photochemical oxidation	kg ethyleen eq.	2,2E+04	1,9E+03	4,3E+01	1,0E+02	0,0E+00	6,9E-01	0,0E+00	1,7E+03	0,0E+00	1,9E+04	1,0E+01	2,6E+00	9,8E+00	5,3E+01	-1,1E+03	4,3E+04
Acidification	kg SO ₂ eq.	1,9E+05	1,2E+04	3,2E+02	7,9E+02	0,0E+00	6,8E+00	0,0E+00	1,5E+04	0,0E+00	1,6E+05	7,9E+01	1,9E+01	1,1E+02	3,6E+02	-4,5E+03	7,5E+05
Eutrophication	kg PO ₄ - eq.	3,1E+04	1,7E+03	6,2E+01	1,4E+02	0,0E+00	1,0E+00	0,0E+00	1,9E+03	0,0E+00	2,8E+04	1,7E+01	3,7E+00	1,9E+01	7,0E+01	-6,9E+02	2,8E+05
Human toxicity	kg 1,4-DCB eq.	1,5E+07	2,0E+06	3,0E+04	5,0E+04	0,0E+00	6,8E+02	0,0E+00	2,7E+06	0,0E+00	1,1E+07	4,9E+03	1,8E+03	1,9E+04	3,1E+04	-6,1E+05	1,3E+06
Ecotoxicity, fresh water	kg 1,4-DCB eq.	4,0E+05	6,0E+04	8,8E+02	1,0E+03	0,0E+00	1,4E+01	0,0E+00	7,9E+04	0,0E+00	2,7E+05	7,6E+01	5,3E+01	2,0E+03	7,2E+02	-1,4E+04	1,2E+04
Ecotoxicity, marine water	kg 1,4-DCB eq.	1,5E+09	1,8E+08	3,2E+06	3,8E+06	0,0E+00	5,4E+04	0,0E+00	2,6E+08	0,0E+00	1,1E+09	2,8E+05	1,9E+05	3,9E+06	2,2E+06	-5,5E+07	1,5E+05
Ecotoxicity, terrestic	kg 1,4-DCB eq.	6,2E+05	1,1E+04	1,1E+02	2,0E+02	0,0E+00	6,4E+00	0,0E+00	1,1E+04	0,0E+00	5,8E+05	1,9E+01	6,4E+00	4,8E+01	5,7E+01	1,7E+04	3,7E+04
MKI	€	9,7E+06	3,7E+05	8,7E+03	1,6E+04	5,0E+04	2,3E+02	0,0E+00	5,3E+05	0,0E+00	8,8E+06	2,4E+03	5,2E+02	1,5E+04	8,0E+03	-1,3E+05	

Tabel 4.5

Milieuprofiel van warmtenetconfiguratie S5, welke gedurende 50 jaar warmte en koude levert aan 1000 woningen met een distributienet op zeer-lage-temperatuur, aan gestapelde bouw (S5 ZLT-gestapeld).

		Totaal	Productiefase	Transport	Bouw- en installatieproces, aanleg	Gebruiksfas	Onderhoud	Reparaties	Vervangingen	Hernieuwing	Operationeel energieverbruik	Sloop	Transport	Afvalbewerking	Finale afvalverwerking	Milieulasten en -baten buiten systeemgrenzen	Milieukostenindicator
S5 ZLT-gestapeld		Totaal	A1-A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	C1	C2	C3	C4	D	MKI
<u>Indicatoren Set 1</u>	Eenheid																
Abiotic depletion, non fuel	kg Sb eq.	2,5E+02	1,0E+02	9,2E-01	1,8E+00	0,0E+00	8,3E-04	0,0E+00	1,8E+02	0,0E+00	8,1E+01	1,0E-02	3,3E-02	1,3E-01	2,4E-01	-1,1E+02	4,1E+01
Abiotic depletion, fuel	kg Sb eq.	5,6E+05	3,4E+03	2,6E+02	4,4E+02	0,0E+00	2,8E+00	0,0E+00	3,5E+03	0,0E+00	5,6E+05	3,7E+01	9,4E+00	2,5E+01	3,5E+02	-1,7E+03	9,0E+04
Global warming	kg CO ₂ eq.	6,4E+07	4,3E+05	3,6E+04	6,2E+04	1,7E+05	4,0E+02	0,0E+00	9,6E+05	0,0E+00	6,3E+07	1,4E+04	1,3E+03	9,2E+04	2,7E+04	-2,6E+05	3,2E+06
Ozone layer depletion	kg CFK-11 eq.	6,8E+00	4,5E-01	6,4E-03	8,4E-03	0,0E+00	5,7E-05	0,0E+00	1,4E+00	0,0E+00	5,6E+00	9,2E-04	2,3E-04	7,1E-04	8,6E-03	-7,4E-01	2,0E+02
Photochemical oxidation	kg ethyleen eq.	9,7E+03	4,3E+02	2,2E+01	5,4E+01	0,0E+00	1,2E-01	0,0E+00	5,3E+02	0,0E+00	9,0E+03	5,0E+00	7,8E-01	2,6E+00	2,8E+01	-4,0E+02	1,9E+04
Acidification	kg SO ₂ eq.	8,5E+04	3,2E+03	1,6E+02	4,1E+02	0,0E+00	1,1E+00	0,0E+00	5,4E+03	0,0E+00	7,8E+04	3,7E+01	5,7E+00	3,0E+01	1,9E+02	-2,2E+03	3,4E+05
Eutrophication	kg PO ₄ - eq.	1,4E+04	3,4E+02	3,1E+01	7,3E+01	0,0E+00	1,7E-01	0,0E+00	5,2E+02	0,0E+00	1,3E+04	8,3E+00	1,1E+00	6,1E+00	3,7E+01	-2,4E+02	1,3E+05
Human toxicity	kg 1,4-DCB eq.	6,5E+06	6,0E+05	1,5E+04	2,6E+04	0,0E+00	1,1E+02	0,0E+00	1,0E+06	0,0E+00	5,2E+06	2,5E+03	5,4E+02	5,9E+03	1,2E+04	-3,3E+05	5,9E+05
Ecotoxicity, fresh water	kg 1,4-DCB eq.	1,6E+05	1,3E+04	4,4E+02	5,3E+02	0,0E+00	2,3E+00	0,0E+00	2,4E+04	0,0E+00	1,3E+05	3,4E+01	1,6E+01	9,4E+02	3,6E+02	-6,6E+03	4,9E+03
Ecotoxicity, marine water	kg 1,4-DCB eq.	6,2E+08	4,3E+07	1,6E+06	2,0E+06	0,0E+00	9,0E+03	0,0E+00	8,6E+07	0,0E+00	5,1E+08	1,3E+05	5,7E+04	1,6E+06	1,1E+06	-2,9E+07	6,2E+04
Ecotoxicity, terrestrial	kg 1,4-DCB eq.	2,9E+05	2,3E+03	5,3E+01	1,0E+02	0,0E+00	1,1E+00	0,0E+00	3,3E+03	0,0E+00	2,7E+05	7,1E+00	1,9E+00	1,4E+01	3,0E+01	5,8E+03	1,7E+04
MKI	€	4,5E+06	9,7E+04	4,3E+03	8,2E+03	8,3E+03	3,8E+01	0,0E+00	1,8E+05	0,0E+00	4,2E+06	1,2E+03	1,5E+02	5,5E+03	3,8E+03	-5,8E+04	

Tabel 4.6

Milieuprofiel van warmtenetconfiguratie S6, welke gedurende 50 jaar warmte en koude levert aan 1000 woningen met een distributienet op zeer-lage-temperatuur, aan grondgebonden bouw (S6 ZLT-grondgebonden).

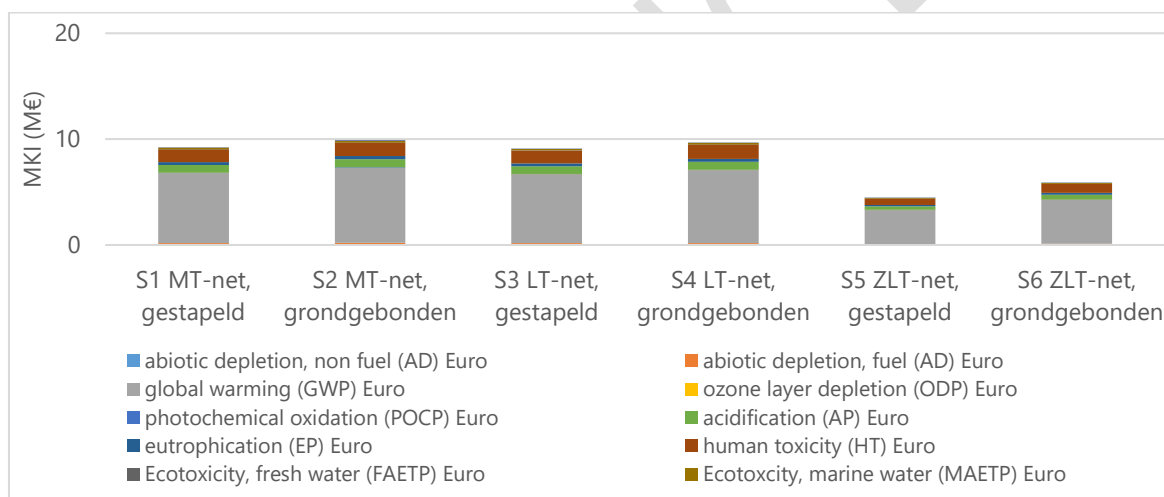
		Totaal	Productiefase	Transport	Bouw- en installatieproces, aanleg	Gebruiksfase	Onderhoud	Reparaties	Vervangingen	Hernieuwing	Operationeel energieverbruik	Sloop	Transport	Afvalbewerking	Finale afvalverwerking	Milieulasten en -baten buiten systeemgrenzen	Milieukostenindicator
S6 ZLT-grondgebonden		Totaal	A1-A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	C1	C2	C3	C4	D	MKI
<u>Indicatoren Set 1</u>	Eenheid	Totaal	A1-A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	C1	C2	C3	C4	D	MKI
Abiotic depletion, non fuel	kg Sb eq.	3,8E+02	1,4E+02	9,9E-01	1,9E+00	0,0E+00	8,3E-04	0,0E+00	2,6E+02	0,0E+00	1,0E+02	1,0E-02	5,0E-02	2,3E-01	2,6E-01	-1,3E+02	6,1E+01
Abiotic depletion, fuel	kg Sb eq.	7,3E+05	6,2E+03	2,8E+02	4,6E+02	0,0E+00	2,8E+00	0,0E+00	9,2E+03	0,0E+00	7,1E+05	3,8E+01	1,4E+01	3,6E+01	3,7E+02	-3,5E+03	1,2E+05
Global warming	kg CO ₂ eq.	8,3E+07	8,3E+05	3,9E+04	6,4E+04	3,5E+05	4,0E+02	0,0E+00	2,3E+06	0,0E+00	8,0E+07	2,3E+04	2,0E+03	9,7E+04	2,9E+04	-5,4E+05	4,2E+06
Ozone layer depletion	kg CFK-11 eq.	9,7E+00	9,7E-01	6,9E-03	8,7E-03	0,0E+00	5,7E-05	0,0E+00	3,1E+00	0,0E+00	7,2E+00	9,5E-04	3,5E-04	9,0E-04	9,0E-03	-1,6E+00	2,9E+02
Photochemical oxidation	kg ethyleen eq.	1,3E+04	8,0E+02	2,3E+01	5,6E+01	0,0E+00	1,2E-01	0,0E+00	1,3E+03	0,0E+00	1,1E+04	5,2E+00	1,2E+00	4,2E+00	2,9E+01	-8,6E+02	2,6E+04
Acidification	kg SO ₂ eq.	1,1E+05	5,7E+03	1,7E+02	4,3E+02	0,0E+00	1,1E+00	0,0E+00	1,1E+04	0,0E+00	1,0E+05	3,9E+01	8,6E+00	4,7E+01	2,0E+02	-2,9E+03	4,6E+05
Eutrophication	kg PO ₄ - eq.	1,9E+04	6,4E+02	3,3E+01	7,6E+01	0,0E+00	1,7E-01	0,0E+00	1,2E+03	0,0E+00	1,7E+04	8,6E+00	1,7E+00	8,4E+00	3,8E+01	-4,0E+02	1,7E+05
Human toxicity	kg 1,4-DCB eq.	9,5E+06	1,2E+06	1,6E+04	2,7E+04	0,0E+00	1,1E+02	0,0E+00	2,1E+06	0,0E+00	6,6E+06	2,5E+03	8,2E+02	7,8E+03	1,4E+04	-4,3E+05	8,6E+05
Ecotoxicity, fresh water	kg 1,4-DCB eq.	2,4E+05	2,5E+04	4,8E+02	5,5E+02	0,0E+00	2,3E+00	0,0E+00	5,2E+04	0,0E+00	1,7E+05	3,5E+01	2,4E+01	8,8E+02	4,8E+02	-7,6E+03	7,1E+03
Ecotoxicity, marine water	kg 1,4-DCB eq.	8,7E+08	8,0E+07	1,7E+06	2,1E+06	0,0E+00	9,0E+03	0,0E+00	1,7E+08	0,0E+00	6,5E+08	1,4E+05	8,6E+04	1,6E+06	1,4E+06	-3,3E+07	8,7E+04
Ecotoxicity, terrestrial	kg 1,4-DCB eq.	3,8E+05	4,4E+03	5,8E+01	1,1E+02	0,0E+00	1,1E+00	0,0E+00	7,8E+03	0,0E+00	3,5E+05	7,2E+00	2,9E+00	2,1E+01	3,2E+01	1,6E+04	2,3E+04
MKI	€	5,9E+06	1,9E+05	4,7E+03	8,5E+03	1,8E+04	3,8E+01	0,0E+00	3,8E+05	0,0E+00	5,4E+06	1,7E+03	2,4E+02	6,0E+03	4,1E+03	-8,5E+04	

4.3 Duiding van resultaten (Zwaartepuntanalyse)

Een zwaartepuntanalyse is uitgevoerd om een beeld te krijgen van respectievelijk de relevante milieueffecten en relevante onderdelen en deelproducten van de warmtenetten.

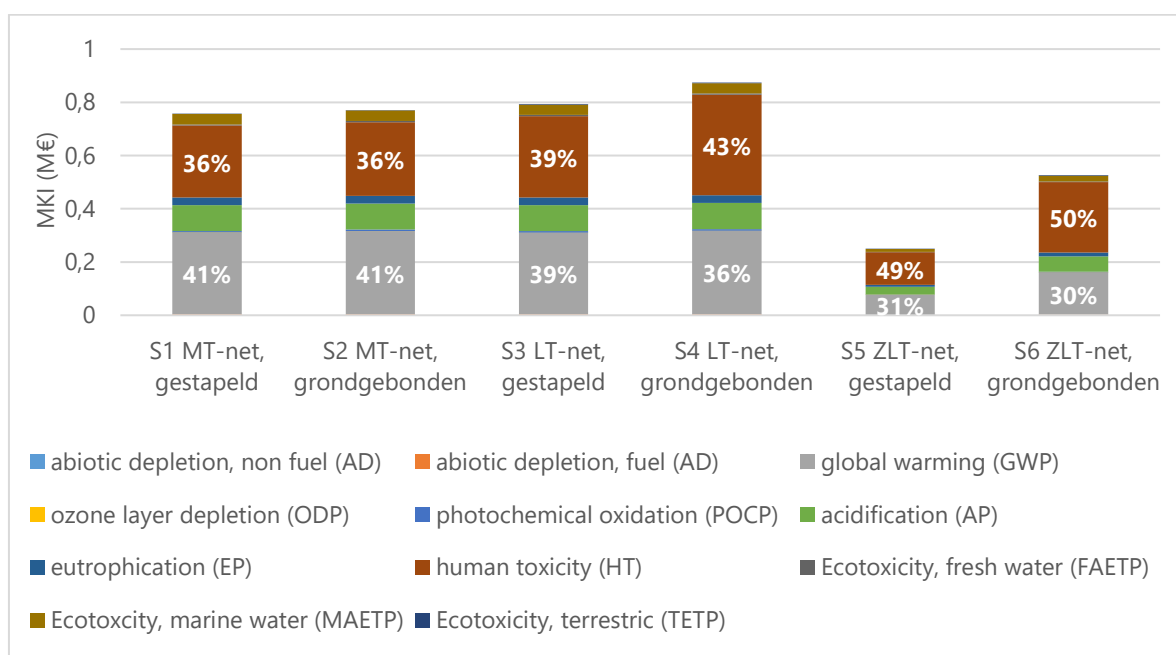
4.3.1 Relevante milieueffecten

In Figuur 4.1 is de MKI van de volledige levenscyclus van de zes warmtenetconfiguraties opgesplitst per milieueffectcategorie. In deze figuur is te zien dat alle warmtenetconfiguraties de milieueffecten *Global warming potential* (70-72%), *Human toxicity* (13-15%) en *Acidification* (8%) het meeste bijdragen aan de milieuprofielen met een cumulatieve bijdrage van 93%. De relatieve bijdragen van de milieueffectcategorieën aan de MKI zijn nagenoeg gelijk voor de zes configuraties. De hoge bijdrage aan de MKI van global warming potential is te verklaren door het hoge aandeel in de MKI voor alle configuraties van het elektriciteitsverbruik (zie Sectie 4.3.2), welke relatief hoog scoort op global warming potential.



Figuur 4.1 Zwaartepuntanalyse, relevante milieueffecten voor de zes warmtenetconfiguraties, volledige levenscyclus

In Figuur 4.2 is de MKI van de levenscyclus zonder elektriciteitsverbruik uiteengezet per milieueffectcategorie. In deze figuur is te zien dat zonder het elektriciteitsverbruik het aandeel van global warming potential van de MKI aanzienlijk lager ligt (30-41%). Daarentegen is het aandeel van human toxicity een stuk hoger (36-50%). Tevens is er een groter onderling verschil tussen de configuraties in de relatieve bijdragen van de milieueffectcategorieën, met name tussen de MT-/LT- en de ZLT-netten. De oorzaak van dit onderlinge verschil is afkomstig van de verschillende onderdelen die nodig zijn voor de warmtenetconfiguraties, zoals de airconditioningunit die alleen nodig is in de MT-/LT-netten.



Figuur 4.2

Zwaartepuntanalyse, relevante milieueffecten voor de zes warmtenetconfiguraties, levenscyclus zonder elektriciteitsverbruik

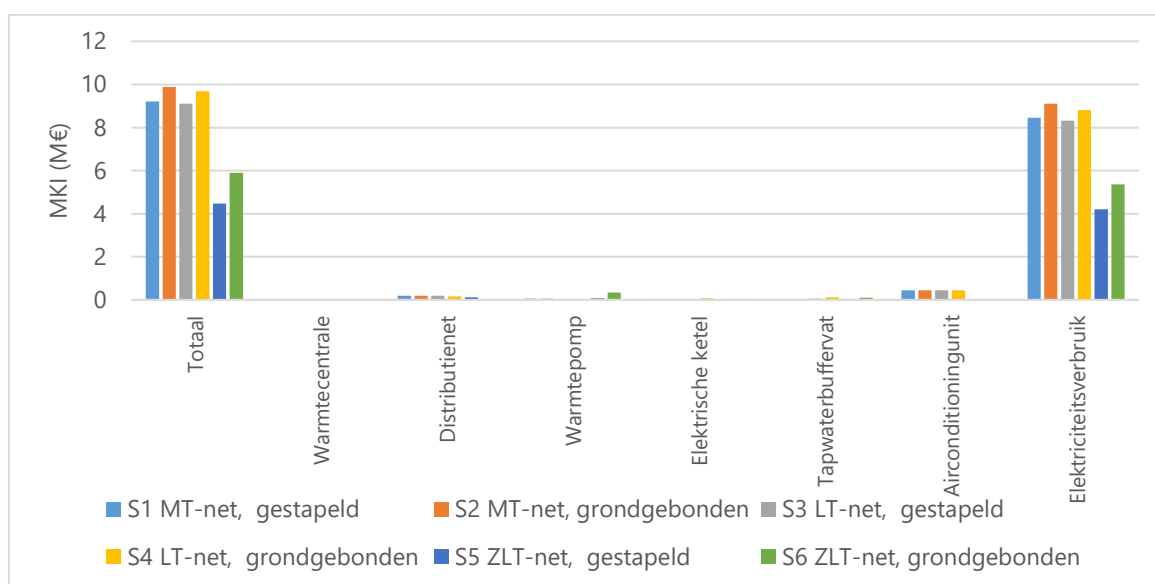
4.3.2 Relevante onderdelen en deelproducten van de warmtenetten

In deze sectie is de milieulast van de relevante onderdelen en deelproducten van de warmtenetten omschreven en vergeleken. Eerst zijn de netten op volledige schaal vergeleken, daarna worden de onderdelen en deelproducten apart beschreven.

Volledige warmtenetconfiguraties

In Figuur 4.3 is de MKI (in M€) van de zes warmtenetconfiguraties opgesplitst in de onderdelen van de netten. De totale MKI van de warmtenetconfiguraties varieert aanzienlijk, tussen de 4,5 M€ voor het ZLT-net met gestapelde bouw en 9,9 M€ voor het MT-net met grondgebondenbouw. De MKI van de ZLT-netten is, op basis van de opbouw van de bestudeerde configuraties, significant lager dan de MKI van de MT- en LT-netten. Bij een gelijk wijktype, zorgt een lagere temperatuur voor een lagere MKI, al is het verschil gering voor de MT- en LT-netten. Dit verschil is gerelateerd aan de hogere verliezen die optreden over het distributienet bij hogere transporttemperaturen.

Voor zowel de MT-, LT- als de ZLT-netten geldt dat de configuratie met gestapelde bouw een significant lagere milieulast heeft dan de configuraties met grondgebondenbouw. De oorzaak van dit verschil is voornamelijk dat een lager aantal apparaten leidt tot een lagere milieulast bij het leveren van dezelfde vraag naar vermogen/volume. Dit is het geval bij gestapelde bouw.



Figuur 4.3

Zwaartepuntanalyse, relevante onderdelen van de warmtenetten voor de zes configuraties, volledige levenscyclus

In Figuur 4.3 is tevens te zien dat het elektriciteitsverbruik voor alle configuraties de hoogste bijdrage levert aan de MKI (91-94%). De airconditioningunit (0-5%), de warmtepomp (0-6%) en het distributienet (1-3%) hebben een geringe bijdrage. De warmtecentrale, de elektrische ketel en het tapwaterbuffervat hebben allen een minieme bijdrage lager dan 2% voor alle configuraties.

Elektriciteitsverbruik

De belangrijkste factor voor de variatie in milieulast tussen de warmtenetconfiguraties, is het verbruik van elektriciteit. De spreiding in het elektriciteitsverbruik tussen de warmtenetconfiguraties is groot (123 - 266 GWh), en leidt daarmee tot een grote spreiding in de MKI van dit proces (4,2 en 9,1 M€).

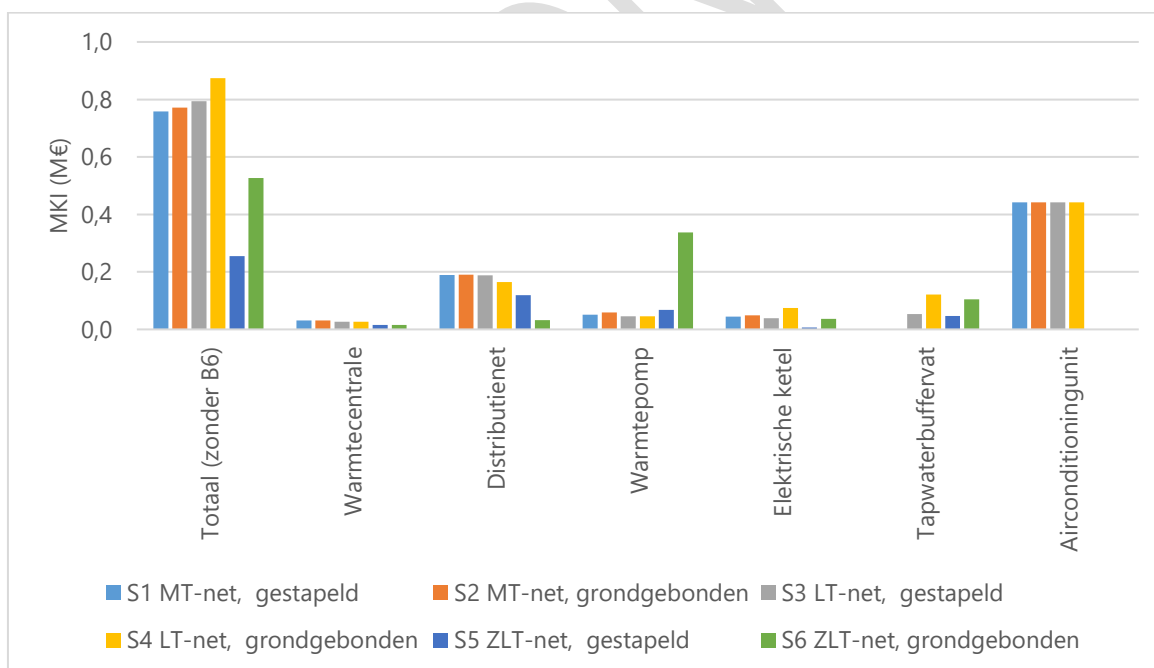
De spreiding in het elektriciteitsverbruik is te verklaren door:

- Er is voor een MT-net dubbel zoveel thermisch vermogen op het warmtenet nodig ten opzichte van een ZLT-net. De opwaardering in de warmtecentrale bij een MT-net resulteert in een hogere transporttemperatuur, waardoor er grotere thermische verliezen optreden over het distributienet.
- Er is een grotere piekvoorziening nodig door het hogere transportverlies en de grotere piekvraag voor de warmtenetconfiguraties. Tevens neemt de COP van een warmtepomp af voor een hogere opwaarderingstemperatuur, waardoor de SCOP lager is voor een MT-net dan voor een LT-net en ZLT-net.

- De Carnot efficiëntie van de centrale warmtepompen is ongeveer 33% groter, waardoor het ZLT-net met gestapelde bouw een hogere SCOP behaalt dan het ZLT-net met grondgebonden bouw. De hogere SCOP voor het ZLT-net met gestapelde bouw zorgt voor een lager energieverbruik dan dat van het ZLT-net met grondgebondenbouw bij een gelijke thermische vraag (Deltares, 2022).

Warmtenetconfiguraties zonder elektriciteitsverbruik

Om het verschil in milieulast van de overige onderdelen te visualiseren, is in Figuur 4.4 de MKI opgesplitst per onderdeel van de warmtenetten, zonder het elektriciteitsverbruik. In deze figuur zijn dezelfde trends te zien als in Figuur 4.3, waarbij een lagere temperatuur en gestapelde bouw een lagere MKI hebben dan een hogere temperatuur en grondgebondenbouw. Tevens is te zien dat voor de MT- en LT-netten, de hoogste milieulast afkomstig is van de airconditioningunit (51-58%), gevolgd door het distributienet (19-25%) en de elektrische ketel (5-9%). Voor het ZLT-net met gestapelde bouw komt de hoogste milieulast van het distributienet (47%), de warmtepomp (27%) en het tapwaterbuffervat (18%). Voor het ZLT-net met grondgebonden bouw komt de hoogste milieulast van de warmtepomp (64%) en het buffervat (20%). De oorzaken van de variatie in de milieulast van de onderdelen van de warmtenetconfiguraties worden in de onderstaande secties apart beschreven.



Figuur 4.4

Zwaartepuntanalyse, relevante onderdelen van warmtenetten voor de zes configuraties, levenscyclus zonder elektriciteitsverbruik.

Warmtepomp

In Figuur 4.4 is te zien dat het ZLT-net met grondgebonden bouw (S6) een aanzienlijk hogere milieulast heeft dan de andere configuraties, waar kleine onderlinge verschillen zijn. De hoge impact van S6 is te verklaren door de combinatie van het relatief hoge vermogen dat geleverd moet worden (2960 kW_{th} t.o.v. 1960-2590 voor de MT- en LT-netten) en het aantal units dat dit vermogen levert (zie sectie 3.2.3.1). In S6 wordt het vermogen geleverd door 1000 units (1 per woning), terwijl in alle andere configuraties het vermogen geleverd wordt door 13 tot 19 units. In het algemeen geldt dat voor een klein aantal grote apparaten (met een hoog vermogen/volume etc.) minder materiaal nodig is om dezelfde functie te leveren dan een groot aantal kleine apparaten. De milieulast is dan ook lager voor een kleiner aantal apparaten. Voor de warmtepompen is dit contrast extra groot, omdat de elektronische componenten een significant aandeel hebben in de MKI, en deze componenten niet mee schalen met het geleverde vermogen. In een warmtepomp van 3 kW_{th} zit dus dezelfde hoeveelheid elektronica als in een warmtepomp met 162 kW_{th}.

Elektrische ketel en tapwaterbuffervat

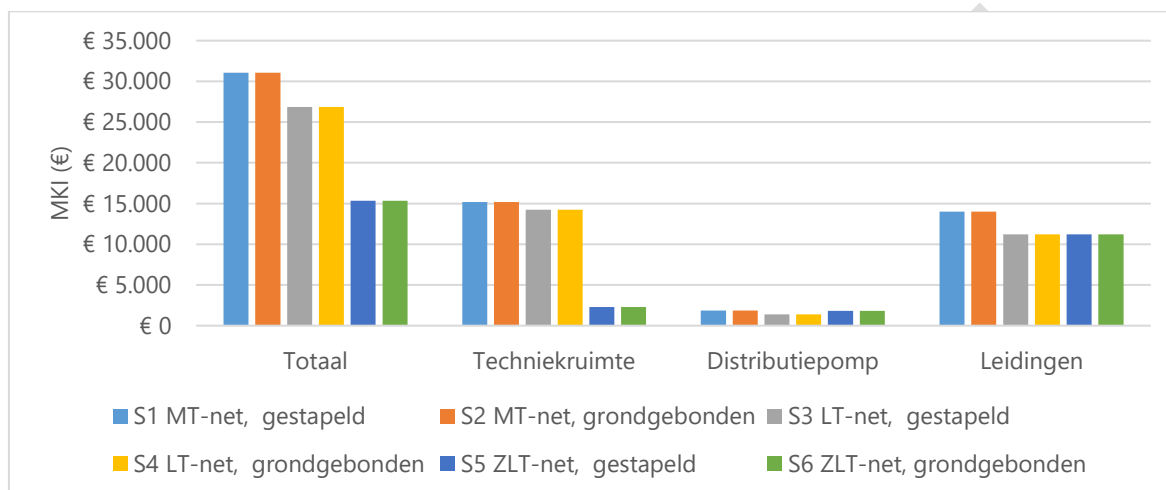
De variatie in milieulast tussen de warmtenetconfiguraties afkomstig van de elektrische ketels en tapwaterbuffervaten, zoals te zien in Figuur 4.4, is tevens te verklaren door het verschil in het te leveren vermogen/volume en het aantal units dat dit vermogen/volume levert (zie sectie 3.2.4.1 en sectie 3.2.5.1). Het contrast is minder groot dan bij de warmtepompen, voornamelijk omdat er geen continue schaling is gebruikt zoals bij de warmtepomp (tussen 3-162 kW_e), maar er slechts twee of drie 'maten' zijn gebruikt, namelijk een van 2 kW_e en een van 100 kW_e voor de elektrische ketel en 2000 L, 150 L en 120 L voor het tapwaterbuffervat.

Airconditioningunit

In Figuur 4.4 is te zien dat de milieulast van de airconditioningunit gelijk is voor alle configuraties waar deze van toepassing is (MT- en LT-netten). Voor de zwaartepuntanalyse van de airconditioningunit, zie Sectie 3.2.6.2. Opvallend is dat de milieulast van airconditioningunits hoger is dan die van warmtepompunits van het ZLT-net met grondgebondenbouw. Dit komt omdat de milieulast van de airconditioningunit (vermogen tussen de 1-4 kW_{th}) aanzienlijk hoger is dan die van een warmtepomp van 3 kW_{th}. De milieulast van 1 airconditioningunit is € 177, die van de warmtepomp € 101. Ondanks de langere levensduur van de airconditioningunit van 20 jaar ten opzichte van die van de warmtepomp van 15 jaar, heeft de warmtepomp alsnog een lagere MKI. De hogere milieulast van de airconditioningunit is te verklaren door het hogere aandeel aan elektronica wat vereist is, omdat de split-type airconditioningunit elektronische componenten vereist voor zowel de indoor als outdoor unit.

Warmtecentrale

In Figuur 4.5 is de MKI van de warmtecentrale opgesplitst in de deelproducten *techniekrumte*, *distributiepompen* en *leidingen*. In deze figuur is te zien dat de grootste milieulast afkomstig is van de leidingen en techniekrumte. Tevens is te zien dat de impact van de techniekrumte aanzienlijk lager is voor de ZLT-netten, omdat hier geen ruimte nodig is voor opwaardering in de warmtecentrale (zie sectie 3.2.1.1). Daarnaast is te zien dat, door de hogere temperatuur en debiet, de distributiepompen en leidingen een hogere milieulast hebben dan voor de LT- en ZLT-netten.

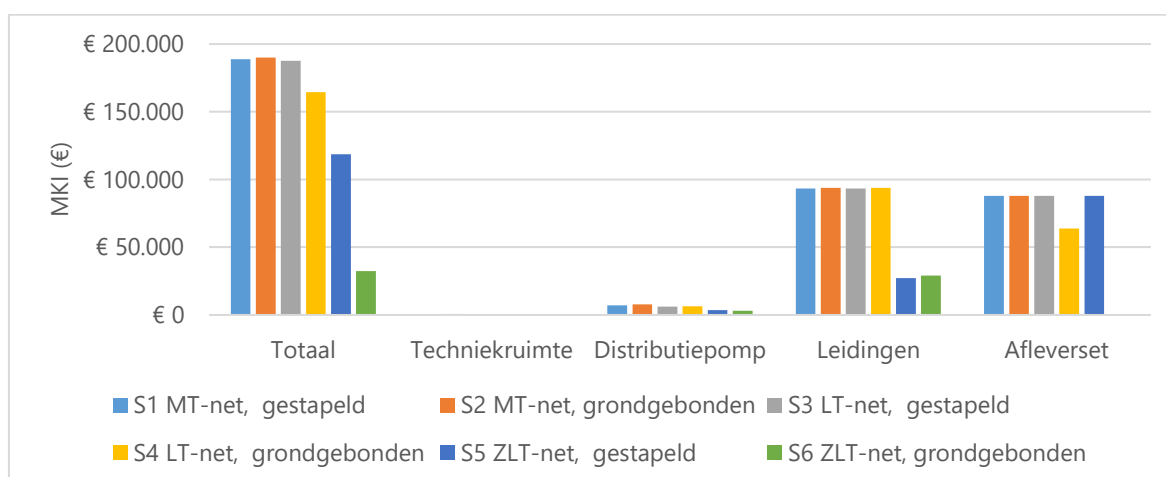


Figuur 4.5

Zwaartepuntanalyse, relevante deelproducten van de warmtecentrale voor de zes warmtenetconfiguraties

Distributienet

In Figuur 4.6 is de MKI van het distributienet opgesplitst in de deelproducten *techniekrumte*, *distributiepompen*, *leidingen* en *afleverset*. In deze figuur is te zien dat de hoogste milieulast afkomstig is van de leidingen en de afleverset, de impact van de techniekrumte en distributiepompen is minimaal. De relatief lage impact van de leidingen van de ZLT-netten is te verklaren door het gebruik van niet geïsoleerde HDPE leidingen, in plaats van Staal-PUR-PE en PEX-PUR-PE. Daarnaast is te zien dat het verschil in leidinglengte voor de grondgebonden/gestapelde bouw (15/10 m) gecompenseerd wordt door het verschil in de kleinste diameter van het leidingnetwerk (20/40 mm) (zie Sectie 3.2.2). Het ontbreken van de afleverset in het ZLT-net met grondgebondenbouw resulteert in een significant lagere milieulast van het distributienet voor deze configuratie. De milieulast van de afleverset van het LT-net met grondgebonden bouw is tevens lager door het ontbreken van de tapwatervoorziening (zie sectie 3.2.2).



Figuur 4.6

Zwaartepuntanalyse, relevante deelproducten van het distributienet voor de zes warmtenetconfiguraties

4.4 Gevoeligheidsanalyse, aanbevelingen en discussiepunten

In deze sectie zijn de gevoeligheidsanalyse, aanbevelingen en discussiepunten omschreven. Als eerste is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd om de milieulast van de warmtenetconfiguraties te vergelijken met een alternatief scenario waar de warmte en koude met individuele systemen wordt opgewerkt. Daarna is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd om de spreiding in de milieu-impact te bepalen wanneer het aandeel hernieuwbare stroom wordt vergroot. Als laatste zijn er aanbevelingen gedaan en zijn discussiepunten besproken.

4.4.1 Gevoeligheidsanalyse - vergelijking alternatief scenario: individuele lucht-water warmtepomp (S7 – LW warmtepomp)

In deze sectie is de milieulast van de zes warmtenetconfiguraties vergeleken met een alternatief scenario omtrent het voorzien in warmte en koude. In dit scenario wordt de warmte en koude opgewerkt met individuele systemen. De warmtecentrale en het distributienet zijn daarom geen onderdeel van dit scenario. De warmte wordt geleverd door een lucht-water (LW) warmtepomp en een elektrische ketel. Een buffervat verlaagt het benodigde piekvermogen door spreiding van de warmtevraag over de dag. De koude wordt geleverd door een airconditioningunit¹⁹.

¹⁹ De warmte en koudevraag zou technisch gezien ook geleverd kunnen worden door een enkele lucht-water combinatiewarmtepomp met speciale modules/uitbreidingen. De elektrische ketel, het tapwaterbuffervat en de airconditioningunit zouden dan overbodig zijn. Echter is er geen toereikende data beschikbaar betreft de materialisatie van zo'n lucht-water combinatiewarmtepomp. Daarom is, in overeenstemming met en voor een eerlijke vergelijking met de andere scenario's, gekozen om deze onderdelen apart te modeleren.

Om de warmtenetconfiguraties met het alternatieve scenario te kunnen vergelijken, zijn dezelfde uitgangspunten (zie Sectie 2.2) van toepassing. Dat wil zeggen dat de thermische vraag (per 1000 woningen) gelijk is voor alle configuraties/scenario's. In Tabel 4.7 is een overzicht weergegeven van de thermische vraag, de COP en het resulterende elektriciteitsverbruik van de scenario-onderdelen. In overeenstemming met de warmtenetconfiguraties, is gebruikgemaakt van 100% grijze stroom. In de volgende sectie is het alternatieve scenario meegenomen in de gevoeligheidsanalyse omtrent hernieuwbare stoom.

Tabel 4.7

Thermische vraag en elektriciteitsverbruik scenario: S7 - LW warmtepomp²⁰.

Onderdeel	Thermische vraag (Type)	Thermische vraag (kWh/jaar/woning)	COP	Elektriciteitsverbruik (kWh/jaar/woning)
Lucht-water warmtepomp	Ruimteverwarming	7.000	3,5	2.000
Elektrische ketel	Tapwaterbereiding	3.000	2,5 ²¹	1.200
Airconditioningunit	Koude	430	3	143
Elektriciteitsverbruik	-	-	-	3.343

In Tabel 4.8 is weergegeven uit welke producten het scenario is opgebouwd, hoeveel units er nodig zijn en welk vermogen/volume een unit levert. Het vermogen/volume van de elektrische ketel en de tapwaterbuffer is gelijk gesteld aan dat van de ZLT-warmtenetconfiguratie met grondgebondenbouw (S6). Het vermogen van de LW-warmtepomp is gesteld op 5 kW_{th}, ten opzichte van de 3 kW_{th} uit S6. In die configuratie wordt er warmte geleverd door het warmtenet (15 graden), waardoor er minder opwaardering op woningniveau vereist is. De modellering en zwaartepuntanalyse van de lucht-water warmtepomp zijn omschreven in bijlage III.

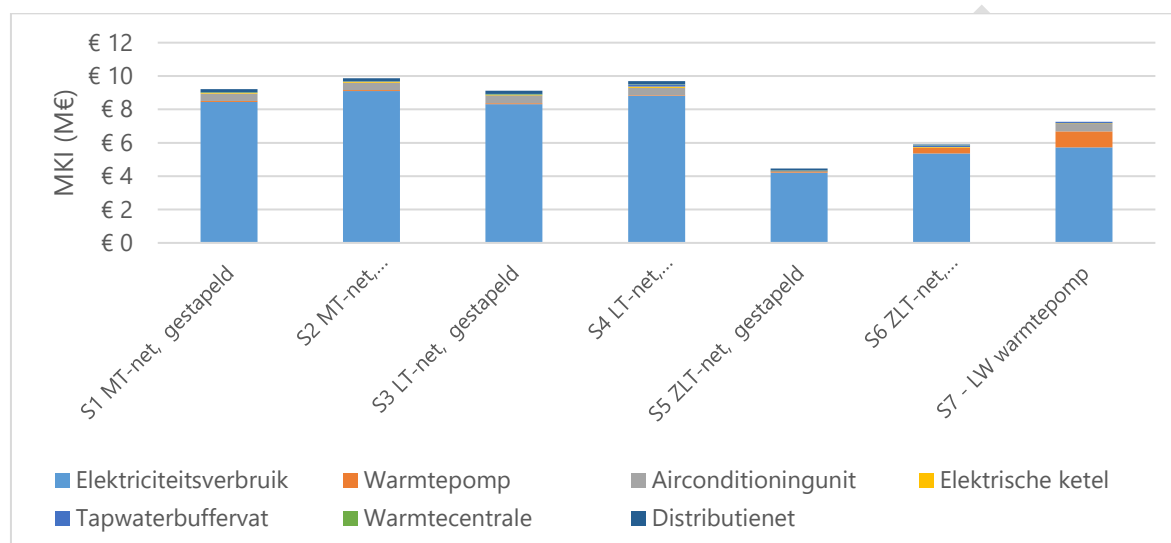
Tabel 4.8: Productopbouw scenario: S7 - LW warmtepomp.

Onderdeel	Aantal units	Vermogen/Volume	Eenheid
Lucht-water warmtepomp	1000	5	kW _{th}
Elektrische ketel	1000	2	kW _e
Airconditioningunit	1000	1,4 – 4,3	kW _{th}
Tapwaterbuffer	1000	120	L

20 ²⁰ De thermische vraag en de COP van de elektrische ketel en airconditioningunit zijn overgenomen uit de studie van Deltares (2020). Zie Bijlage III voor de toelichting over de COP van de lucht-water warmtepomp.

21 ²¹ Na overleg met de klankbordgroep is besloten om de COP van de elektrische ketel, voor het opwaarderen van het tapwater, te stellen op 2,5. Hier is voor gekozen omdat de COP van een lucht-water combinatiewarmtepomp een hogere COP heeft voor tapwaterbereiding.

In Figuur 4.7 is de MKI van de zes warmtenetconfiguraties vergeleken met de MKI van het alternatieve scenario (S7 – LW warmtepomp). In deze figuur is te zien dat het alternatieve scenario een lagere milieulast heeft dan de MT- en LT-netten, maar een hogere last dan de ZLT-netten. De hoogste bijdrage aan de milieulast is tevens afkomstig van het elektriciteitsverbruik. De MKI van het elektriciteitsverbruik van 5,7 M€ is aanzienlijk lager dan die van de MT- en LT-netten (8,3 – 9,1 M€), maar hoger dan die van de ZLT-netten met gestapelde en grondgebonden bouw (respectievelijk 4,2 en 5,4 M€).

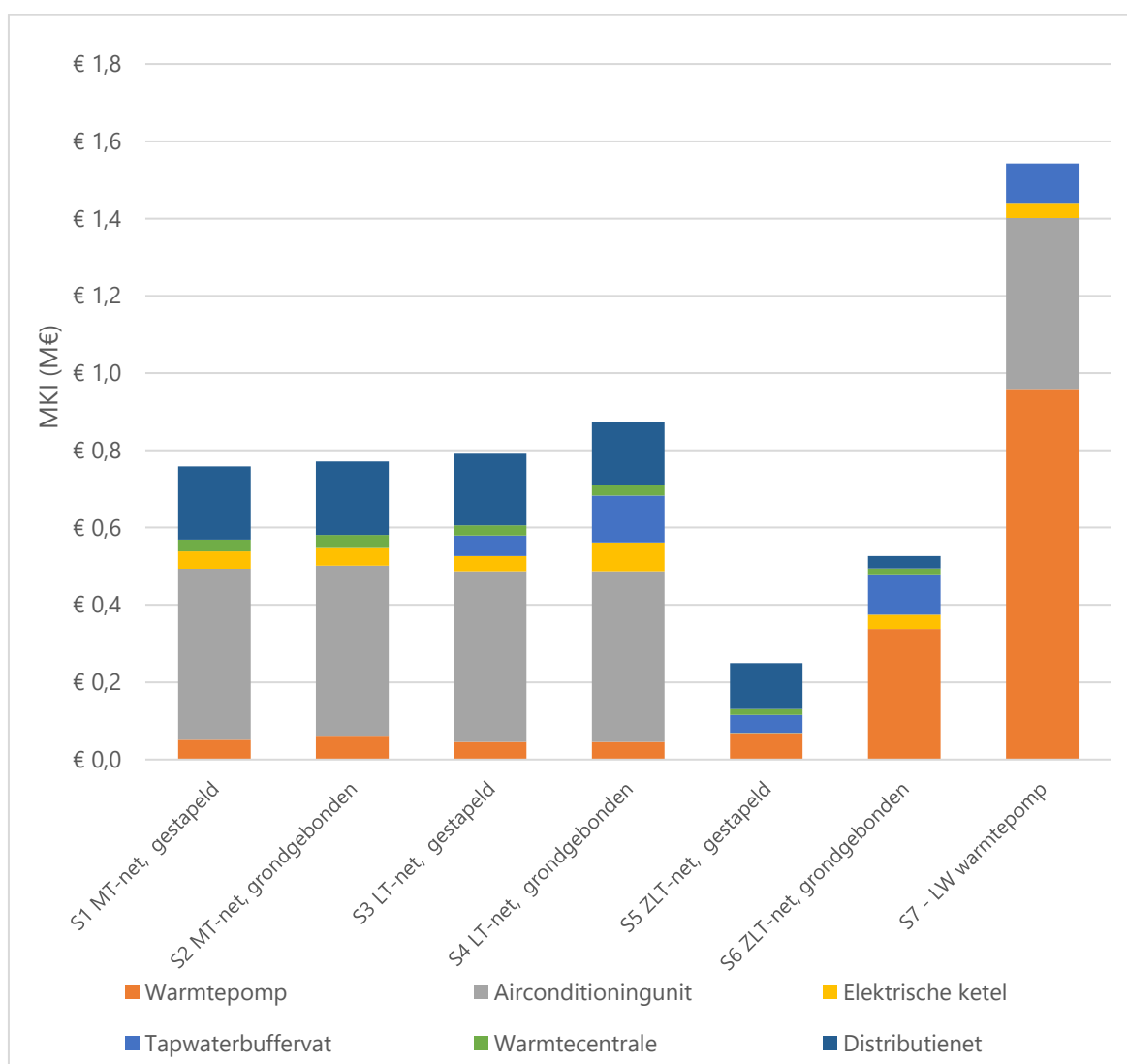


Figuur 4.7

Gevoeligheidsanalyse, vergelijking MKI warmtenetconfiguraties met alternatief scenario (S7- LW -warmtepomp)

In dit alternatieve scenario wordt de warmte (lucht-water warmtepomp) en koude opgewerkt met individuele systemen.

In Figuur 4.8 is de MKI van de warmtenetconfiguraties en het alternatieve scenario weergegeven zonder het elektriciteitsverbruik. In deze figuur is te zien dat de MKI van de warmtepompen aanzienlijk hoger is in het alternatieve scenario (0,96 M€) dan bij de warmtenetconfiguraties (tussen de 0,05 – 0,34 M€). Dit verschil is enerzijds afkomstig van het hogere vermogen dat geleverd moet worden in het alternatieve scenario, en anderzijds afkomstig van de hogere MKI van de lucht-water warmtepomp ten opzichte van de water-water warmtepomp. De lucht-water warmtepomp heeft namelijk een indoor en een outdoor unit. Bij de water-water warmtepomp in de warmtenet-configuraties wordt het 'outdoor' gedeelte overgenomen door het warmtenet, welke de warmtepomp voorziet van de warmtebron. Verder is de milieulast van de airconditioningunit exact gelijk voor alle scenario's waar deze op van toepassing is, en in de milieulast van de elektrische ketel en tapwaterbuffervat zit geen significante variatie.



Figuur 4.8

Gevoeligheidsanalyse, vergelijking MKI warmtenetconfiguraties zonder elektriciteitsverbruik, inclusief alternatief scenario (S7 – LW warmtepomp).

In dit alternatieve scenario wordt de warmte (lucht-water warmtepomp) en koude opgewerkt met individuele systemen.

Er is voor het alternatieve scenario geen onderscheid gemaakt tussen gestapelde en grondgebonden bouw, omdat de koude en warmte wordt opgewerkt met individuele systemen. Waarschijnlijk is het moeilijker om dit scenario te realiseren bij gestapelde bouw, omdat het ruimtebeslag in de woning aanzienlijk groot is door de combinatie van een lucht-water warmtepomp (split unit), een airconditioningunit (split unit), een elektrische ketel en een tapwaterbuffer.

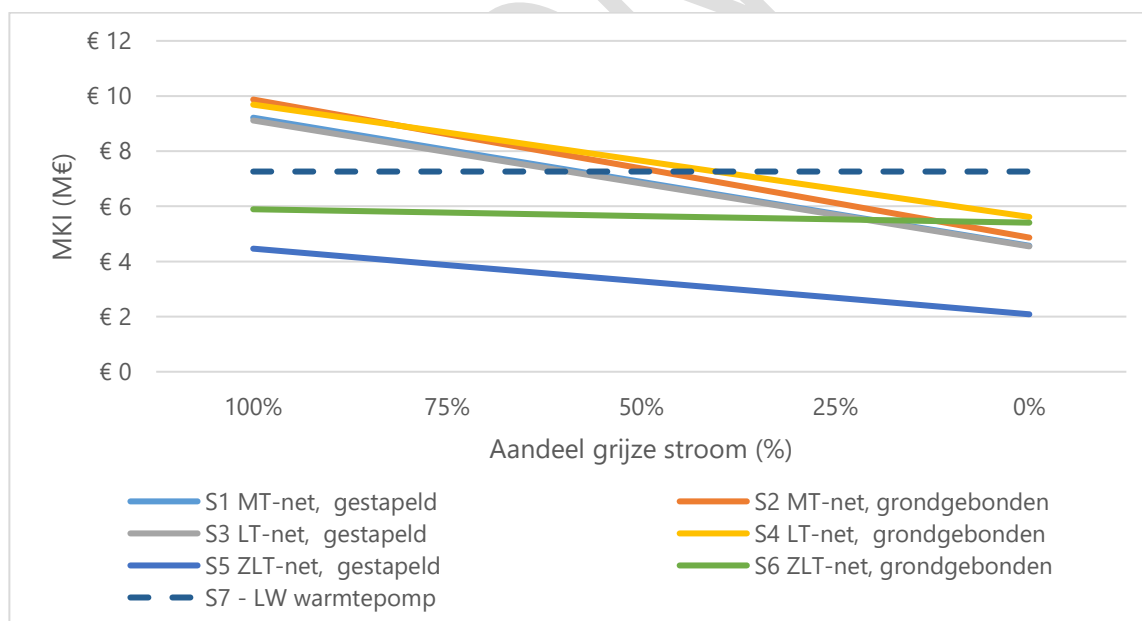
4.4.2 Gevoeligheidsanalyse - aandeel hernieuwbare stroom

In deze LCA is er gekeken naar het elektriciteitsverbruik bijbehorend aan de warmte- en koudelevering van de zes warmtenetconfiguraties en het alternatieve scenario ('S7') uit de voorgaande sectie (4.4.1). Uit de zwaartepuntanalyse is gebleken dat dit proces voor alle warmtenetconfiguraties een significante impact heeft op de totale MKI (91-94%). Daarbij is uitgegaan van een gebruik van 100% grijze stroom.

Om het effect van het gebruik van hernieuwbare stroom te bepalen, is het milieuprofiel van de warmtenetten, en het alternatieve scenario, bepaald bij een variërend aandeel grijze stroom. Daarbij is onderscheid gemaakt tussen het elektriciteitsverbruik van de consument en van de warmtenetbeheerder (zie Tabel 3.16).

Gevoeligheidsanalyse variatie aandeel hernieuwbare stroom – enkel aandeel netbeheerder

Het aandeel grijze stroom waar de warmtenetbeheerder direct invloed op heeft, is gevarieerd tussen de 100 en 0%. Het aandeel grijze stroom van de consument blijft op 100%, er is in deze situatie aangenomen dat dit niet te beïnvloeden is, er is daarom uitgegaan van 'worst case'. De MKI van de volledige warmtenetconfiguraties en het alternatieve scenario onder deze variatie is weergegeven in Figuur 4.9.



Figuur 4.9

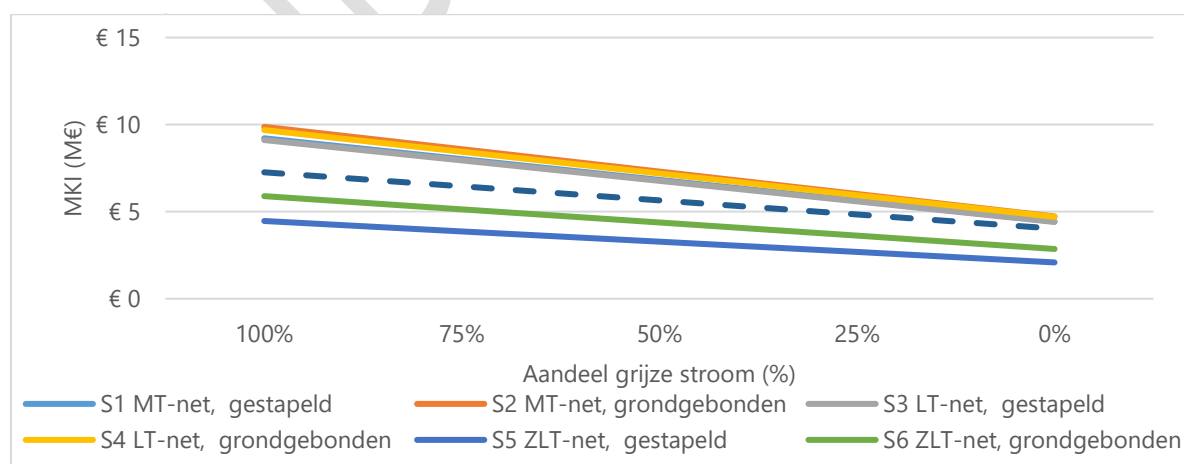
Gevoeligheidsanalyse, MKI levenscyclus warmtenetten en alternatief scenario (S7) bij variatie in aandeel grijze stroom van de warmtenetbeheerder

In deze grafiek is enkel het aandeel grijze stroom gevarieerd waar de beheerder van het warmtenet direct invloed op heeft. Het aandeel grijze stroom van het verbruik van de consument is onaangepast (100%).

In Figuur 4.9 is te zien dat de variatie in het aandeel hernieuwbare / grijze stroom een significante impact heeft op alle warmtenetconfiguraties, behalve voor het ZLT-net met grondgebonden bouw (S6). De MKI van deze configuratie blijft nagenoeg gelijk, omdat het grootste gedeelte van het elektriciteitsverbruik plaatsvindt bij de consument. Bij 0% grijze stroom van de warmtenet-beheerder, heeft daarom enkel het LT-net met grondgebondenbouw (S4) een hogere MKI dan S6. Daarnaast heeft het MT-net met grondgebondenbouw vanaf een aandeel grijze stroom lager dan $\pm 80\%$ een lagere MKI dan S4. De MT- en LT-netten met gestapelde bouw blijven ten opzichte van elkaar een nagenoeg gelijke MKI hebben onder de variatie in het aandeel grijze stroom. Het ZLT-net met gestapelde bouw heeft voor elk percentage grijze stroom verreweg de laagste MKI. Het alternatieve scenario heeft enkel elektriciteitsgebruik bij de consument. Dit scenario scoort daarom relatief steeds slechter naarmate het aandeel grijze stroom van de warmtenetbeheerder daalt.

Gevoeligheidsanalyse variatie aandeel hernieuwbare stroom – aandeel warmtenetbeheerder + consument

Het aandeel grijze stroom van het totaalverbruik (aandeel warmtenetbeheerder + consument) is gevarieerd tussen de 100 en 0%. Hierbij is dus wel uitgegaan van gebruik van hernieuwbare elektriciteit door de consument. De MKI van de volledige warmtenetconfiguraties, en het alternatieve scenario, onder deze variatie is weergegeven in Figuur 4.10. In deze figuur is te zien dat de variatie in het aandeel grijze stroom een significante impact heeft op het alternatieve scenario en alle warmtenetconfiguraties, het ZLT-net met grondgebondenbouw inbegrepen. Naarmate het aandeel grijze stroom afneemt, convergeert de MKI van de MT- en LT-netten, waarbij de configuraties met gestapelde bouw een kleine afname behouden ten opzichte van de grondgebondenbouw. De ZLT-netten hebben een aanzienlijk lagere MKI dan de MT- en LT-netten, waarbij de netten met gestapelde bouw weer een lagere MKI heeft dan de netten met grondgebonden bouw. Het alternatieve scenario heeft de lagere MKI dan de MT- en LT-netten en een hogere MKI dan de ZLT-netten, ongeacht wat het aandeel grijze stroom is.



Figuur 4.10

Gevoeligheidsanalyse, MKI levenscyclus warmtenetten en het alternatieve scenario (S7) bij variatie in het aandeel grijze stroom van het totale elektriciteitsverbruik

In deze grafiek is het aandeel grijze stroom van zowel het verbruik van de warmtenetbeheerder als van de consument gevarieerd.

Conclusie gevoeligheidsanalyse hernieuwbare stroom

De gevoeligheidsanalyse laat het belang zien van het gebruiken van hernieuwbare stroom voor alle warmtenetconfiguraties en het alternatieve scenario. De afname van de totale MKI bij gebruik van 100% hernieuwbare stroom in plaats van 100% grijze stroom, is weergegeven in Tabel 4.9. Om een significante reductie te behalen van de MKI, is het voor het ZLT-net met grondgebonden woningen en het alternatieve scenario van belang dat (ook) de consument gebruik maakt van hernieuwbare stroom. Voor de andere configuraties is een significante reductie al mogelijk met enkel het gebruik van hernieuwbare stroom van de warmtenetbeheerder.

Tabel 4.9

Afname totale MKI warmtenetconfiguraties en het alternatieve scenario bij gebruik 100% hernieuwbare stroom t.o.v. 100% grijze stroom.

Warmtenetconfiguratie	Afname (%) - enkel warmtenetbeheerder	Afname (%) - totale stroom
S1 MT-net, gestapeld	50%	51%
S2 MT-net, grondgebonden	51%	52%
S3 LT-net, gestapeld	50%	52%
S4 LT-net, grondgebonden	42%	51%
S5 ZLT-net, gestapeld	53%	53%
S6 ZLT-net, grondgebonden	8%	52%
S7 – LW warmtepomp	0%	45%

Er is onderscheid gemaakt tussen het gebruik van hernieuwbare stroom voor enkel het elektriciteitsverbruik van de warmtenetbeheerder en dat van de warmtenetbeheerder en de consument samen (totaal).

4.4.3 Aanbevelingen en discussiepunten

Thermische Energie uit Oppervlaktewater

Voor het modelleren van de TEO installatie is enkel het leidingwerk en de distributiepomp meegenomen (zie sectie 3.2.1.1). In realiteit zijn er meer onderdelen nodig om thermische energie uit oppervlaktewater te verkrijgen, zoals regeltechniek, filtering, bemetering en onderhoud. Op basis van de beperkte beschikbare informatie, is het niet mogelijk om in te schatten hoe groot de relatieve impact van deze onderdelen is, en in welke maten dit varieert tussen de warmtenetconfiguraties. De berekende milieulast in deze studie is in ieder geval een onderschatting van de werkelijkheid. Voor een nauwkeurigere schatting is meer onderzoek vereist.

Combinatiewarmtepomp

Zoals besproken in sectie 3.2.3.1, heeft Deltares in haar analyse gekozen voor het gebruik van een combinatiewarmtepomp voor de opwaardering in de ZLT-netten. In verband met tijdsoverwegingen en bij gebrek aan passende data, is er in deze studie gekozen om de combinatiewarmtepomp te modelleren als de som van een warmtepomp en een elektrische ketel. De materialisatie, en tevens de milieulast, kan daarom in realiteit afwijken wanneer er gebruikgemaakt gaat worden van een combinatiewarmtepomp.

Verzwarend elektriciteitsnet

Om het piekvermogen van de warmtenetconfiguraties te kunnen leveren, moet er voldoende aansluitvermogen aanwezig zijn. Daarnaast moet er per woning voldoende vermogen beschikbaar zijn om de decentrale opwaardering van de warmte te kunnen realiseren. Daarom zijn er op verschillende niveaus verzwaringen van het elektriciteitsnet vereist. Deltares heeft deze verzwaring meegenomen in haar analyse. Het verzwaren van het net kan op veel verschillende manieren gerealiseerd worden en vereist een complexe analyse. In verband met tijdsoverwegingen en bij gebrek aan passende data, is de verzwaring van het elektriciteitsnet daarom niet opgenomen in deze studie.

Distributieleidingen

In deze studie is gebruikt gemaakt van UNO leidingen, dat wil zeggen dat er een aanvoer- en retourleiding vereist is voor de distributie van warmte en koude. Er zijn ook DUO leidingen beschikbaar op de markt, waar de aanvoer- en retourleiding in een enkele buis zitten. Het materiaalgebruik, en daarmee de milieulast van de leidingen, kan aanzienlijk gereduceerd worden met het gebruik van DUO leidingen. Na overleg met experts is ervoor gekozen om de DUO leidingen niet in het model op te nemen. De aanleg van DUO leidingen is vaak complex en duur, omdat deze starre leidingen veel moeilijker zijn om aan te leggen. Dat geldt al helemaal voor bestaande wijken waar al een groot aantal leidingen in de grond aanwezig is.

Daarnaast is er voor alle leidingtypen uitgegaan van rechte buizen, d.w.z. geen gebogen onderdelen en koppelstukken. Tevens zijn moffen, eindmanchetten, expansies en muurdoorvoeringen buiten beschouwing gelaten. De berekende milieulast in deze studie is daarmee een onderschatting van de werkelijkheid. Voor een nauwkeurigere benadering is meer onderzoek vereist.

Tenslotte is er geen onderscheid gemaakt tussen de pijpdiameter van de MT-, LT- en ZLT-netten. De exacte diameterverdeling van een warmtenet is onder andere afhankelijk van de geografie van de wijk, het temperatuurregime en het debiet. De keuze om geen onderscheid te maken tussen de netten zorgt naar verwachting niet voor een grote afwijking in de werkelijke milieulast van de netten, omdat de relatieve impact van dit onderdeel van het warmtenet klein is.

Leidingwerk in de woning/blok

In overeenstemming met de studie van Deltares, zijn de alle eventueel benodigde aanpassingen in de woning of het blok niet meegenomen in deze studie. Het ontbreken van deze aanpassingen zou een vertekend beeld kunnen geven tussen de verschillen in milieulast van de configuraties met grondgebonden en gestapelde bouw. In overleg met een expert is gebleken dat het bij bestaande gestapelde bouw in praktijk lastig is om gebruik te maken van voorisolatie. Door de starheid van de voorgeïsoleerde leidingen is het moeilijk om de benodigde bochten te maken. Daarom wordt er vaak gebruik gemaakt van stalen leidingen met perssystemen, waarna deze geïsoleerd worden met Armaflex, steenwol of PUR. Dit zorgt voor een hoger energieverlies. Alternatieve opties zijn om de leidingen te plaatsen op een dak of te leiden via balkons. De beste oplossing is sterk afhankelijk van het woningcomplex, en daarom is het lastig om een representatief model te maken voor het inpandige leidingwerk. Er is meer onderzoek nodig om dit onderdeel op te nemen in deze studie.

LBP|SIGHT B.V.

ing. J.B. (Jeannette) Levels-Vermeer

ing. H.C. (Hilko) van der Leij MSc

B.M. (Benthe) Vermaas MSc

Bijlage I Nieuw verwerking-scenario einde leven van elektronica

Deze bijlage beschrijft hoe het massa-aandeel per grondstof van de processen 0405-*fab&Elektronica, printplaat, inclusief elektronische componenten (o.b.v. Printed wiring board, surface mounted, unspecified, Pb free {GLO}) market for | Cut-off, U* en 0303-*fab&Elektronica, passieve componenten (o.b.v. Electronic component, passive, unspecified {GLO}) market for | Cut-off, U* bepaald is.

In tabel 4.10 is voor het printed wiring board (PWB) proces van de NMD een overzicht gemaakt van de inbegrepen sub-processen. Het gewicht van de input grondstoffen is per functionele eenheid van deze sub-processen weergegeven. Om het gewicht te bepalen van de input grondstoffen in het PWB proces, is het gewicht afkomstig uit de sub-processen gecorrigeerd aan de hand van het afvalverlies in het sub-proces en het aandeel van het PWB proces.

Voorbeeld:

In 1 kg *Capacitor, for surface mounting* wordt 0,014 kg koper gebruikt voor de productie. Per 1 kg output gaat er 0,48 kg input verloren. Daarnaast gaat er 0,033 kg *Capacitor* in 1 kg PWB. Het koper aandeel in 1 kg PWB, afkomstig uit *Capacitor* is daarom $0,014 \cdot 0,033 / 1,48 = 00,00031$ kg koper.

Het massa-aandeel per grondstof (input), per sub-proces, in 1 kg PWB is weergegeven in tabel 4.11. De som van de sub-processen geeft de totale massa van de input van de grondstoffen. Voor het massa-aandeel van de grondstoffen van 1 kg PWB output (aandeel PWB %), is de totale input per grondstof gedeeld door de som van de totale input van alle grondstoffen.

Voor het passieve componenten proces van de NMD zijn dezelfde stappen gevolgd als voor de PWB. De resultaten zijn weergegeven in tabel 4.12 en tabel 4.13

Tabel 4.10

Overzicht massa-aandeel grondstoffen in sub-processen van proces 0405-fab&Elektronica, printplaat, inclusief elektronische componenten.

Proces		Capacitor, for surface-mounting {GLO} production Cut-off, U	Diode, glass-, for surface-mounting {GLO} production Cut-off, U	Electric connector, peripheral component interconnect buss {GLO} production Cut-off, U	Integrated circuit, logic type {GLO} production Cut-off, U	Light emitting diode {GLO} production Cut-off, U	Printed wiring board, for surface mounting, Pb free surface {GLO} market for Cut-off, U	Resistor, surface-mounted {GLO} production Cut-off, U	Transistor, surface-mounted {GLO} production Cut-off, U
	Eenheid	kg	kg	kg	kg	kg	m ²	kg	kg
Brass (0,707 copper / 0,303 Zinc)	kg								
Copper {GLO} market for Cut-off, U	kg	0,01	0,25	0,14	0,08	0,24	2,87	0,00	2,11
Gold {GLO} market for Cut-off, U	kg			0,00	0,01		0,00	0,01	
Lead {GLO} market for Cut-off, U	kg		0,01		0,04	0,02		0,01	0,26
Nickel, 99.5% {GLO} market for Cut-off, U	kg	0,20			0,00	0,00	0,00	0,02	0,05
Silver {GLO} market for Cut-off, U	kg	0,04			0,01		0,00	0,01	
Tin {GLO} market for Cut-off, U	kg	0,02	0,02		0,06	0,05	0,00	0,01	0,44
Zinc {GLO} market for Cut-off, U	kg			0,06	0,01				
Pig iron {GLO} market for Cut-off, U	kg					0,45		0,03	0,06
<i>Som van bovenstaande materialen</i>	kg	<i>0,28</i>	<i>0,27</i>	<i>0,21</i>	<i>0,21</i>	<i>0,75</i>	<i>2,88</i>	<i>0,09</i>	<i>2,91</i>
Materialen + afval in proces	-/-	1,48	1,04	1,00	1,00	1,04	1,00	1,23	5,90
Specifiek gewicht van proces	kg/-	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	3,26	1,00	1,00
Aandeel PWB proces	-/-	0,03	0,00	0,02	0,17	0,00	0,23	0,02	0,01

Tabel 4.11

Massa-aandeel grondstoffen in 1 kg 0405-fab&Elektronica, printplaat, inclusief elektronische componenten

Proces	Eenheid	Capacitor, for surface-mounting (GLO) production Cut-off, U	Diode, glass-, for surface-mounting (GLO) production Cut-off, U	Electric connector, peripheral component interconnect buss (GLO) production Cut-off, U	Integrated circuit, logic type (GLO) production Cut-off, U	Light emitting diode (GLO) production Cut-off, U	Printed wiring board, for surface mounting, Pb free surface (GLO) market for Cut-off, U	Resistor, surface-mounted (GLO) production Cut-off, U	Transistor, surface-mounted (GLO) production Cut-off, U	Totaal	Aandeel PWB (%)
Copper (GLO) market for Cut-off, U	kg	3,1E-04	9,8E-04	2,8E-03	1,4E-02	2,3E-04	6,7E-01	8,7E-05	3,6E-03	6,9E-01	67,5%
Gold (GLO) market for Cut-off, U	kg	0,0E+00	0,0E+00	4,0E-05	1,9E-03	0,0E+00	3,6E-05	1,2E-04	0,0E+00	2,1E-03	0,2%
Lead (GLO) market for Cut-off, U	kg	0,0E+00	3,2E-05	0,0E+00	6,4E-03	1,6E-05	0,0E+00	1,0E-04	4,4E-04	7,0E-03	0,7%
Nickel, 99.5% (GLO) market for Cut-off, U	kg	4,4E-03	0,0E+00	0,0E+00	5,7E-04	3,8E-06	1,8E-04	3,9E-04	8,0E-05	5,7E-03	0,6%
Silver (GLO) market for Cut-off, U	kg	8,7E-04	0,0E+00	0,0E+00	1,3E-03	0,0E+00	1,2E-04	2,3E-04	0,0E+00	2,5E-03	0,2%
Tin (GLO) market for Cut-off, U	kg	5,4E-04	6,0E-05	0,0E+00	1,1E-02	4,6E-05	6,5E-04	2,7E-04	7,6E-04	1,3E-02	1,3%
Zinc (GLO) market for Cut-off, U	kg	0,0E+00	0,0E+00	1,2E-03	1,3E-03	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	2,5E-03	0,2%
Pig iron (GLO) market for Cut-off, U	kg	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	4,4E-04	0,0E+00	5,5E-04	1,0E-04	1,1E-03	0,1%
Totaal	kg	6,1E-03	1,1E-03	4,0E-03	3,7E-02	7,4E-04	6,7E-01	1,8E-03	5,0E-03	7,2E-01	0,0%

Tabel 4.12

Overzicht massa-aandeel grondstoffen in sub-processen van proces 0303-fab&Elektronica, passieve componenten

Proces	Eenheid	Capacitor, electrolyte type, < 2cm height {GLO} market for Cut-off, U	Capacitor, film type, for through-hole mounting {GLO} market for Cut-off, U	Capacitor, for surface-mounting {GLO} market for Cut-off, U	Capacitor, tantalum-, for through-hole mounting {GLO} market for Cut-off, U	Electric connector, peripheral component interconnect buss	Electric connector, peripheral type buss {GLO} market for Cut-off, U	Inductor, ring core choke type {GLO} market for Cut-off, U	Potentiometer, unspecified {GLO} market for Cut-off, U	Resistor, metal film type, through-hole mounting {GLO} market for Cut-off, U	Resistor, surface-mounted {GLO} market for Cut-off, U	Resistor, wirewound, through-hole mounting {GLO} market for Cut-off, U
Brass (0,707 copper / 0,303 Zinc)	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
Copper {GLO} market for Cut-off, U	kg	0,02	0,05	0,01	0,02	0,04	0,01	0,07	0,00	0,01	0,00	0,00
Gold {GLO} market for Cut-off, U	kg	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Lead {GLO} market for Cut-off, U	kg	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
Nickel, 99.5% {GLO} market for Cut-off, U	kg	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Silver {GLO} market for Cut-off, U	kg	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Tin {GLO} market for Cut-off, U	kg	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
Zinc {GLO} market for Cut-off, U	kg	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Pig iron {GLO} market for Cut-off, U	kg	0,12	0,10	0,04	0,09	0,08	0,05	0,25	0,01	0,01	0,02	0,01
<i>Som van bovenstaande materialen</i>		<i>0,15</i>	<i>0,16</i>	<i>0,06</i>	<i>0,11</i>	<i>0,11</i>	<i>0,06</i>	<i>0,35</i>	<i>0,01</i>	<i>0,02</i>	<i>0,03</i>	<i>0,01</i>
Materialen + afval	-/-	1,48	1,48	1,48	1,48	1,00	1,00	1,48	1,23	1,23	1,23	1,23
Specifiek gewicht	kg/-	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Aandeel PWB proces	-/-	0,14	0,11	0,04	0,03	0,18	0,10	0,34	0,01	0,01	0,01	0,01

Tabel 4.13: Massa-aandeel grondstoffen in 1 kg 0303-fab&Elektronica, passieve componenten.

Proces	Eenheid	Capacitor, electrolyte type, < 2cm height {GLO} market for Cut-off, U	Capacitor, film type, for through-hole mounting {GLO} market for Cut-off, U	Capacitor, for surface-mounting {GLO} market for Cut-off, U	Capacitor, tantalum-, for through-hole mounting {GLO} market for Cut-off, U	Electric connector, peripheral component interconnect buss {GLO} market for Cut-off, U	Electric connector, peripheral type buss {GLO} market for Cut-off, U	Inductor, ring core choke type {GLO} market for Cut-off, U	Potentiometer, unspecified {GLO} market for Cut-off, U	Resistor, metal film type, through-hole mounting {GLO} market for Cut-off, U	Resistor, surface-mounted {GLO} market for Cut-off, U	Resistor, wirewound, through-hole mounting {GLO} market for Cut-off, U	Totaal	Aandeel passieve componenten (%)
Copper {GLO} market for Cut-off, U	kg	1,9E-03	3,8E-03	2,1E-04	4,0E-04	6,8E-03	1,3E-03	1,6E-02	2,8E-05	9,3E-05	3,2E-05	2,4E-05	3,0E-02	3,0%
Gold {GLO} market for Cut-off, U	kg	1,4E-08	8,8E-09	1,6E-09	1,3E-09	6,8E-05	1,2E-08	7,7E-08	1,5E-10	1,6E-10	1,0E-06	1,5E-10	6,9E-05	0,0%
Lead {GLO} market for Cut-off, U	kg	2,1E-05	5,8E-05	2,5E-06	3,5E-06	5,7E-05	2,7E-06	5,3E-03	1,7E-07	1,0E-05	1,9E-06	1,7E-07	5,5E-03	0,5%
Nickel, 99.5% {GLO} market for Cut-off, U	kg	9,7E-07	1,0E-04	2,6E-04	5,2E-05	4,1E-06	5,9E-07	4,1E-06	9,3E-07	4,8E-06	3,4E-06	2,2E-06	4,3E-04	0,0%
Silver {GLO} market for Cut-off, U	kg	3,3E-04	3,1E-04	5,1E-05	3,1E-05	1,8E-07	4,6E-08	2,9E-07	5,8E-10	6,0E-10	2,0E-06	5,8E-10	7,2E-04	0,1%
Tin {GLO} market for Cut-off, U	kg	2,8E-05	2,5E-04	3,2E-05	2,8E-05	2,1E-06	5,2E-07	2,9E-03	9,3E-07	1,8E-05	2,4E-06	4,4E-06	3,3E-03	0,3%
Zinc {GLO} market for Cut-off, U	kg	3,3E-14	2,7E-14	7,6E-15	5,7E-15	7,4E-14	8,1E-15	1,8E-13	8,3E-16	1,0E-15	1,7E-15	8,4E-16	3,4E-13	0,0%
Pig iron {GLO} market for Cut-off, U	kg	1,1E-02	7,1E-03	1,1E-03	2,1E-03	1,4E-02	5,2E-03	5,6E-02	1,2E-04	1,5E-04	2,9E-04	1,4E-04	9,8E-02	9,8%
Totaal	kg	1,4E-02	1,2E-02	1,7E-03	2,6E-03	2,1E-02	6,6E-03	8,0E-02	1,5E-04	2,7E-04	3,3E-04	1,7E-04	1,4E-01	0,0%

Bijlage II LCI-LCA warmtenetconfiguraties

Bijlage II – LCI-LCA warmtenetconfiguraties.xlsx

ENDCONCEPT

Bijlage III Lucht-water warmtepomp

In deze bijlage is omschreven hoe de lucht-water (LW) warmtepomp uit het alternatieve scenario (S7 – LW warmtepomp, uit Sectie - 4.4.1) is gemodelleerd.

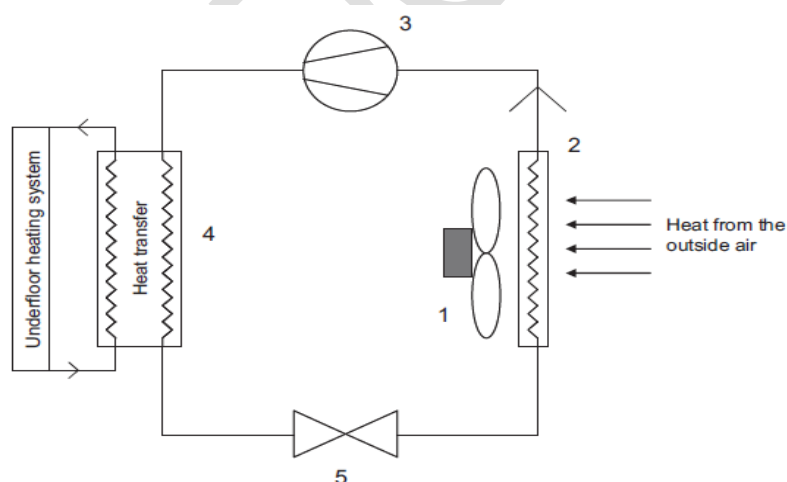
Productomschrijving

Het betreft een split unit lucht-water warmtepomp, inclusief aansluiting warmtebron (buiten-unit), met R-134a als koelvloeistof. De warmtepomp is schaalbaar naar het geleverde vermogen, binnen een bereik van 3-162 kW_t. De levensduur van het product is 15 jaar. In overeenstemming met Caduff, M. et al. (2014) heeft de warmtepomp een COP van 3,5.

Een schematische weergave van een LW warmtepomp is weergegeven in Figuur 4.11. In deze figuur is te zien dat is te zien dat een LW warmtepompsysteem bestaat uit:

- een warmtepompunit, welke bestaat uit een compressor, verdamper en condensor;
- de warmtebron: een axiaal ventilator.

Het split unit type warmtepomp bestaat uit een outdoor en indoor unit(s). Op basis van de voor de materialisatie gebruikte artikelen van Greening en Azapagic (2012) en Caduff et al. (2014), is niet te achterhalen welk deel van de materialisatie toebehoort aan een eventuele outdoor en indoor unit(s). In de materialisatie en resultaten van de LW warmtepomp is daarom geen onderscheid gemaakt tussen de verschillende units. De axiaal ventilator is daarmee onderdeel van de warmtepompunit. Het vloerverwarming-systeem (underfloor heating system) in Figuur 4.11 is geen onderdeel van het warmtepompsysteem, en is daarom niet meegenomen in de productkaart.



Figuur 4.11

Schematische weergave van een lucht-water warmtepompsysteem

Onderdelen: 1. Axiaal ventilator; 2. Verdamper; 3. Compressor; 4. Condensor; 5. Expansieklep [Afbeelding van Greening, B. en Azapagic, A. (2012)].

Toelichting levensfasen

In onderstaande secties zijn alle levensfasen toegelicht. Het decompositietabel van de lucht-water warmtepomp is weergegeven bijlage II: LCI-LCA warmtenetconfiguraties, *tabblad warmtepomp - LW*.

Productiefase (A1-3)

Warmtepompunit

De hoofdelementen van een warmtepomp zijn de behuizing, verdamper, compressor, condensor en koelvloeistof. De compressor, behuizing, verdamper en condensor zijn gemaakt van staal. De buizen, elektrische kabels en expansieklep zijn gemaakt van koper. De kabels zijn geïsoleerd met polyvinylchloride (PVC). Er wordt aangenomen dat de helft van het staal gevormd wordt tot platen, en de andere helft tot buizen (Caduff et al., 2014). Tevens nemen wij voor koper aan dat de helft gevormd wordt tot buizen, en de andere helft tot draden. Aanvullend heeft de LW warmtepomp een axiaal ventilator bestaande uit high density polyethyleen (HDPE) en koper.

Er is aangenomen dat de assemblage van de warmtepomp een verbruik vereist van 337 MJ elektriciteit en 875 MJ aardgas. De benodigde hoeveelheden van de processen en materialen zijn overgenomen uit de warmtepomp LCA van Greening en Azapagic (2012).

Elektronica

Wij nemen aan dat de elektronische componenten in een warmtepomp vergelijkbaar zijn met die van een split-type airconditioningunit. Bij gebrek aan gegevens over elektronica bij grotere vermogens, nemen wij aan dat de elektronica voor de besturing van de warmtepomp onafhankelijk is van de grootte van het apparaat, binnen het vermogensbereik dat hier onderzocht is. De massa en de typen elektronische componenten nemen wij daarom over van de Midea split-type airconditioner, type MSAGBU-12HRFN8-QRD0GW (Midea, 2022).

In de EPD van Midea (2022) is onderscheid gemaakt tussen de elektronica voor de indoor en outdoor unit. In deze studie is de elektronica voor zowel de indoor als de outdoor unit opgenomen in de materialisatie van de 'warmtepompunit'. De beschreven elektronische componenten zijn: *elektrolytische condensator, spoel en anders*. De elektrolytische condensator en de spoel modelleren wij met het NMD proces *0303-fab&Elektronica, passieve componenten (o.b.v. Electronic component, passive, unspecified {GLO}) market for | Cut-off, U* en de categorie *anders* is gemodelleerd met het proces *0405-fab&Elektronica, printplaat, inclusief elektronische componenten (o.b.v. Printed wiring board, surface mounted, unspecified, Pb free {GLO}) market for | Cut-off, U*.

Vanwege de grote invloed op het resultaat is ook de hoeveelheid elektronica voorgelegd aan experts en fabrikanten verbonden aan de Vereniging Warmtepompen (branchevereniging). Er bleken over dit onderwerp slechts beperkt gegevens beschikbaar te zijn, maar de weinige gegevens die konden worden verstrekt over de hoeveelheid elektronica gaven een vergelijkbare hoeveelheid aan.

Ook is aangegeven dat de hoeveelheid elektronica vrijwel gelijk blijft bij grotere vermogens en dat enkel de spoelen/transformatoren iets groter kunnen worden. Dit valt onder passieve componenten, die relatief beperkte invloed hebben op het resultaat. Op basis van deze expertopinie worden de gehanteerde uitgangspunten en hoeveelheden representatief geacht.

Transportfase (A4, C2)

Forfaitaire transportafstanden volgens de bepalingsmethode zijn toegepast:

- 50 km bulktransport naar werk (A4); toegepast voor bentoniet en cement
- 150 km overig transport naar werk (A4); toegepast voor overige materialen
- 50 km transport voor einde-leven naar sorteerlocatie/recycling (C2)
- 100 km transport totaal voor einde-leven naar stort (C2)
- 150 km transport totaal voor einde-leven naar afvalverbrandingsinstallatie (AVI) (C2)

Constructiefase (A5)

Het koelvloeistofcircuit moet door de installateur geassembleerd worden. De koelvloeistof (R-134a) wordt daarom tijdens de installatie toegevoegd aan het systeem. Tijdens het vullen gaat 3% van de koelvloeistof verloren. Voor het verlies is aangenomen dat deze hoeveelheid verdampt. Om de verdamping te modelleren, is het Ecoinvent (3.6) proces *Used refrigerant R134a (GLO) | treatment of used refrigerant R134a, venting | Cut-off, U* gebruikt voor koelvloeistof R-134a, welke de emissie naar lucht bevat van 1 kg *Ethane, 1,1,1,2-tetrafluoro-, HFC-134a*. Voor de verdamping van 1 kg propaan is een nieuw proces gemaakt (in SimaPro, database Ecoinvent 3.6), welke enkel de emissie naar lucht bevat van 1 kg propaan (C₃H₈).

Het installeren van de warmtepompunit vereist verder minimaal werk. Het gaat met name om manueel werk en elektriciteitsgebruik voor monteren (bijvoorbeeld met een boormachine) en testen. Deze impact is daarom verwaarloosbaar en niet meegenomen in dit model.

Gebruiksfase (B1-B5)

Gebruik (B1) en Vervangingen (B4)

Tijdens de gebruiksfase vindt er verdamping plaats van lekkende koelvloeistof uit het circuit van de warmtepompunit. Het gemiddelde verlies is gesteld op 3% per jaar.

Dit lekpercentage was in het verleden een stuk hoger, er wordt bijvoorbeeld in de gehanteerde literatuur Caduff et al. (2014) en Greening & Azapagic (2012) een percentage van 6% aangehouden. Vanwege de grote invloed op het milieuprofiel van deze lekkage is over dit percentage navraag gedaan bij experts en fabrikanten verbonden aan de Vereniging Warmtepompen. Daarbij werd aangehaald dat hier circa 10 jaar geleden onderzoek naar is gedaan waarbij destijds bleek dat per jaar gemiddeld 7% van de koelvloeistof weglekt. Het bleek dat als er een lekkage ontstaat in kleine systemen veelal de volledige inhoud verdwijnt tegenover gemiddeld 25% van de inhoud bij grotere, op maat gemaakte installaties. Dit zijn incidentele lekkages, 10% van de installaties zorgen daarbij voor het volledige verlies.

Sindsdien is de regelgeving aangescherpt en schrijft de EN378 (2016) o.a. voor dat bij de productie van apparatuur tot 5 kg koudemiddelvulling een lekttest verplicht is, met een maximaal lekverlies van 3 of 5 gram/jaar. Daarom wordt een gemiddeld lekpercentage van 3% per jaar voor de split unit LW warmtepomp aannemelijk geacht voor de huidige generatie warmtepompen. Er is aangenomen dat de verloren koelvloeistof door lekkage jaarlijks wordt bijgevuld, waardoor het lekverlies constant is.

Onderhoud (B2), Reparaties (B3) en Hernieuwing (B5)

Onder normale omstandigheden zijn geen onderhoudsprocessen, reparaties en hernieuwingen voorzien tijdens de levensduur van de warmtepompen. De impact van deze fasen is daarom nul.

Sloopfase (C1)

Er is aangenomen dat de sloopfase vergelijkbare processen vereist als de installatiefase. Daarnaast wordt er aangenomen dat de koelvloeistoffen in deze fase uit de koelsystemen opgenomen worden.

Einde levensduur, afvalscenario en baten en lasten buiten systeemgrenzen (C3, C4 en D)

Voor het modelleren van deze fasen wordt gebruik gemaakt van de forfaitaire waarden voor verwerking-scenario's einde leven van de Bepalingsmethode (versie mei 2022). Voor koelvloeistof R-134a en de elektronische componenten zijn nieuwe verwerking-scenario's einde leven gemaakt. Deze scenario's zijn beschreven in Sectie 3.2.3.2.

Schaling

De warmtepomp is schaalbaar naar het thermische vermogen tussen de 3 – 162 kW, referentiewaarde is 10 kW.

De schalingformules om de warmtepomp te schalen, zijn overgenomen van Caduff, M. et al. (2014), welke empirische schalingsformules hebben afgeleid met behulp van data van 265 warmtepompen met een thermisch vermogen tussen de 3 en 162 kW. Er is onderscheid gemaakt tussen de schaling van de koelvloeistof, de elektronische componenten en de schaling van de overige componenten. Er is aangenomen dat de massa van de elektronische componenten niet mee schaalbaar is met het vermogen, omdat hier enerzijds geen informatie over is en anderzijds de aansturing van een groter model in principe met dezelfde hoeveelheid componenten zou moeten kunnen plaatsvinden. De gebruikte schalingsformules zijn weergegeven in Tabel 4.14 en de resulterende MKI voor de minimum-, maximum-, en referentiewaarde zijn weergegeven in Tabel 4.15. De totale massa van de warmtepompunit kan berekend worden met $M_{totaal} = M_{schaalbaar} + RF + M_{elektronica}$.

Tabel 4.14

Schalingsformules Lucht-water warmtepomp.

Schalingsformule	<i>B</i> (95% CI)	<i>a</i> (95% CI)	<i>R</i> ²	<i>SE</i>
$M_{\text{schaalbaar}} = a * P^b$	0,67	50,12	0,62	0,13
$RF = a * P^b$	0,91	0,49	0,61	0,19
$M_{\text{elektronica}} = C$	De elektronische componenten hebben een constante massa			

De empirisch berekende schalingsfactoren zijn weergegeven als *a* en *b*, *R*² is de determinatiecoëfficiënt, *M*_{schaalbaar} de massa van de schaalbare onderdelen van de lucht-water warmtepomp, exclusief koelvloeistof, in kg, *RF* de massa van de koelvloeistof in kg, *P* het thermisch vermogen in kW, *CI* het betrouwbaarheidsinterval en *SE* de standaardfout. Bron: Caduff, M. et al. (2014).

Tabel 4.15

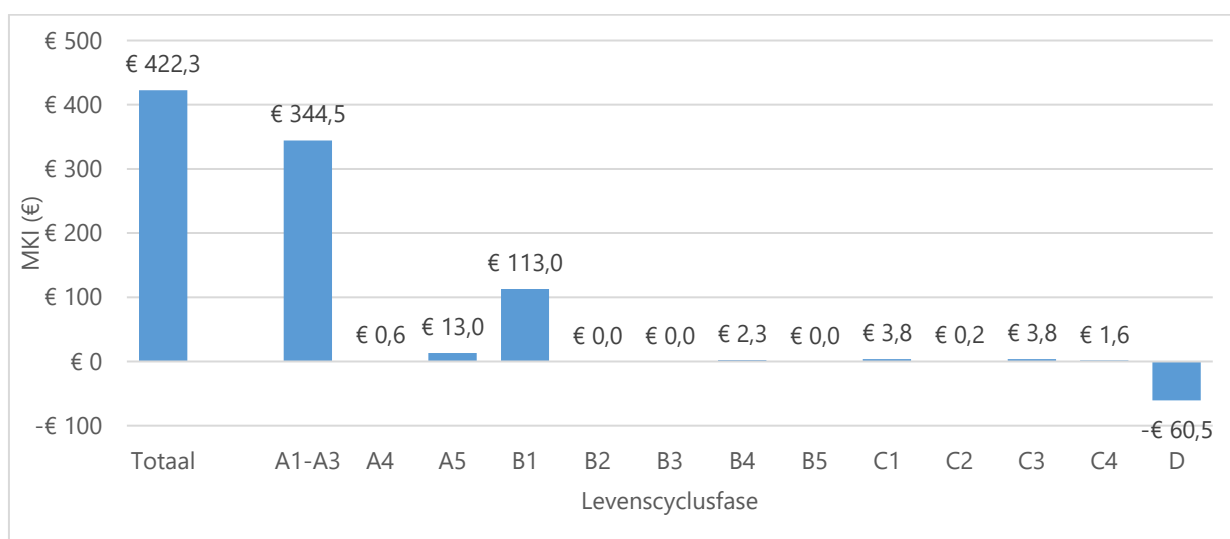
MKI lucht-water warmtepomp bij minimaal-, referentie- en maximaalvermogen

Vermogen (kW)	MKI (€)
3	226
10	442
162	3.015

Zwaartepuntanalyse

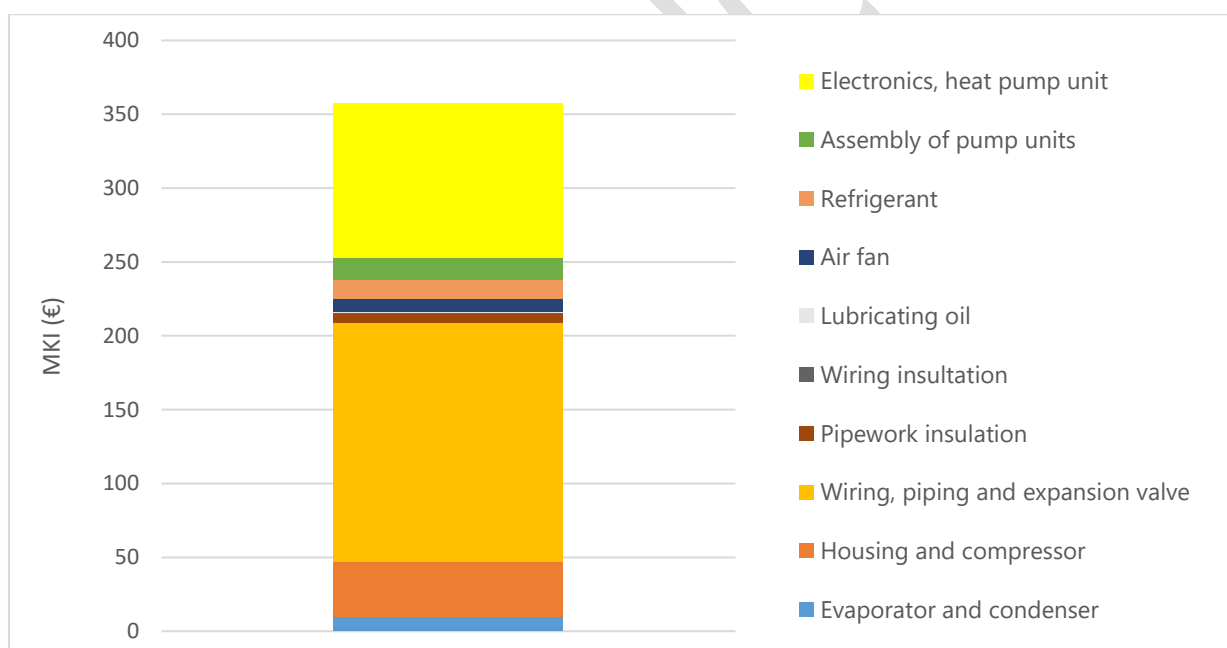
In Figuur 4.12 is de MKI van de LW warmtepomp (split unit, koelvloeistof R-134a) weergegeven per levensfase voor het referentievermogen van 10 kW_t. In deze figuur is te zien dat de productiefase (A1-A3; 82%) en de gebruiksfase (B1; 27%) de grootste bijdrage leveren aan de totale MKI. De impact van de gebruiksfase is volledig afkomstig van de verdamping van R-134a. Een deel van de milieu-impact wordt in module D gecompenseerd (-14%), omdat een groot deel van de materialen gerecycled of verbrand wordt.

In Figuur 4.13 is de MKI van de productiefase (A1-A3) opgesplitst per proces. Hierin is te zien dat de grootste bijdrage aan de MKI afkomstig is van de koperen onderdelen (wiring, piping and expansion valve; 47%), gevolgd door de elektronische componenten (30%), en stalen behuizing en compressor (11%).



Figuur 4.12

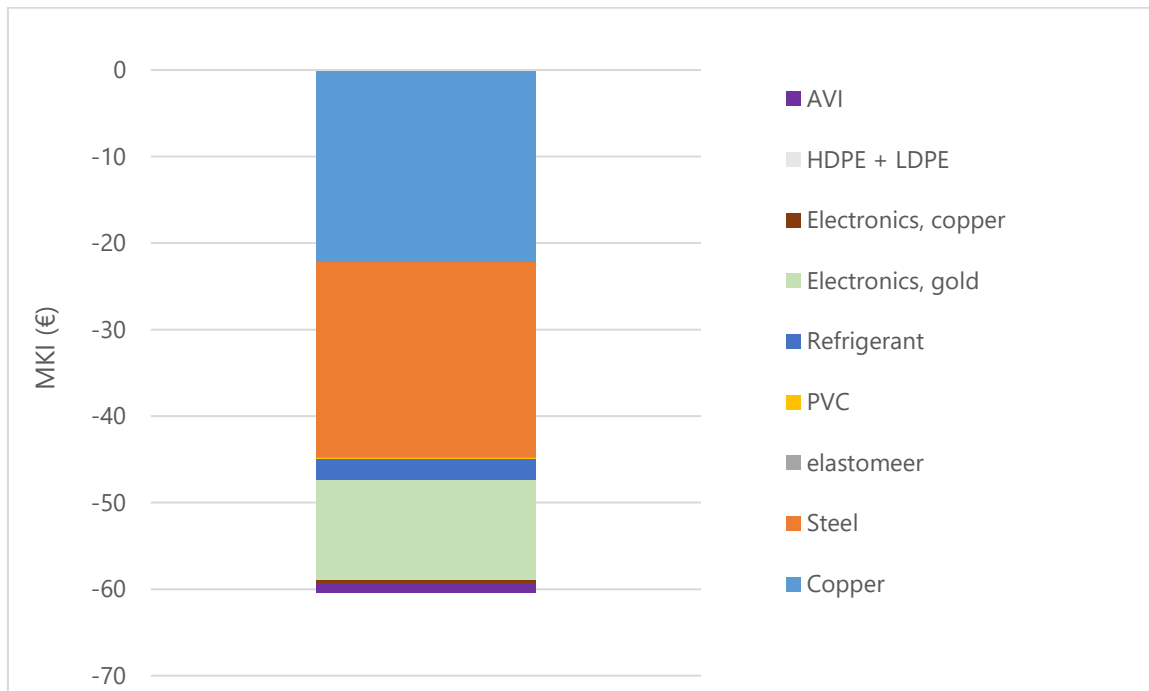
Zwaartepuntanalyse lucht-water warmtepomp, split unit, koelvloeistof R-134a (10 kWt), MKI opgesplitst per levensfase.



Figuur 4.13

Zwaartepuntanalyse lucht-water warmtepomp, split unit, koelvloeistof R-134a (10 kWt), MKI van productiefase (A1-A3) opgesplitst per proces

In Figuur 4.14 is de MKI van module D opgesplitst per proces. In deze figuur is te zien dat de hoogste baten behaald worden door het uitsparen van staal (37%), koper (37%) en goud (19%).



Figuur 4.14

Zwaartepuntanalyse lucht-water warmtepomp, split unit, koelvloeistof R-134a (10 kWt), MKI van module D opgesplitst per proces

EINDCOMING