



Mkba bodemenergie - Update



Mkba bodemenergie - Update

Dit rapport is geschreven door:

Benno Schepers, Amanda Bachaus, Martijn Blom en Fenneke van de Poll

Delft, CE Delft, juli 2025

Publicatienummer: 25.240280.152

Opdrachtgever: Bodemenergie Nederland

Alle openbare publicaties van CE Delft zijn verkrijgbaar via www.ce.nl

Meer informatie over de studie is te verkrijgen bij de projectleider Benno Schepers (CE Delft)

© copyright, CE Delft, Delft

CE Delft

Committed to the Environment

CE Delft draagt met onafhankelijk onderzoek en advies bij aan een duurzame samenleving. Wij zijn toonaangevend op het gebied van energie, transport en grondstoffen. Met onze kennis van techniek, beleid en economie helpen we overheden, NGO's en bedrijven structurele veranderingen te realiseren. Al meer dan 40 jaar werken betrokken en kundige medewerkers bij CE Delft om dit waar te maken.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	10
	1.1 Aanleiding	10
	1.2 Doel van het project	11
	1.3 Afbakening en alternatieven	11
	1.4 Wat is een mkba?	11
	1.5 Leeswijzer	12
2	Methodiek	13
	2.1 Inleiding	13
	2.2 Methodiek in vogelvlucht	13
	2.3 Indeling effecten	14
	2.4 Tijdshorizon	14
	2.5 Discontovoet	14
3	Nul- en projectalternatieven	16
	3.1 Inleiding	16
	3.2 Methodiek	16
	3.3 Overzicht nul- en projectalternatieven	17
	3.4 Beschrijving casussen	17
	3.5 Beschrijving alternatieven	21
4	Projecteffecten	29
	4.1 Inleiding	29
	4.2 Directe financiële effecten	29
	4.3 Indirecte financiële effecten	37
	4.4 Externe effecten	38
5	Mkba-resultaat	51
	5.1 Inleiding	51
	5.2 Totaalsaldo per casus	51
	5.3 Gevoeligheidsanalyse	58
6	Conclusie en aanbevelingen	63
	6.1 Conclusie	63
	6.2 Aanbevelingen	65
7	Referenties	67



Samenvatting

Dit rapport is een update van het oorspronkelijke rapport 'Mkba bodemenergie' uit 2023. In deze versie zijn (op basis van praktijkdata van diverse partijen) vernieuwde inzichten meegenomen over het onderhoud van gesloten bodemenergiesystemen (GBES) bij woningen.

Inleiding

Bodemenergie is een duurzame energiebron, waarbij de warmte en koude in de ondergrond wordt gebruikt voor de verwarming en koeling van gebouwen. Bodemenergie wordt toegepast tot een diepte van maximaal 500 meter; na 500 meter spreken we van geothermie. De toepassing van bodemenergie heeft een aantal voordelen, zoals besparing op energieverbruik en CO₂-emissies. Aan de andere kant zijn er ook nadelen, zoals de investeringskosten bij de aanleg en potentiële risico's voor de bodem.

Voor een efficiënte uitvoering van de energietransitie in de gebouwde omgeving is het van belang om een afweging te maken tussen de voor- en nadelen van verschillende alternatieven voor warmte en koude. In de beleidspraktijk is te zien dat er bij de afweging van bodemenergie vaak de nadruk ligt op de potentiële bodemrisico's. Het ontbreekt op dit moment aan een duidelijk kwantitatief kader voor het beleidsmatig afwegen van waar bodemenergie wel (geen of klein risico) of niet (groter risico) kan worden toegepast.

Om dit probleem te overkomen, is een maatschappelijke kosten-batenanalyse (mkba) opgesteld, die het integrale perspectief van de toepassing van open en gesloten bodemenergie (OBES en GBES) schetst. Een maatschappelijke kosten-batenanalyse heeft tot doel de verschillende opties voor de uitvoering van een project op integrale wijze met elkaar te vergelijken. Alle effecten worden vervolgens zoveel mogelijk in geld uitgedrukt en vervolgens telt men deze op, zodat een integrale afweging mogelijk is.

Binnen deze studie is specifiek gekeken naar vier veel voorkomende gebouwtypen (hierna 'casussen'), waarbij de positieve en negatieve effecten van OBES en GBES samen met alternatieve warmtevoorziening zijn gemonetariseerd. Per casus zijn voor bestaande bouw en nieuwbouw de effecten van de verschillende warmte- en koudetechnieken op gebouwniveau met elkaar vergeleken:

- kantoor;
- verzorgingstehuis;
- appartementencomplex;
- individuele woning.

De mkba is alleen geldig voor deze casussen met bijbehorende aannames.

Alternatieven

Het nulalternatief is het 'meest voor de hand liggende' systeem dat toegepast wordt als er geen gebruik wordt gemaakt van bodemenergie. De alternatieven die gebruik maken van aardgas zijn enkel meegenomen bij bestaande bouw, aangezien nieuwbouw aardgasvrij wordt opgeleverd. Bij bestaande bouw/utiliteitsbouw is dit een hr-ketel, voor woningen is hierbij de hybride warmtepomp + airco meegenomen, vanwege de aangekondigde normering voor hybride warmtepompen in woningen. In nieuwbouw zijn we voor alle casussen uitgegaan van een lucht-waterwarmtepomp (l/w-warmtepomp).

Uitkomsten

In Tabel 1 t/m Tabel 4 zijn de uitkomsten te zien van de mkba per casus. Hierbij zijn de projectalternatieven vergeleken met het nulalternatief, uitgesplitst tussen bestaande bouw en nieuwbouw. Een positief saldo betekent dat het projectalternatief een gunstig effect heeft op de Nederlandse samenleving ten opzichte van het nulalternatief; een negatief saldo het omgekeerde.

De volgende afkortingen worden gebruikt in de tabellen: OBES (open bodemenergiesysteem), l/w-warmtepomp (lucht-waterwarmtepomp) en mt-net (midentemperatuurwarmtenet).

Tabel 1 - Mkba-eindsaldo casus 'Kantoor'

Welvaartseffecten t.o.v. nulalternatief (€ duizend)	Bestaande bouw <i>Nulalternatief: hr-ketel + airco</i>			Nieuwbouw <i>Nulalternatief: l/w-warmtepomp</i>	
Projectalternatief	OBES	L/w-wp + airco	Mt-net + airco	OBES	Mt-net + airco
Directe effecten	-485	-491	-1.290	-80	-992
Indirecte effecten	0	0	0	0	0
Externe effecten	884 + PM *	72 + PM	748 + PM	190 + PM	58 + PM
PM-posten					
Hitte-eiland	+	0	0	+	0
Bodem (niet correct aangevuld boorgat)	--	0	0	--	0
Bodem (vermenging grondwaterkwaliteit)	-	0	0	-	0
Bodem (bodempverontreiniging ondiepe aquifer)	Locatie-afhankelijk	0	0	Locatie-afhankelijk	0
Bodem (lekkage van koelvloeistoffen)	0	0	0	0	0
Totaalsaldo	399 + PM	-419 + PM	-541 + PM	110 + PM	-934 + PM

* PM betekent dat het betreffende welvaartseffect niet volledig is gekwantificeerd.

Tabel 2 - Mkba-eindsaldo casus 'Verzorgingstehuis'

Welvaartseffecten t.o.v. nulalternatief (€ duizend)	Bestaande bouw Nulalternatief: hr-ketel + airco			Nieuwbouw Nulalternatief: l/w-warmtepomp	
Projectalternatief	OBES	L/w-wp + airco	Mt-net + airco	OBES	Mt-net + airco
Directe effecten	-667	-661	-3.188	118	-2.187
Indirecte effecten	0	0	0	0	0
Externe effecten	2.324 + PM*	821 + PM	2.202 + PM	627 + PM	479 + PM
PM-posten					
Hitte-eiland	+	0	0	+	0
Bodem (niet correct aangevuld boorgat)	--	0	0	--	0
Bodem (vermenging grondwaterkwaliteit)	-	0	0	-	0
Bodem (bodemonverontreiniging ondiepe aquifer)	Locatie-afhankelijk	0	0	Locatie-afhankelijk	0
Bodem (lekkage van koelvloeistoffen)	0	0	0	0	0
Totaalsaldo	1.656 + PM	160 + PM	-986 + PM	744 + PM	-1.708 + PM

* PM betekent dat het betreffende welvaartseffect niet volledig is gekwantificeerd.

Tabel 3 - Mkba-eindsaldo casus 'Appartementencomplex'

Welvaartseffecten t.o.v. nulalternatief (€ duizend)	Bestaande bouw Nulalternatief: hybride warmtepomp + airco				Nieuwbouw Nulalternatief: l/w-warmtepomp		
Projectalternatief	OBES	GBES	L/w-wp + airco	Mt-net + airco	OBES	GBES	Mt-net + airco
Directe effecten	909	979	264	-798	669	558	-994
Indirecte effecten	0	0	0	0	0	0	0
Externe effecten	349 + PM*	349 + PM	-46 + PM	349 + PM	177 + PM	177 + PM	128 + PM
PM-posten							
Hitte-eiland	+	+	0	0	+	+	0
Bodem (niet correct aangevuld boorgat)	--	--	0	0	--	--	0
Bodem (vermenging grondwaterkwaliteit)	-	0	0	0	-	0	0
Bodem (bodemonverontreiniging ondiepe aquifer)	Locatie-afhankelijk	0	0	0	Locatie-afhankelijk	0	0
Bodem (lekkage van koelvloeistoffen)	0	---	0	0	0	---	0
Totaalsaldo	1.258 + PM	1.328 + PM	217 + PM	-449 + PM	846 + PM	736 + PM	-866 + PM

* PM betekent dat het betreffende welvaartseffect niet volledig is gekwantificeerd.

Tabel 4 - Mkba-eindsaldo casus 'Woning'

Welvaartseffecten t.o.v. nulalternatief (€ duizend)	Bestaande bouw <i>Nulalternatief: hybride warmtepomp + airco</i>			Nieuwbouw <i>Nulalternatief: l/w-warmtepomp</i>	
	GBES	L/w-wp + airco	Mt-net + airco	GBES	Mt-net + airco
Directe effecten	9	6	-28	-2	-27
Indirecte effecten	0	0	0	0	0
Externe effecten	16 + PM*	1 + PM	17 + PM	7 + PM	5 + PM
PM-posten					
Hitte-eiland	+	0	0	+	0
Bodem (niet correct aangevuld boorgat)	--	0	0	--	0
Bodem (vermenging grondwaterkwaliteit)	0	0	0	0	0
Bodem (bodemonverontreiniging ondiepe aquifer)	0	0	0	0	0
Bodem (lekkage van koelvloeistoffen)	---	0	0	---	0
Totaalsaldo	26 + PM	7 + PM	-12 + PM	5 + PM	-21 + PM

* PM betekent dat het betreffende welvaartseffect niet volledig is gekwantificeerd.

Conclusies

Bodemenergie in alle gevallen meest positieve mkba-resultaat

In alle vier van de geanalyseerde casussen van zowel bestaande bouw als van nieuwbouw heeft een bodemenergiesysteem het meeste positieve mkba-saldo. Dit betekent dat bij deze casussen een bodemenergiesysteem maatschappelijk gezien het meest rendabel is.

Over het algemeen blijkt dat bij de meeste casussen de investeringskosten van bodem-energie hoger liggen dan bij de andere warmte- en koudetechnieken. Daar staat tegenover dat de kosten voor het energieverbruik een positief effect hebben voor bodemenergie-systemen. Bij de externe effecten is te zien dat met name 'lagere CO₂-emissies', en in mindere mate 'een lagere impact op het elektriciteitsnet', zorgen voor een positief welvaartseffect bij bodemenergiesystemen ten opzichte van de alternatieven.

In de toekomst zal door klimaatverandering de koelvraag toenemen en de warmtevraag af-nemen. Omdat bodemenergiesystemen een hoger rendement behalen voor koeling, zullen de positieve effecten van bodemenergiesystemen op het gebied van energieverbruik en klimaateffect naar verwachting verder toenemen ten opzichte van de andere alternatieven.

Effecten op hitte-eiland, geluidsoverlast en bodem nog niet kwantitatief

Binnen de mkba is geprobeerd alle relevante effecten in kaart te brengen en met elkaar te vergelijken. Dit heeft geleid tot het inzicht dat dat voor veel effecten mogelijk is, namelijk de directe financiële effecten (eenmalige investeringskosten, herinvesteringen, kosten voor het onderhoud, kosten voor het energieverbruik en de resterende waarde van de bodem-bron), CO₂-besparing, lekkage van koelmiddel en de impact op het elektriciteitsnet. Daarmee geeft deze mkba een generiek inzicht in de verdeling van kosten en baten bij de verschillende technieken en casussen.

Hoewel de effecten op de bodem, hitte-eiland en geluid niet kwantitatief ingeschat konden worden, deze zeer locatiespecifiek zijn en verschillen, is wel een kwalitatieve duiding gegeven welke invloed deze effecten hebben op de maatschappelijke welvaart. Bij het hitte-eilandeffect is te zien dat met name lucht-waterwarmtepompen en airco's hier een potentieel negatief effect op hebben. Voor geluidshinder zijn normen opgesteld waar in principe alle warmte- en koudetechnieken onder blijven, waardoor het effect hierop in principe 0 is. Als in de praktijk echter blijkt dat deze grenzen overschreden worden, kunnen er wel negatieve effecten optreden.

Er is meer onderzoek nodig om de posten 'bodemeffecten', 'geluidseffecten' en 'hitte-eilandeffect' kwantitatief mee te kunnen nemen in de vergelijking (oftewel in euro's uit te kunnen drukken). Hiervoor is het vooral van belang om de economische schade door effecten op het bodemmilieu te monitoren, schade door geluidshinder en de bijdrage van warmtetechnieken aan het hitte-eilandeffect.

Afweging bodemrisico's

De bodemeffecten zijn kwalitatief omschreven en hebben per effect een risico-aanduiding gekregen. Op basis van beschikbaar onderzoek is er een risicoanalyse opgenomen over de kans op lekkage van circulatievloeistof bij een gesloten bodemenergiesysteem. Dit houdt in dat is onderzocht hoe groot het effect zou mogen zijn totdat het resultaat van GBES binnen de mkba verandert. Uit de analyse komt naar voren dat het onwaarschijnlijk is dat wanneer de aanleg van GBES bij een appartementencomplex of woning volgens de richtlijnen verloopt, mogelijke schade door lekkage van circulatievloeistof de totale welvaart van GBES negatief zal beïnvloeden. Wel geldt dat voor de aanleg van GBES op grotere schaal, zoals bij woonwijken, de kans op lekkage toeneemt en de verhouding met de corresponderende schade moeilijker op voorhand in te schatten is.

Over de andere bodemeffecten zijn er op dit moment onvoldoende gegevens beschikbaar om een dergelijke risicoanalyse uit te voeren. Wel is in deze mkba voor ieder effect een kwalitatieve omschrijving gegeven, evenals een advies hoe dit effect meegenomen kan worden in het afwegingskader. De bodemrisico's zijn vooral afhankelijk van de lokale bodemomstandigheden, zoals de bodemgesteldheid en eventuele verontreinigingen in de buurt. Hoewel experts aangeven dat er in theorie risico's zijn die effect hebben op de waterkwaliteit van grondwater en oppervlaktewater, zijn er nog geen studies die een overzicht geven van bekende gevallen van de andere bodemeffecten met nadelige gevolgen, zoals verontreinigingen of vermenging van grondwater.

In het algemeen verwachten we dat - rekening houdend met zowel de kwantitatieve en kwalitatieve uitkomsten in deze mkba - onder voorwaarde dat er rekening wordt gehouden met de lokale omstandigheden en de aanleg en beheer van bodemenergiesystemen zorgvuldig gebeurt, de potentiële bodemrisico's naar verwachting niet opwegen tegen de baten voor de Nederlandse samenleving. Meer monitoring moet leiden tot meer inzicht in de potentiële schade wanneer een effect optreedt, en tot aanpassingen van de gegevens en conclusies van deze mkba.

Externe effecten belangrijk bij integrale afweging

Overkoepelend komt uit deze mkba naar voren dat de effecten van bodemenergie positiever uitpakken wanneer externe effecten, zoals klimaatimpact en de impact op het elektriciteitsnet worden meegenomen in de integrale afweging tussen warmte- en koudetechnieken. Voor andere effecten, zoals het hitte-eilandeffect en bodemeffecten, is het van belang de lokale situatie nader te onderzoeken.

Om een goede afweging te kunnen maken, is het belangrijk om in besluitvormingsprocessen rondom warmte- en koudetechnieken niet enkel de directe (financiële) effecten mee te nemen, maar waar mogelijk ook de vermeden milieuschade en vermeden kosten van verzwaring van het elektriciteitsnet. We bevelen aan om bodemrisico's en geluid (en vermeden hittestress) van een toenemend gebruik van ondergrond voor energie te monitoren, zodat de totaalresultaten in een vervolg-mkba preciezer kunnen worden vastgesteld.

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

De huidige warmte- en koudevoorziening in Nederland is voor het grootste deel gebaseerd op aardgas, en slechts een klein deel op elektriciteit en duurzame bronnen. Om aan de klimaatdoelstellingen te kunnen voldoen, is het van belang dat de gebouwde omgeving in de komende jaren de transitie maakt naar een aardgasvrije gebouwde omgeving. Zowel op landelijk niveau als op lokaal niveau wordt er gewerkt aan beleid om de warmtetransitie vorm te geven en te stimuleren. Daarnaast zijn er ook steeds meer individuele gebouw-eigenaren die besluiten om over te stappen op een duurzame manier van verwarmen (en koelen). Zowel beleidsmakers als individuele gebouw-eigenaren maken hierin een afweging tussen verschillende alternatieven.

De meest voorkomende technieken voor verwarmen en koelen in Nederland zijn de hr-ketel (op gas), de hybride warmtepomp (maakt ook gebruik van gas), elektrische luchtwarmtepomp, gesloten bodemenergiesystemen (bodewisselaarsystemen), open bodemenergiesystemen (ook wel warmte-koudeopslagsystemen) en diverse varianten van warmtenetten. Voor koelen ligt de keuze met name tussen airco's en bodemenergiesystemen, alhoewel koelen met een luchtwarmtepomp (de werking van de warmtepomp wordt omgedraaid, waardoor deze in feite werkt als een airco) ook steeds meer in opkomst is, op voorwaarde dat het afgiftesysteem hiervoor geschikt is (reguliere radiatoren zijn niet geschikt voor koeling).

Bodemenergiesystemen gebruiken omgevingswarmte uit de ondiepe ondergrond. Open bodemenergiesystemen gebruiken daarbij grondwater, terwijl gesloten systemen geen grondwater gebruiken. Omdat de warmtestroom in de bodem en grondwater relatief traag is, heeft de bodem een opslagfunctie en kan warmte en koude seizoensmatig worden opgeslagen. Door warmtetoevoer vanuit de omgeving - vanaf de diepere ondergrond (geothermische warmtestroom) en vanaf de oppervlakte -, wordt de onttrokken warmte aangevuld of wordt de opgeslagen warmte langzaam afgevoerd.

De ondergrond wordt in Nederland voor meerdere functies gebruikt, waaronder de benodigde ruimte voor ondergrondse infrastructuur (zoals leidingen), de drinkwatervoorziening, warmte- en koudeopslag. Het kabinet streeft naar meer duurzaam en doelmatig gebruik van de ondergrond, waarbij in plaats van 'wie het eerst komt, wie het eerst maalt' duurzaam gebruik en de geschiktheid van de ondergrond een centralere rol krijgen in de toekenning van ondergronds ruimtegebruik. De eisen voor de kwantiteit en chemische kwaliteit van grondwater zijn vastgelegd in de Kaderrichtlijn Water (KRW; Richtlijn 2000/60/EG) en de Dochterrichtlijn Grondwater (GWR; Richtlijn 2006/118). Voor een zinvolle en gerichte inzet van de ondergrond, is het van belang om meer zicht te krijgen in de rol die bodemenergie kan spelen in de warmtetransitie, en daarmee de klimaatdoelstellingen van Nederland.

In de afweging rondom de toepassing van bodemenergie ligt er vaak nadruk op de potentiële risico's voor het bodemmilieu. Hierdoor worden de voor- en nadelen van bodemenergie in de beleidspraktijk niet altijd goed afgewogen. Het ontbreekt aan een duidelijk kwantitatief beleidskader voor het beleidsmatig afwegen van waar bodemenergie wel (geen of klein risico) of niet (groter risico) kan worden toegepast.

Bodemenergie Nederland, de branchevereniging van partijen die werkzaam zijn in de bodemenergiesector, heeft CE Delft gevraagd om voor- en nadelen van bodemenergie kwantitatief en met een objectieve methode in kaart te brengen ten opzichte van andere warmte- en koudetechnieken. Hierbij wordt gekeken naar vier gebouwtypen, zowel nieuwbouw als bestaande bouw. De vergelijking wordt in een maatschappelijke kosten-batenanalyse (mkba) weergegeven.

Deze mkba is een eerste stap om al deze effecten in beeld te brengen. Hierbij is het van belang om aan te geven dat de uitwerking van de effecten afhangt van de beschikbaarheid van (kwantitatieve) gegevens. Er zijn echter op dit moment relatief weinig studies die onderzoek hebben gedaan naar de externe effecten van de (grootschalige toepassing van) duurzame warmtetechnieken, waaronder bodemenergie. Dit betekent dat van sommige posten enkel een kwalitatief effect kan worden bepaald. Hierbij wordt een aanvullend advies gegeven hoe beleidsmakers deze effecten kunnen meenemen in de afweging rondom de keuze van duurzame warmtealternatieven in de gebouwde omgeving en de ondergrond. Wel zal er in de komende jaren meer onderzoek nodig zijn om ook deze effecten te kunnen kwantificeren.

1.2 Doel van het project

Het doel de mkba is om een methode te ontwikkelen die een kwantitatieve en objectieve invulling geeft aan het gesprek over de positie van bodemenergie binnen het energie-transitievraagstuk.

1.3 Afbakening en alternatieven

De studie is als volgt afgebakend:

- Voor de mkba wordt gekeken naar de maatschappelijke waarde van bodemenergiesystemen. Deze worden vergeleken met alternatieven die eveneens in de warmte- en koudebehoefte kunnen voorzien.
- Er wordt gekeken naar vier casussen; elk met twee varianten, waarbij een uitsplitsing is gemaakt tussen bestaande bouw en nieuwbouw:
 - kantoor;
 - verzorgingstehuis;
 - appartementencomplex;
 - woning.
- De keuze van het nul- en de projectalternatieven wisselt per casus. Meer toelichting hierover wordt gegeven in Hoofdstuk 3.
- Techniekspecifieke afbakeningen worden toegelicht bij de techniekbeschrijvingen in Paragraaf 3.5.

1.4 Wat is een mkba?

Een maatschappelijke kosten-batenanalyse (mkba) heeft tot doel verschillende opties voor de uitvoering van een project op integrale wijze met elkaar te vergelijken. Alle effecten worden vervolgens zoveel mogelijk in geld uitgedrukt en vervolgens telt men deze op, zodat een integrale afweging mogelijk is. Dat geldt ook voor zaken die meestal niet in geld worden gewaardeerd, zoals CO₂-emissies of luchtverontreinigende emissies. Bij het bepalen van de kosten en baten wordt uitgegaan van het ruime welvaartsbegrip en worden de kosten en baten gekwantificeerd en gerelateerd aan specifieke partijen. Een positief saldo

duidt op een project dat de welvaart verhoogt. Een negatief saldo duidt op een project dat de welvaart verlaagt.

In een mkba wordt een nulalternatief vergeleken met één of meerdere projectalternatieven. Hierbij is het nulalternatief de meest waarschijnlijk te achten ontwikkeling als geen van de projectalternatieven doorgang vindt. Tegen dit alternatief zetten we de kosten en baten van het nulalternatief af. Om het nulalternatief te definiëren wordt gekeken naar de meest waarschijnlijke ontwikkelrichting van de warmtetransitie, hetgeen dus niet per definitie hetzelfde is als niets doen. We houden hierbij rekening met de stappen die al gezet zijn in de energietransitie en stappen die waarschijnlijk nog gezet gaan worden. In de projectalternatieven bekijken we de inzet van verschillende bodemtoepassingen op gebouwniveau. Zowel in het nulalternatief als de projectalternatief houden we rekening met autonome ontwikkelingen, ofwel ontwikkelingen die zowel in het nul- als projectalternatief plaatsvinden.

Bij het opstellen van de mkba maken we gebruik van de Algemene Leidraad voor maatschappelijke kosten-batenanalyses die is opgesteld door (CPB & PBL, 2013). Hierin staan voorschriften en richtlijnen waaraan iedere mkba minimaal moet voldoen. Ook is er een stappenplan opgenomen. Voor het ramen van de energieprijzen wijken we af van WLO-scenario's zoals in de leidraad wordt benoemd, aangezien de energieprijzen sinds 2015 sterk zijn veranderd. In plaats hiervan maken we gebruik van de ramingen uit de Klimaat- en Energieverkenning van het PBL (PBL, 2022). Voor de CO₂-prijs maken we gebruik van de geüpdatete prijzen naar het huidige prijspeil van de WLO-scenario's uit het Handboek Milieuprijzen (CE Delft, 2023a).

1.5 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 beschrijft de methodiek van het in beeld brengen van de maatschappelijke kosten en baten per alternatief.

Hoofdstuk 3 geeft een beschrijving van casussen, de nul- en projectalternatieven (de warmte- en koudetechnieken) en welke specifieke nul- en projectalternatieven worden meegenomen bij iedere casus.

Hoofdstuk 4 gaat in op de kosten en baten per alternatief. Hierin worden de verschillende kosten- en batenposten in totaal gepresenteerd in netto contante waarde. De posten waarvan het effect kwalitatief wordt beschreven, worden aangegeven met een speciaal kader en icoon. Het doel hiervan is om de lezer handvatten te geven om de kwantitatieve en kwalitatieve effecten met elkaar te kunnen afwegen.

Kwalitatief effect



Hoofdstuk 5 geeft het totaalresultaat in saldo van kosten en baten weer en presenteert de resultaten van de gevoeligheidsanalyse.

Hoofdstuk 6 omvat de conclusies die volgen uit de mkba.

2 Methodiek

2.1 Inleiding

Dit hoofdstuk beschrijft de gehanteerde methodiek. Allereerst wordt er ingegaan op de methodiek in vogelvlucht. Daarna wordt een beeld geschetst van de indeling van de effecten en inzicht gegeven in de uitgangspunten en keuzes ten aanzien van de afbakening.

2.2 Methodiek in vogelvlucht

Bij het opstellen van de mkba volgen we de Algemene Leidraad (CPB & PBL, 2013). In de leidraad worden een aantal onderzoekstappen onderscheiden (Figuur 1).

Figuur 1 - Stappenplan van mkba

1. Probleemanalyse	• Welk knelpunt of welke kans doet zich voor en hoe ontwikkelt deze zich? • Welke beleidsdoelstelling volgt daaruit? • Welke oplossingsrichtingen zijn kansrijk?
2. Vaststellen nulalternatief	• Meest waarschijnlijke ontwikkeling zonder beleid • Effect = beleidsalternatief – nulalternatief
3. Definitie beleidsalternatieven	• Beschrijf de te nemen maatregelen • Rafel pakketten uiteen tot samenstellende onderdelen • Definieer meerdere alternatieven en varianten
4. Bepalen effecten en baten	• Identificeer effecten • Kwantificeer effecten • Waardeer (monetariseer) effecten
5. Bepalen kosten	• Opgeofferde middelen om de oplossing te implementeren • Kosten kunnen eenmalig of periodiek zijn, vast of variabel • Alleen de extra kosten ten opzichte van het nulalternatief
6. Varianten- en risicoanalyse	• Identificeer de belangrijkste onzekerheden en risico's • Analyseer de gevolgen voor de uitkomsten
7. Opstellen overzicht van kosten en baten	• Reken alle kosten en baten naar hetzelfde basisjaar en bepaal het saldo • Breng alle effecten in beeld, ook niet-gekwificeerde en/of niet-gemonetariseerde
8. Resultaten presenteren	• Relevant, toegankelijk en duidelijk • Verantwoorden: transparantie en reproduceerbaarheid • Interpretieren: wat kan de besluitvormer uit de MKBA leren?

2.3 Indeling effecten

Het uitgangspunt van een mkba is dat alle welvaartseffecten in kaart worden gebracht. De welvaartseffecten staan voor alle effecten die in Nederland worden ervaren als gevolg van een project. Hierbij hanteren we een breed welvaartsbegrip, omdat bekend is dat mensen aan veel effecten waarde toekennen, zoals luchtkwaliteit, reistijdwinst, een veilige leefomgeving en inkomen (CPB & PBL, 2013).

De welvaartseffecten zijn ingedeeld in directe, indirecte en externe effecten. Om een objectieve vergelijking van bodemenergie te kunnen maken, is de aanname gedaan dat alle gebouwen geschikt zijn voor lagetemperatuurverwarming en -afgifte. Bij de projecteffecten worden dus de effecten meegenomen ten gevolge van de productie van warmte en koude bij verschillende alternatieven.

Directe effecten zijn de financiële effecten voor de initiatiefnemer en de gebruiker. Dit zijn investeringskosten, jaarlijkse kosten en financiële opbrengsten van de projectalternatieven. Indirecte effecten zijn een afgeleide van de directe effecten en werken door op bijvoorbeeld de regionale arbeidsmarkt (extra werkgelegenheid), de woningmarkt (effect op woningwaarde en verkoopbaarheid van woningen) of de detailhandel (bestedingen). Externe effecten zijn (door de initiatiefnemers) niet-beoogde effecten van de interventie op derden, zoals milieueffecten en hinder voor omwonenden. Om de welvaartseffecten vergelijkbaar te maken, waarderen we de effecten zo veel mogelijk in euro's. Voor een aantal effecten is het in dit onderzoek echter niet mogelijk geweest om de effecten in euro's uit te drukken. Deze effecten worden kwalitatief beoordeeld.

Update effecten

Sinds de publicatie van het oorspronkelijke rapport in september 2023 zijn er actuelere gegevens beschikbaar gekomen over de kosteninschatting van het onderhoud van gesloten bodemenergiesystemen (GBES). Voor deze update hebben we gegevens verzameld van een aantal marktpartijen die verantwoordelijk zijn voor het onderhoud en beheer van gesloten bodemenergiesystemen. Deze actuelere gegevens zijn verwerkt in de effecten.

2.4 Tijdshorizon

De baten die voortvloeien uit bodemenergie, krijgen hun beslag over een lange termijn. Om deze baten goed in beeld te brengen, wordt een tijdshorizon van 30 jaar gehanteerd. Hierdoor wordt 2050 het eindjaar van de analyse. Tot en met 2050 zijn er meerdere prognoses beschikbaar (bijvoorbeeld over energieprijzen en CO₂-emissies). Verder dan 2050 gaan deze prognoses niet. Aangezien diverse componenten van de investeringen binnen deze 30 jaar economisch zijn afgeschreven, worden herinvesteringen meegenomen. Van de investeringen die binnen de tijdshorizon economisch gezien nog niet volledig zijn afgeschreven, wordt de resterende waarde van de investering als baat meegenomen.

2.5 Discontovoet

In een mkba worden de verwachte kosten en baten van een project teruggerekend naar het heden op basis van de toe te passen discontovoet. In deze studie nemen we 2020 als basisjaar. De discontovoet is het (minimaal) vereiste rendement op een project.



We sluiten aan bij de aanbevelingen van de werkgroep Discontovoet. In 2020 heeft de werkgroep een nieuw advies uitgebracht. Hierbij wordt gepleit voor een risicogewogen standaarddiscontovoet van 2,25% (gecorrigeerd voor inflatie), opgebouwd uit een risicovrij deel van -1% en een risicopremie van 3,25%. Verder wordt een vlakke discontocurve aan-geraden. Dit betekent dat de discontovoet voor de korte en lange termijn hetzelfde is (Ministerie van Financiën, 2015).

Tekstbox 1 - Netto contante waarde

Een euro die men ontvangt in jaar t , heeft niet dezelfde waarde als een euro die men nu reeds in bezit heeft. Een euro die men nu bezit, kan tegen rente worden uitgezet, waardoor deze naar t jaar meer oplevert. Eén euro levert na t jaar bij een rente r een bedrag op van $(1+r)^t$ euro.

Om de huidige waarde van toekomstige kosten en baten te bepalen, moeten deze daarom worden gedisc-
teerd met de discontovoet. Alle baten en kosten worden contant gemaakt en samengevat in één getal: de netto
contante waarde (NCW).

De netto contante waarde:

$$NCW = \sum_{t=0}^N \frac{B_t - C_t}{(1+r)^t}$$

Hierbij is B_t de baat in jaar t , C_t de kosten in jaar t , r de rente of discontovoet die gebruikt wordt om bedragen
in de toekomst naar het heden toe te rekenen en N is de verwachte looptijd van het project.

3 Nul- en projectalternatieven

3.1 Inleiding

Deze mbka is opgesteld voor vier verschillende casussen met twee varianten: bestaande bouw en nieuwbouw. Elke casus representeert een veel voorkomend gebouwtype in Nederland. Voor elke casus zijn individueel alle effecten doorgerekend. In feite is deze mkba dus viervoudig uitgevoerd.

In dit hoofdstuk stellen we het nulalternatief en de projectalternatieven per casus vast. Dit zijn de te beschouwen warmte- en koudetechnieken. Hierbij geven we eerst een beschrijving van de vier verschillende casussen. Deze beschrijving omvat de aannames en uitgangspunten. Vervolgens wordt per casus het nulalternatief en het projectalternatief weergegeven.

De mkba die wordt uitgevoerd, is alleen geldig voor deze casussen met bijbehorende aannames. Zij zijn in principe niet algemeen geldend voor de technieken.

3.2 Methodiek

Voor het vaststellen van de verschillende alternatieven zijn de volgende stappen doorlopen:

1. Vaststellen van te beschouwen gebouwkenmerken per casus

Het doel van de studie is het beschouwen van de maatschappelijke kosten en baten van bodemenergiesystemen. Daarom is bij het vaststellen van de te beschouwen gebouwtypen gekeken naar typen waar deze systemen (technisch) toegepast kunnen worden. Voor ieder gebouwtype zijn twee varianten bekeken: bestaande bouw en nieuwbouw.

2. Vaststellen van energievraag voor ruimteverwarming en -koeling

Het vaststellen van de energievraag voor ruimteverwarming en -koeling is gedaan aan de hand van openbare bronnen. Voor bestaande bouw is daarbij gebruik gemaakt van de achtergrondinformatie uit het functioneel ontwerp 5.0 van het Vesta MAIS-model van het PBL (PBL, 2021). Voor de nieuwbouw is gebruik gemaakt van de Uniforme Maatlat Gebouwde Omgeving van RVO/ECW (RVO, 2022). Aanvullend hierop is voor de vraag naar koeling bij woningen gebruik gemaakt van aanvullende publicatie van TNO over de energievraag van ruimtekouling in woningen (TNO, 2021).

3. Vaststellen van nulalternatief

Het nulalternatief is het 'meest voor de hand liggende' systeem dat toegepast wordt als er geen gebruik wordt gemaakt van bodemenergie. Het vaststellen daarvan is gedaan door het raadplegen van diverse experts.

4. Vaststellen van projectalternatief

De projectalternatieven zijn de alternatieven die onderzocht worden. Voor alle gebouwtypen zitten daar uiteraard de bodemenergiesystemen in. Daarnaast is gekeken naar mogelijke alternatieve oplossingen voor het leveren van warmte en koude aan een gebouw.

De bovenstaande uitwerking is in overleg met diverse experts binnen CE Delft en Bodemenergie NL vastgesteld. In Paragraaf 3.3 worden de casussen verder toegelicht.

3.3 Overzicht nul- en projectalternatieven

Voor deze mkba zijn een viertal gebouwtypen (kantoor, verzorgingstehuis, appartementen-complex en individuele woning) geselecteerd voor het doorrekenen van de maatschappelijke effecten, waarbij voor iedere casus onderscheid is gemaakt tussen bestaande bouw en nieuwbouw. In de volgende paragrafen worden deze verder toegelicht. De verschillende gebouwtypen, in combinatie met de techniek voor warmte en koeling, vormen samen de casussen voor de nul- en projectalternatieven.

Tabel 5 geeft de alternatieven per casus weer. De mkba die wordt uitgevoerd, is alleen geldig voor deze casussen met bijbehorende aannames. Zij zijn in principe niet algemeen geldend voor de technieken.

Tabel 5 - Alternatieven

	Bestaande bouw		Nieuwbouw	
	Nulalternatief	Projectalternatieven	Nulalternatief	Projectalternatieven
Kantoor	Hr-ketel + airco	– OBES – L/w-warmtepomp – Mt-net + airco	L/w-warmtepomp	– OBES – Mt-net + airco
Verzorgings-tehuis	Hr-ketel + airco	– OBES – L/w-warmtepomp – Mt-net + airco	L/w-warmtepomp	– OBES – Mt-net + airco
Appartementen-complex	Hybride warmte-pomp + airco	– OBES – GBES – L/w-warmtepomp – Mt-net + airco	L/w-warmtepomp	– OBES – GBES – Mt-net + airco
Woning	Hybride warmte-pomp + airco	– GBES – L/w-warmtepomp – Mt-net + airco	L/w-warmtepomp	– GBES – Mt-net + airco

3.4 Beschrijving casussen

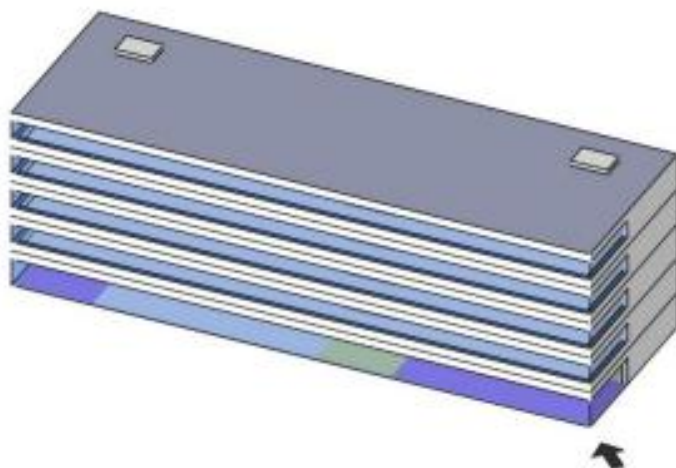
Elk gebouw is uniek. Voor een transparante doorrekening op casusniveau sluit deze mkba aan bij de zogenaamde referentiegebouwen die zijn opgesteld door RVO (RVO, 2017). Deze referentiegebouwen zijn opgesteld voor het (beleidsmatig) rekenen aan energieprestaties, en heeft als doel om een goede afspiegeling te vormen van de hedendaagse bouw.

Voor deze mkba zijn vier van deze referentiegebouwen gekozen om door te rekenen. Het doel hiervan is om de effecten bij verschillende typen gebouwen te laten zien. Vanwege de maatschappelijke relevantie, is gekozen voor twee gebouwen in de diensten-sector en twee woongebouwen, ieder met verschillende eigenschappen. De keuze voor de specifieke casussen heeft arbitrair plaats gevonden, in samenspraak met Bodemenergie NL.

Hierna staat per casus een nadere toelichting over de bouwkundige en energetische kenmerken per gebouw. De weergegeven warmte- en koudevraag betreft de *functionele* vraag voor ruimteverwarming en -koeling en warm tapwater. Dit betreft de vraag van het gebouw, exclusief het rendement van de warmtetechniek.

3.4.1 Kantoor

Figuur 2 - Afbeelding 'Kantoor'



Bron: (RVO, 2017).

Bij de casus 'Kantoor' is gekozen voor een gebouw met een gebruiksoppervlak van 4.500 m². Dit is referentiegebouw 'Kantoor M' van RVO. De bovenstaande afbeelding geeft hiervan een illustratief voorbeeld. Voor de bestaande bouw wordt uitgegaan van een gebouw dat gebouwd is in 1975-1990 (label C). Voor nieuwbouw betreft het een gebouw dat aan de BENG-eisen¹ voldoet.

Energetisch gaan we uit van de eigenschappen zoals vermeld in Tabel 6.

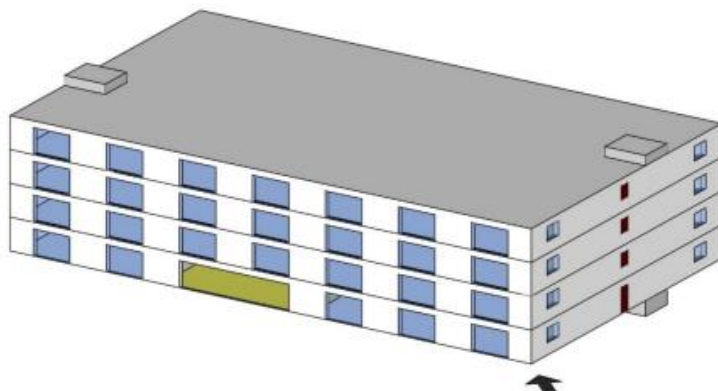
Tabel 6 - Eigenschappen 'Kantoor'

Omschrijving	Bestaand	Nieuwbouw	Eenheid
Bouwjaar	1975-1990	2022	Jaartal
Oppervlakte	4.500	4.500	m ²
Ruimteverwarmingsvraag per m ²	0,406	0,081	[GJ/m ²]
Warmtapwatervraag per m ²	0,004	0,005	[GJ/m ²]
Koelvraag per m ²	0,087	0,077	[GJ/m ²]
Totale ruimteverwarmingsvraag	1.826	366	GJ per jaar
Totale warmtapwatervraag	17	23	GJ per jaar
Totale koelvraag	391	345	GJ per jaar

¹ Conform de Europese EPBD-richtlijn dienen vanaf 2020 alle gebouwen bijna energieneutraal te zijn. De energieprestatie van Bijna Energie Neutrale Gebouwen wordt vastgelegd in drie eisen, en zijn gericht op het beperken van de energiebehoefte van gebouwen.

3.4.2 Verzorgingstehuis

Figuur 3 - Afbeelding 'Verzorgingstehuis'



Bron: (RVO, 2017).

Bij de casus 'Verzorgingstehuis' is gekozen voor een gebouw met een oppervlak van 10.000 m², met gezondheidsfunctie en overnachtingsmogelijkheid. Dit komt overeen met referentiegebouw 'Gezondheid met bed (L)' van RVO. De bovenstaande afbeelding geeft hiervan een illustratief voorbeeld. Voor de bestaande bouw wordt uitgegaan van een gebouw dat gebouwd is in 1975-1990 (label C). Voor nieuwbouw betreft het een gebouw dat aan de BENG-eisen voldoet.

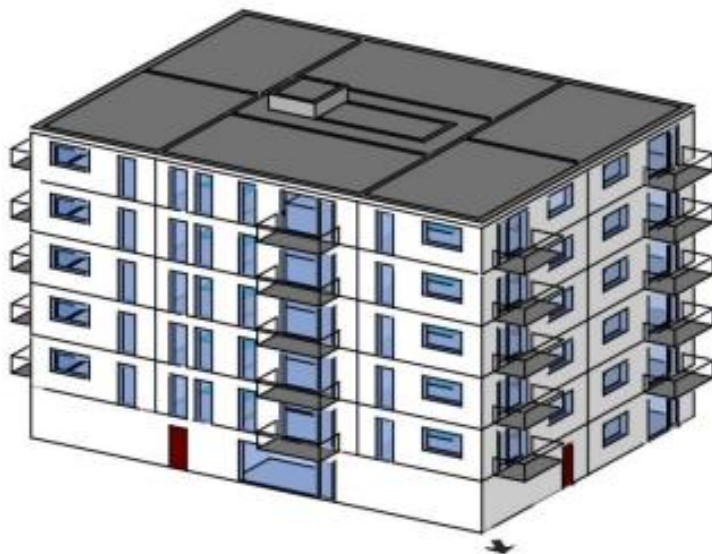
Energetisch gaan we uit van de eigenschappen zoals vermeld in Tabel 7.

Tabel 7 - Eigenschappen 'Verzorgingstehuis'

Omschrijving	Bestaand	Nieuwbouw	Eenheid
Bouwjaar	1975-1990	2022	Jaartal
Oppervlakte	10.000	10.000	m ²
Ruimteverwarmingsvraag per m ²	0,476	0,243	[GJ/m ²]
Warmtapwatervraag per m ²	0,038	0,055	[GJ/m ²]
Koelvraag per m ²	0,032	0,043	[GJ/m ²]
Totale ruimteverwarmingsvraag	4.756	2.430	GJ per jaar
Totale warmtapwatervraag	383	551	GJ per jaar
Totale koelvraag	323	428	GJ per jaar

3.4.3 Appartementencomplex

Figuur 4 - Afbeelding 'Appartementencomplex'



Bron: (RVO, 2017).

Voor de casus 'Appartementencomplex' is gekozen voor een gebouw met 40 appartementen, met elk een gebruiksoppervlak van 90 m². Het totale gebruiksoppervlak is daarmee 3.600 m². Dit is referentiegebouw 'Woongebouw M' van RVO. De bovenstaande afbeelding geeft hiervan een illustratief voorbeeld. Voor de bestaande bouw wordt uitgegaan van een gebouw dat gebouwd is in 1965-1974 (label D). Voor nieuwbouw betreft het een gebouw dat aan de BENG-eisen voldoet.

Energetisch gaan we uit van de eigenschappen zoals vermeld in Tabel 8.

Tabel 8 - Eigenschappen 'Appartementencomplex'

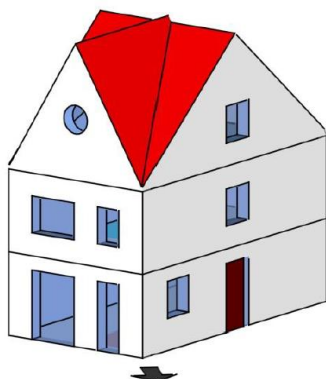
Omschrijving	Bestaand	Nieuwbouw	Eenheid
Bouwjaar	1965-1974	2022	Jaartal
Oppervlakte	90	90	m ²
Aantal aansluitingen	40	40	Aantal
Ruimteverwarmingsvraag per aansluiting*	13.930	N.v.t.	[GJ/woning]
Ruimteverwarmingsvraag per m ²	0,139	0,131	[GJ/m ²]
Warmtapwatervraag per aansluiting	6,1	N.v.t.	[GJ/woning]
Warmtapwatervraag per m ²	0	0,072	[GJ/m ²]
Koelvraag per m ² **	0,009	0,046	[GJ/m ²]
Totale ruimteverwarmingsvraag	1.056	470	GJ per jaar per complex
Totale warmtapwatervraag	244	258	GJ per jaar per complex
Totale koelvraag	47	167	GJ per jaar per complex

* Opmerking: de energievraag voor ruimteverwarming wordt bij bestaande bouw in het Vesta-model opgebouwd uit een vast deel per woning plus een variabel deel per oppervlak.

** De koelvraag is gebaseerd op een studie van TNO, zie Paragraaf 3.2.

3.4.4 Individuele woning

Figuur 5 - Afbeelding 'Individuele woning'



Bron: (RVO, 2017).

Voor de casus 'Individuele Woning' is gekozen voor een gebouw met een oppervlak van 135 m². Dit is referentiegebouw 'Woning M hoek' van RVO. De bovenstaande afbeelding geeft hiervan een illustratief voorbeeld. Voor de bestaande bouw wordt uitgegaan van een gebouw dat gebouwd is in 1965-1974 (label D). Voor nieuwbouw betreft het een gebouw dat aan de BENG-eisen voldoet.

Energetisch gaan we uit van de eigenschappen zoals vermeld in Tabel 9.

Tabel 9 - Eigenschappen 'Individuele Woning'

Omschrijving	Bestaand	Nieuwbouw	Eenheid
Bouwjaar	1965-1974	2022	Jaartal
Oppervlakte	135	135	m ²
Ruimteverwarmingsvraag per aansluiting*	25.088	N.v.t.	[GJ/woning]
Ruimteverwarmingsvraag per m ²	0,143	0,113	[GJ/m ²]
Warmtapwatervraag per aansluiting	8,2	N.v.t.	[GJ/woning]
Warmtapwatervraag per m ²	0	0,060	[GJ/m ²]
Koelvraag per m ² **	0,013	0,046	[GJ/m ²]
Totale ruimteverwarmingsvraag	44	15	GJ per jaar
Totale warmtapwatervraag	8	8	GJ per jaar
Totale koelvraag	1,7	6,3	GJ per jaar

* Opmerking: de energievraag voor ruimteverwarming wordt bij bestaande bouw in het Vesta-model opgebouwd uit een vast deel per woning plus een variabel deel per oppervlak. Voor de bovenstaande waarden is gebruik gemaakt van het woningtype twee-onder-één-kap in Vesta.

** De koelvraag is gebaseerd op een studie van TNO, zie Paragraaf 3.2.

3.5 Beschrijving alternatieven

De warmte- en koudetechnieken vormen de nul- en projectalternatieven in deze mkba. Het nulalternatief is de meest voor de hand liggende warmte- en koudetechniek. De projectalternatieven zijn andere alternatieven voor een warmte- en koudetechniek.

In de volgende paragrafen worden de warmtetechnieken toegelicht.

Afbakening

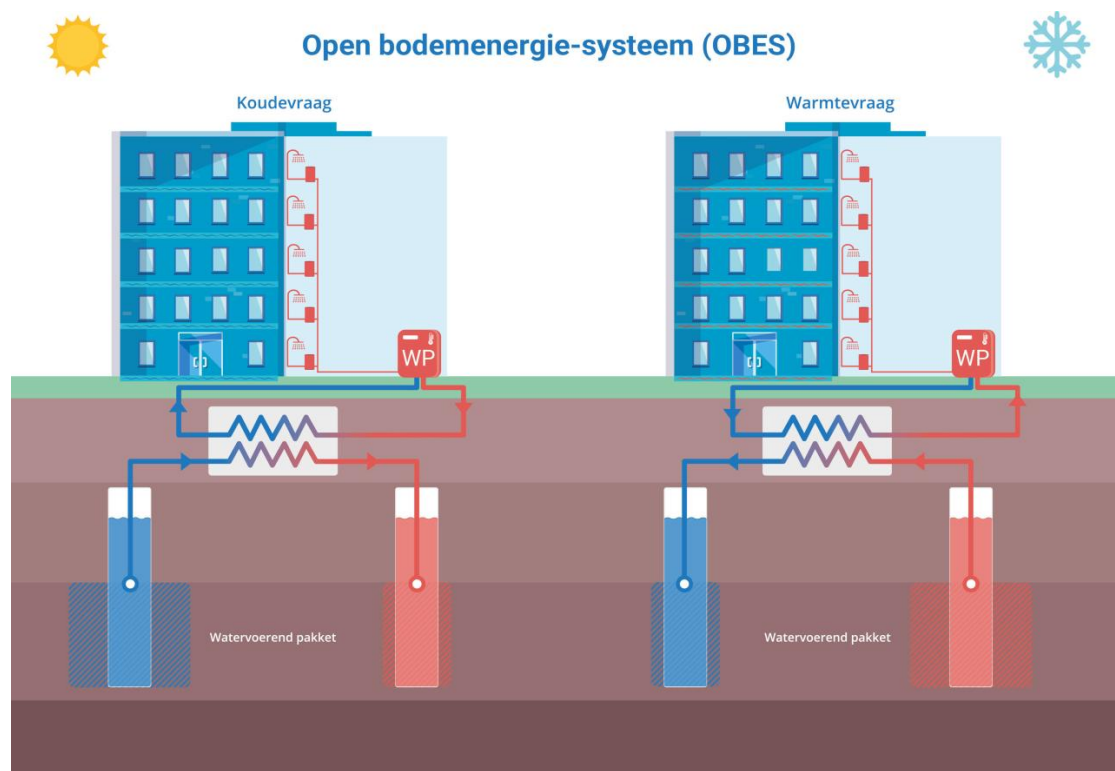
Bij alle technieken wordt alleen gekeken naar het deel dat nodig is voor de productie van warmte en koude. Er wordt niet gekeken naar de afgiftekant (voor warmte, koude en tapwater) en naar de eventueel benodigde gebouwaanpassingen (schilverbetering). Alle onderdelen die wél nodig zijn voor de productie, zoals bodembron, buitenunits en warmteaansluitingen, worden wel meegenomen.

3.5.1 OBES

OBES is meegenomen als projectalternatief bij de casussen 'Kantoor', 'Verzorgingstehuis' en 'Appartementen-complex'.

Open Bodemenergiesystemen (OBES) zijn systemen die gebruikmaken van de opslagmogelijkheden in watervoerende pakketten in de bodem. In deze watervoerende pakketten, ofwel aquifers, kan zowel warmte als koude worden opgeslagen. In de winter wordt warm water uit de warme kant van de aquifer opgepompt en via een warmtepomp opgewarmd naar de wenselijke temperatuur voor ruimteverwarming en tapwater. Het afgekoelde water wordt vervolgens teruggepompt in de koude kant van de aquifer. In de zomer werkt een OBES andersom: het koude water wordt opgepompt en hiermee wordt een gebouw gekoeld (met of zonder tussenkomst van een warmtepomp). Het opgewarmde water wordt vervolgens weer in de warme kant opgeslagen. Dit wordt jaar op jaar herhaald. Door de warmte- en koudeonttrekking in balans te brengen, kan een OBES in principe onbeperkt gebruikmaken van de energie uit de ondergrond, zolang het systeem technisch functioneert.

Figuur 6 - Schematische weergave open bodemenergiesysteem (OBES)



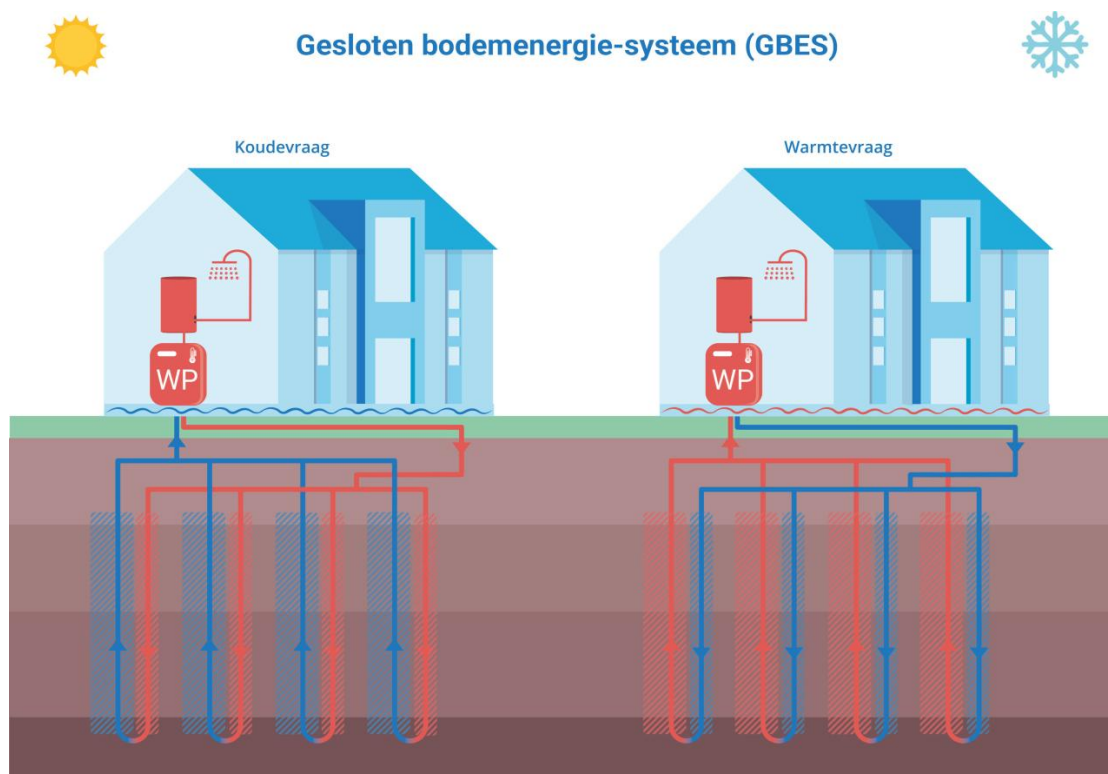
Bron: (BodemenergieNederland, 2023).

3.5.2 GBES

GBES is meegenomen als projectalternatief bij de casussen 'Appartementencomplex' en 'Woning'.

Een gesloten bodemenergiesysteem (GBES) maakt net als OBES gebruik van de ondergrond als primaire bron van warmte en koude. Het verschil met een open systeem is dat er geen warm of koud grondwater op-en-neer wordt gepompt, maar dat er een gesloten buis (warmtewisselaar) in de grond wordt geboord (van enkele tientallen tot circa 300 m diepte). Door deze warmtewisselaar stroomt een vloeistof, die warmte uitwisselt met de omringende bodem. Dit is veel constanter dan de temperatuur van de buitenlucht en in de winter ook veel warmer. Bovengronds wordt de warmte (of koude) via een warmtepomp naar de gewenste temperatuur gebracht voor het gebouw.

Figuur 7 - Schematische weergave gesloten bodemenergiesysteem (GBES)



Bron: (BodemenergieNederland, 2023).

3.5.3 Lucht-waterwarmtepomp

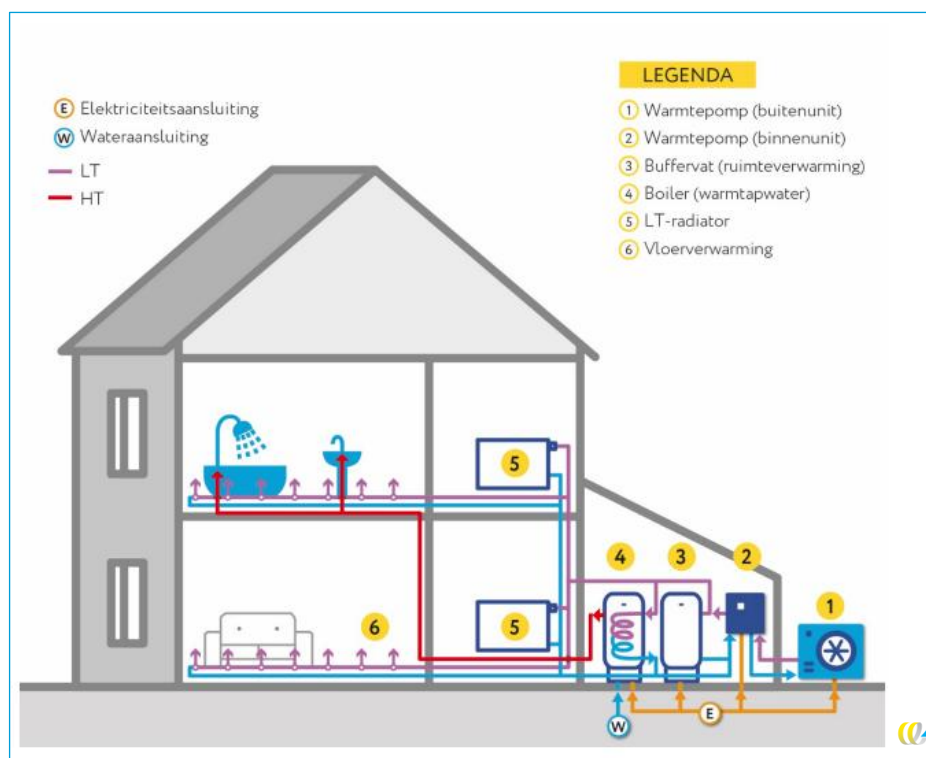
Lucht-waterwarmtepomp is meegenomen bij alle casussen - in bestaande bouw als één van de projectalternatieven, in nieuwbouw als het nulalternatief.

Een elektrische lucht-waterwarmtepomp (l/w-warmtepomp) gebruikt energie uit de lucht, die met behulp van elektriciteit wordt opgewaardeerd voor het verwarmen van de woning en eventueel voor het opwarmen van het tapwater met een boiler. Het is een systeem met een buitenunit waar een koudemiddel doorheen stroomt, dat energie opneemt uit de lucht. De warmtepomp zet deze energie om in bruikbare warmte voor de woning. Doordat de luchtwarmtepomp grotendeels energie uit de lucht gebruikt en maar een beperkte hoeveelheid elektriciteit, heeft hij een hoger rendement dan de hr-ketel. Het rendement gaat omhoog bij een zo laag mogelijke afgiftetemperatuur.

Een belangrijk verschil tussen een lucht-waterwarmtepomp en bodemenergie is dat de brontemperatuur van buitenlucht grotere temperatuurverschillen kent dan de brontemperatuur van grondwater in de bodem. Met name in de winter bij lage buitentemperaturen kan dit een verschil geven. Dit zorgt ervoor dat lucht-waterwarmtepompen met name in de winter een lager rendement hebben.

Voor koeling verschilt het per type (en afgiftesysteem) of een lucht-waterwarmtepomp geschikt is om te koelen. Lucht-waterwarmtepompen maken gebruik van zogenaamde actieve koeling, waarbij de lucht-waterwarmtepomp vergelijkbaar functioneert als een airco. Actief koelen kost veel stroom, waardoor dit een lager rendement geeft in de zomer.

Figuur 8 - Schematische weergave lucht-waterwarmtepomp in een woning



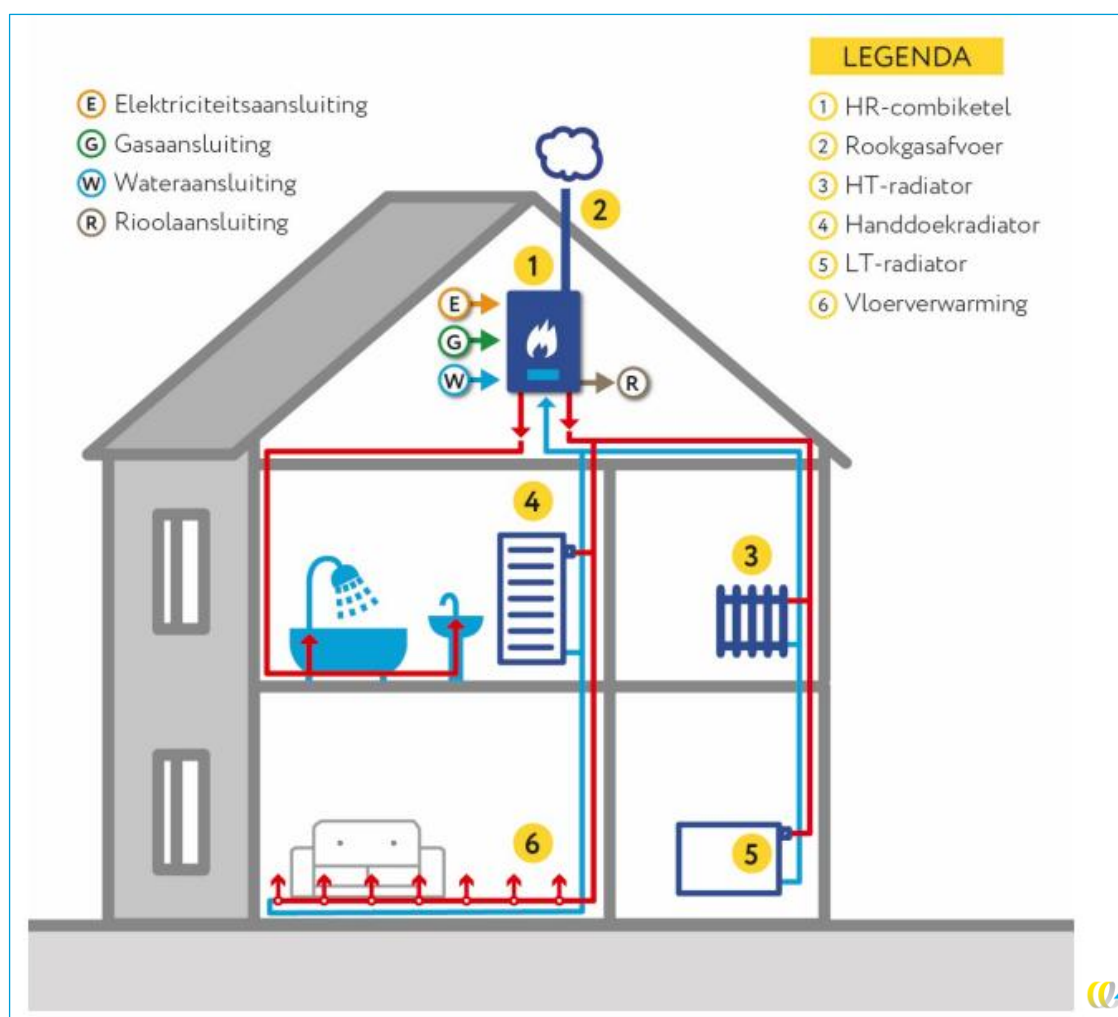
Bron: (CE Delft, lopend).

3.5.4 Hr-ketel

Hr-ketel is meegenomen als nulalternatief bij de casussen 'Kantoor' en 'Verzorgingstehuis' - enkel bij bestaande bouw. Nieuwbouw wordt aardgasvrij opgeleverd.

Een hoogrendement-combiketel of hr-combiketel is een warmtetechniek voor de productie van ruimteverwarming en warm tapwater. De hr-combiketel verwarmt water door aardgas of groen gas te verbranden. De pomp bij de ketel verplaatst het verwarmde water naar het afgiftesysteem in de woning. Nadat het water door het afgiftesysteem is gestroomd, komt het afgekoelde water weer terug naar de ketel en wordt het opnieuw verwarmd. Voor het maken van warm tapwater wordt koud water uit de waterleiding verwarmd. Dit warme water wordt naar de tappunten vervoerd.

Figuur 9 - Schematische weergave hr-ketel



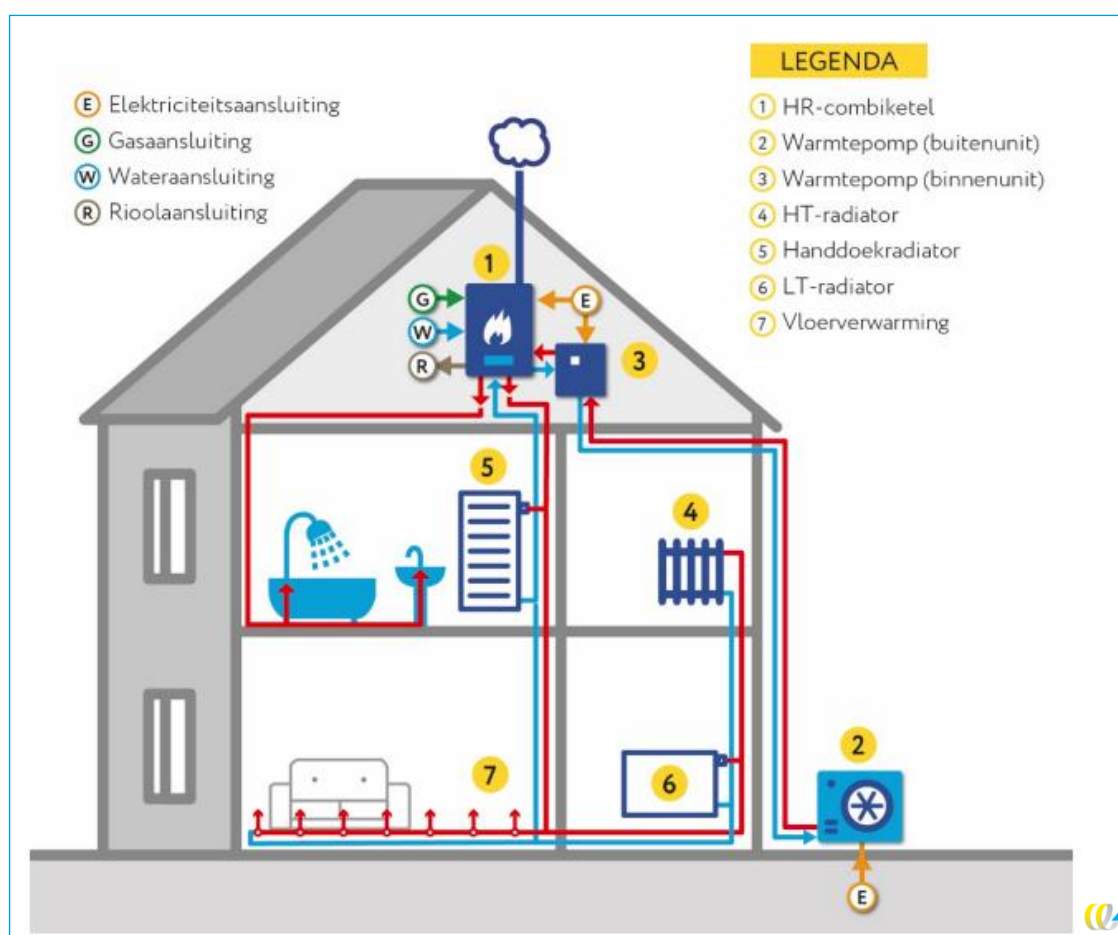
Bron: (CE Delft, lopend).

3.5.5 Hybride warmtepomp

De hybride warmtepomp is meegenomen als nulalternatief bij de casussen ‘Appartementencomplex’ en ‘Woning’ - enkel bij bestaande bouw, vanwege de recent aangekondigde normering voor hybride warmtepompen in woningen (Ministerie van BZK, 2022). Nieuwbouw wordt aardgasvrij opgeleverd.

De hybride warmtepomp combineert een elektrische warmtepomp met de hr-ketel op gas. De elektrische warmtepomp kan ongeveer voor de helft van de warmtevraag zorgen. Dit gaat efficiënt, omdat de warmtepomp energie haalt uit de buitenlucht of ventilatie-lucht. De energie wordt gebruikt voor ruimteverwarming en/of warmtapwaterbereiding. Ongeveer een vijfde van de tijd springt de hr-ketel bij op momenten dat de warmtepomp niet voldoende warmte kan leveren, zoals in het geval wanneer het buiten koud is en/of er (veel) warmtapwater nodig is.

Figuur 10 - Schematische weergave hybride warmtepomp in een woning



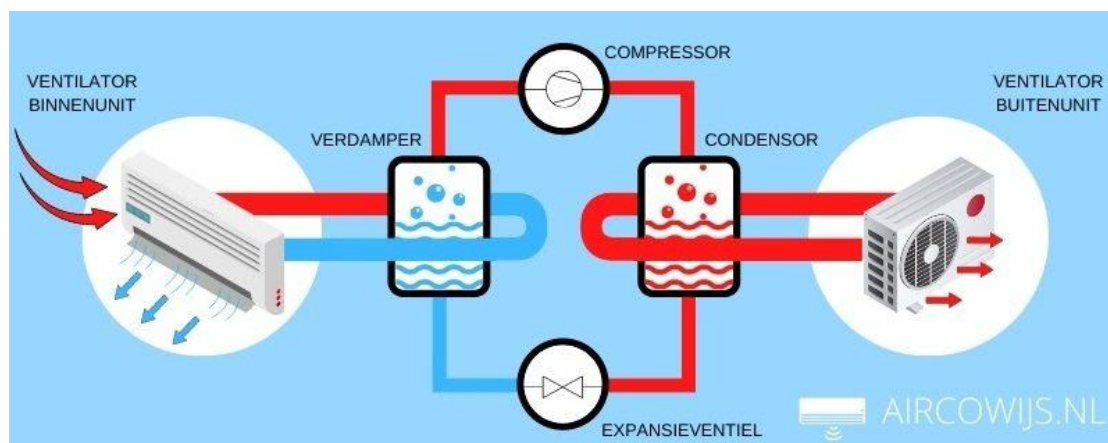
Bron: (CE Delft, lopend).

3.5.6 Airco

Airco is meegenomen bij alle alternatieven waarbij de warmtetechniek niet geschikt is om te koelen. Dit geldt voor de hr-ketel, hybride warmtepomp en het mt-net. Verder is de aanname dat in bestaande bouw lucht-waterwarmtepompen niet altijd geschikt zijn om te koelen; vandaar dat hierbij ook de effecten van een airco worden meegenomen.

Een airco of koelmachine is in feite een omgekeerde warmtepomp. De airco wordt primair gebruikt voor het koelen van gebouwen, door de binnenlucht te koelen en terug te blazen. Door het koelen wordt warmte onttrokken aan het gebouw. Deze warmte wordt via een buitenunit uitgestoten naar de buitenlucht. Voor het koelen van de binnenlucht maakt de airco gebruik van elektriciteit.

Figuur 11 - Schematische weergave airco



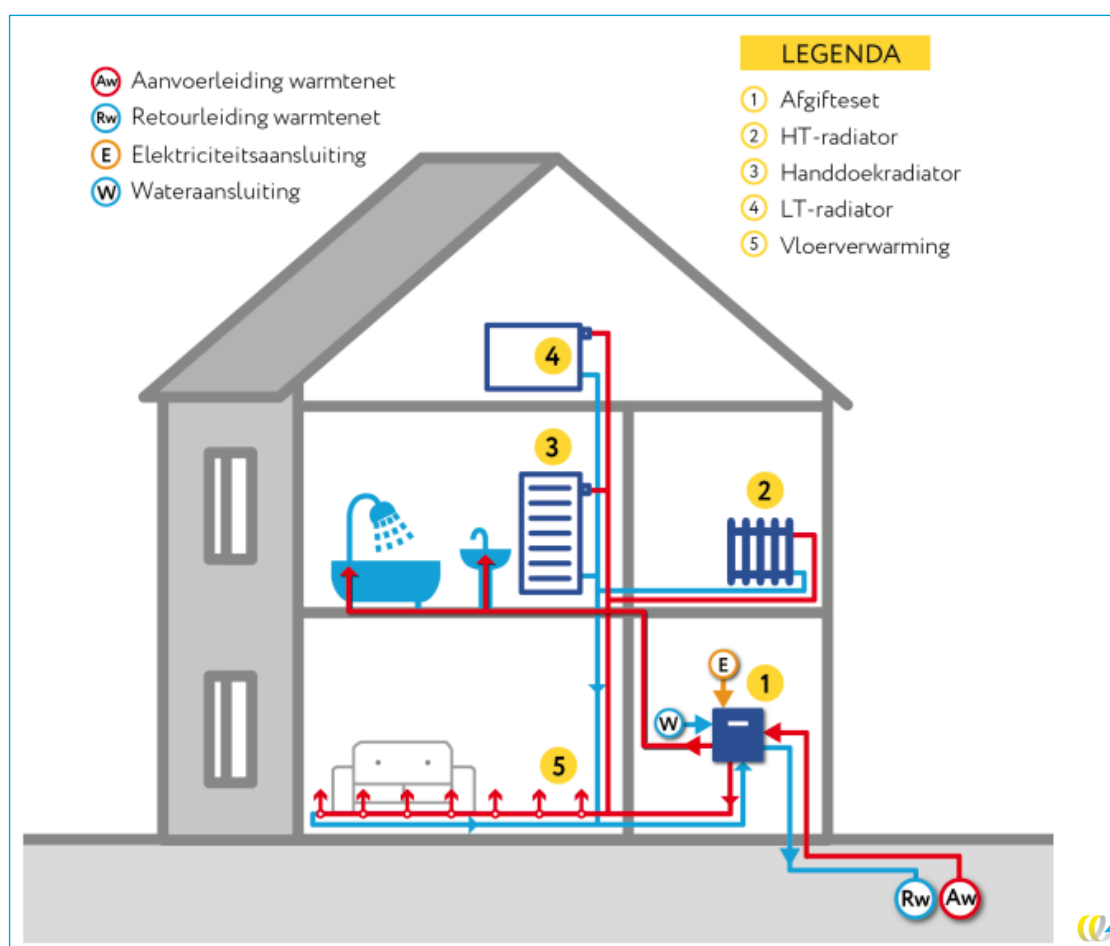
Bron: (aircowijs.nl, lopend).

3.5.7 Mt-net

Mt-net is meegenomen als projectalternatief bij alle casussen.

Een middentemperatuurwarmtenet (mt-net) levert warmte voor ruimteverwarming en warm tapwater. Een collectieve bron verwarmt water dat via een buizensysteem naar de woning wordt vervoerd. In de woning is enkel een afgifteset nodig, waar de aanvoer- en afvoerbuis van het warmtenet op worden aangesloten. De afgifteset wordt gekoppeld aan het interne warmteafgiftesysteem, waarmee de woning verwarmd wordt en het warm tapwater op de juiste locaties wordt gebracht.

Figuur 12 - Schematische weergave mt-net



Bron: (CE Delft, lopend).

4 Projecteffecten

4.1 Inleiding

In deze mkba staat het in beeld brengen van relevante projecteffecten centraal. De meegenomen effecten zijn weergegeven in Tabel 10 en worden in de volgende paragrafen verder toegelicht. Voor alle effecten wordt het totale verdisconteerde effect over de gehele looptijd van de mkba weergegeven.

Tabel 10 - Overzicht van projecteffecten

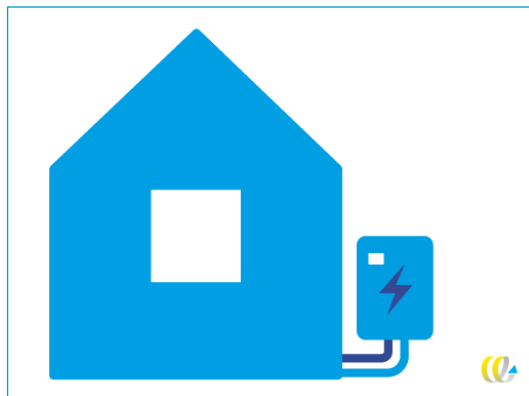
Type effect	Effect	Toelichting effect	Waardering
Direct	Directe kosten bij implementatie warmte- en koudetechnieken	Eenmalige investeringskosten	€
		Herinvesteringen	€
		Onderhoudskosten	€
		Kosten energieverbruik	€
	Directe baten bij implementatie warmte- en koudetechnieken	Resterende waarde bodembron	€
Indirect	Arbeidsmarkt	Effect op werkgelegenheid	€
Extern	Klimaat effecten	CO ₂ -besparing	€
		Lekkage koudemiddel	€
	Hitte-eiland	Lokale opwarming door de technieken	Kwalitatief
	Geluidseffecten	Geluidsoverlast van de technieken	€
	Effecten op het net	Belasting laagspanningsnet	€
	Bodem effecten	Niet correct aangevuld boorgat	Kwalitatief
		Vermenging grondwaterkwaliteit	Kwalitatief
		Verspreiding bodemverontreiniging ondiepe aquifer	Kwalitatief
		Effecten van lekkages in de bodem en gebruik van antivriesmiddelen	Kwalitatief en risicoverkenning

4.2 Directe financiële effecten

Eenmalige investeringen

De eenmalige investeringen zijn de investeringskosten voor de aanschaf en installatie van een warmte- en koudetechniek. Zoals toegelicht in Hoofdstuk 3, worden in deze mkba alle projecteffecten meegenomen tot en met opwekking, exclusief distributie en afgifte in het gebouw. Dit betekent dat de investeringskosten van de technieken worden meegenomen die nodig zijn om warm/koud water voor ruimteverwarming, tapwater en koude te produceren. Inpandige investeringskosten van een gebouw, zoals eventuele aanpassingen aan het afgiftesysteem en isolatiemaatregelen, worden buiten beschouwing gelaten.

Figuur 13 - Afbakening scope 'Investeringskosten'



De investeringskosten van alle technieken zijn per casus afgestemd op het benodigde vermogen voor warmte en koude. De investeringskosten zijn niet lineair: voor de meeste technieken geldt dat de gemiddelde investeringskosten per opgesteld vermogen dalen met de groei van het gevraagde vermogen. De totale kosten stijgen wel mee met het totale gevraagde vermogen. Dit betekent dat de investeringskosten in deze mkba enkel bedoeld zijn om onderling te vergelijken, en niet toepasbaar zijn op andere situaties.

De directe investeringskosten van GBES en OBES zijn aangeleverd door Bodemenergie NL. Deze input is afgestemd binnen Bodemenergie NL en voor dit project opgesteld. De investeringskosten zijn afhankelijk van de aansluitwaarde (€/kW) per casus en uitgesplitst tussen de kosten voor een warmtepomp en het bronsysteem. Verder is er een onderscheid gemaakt tussen de kosten voor bestaande bouw en nieuwbouw.

De directe investeringskosten van de hr-ketel, hybride warmtepomp, lucht-waterwarmtepomp en airco zijn bepaald op basis van de kostenkengetallen van RVO², opgesteld door Arcadis. Deze kentallen worden regelmatig geüpdatet. De database bestaat uit diverse onderdelen en niveaus, afhankelijk van de aansluitwaarde van een pand. We maken gebruik van de investeringskosten per prestatie-eenheid, wat bij utiliteitsbouw neerkomt op investeringskosten per aansluitwaarde (€/kW) en voor woningen per stuk (€/woning). Voor nieuwbouw doen we de aanname van een kortingsfactor voor seriematige aanleg van 2,5%.

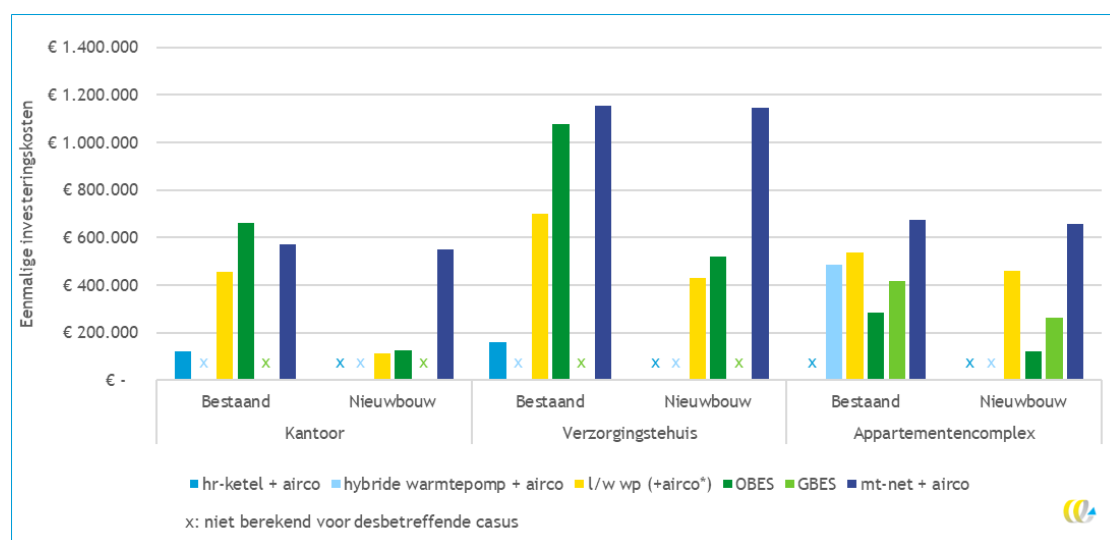
De individuele eenmalige investeringskosten van een warmtenet zijn lastig in te schatten op gebouwniveau, omdat het hierbij naast de individuele warmtewisselaar ook gaat om de investeringskosten van de warmteproductie en distributie. Deze kosten zijn sterk afhankelijk van de bebouwingsdichtheid en de afstand tot de warmtebron. Om toch een inschatting te kunnen maken van de investeringskosten van een warmtenet per casus in de deze mkba, is gekozen om aan te sluiten bij de nationale berekening van verschillende warmtetechnieken door het Planbureau voor de Leefomgeving met het Vesta MAIS-model; de zogenaamde Startanalyse 2020. Deze landelijke studie geeft de additionele maatschappelijke kosten weer van warmtenetten (ten opzichte van een referentiealternatief) op buurtniveau in Nederland.

² www.digipesis.com

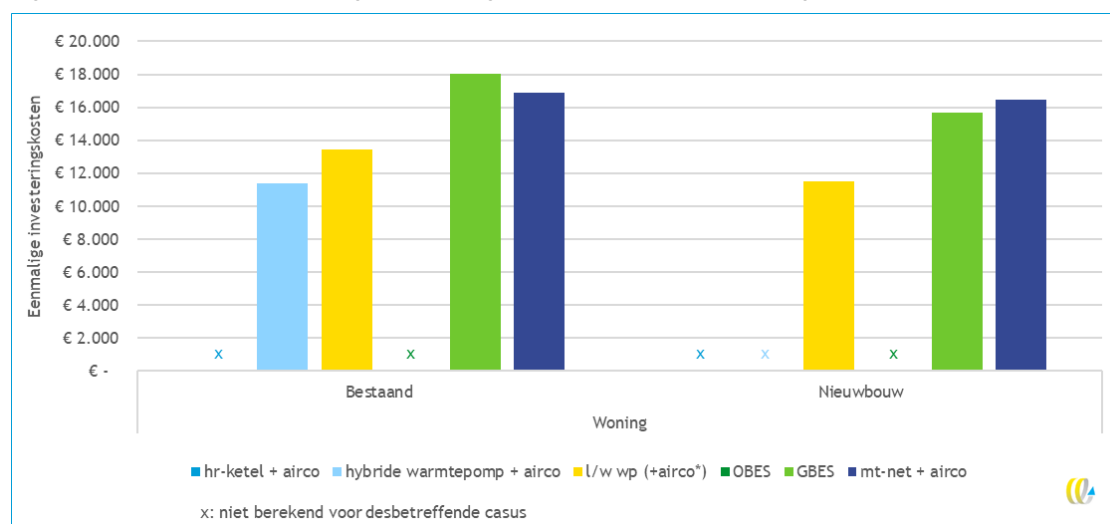
De investeringskosten voor een warmtenet zijn gebaseerd op een selectie van 439 buurten met een stedelijkheidsfactor van 2 of hoger en minimaal 250 utiliteitsgebouwen. Voor het warmtenet maken we gebruik van de uitkomsten voor een mt-net met geothermie (s2e), waarbij de we de bron- en transportkosten meenemen van het net op buurniveau en de installatiekosten op pandniveau. De CAPEX per buurt is omgerekend op basis van het aantal woningequivalenten in een buurt, waarbij één woningequivalent gelijk staat aan 130 m² utiliteitsbouw of één woning.

De eenmalige investeringskosten van de casussen 'Kantoor', 'Verzorgingstehuis' en 'Appartementencomplex' worden weergegeven in Figuur 14. Aangezien de effecten van de casus 'Woning' een kleinere ordergrootte hebben, worden deze apart weergegeven in Figuur 15.

Figuur 14 - Totale effect 'Eenmalige investeringskosten' voor de casussen 'Kantoor', 'Verzorgingstehuis' en 'Appartementencomplex'



Figuur 15 - Totale effect 'Eenmalige investeringskosten' voor de casus 'Woning'



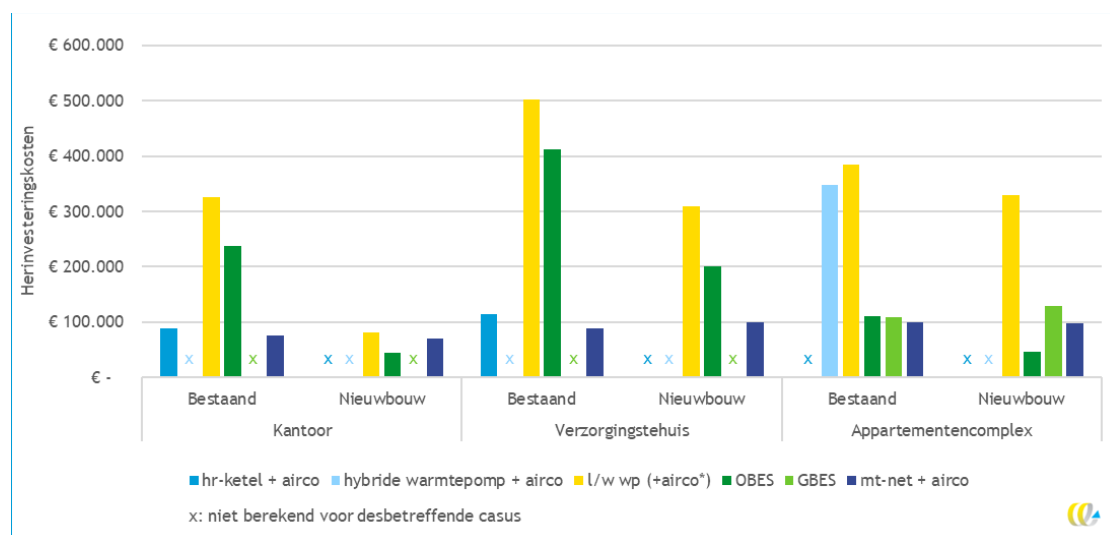
Herinvesteringen

Alle investeringen hebben een bepaalde afschrijvingstermijn. De tijdshorizon van deze mkba is 30 jaar. Als de afschrijvingstermijn van een bepaalde investering korter is dan 30 jaar, is er sprake van een herinvestering. De herinvestering wordt bepaald door de resterende periode van de mkba te vermenigvuldigen met de eenmalige investeringskosten.

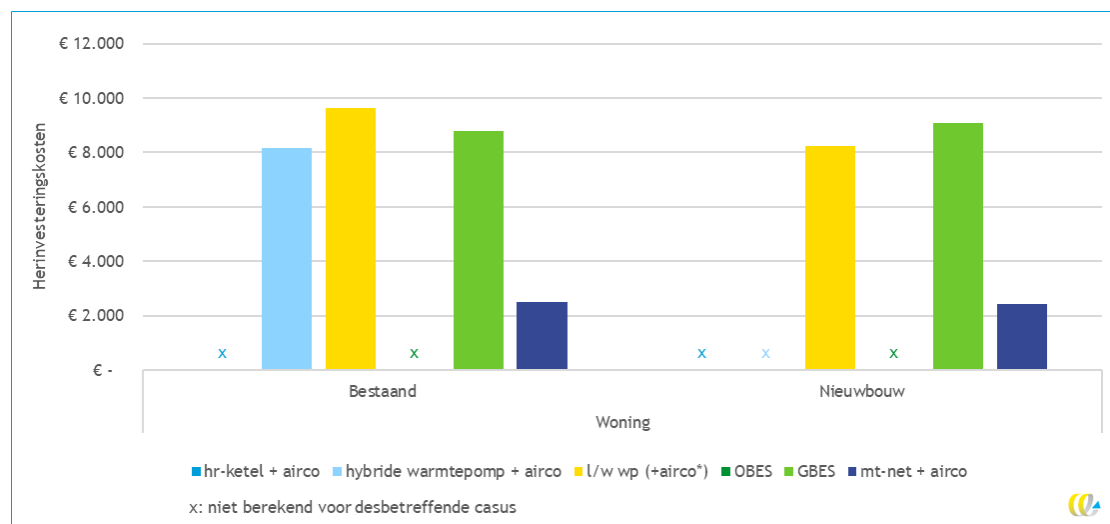
Voor OBES en GBES heeft Bodemenergie NL de afschrijvingstermijn aangeleverd, uitgesplitst naar de bodembron en de installaties (warmtepomp en bronpomp).

Voor de resterende technieken hebben we gebruik gemaakt van de kentallen over de afschrijvingstermijn per techniek uit het functioneel ontwerp van Vesta MAIS 5.0 (PBL, 2021).

Figuur 16 - Totale effect 'Herinvesteringskosten' voor de casussen 'Kantoor', 'Verzorgingstehuis' en 'Appartementencomplex'



Figuur 17 - Totale effect 'Herinvesteringskosten' voor de casus 'Woning'



Onderhoudskosten

De onderhoudskosten bestaan uit de kosten voor het onderhoud van de warmte- en koude-techniek.

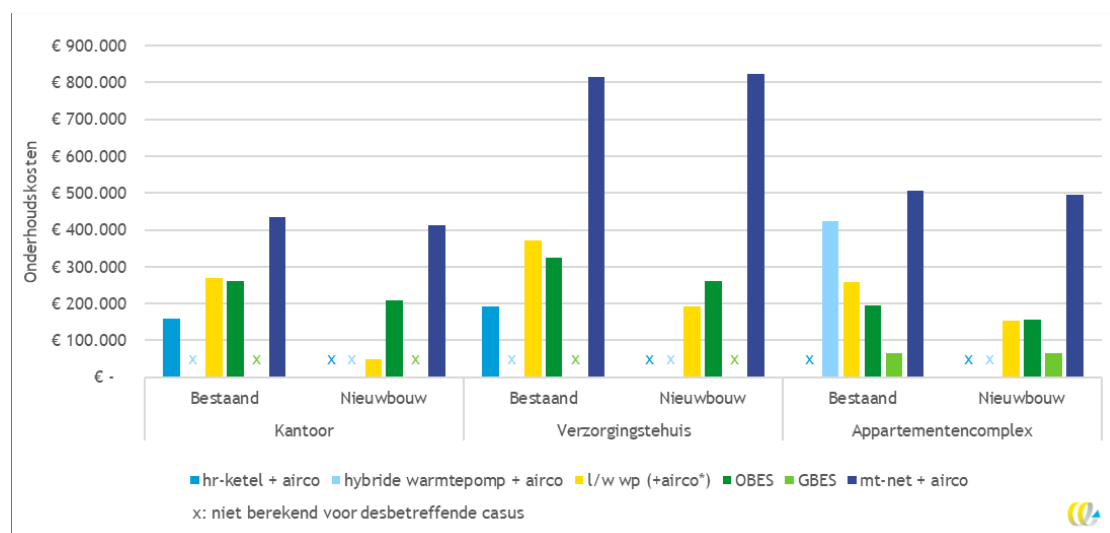
Het percentage onderhoudskosten van OBES en GBES is aangeleverd door Bodemenergie NL. Deze bestaan uit een vast bedrag, waarbij voor OBES is gedifferentieerd tussen bestaande bouw en nieuwbouw.

In deze update zijn de onderhoudskosten gewijzigd op basis van een aantal gesprekken en praktijkgegevens van een aantal verschillende partijen die onderhoud plegen aan GBES.

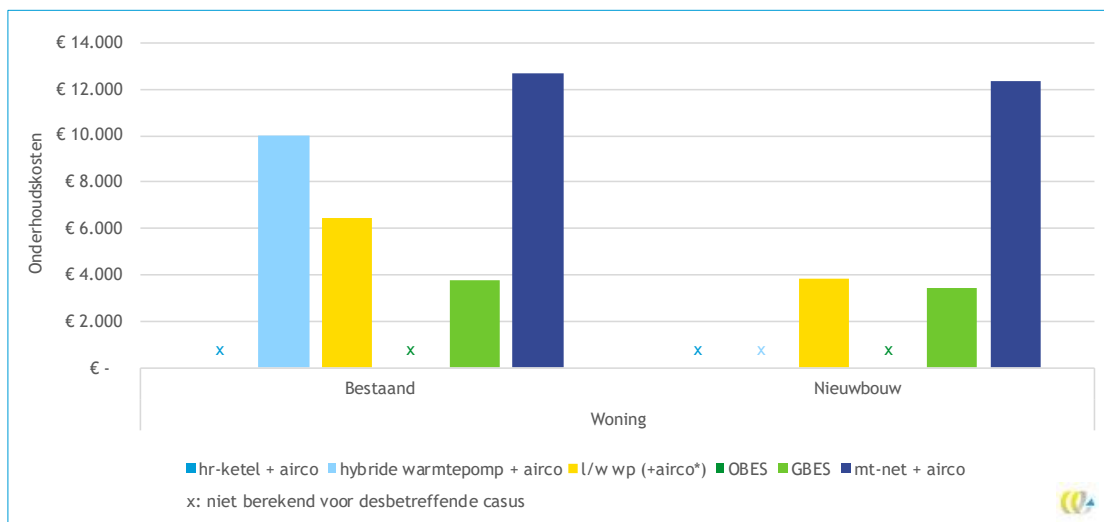
Voor de resterende technieken hebben we gebruik gemaakt van de kentallen over onderhoudskosten uit het functioneel ontwerp van Vesta MAIS 5.0 (PBL, 2021).

De totale onderhoudskosten over de gehele looptijd van de mkba zijn weergegeven in Figuur 18 en Figuur 19.

Figuur 18 - Totale effect 'Onderhoudskosten' voor de casussen 'Kantoor', 'Verzorgingstehuis' en 'Appartementencomplex'



Figuur 19 - Totale effect 'Onderhoudskosten' voor de casus 'Woning'



Kosten energieverbruik

De kosten voor het energieverbruik hangen af van de volgende vier elementen:

1. Functionele vraag van iedere casus.
2. Efficiëntie van de warmtetechniek (het rendement).
3. Prijs van de specifieke energiebron.
4. Netbeheerkosten.

De functionele vraag van iedere casus is weergegeven in Paragraaf 3.3. De functionele vraag is uitgesplitst in vraag voor ruimteverwarming, tapwater en koeling. Deze vraag is casus-specifiek en hangt samen met de gebouwkenmerken. Hierbij zitten verschillen tussen nieuwbouw en bestaande bouw.

De functionele vraag vormt de input voor het energieverbruik per warmte- en koude-techniek. Hoeveel energie een gebouw daadwerkelijk gebruikt om aan de functionele vraag te kunnen voldoen, hangt af van het rendement van de desbetreffende techniek. Het rendement bij warmtepompen over een heel jaar wordt uitgedrukt als de 'Seasonal Coefficient of Performance' (SCOP).

Voor GBES en OBES maken we in deze mkba gebruik van aangeleverde gegevens van Bodemenergie NL. Voor de andere technieken maken we gebruik van kentallen uit het functioneel ontwerp van Vesta MAIS 5.0 (PBL, 2021). Voor warmtelevering uit het warmte-net gaan we uit van een rendement van 100%(één-op-één-warmtelevering).

Op basis van de functionele vraag en de rendementen bepalen we per casus en per warmte- en koudetechniek wat het energieverbruik is. Dit energieverbruik houden we constant over de periode van deze mkba, alhoewel dit naar de toekomst mogelijk wel kan veranderen door de toename van de vraag naar koeling en afname van de vraag naar ruimteverwarming. In de gevoeligheidsanalyse nemen we een scenario mee waarin de energievraag voor 25% hoger ligt en 25% lager ligt, om zo meer inzicht te krijgen in de gevoeligheid van de uitkomsten en de energievraag.

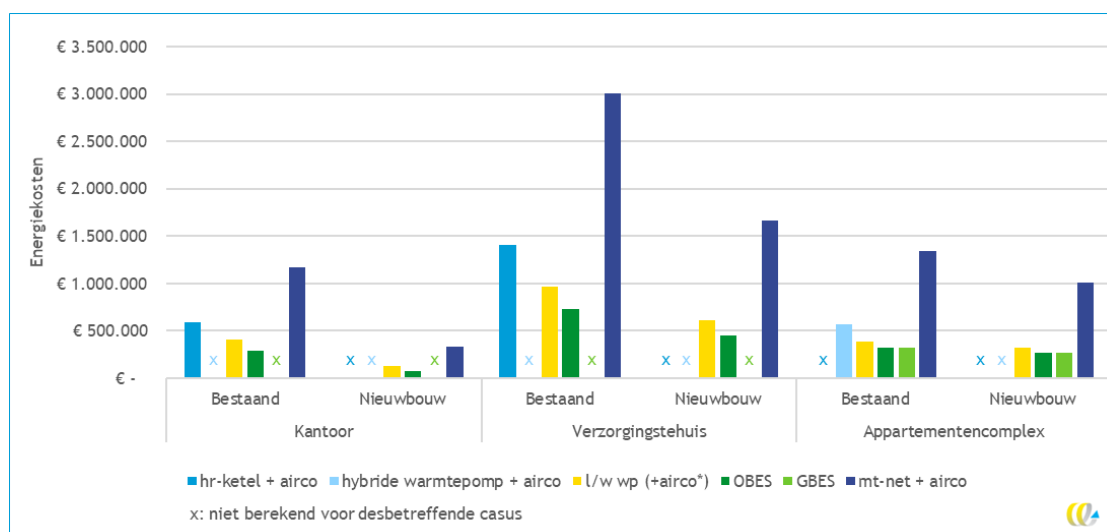
Voor de energieprijzen gaan we uit van de verwachtingen op basis van de Klimaat- en Energieverkenning (KEV) 2022 (PBL, 2022). Hierin wijken we af van de WLO-scenario's zoals voorgeschreven in de mkba-leidraad, omdat er sinds 2015 veel is veranderd op zowel het vlak van energiebeleid als de verwachte energieprijzen richting de toekomst. De verwachtingen uit de KEV 2022 nemen deze beleidsontwikkelingen wel mee.

De variabele warmteprijs (€/GJ) in het basisjaar van de mkba is gebaseerd op de gemiddelde prijs voor warmte zoals berekend in de Startanalyse 2020, op basis van dezelfde methode als de bepaling van de investeringskosten (zie de Paragraaf over investeringskosten, p.29). In de KEV 2022 is geen prognose opgenomen over de ontwikkeling van de warmteprijs. De variabele warmteprijs van geothermie is voor een deel afhankelijk van de kostprijs van elektriciteit, omdat deze voor een belangrijk deel bestaat uit pompenergie. In deze mkba is de aanname gemaakt dat de variabele warmteprijs mee ontwikkelt met de elektriciteitsprijs.

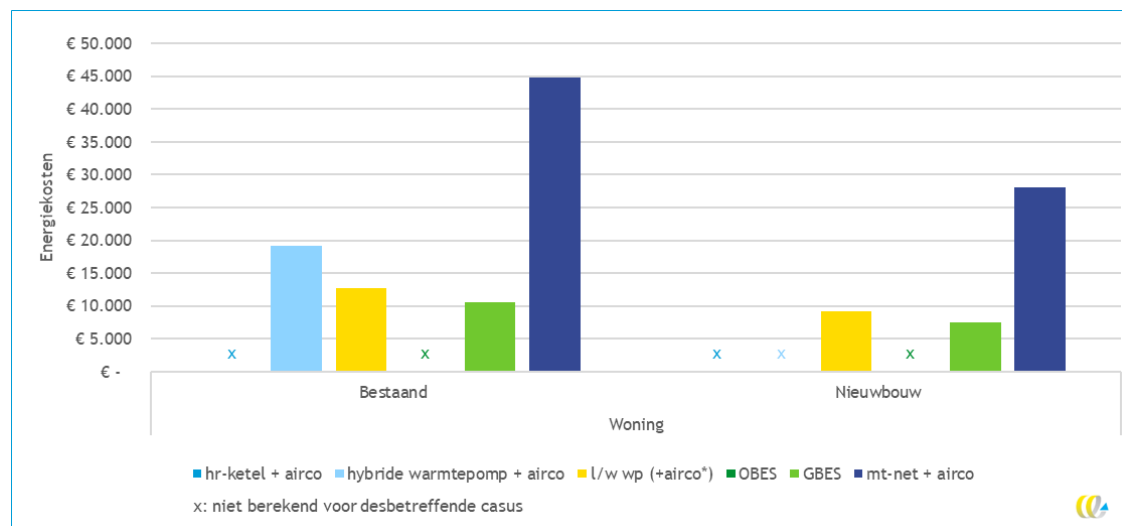
De netbeheerkosten zijn de kosten die een netbeheerder moet maken om energie te leveren aan een gebouw. Voor gas en elektriciteit zijn deze gereguleerd door de ACM. Hierbij ligt er een onderscheid tussen leveringstarieven voor kleinverbruikers en grootverbruikers. De tarieven hangen af van het type contract. Hiervoor doen we een aantal aannames. Voor kleinverbruikers gaan we uit van een aansluiting kleiner dan G100 (voor gas) en een standaardaansluiting van 3x25A voor elektriciteit. Voor grootverbruikers doen we voor de gasaansluiting de aanname dat er sprake is van een G100-aansluiting LD (lage druk) met een capaciteit tussen de 100-160 m³ en voor elektriciteit gaan we uit van de tarieven voor een aansluiting voor het laagspanningsnet (LS). Voor 'Kantoor' en 'Verzorgingstehuis' gaan we uit van de grootverbruikerstarieven. Voor 'Appartementencomplex' en 'Woning' van kleinverbruikerstarieven per woning/appartement. De netbeheerkosten voor warmte bestaan uit een vast bedrag, het maattarief en een basistarief voor de afleverset. Bij alle netbeheerkosten gaan we uit van de tarieven in 2020 en deze houden we constant over de rest van de tijdshorizon.

De totale kosten van het energieverbruik over de gehele looptijd van de mkba zijn weergegeven in Figuur 20 en Figuur 21.

Figuur 20 - Totale effect 'Kosten energieverbruik' voor de casussen 'Kantoor', 'Verzorgingstehuis' en 'Appartementencomplex'



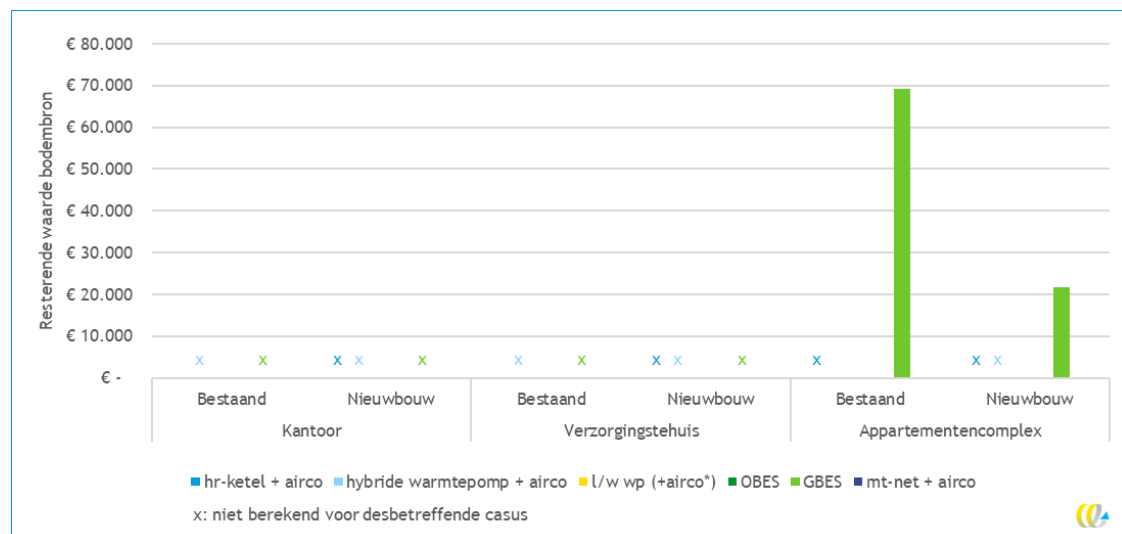
Figuur 21 - Totale effect 'Kosten energieverbruik' voor de casus 'Woning'



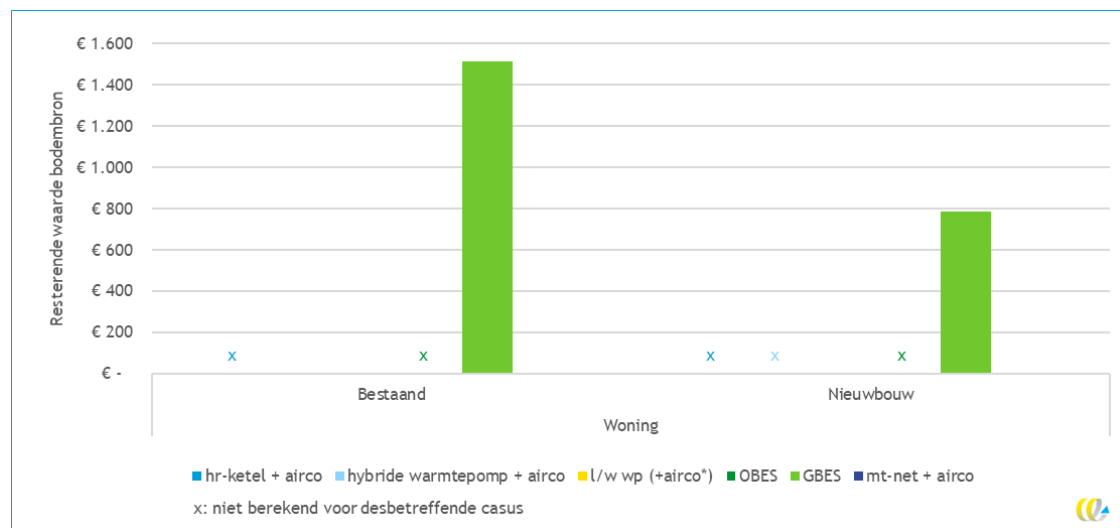
Resterende waarde bodembron

Zoals toegelicht onder de Paragraaf 'Eenmalige investeringen', p. 29, bestaan de investeringskosten van bodemenergie uit de investering in de warmtepomp en het bronsysteem. Het bronsysteem, ook wel de bodembron genoemd, heeft een langere levensduur dan de warmtepomp. Voor een gesloten bodembron (GBES) is de afschrijvingstermijn van het bronsysteem langer dan de looptijd van deze mkba. Voor een open bodembron (OBES) is de verwachte afschrijvingstermijn gelijk aan de looptijd van deze mkba (30 jaar). De resterende waarde van de investering in de bodembron van GBES wordt als een baat meegenomen aan het einde van de looptijd van de mkba.

Figuur 22 - Totale effect 'Resterende waarde bodembron' voor de casussen 'Kantoor', 'Verzorgingstehuis' en 'Appartementencomplex'



Figuur 23 - Totale effect 'Resterende waarde bodembron' voor de casus 'Woning'



4.3 Indirecte financiële effecten

Arbeidsmarkt

In een mkba wordt gekeken naar werkgelegenheidseffecten op de lange termijn. In de Algemene Leidraad voor mkba wordt aandacht besteed aan werkgelegenheidseffecten. In de Leidraad wordt het volgende gesteld:

“Maatregelen die niet zijn gericht op het functioneren van de arbeidsmarkt, het verhogen van de arbeidsproductiviteit of het vergroten van het arbeidsaanbod, hebben alleen indirecte effecten op de arbeidsmarkt. Er is meestal alleen sprake van verschuivingen op de arbeidsmarkt. Extra werkgelegenheid die ontstaat als gevolg van een maatregel op een locatie of in een bedrijfstak, gaat dan ten koste van werkgelegenheid elders.”

Er kan dus verondersteld worden dat de arbeidsmarkteffecten van de alternatieven nul zijn. Alleen de situatie waarin sprake is van onvrijwillige werkloosheid is hierop een uitzondering. Indien dit het geval is, kunnen extra investeringen leiden tot vermindering van deze werkloosheid en kunnen deze voordelen bieden voor de regionale economie. Echter, de huidige arbeidsmarkt is krap. De krapte leidt ertoe dat steeds meer bedrijven te maken hebben met een personeelstekort. De kans op onvrijwillige werkloosheid is nihil. De tijdelijke werkloosheid kan worden ingeschat op basis van beschikbare CBS-data over baanvinduren voor de jaren 2002 t/m 2014 voor mensen die eerder werkzaam waren. Gemiddeld vinden mensen die eerder werkzaam waren binnen iets meer dan één jaar opnieuw een baan³. Het effect op werkgelegenheid is daarmee in de regel van korte duur.

In deze mkba kijken we naar het totale effect over een lange periode (30 jaar). De indirecte effecten van de verschillende projectalternatieven op de arbeidsmarkt zijn beperkt. Omdat de huidige arbeidsmarkt krap is, is het de vraag in hoeverre een extra vraag naar banen als additioneel gezien kan worden. Door de huidige krapte op de arbeidsmarkt gaan we uit van een welvaartseffect van nul.

³ Het merendeel (45%) vindt binnen 6 maanden een nieuwe baan, 16% binnen 6 tot 12 maanden, 15% binnen 12 tot 24 maanden en 23% in meer dan 24 maanden.

4.4 Externe effecten

4.4.1 Klimaat effecten

CO₂-emissies

Het gebruik van energie heeft een negatieve klimaatimpact. Deze impact hangt af van een aantal factoren:

- Het energieverbruik per casus (welke afhankelijk is van de functionele vraag en het rendement van de warmtetechniek).
- De mate waarop een energiedrager bijdraagt aan klimaatverandering. Dit noemen we ook wel de *emissiefactor*. De bronwater uit de bodem kent in principe geen emissies, maar zal echter opgewaardeerd moeten worden met behulp van elektriciteit naar een temperatuur die bruikbaar is voor koeling, verwarming of douchen.
- De waardering van de CO₂-emissies voor klimaatverandering op de maatschappij.

Het energieverbruik per casus hangt af van de gebouwkenmerken en het rendement van de warmtetechniek. Hoe efficiënter een techniek aan de functionele vraag kan voldoen, hoe beter dit is voor het klimaat.

De klimaatimpact van de energiedrager hangt af van hoe deze wordt geproduceerd en/of verbrand. Voor aardgas geldt er een vaste emissiefactor, gebaseerd op de verbrandingswaarde van aardgas. Voor elektriciteit hangt dit af van de elektriciteitsmix in Nederland. Er bestaan uiteraard diverse contracten, maar voor het verbruik rekenen we met de mix die uit het stopcontact komt. Het is de verwachting dat door meer duurzame opwek van elektriciteit de emissiefactor van elektriciteit de komende jaren (verder) zal dalen.

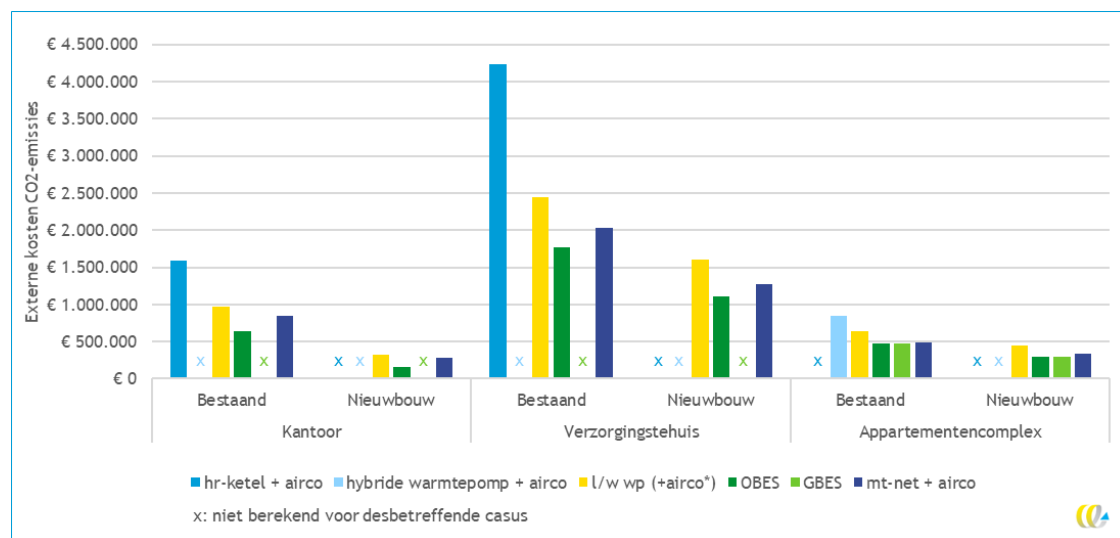
Hiervoor maken we gebruik van de zogenoemde ‘referentiepark’-prognose uit de Klimaat- en Energieverkenning 2022 (PBL, 2022). Dit betekent ook dat de klimaatimpact van elektriciteit naar de toekomst zal afnemen. Voor de emissiefactor van warmte maken we gebruik van de huidige bekende gemiddelde emissiefactor van warmte volgens de Klimaatmonitor via het Warmte-etiket, en voor de toekomst van de huidige regelgeving voor maximale emissie in de Wet collectieve warmtevoorziening (Wcw).

De impact van klimaatverandering op de maatschappij bepalen we aan de hand van de zogenaamde CO₂-prijs uit de WLO-scenario's. In het recent uitgebrachte Handboek Milieuprijzen (CE Delft, 2023a) zijn de CO₂-prijzen uit de WLO-scenario's geactualiseerd op basis van de inflatie en de reële prijsstijging van 3,5% per jaar (CE Delft, 2023a). Voor de standaard mkba maken we gebruik van het WLO-scenario HOOG⁴.

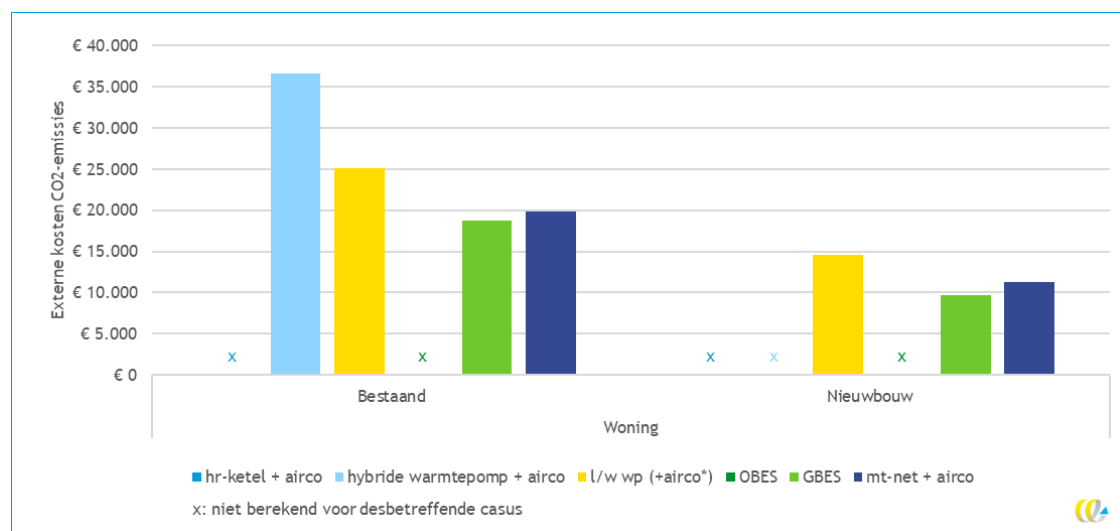
Het totale klimaat effect van CO₂-emissies over de gehele looptijd van de mkba is weer-gegeven in Figuur 24 en Figuur 25.

⁴ Gezien de recente inzichten op klimaatonderzoek, wordt het LAAG-scenario als minder waarschijnlijk geacht.

Figuur 24 - Totale effect 'CO₂-emissies' voor de casussen 'Kantoor', 'Verzorgingstehuis' en 'Appartementencomplex'



Figuur 25 - Totale effect 'CO₂-emissies' voor de casus 'Woning'



Lekkage koudemiddel

Koudemiddelen worden gebruikt in warmtepompen en koelinstallaties om warmte te transporten. In principe zijn dit gesloten systemen. Echter komt het voor dat er koudemiddel lekt naar de atmosfeer. Koudemiddelen hebben een sterk broeikasgaseffect. De sterkte van het broeikasgaseffect hangt af van het type koudemiddel dat wordt gebruikt.

Bij koudemiddelen wordt er onderscheid gemaakt tussen natuurlijke en synthetische koudemiddelen. Veel moderne warmtepompen gebruiken synthetische koudemiddelen, vanwege de gunstige eigenschappen met betrekking tot warmtetransport en veiligheid. De meest gebruikte synthetische koudemiddelen zijn HFK's en (H)CFK's. Deze synthetische middelen worden toegepast vanwege de energetische efficiëntie en brandveiligheid. Als ze ontsnappen in de atmosfeer, veroorzaken ze een sterk broeikasgaseffect. Daarom heeft de

Europese Unie de F-gassenverordening aangenomen, waarmee HFK-koudemiddelen met een GWP (global warming potential) hoger dan 2.500 worden uitgefaseerd en vervangen door andere koudemiddelen.

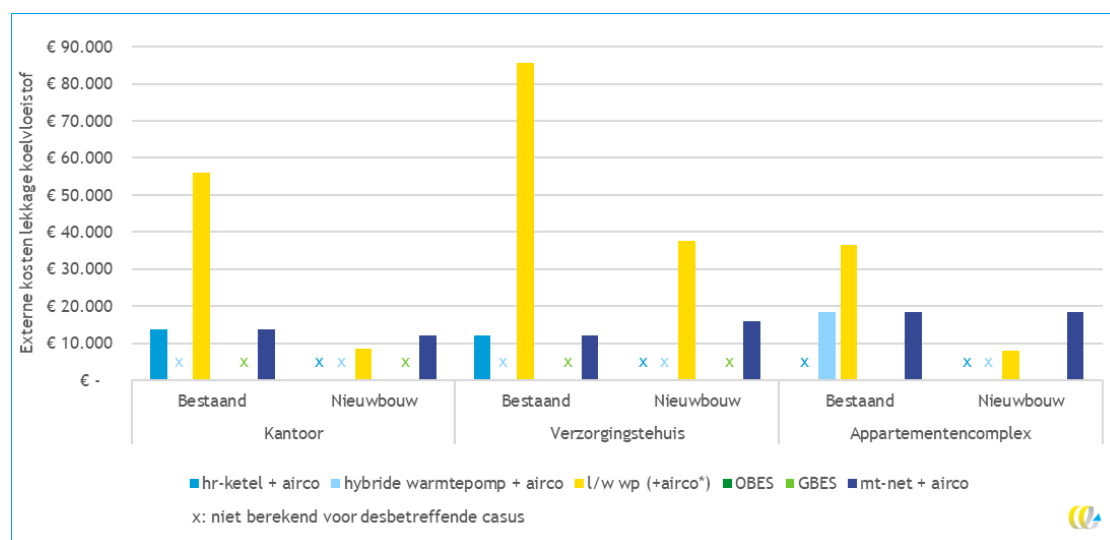
In moderne airco's en warmtepompen met een buitenunit wordt tegenwoordig vaak het koudemiddel R32 toegepast, die in vergelijking tot oudere koelmiddelen een lager broei-kasgaseffect heeft, namelijk een GWP van 675.

In een studie in het Verenigd Koninkrijk is onderzocht hoe vaak lekkage voorkomt (Department of Energy & Climate Change, 2014). De centrale inschatting is dat bij huishoudelijke installaties de kans op lekkage jaarlijks gemiddeld 3,5% is, en bij niet-huishoudelijke installaties gemiddeld 3,8% per jaar.

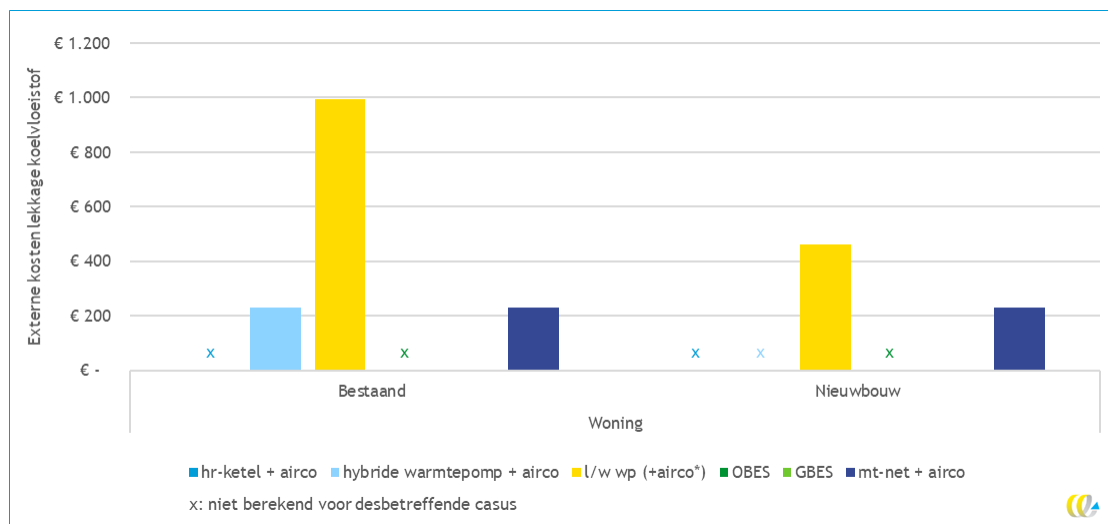
Voor de effectinschatting is de aanname gedaan dat het koudemiddel R32 gebruikt wordt. Verder is de aanname dat in een warmtepomp van 9 kW 2,5 kg koelmiddel wordt gebruikt, gebaseerd op de website Warmtepompberekenen.nl (2023). Deze verhouding (0,278 kg koelmiddel per kW) is toegepast op het vermogen van de luchtwarmtepomp en airco per casus.

Het klimaateffect van lekkage van koelmiddel is weergegeven in Figuur 26 en Figuur 27.

Figuur 26 -Totale effect 'Lekkage koelmiddel' voor de casussen 'Kantoor', 'Verzorgingstehuis' en 'Appartementencomplex'



Figuur 27 - Totale effect 'Lekkage koelmiddel' voor de casus 'Woning'



4.4.2 Hitte-eiland

Het hitte-eilandeffect wordt in deze mkba kwalitatief behandeld. De verschillende technieken hebben in meer en mindere mate een versterkende invloed op het hitte-eiland. Er is op dit moment echter onvoldoende onderzoek beschikbaar waarin een kwantitatieve inschatting is gemaakt van de effecten van warmte- en koudetechnieken op het hitte-eilandeffect. Daarnaast is het hitte-eilandeffect sterk contextafhankelijk; dit speelt vooral in de omgeving van woonwijken en kantoorwijken, waar dit overlast van warmte versterkt en leefbaarheid ten nadele komt. De context (locatie en omgeving waar de casussen worden toegepast) valt buiten de scope van deze mkba. Wel geven we hierna een kwalitatieve indicatie van de mogelijke effecten en mitigerende maatregelen om deze op termijn ook kwantitatief mee te kunnen nemen in een mkba.

Lucht-waterwarmtepompen en airco's gebruiken de buitenlucht als bron en afvoer. In de winter gebruiken lucht-waterwarmtepompen de buitenlucht als bron, onttrekken warmte uit de lucht, en blazen de afgekoelde lucht terug de atmosfeer in. In de zomer werkt het proces precies tegenovergesteld: de warmtepomp (van de airco/lucht-waterwarmtepomp) onttrekt koude uit de lucht en blaast de opgewarmde lucht terug naar buiten. Overigens zijn niet alle lucht-waterwarmtepompen geschikt om te koelen.

Bodemwarmtepompen (GBES en OBES) onttrekken beide warmte en koude uit de bodem via de grond/het grondwater. De toegevoegde warmte of koude wordt teruggegeven aan de grond/het grondwater via het bronsysteem. De thermische balans in de bodem is vastgelegd in wet- en regelgeving. Als er teveel warmte wordt opgeslagen, ontstaat er een thermische onbalans in de bodem, en moeten er maatregelen worden getroffen om dit op te lossen.

Warmtenetten kunnen een thermische uitstraling geven in de ondergrond. Dit kan met name invloed hebben op de temperatuur van het drinkwater (KWR, 2022). Hierbij wordt op dit moment vooral gekeken naar de afstand tussen warmtenetten en drinkwaterleidingen.

Er wordt wel steeds meer onderzoek gedaan naar mogelijke mitigerende maatregelen tegen het hitte-eilandeffect. Bekende mitigerende maatregelen zijn bomen (dankzij de verdampende capaciteit en schaduwwerking) (Rafiee et al., 2016), groene daken (Arcadis, 2008) en

meer water (Kluck et al., 2020). Mitigerende maatregelen brengen echter ook nadelen met zich mee, waaronder kosten en benodigde ruimte in de boven- en ondergrond.

Op basis van bovenstaande informatie is het hitte-eilandeffect kwalitatief beoordeeld per techniek, zie Tabel 11. Een '–' betekent dat het desbetreffende alternatief naar verwachting het hitte-eilandeffect versterkt. Een '0' betekent dat dit alternatief geen effect heeft op de vorming van een hitte-eiland.

Samenvatting 'Hitte-eilandeffect'

Tabel 11 - Kwalitatieve beoordeling effect 'hitte-eilandeffect'	
Alternatief	Effect op hitte-eiland
Hr-ketel + airco	(–)
Hybride warmtepomp + airco	(–)
Lucht-waterwarmtepomp	(–)
GBES	0
OBES	0
Mt-net + airco	(–)



4.4.3 Geluidseffecten

Omgevingsgeluid is een belangrijk milieuprobleem, dat leidt tot verschillende schadelijke effecten op het welzijn van mensen, de menselijke gezondheid en de natuur. Er zijn vijf verschillende schadelijke effecten van omgevingsgeluid die kunnen worden onderscheiden:

1. **Overlast:** geluid kan leiden tot overlast voor mensen, bijvoorbeeld doordat ze erdoor gehinderd worden bij het uitvoeren van bepaalde activiteiten. Deze overlast kan leiden tot een breed scala aan negatieve gevoelens, zoals geïrriteerdheid, teleurstelling, ontevredenheid, hulpeloosheid, depressies, etc. Daarnaast kan de geluidshinder leiden tot stressgerelateerde psychologische en fysieke klachten.
2. **Gezondheidseffecten:** geluid kan verschillende schadelijke effecten hebben op de menselijke gezondheid, bijvoorbeeld hart- en vaatziekten, slaapverstoring, afnemende cognitieve prestaties, tinnitus en gehoorbeperking.
3. **Productiviteitsverlies:** geluid kan leiden tot verminderde prestaties van werknemers, bijvoorbeeld door concentratieproblemen, vermoeidheid door geluidgerelateerde slaapproblemen, etc.
4. **Verstoring rustige gebieden:** omgevingsgeluid kan ertoe leiden dat mensen de voordelen van rustige gebieden minder kunnen ervaren.
5. **Effecten op ecosystemen:** schadelijke effecten van geluid op dieren, bijvoorbeeld doordat broeiperiodes worden verstoord.

Geluidsoverlast wordt in mkba's in de regel gewaardeerd met de milieuprijzen uit het Handboek Milieuprijzen van CE Delft. De A-gewogen decibelwaarde (dB (A)) wordt vaak gebruikt als eenheid voor geluidsbelasting. Dit is een logaritmische maat voor het geluidsniveau. De A-weging wordt toegepast om te corrigeren voor de gevoeligheid van het menselijk oor voor de toonhoogte van het geluid. Verder speelt het tijdstip en de duur van geluid een belangrijke rol. Deze factoren worden meegenomen in de geluidmaat. In het Handboek wordt uitgegaan van de geluidmaat L_{day-evening-night} (L_{den}), de huidige wettelijke geluidmaat voor verkeersgeluid. De L_{den} wordt bepaald door equivalente geluidsniveaus tijdens de dag (07:00-19:00 uur), de avond (19:00-23:00) en de nacht (23:00-07:00) vast te stellen en de niveaus voor de avond en nacht vervolgens te verhogen met respectievelijk 5 en 10 dB(A) en vervolgens een etmaalgemiddelde vast te stellen. Er wordt dus aan-

genomen dat geluid 's avonds en 's nachts storender is dan overdag. De Lden wordt bepaald op basis van jaargemiddelde geluidsniveaus gemeten aan de hoogbelaste buitengevel van een woning. De geluidsoverlast wordt uitgedrukt in euro per persoon per jaar.

Tabel 12 geeft de hoeveelheid geluid per techniek weer. Per 1 april 2021 zijn nieuwe geluidseisen gesteld aan buiten opgestelde installaties voor warmte- of koude-opwekking. Het gaat hierbij om warmtepompen en airco's die worden toegepast bij woningen en woongebouwen. Deze installaties mogen niet meer dan 40 dB geluid veroorzaken bij de burens (Rijksoverheid, 2021). We kunnen constateren dat, indien alle warmtetechnieken voldoen aan de nu geldende normen, er geen verschillen in geluidscores optreden, maar dat de traditionele de 'worst performer' is.

Tabel 12 - Hoeveelheid geluid per techniek

Techniek	Hoeveelheid geluid
Hr-ketel + airco	Standaard verwarmingsketel: 50-60 dB (nieuwecvketel.be, lopend) Airco: maximaal 40 dB per 1 april 2021
Hybride warmtepomp + airco	Maximaal 40 dB per 1 april 2021
OBES	Maximaal 40 dB per 1 april 2021
Lucht-waterwarmtepomp	Maximaal 40 dB per 1 april 2021
Mt-net + airco	Mt-net: nihil Airco: maximaal 40 dB per 1 april 2021
GBES	Maximaal 40 dB per 1 april 2021

In het Handboek Milieuprijzen (2023) zijn kostenkengetallen opgenomen voor geluid. In de meest recente versie van dit handboek uit 2023 wordt een drempelwaarde van 45 dB(A) Lden gehanteerd. Alle technieken, op de hr-ketel na, vallen onder deze drempelwaarde. Hierdoor zijn de geluidseffecten van de projectalternatieven in theorie nul.

Samenvatting effect 'Geluidseffect'

Totale effect 'geluidseffect' is 0.

Naar verwachting is in de praktijk toch sprake van geluidsoverlast van een warmtepomp

De standaard verwarmingsketel komt echter wel boven de drempelwaarde uit. Ook is het aannemelijk dat in sommige gevallen de warmtepomp op buitenlucht (zowel hybride als volledig elektrisch) wel tot overlast zal leiden, bijvoorbeeld op grond van een oudere warmtepomp (norm is uit 2021) en beperkte handhaving, verkeerde installatie of het feit dat normen in de praktijk niet altijd blijken te houden. Zo ontving de Nederlandse Stichting Geluidshinder (NSG) meer dan honderd klachten over warmtepompen. Dit komt doordat warmtepompen vaak direct aan de erfscheiding of tegen de schutting met de burens worden geplaatst. Om een beeld te schetsen van dit effect, laten we zien wat het mogelijke effect is wanneer we veronderstellen dat in deze casus wel sprake is van overlast. Hierbij hanteren we de centrale waarde van de milieuprijs voor geluid in de klasse 45-46 dB(A) Lden. Belangrijk is om te vermelden dat er momenteel alleen kostenkengetallen voor verkeer (weg-, spoor- en luchtverkeer) zijn opgesteld. Er is geen methodologie voor een milieuprijs voor andere geluidsbronnen voorhanden. Deze berekening is daarmee vooral illustratief van aard.

Tabel 13 geeft de milieuprijs per persoon per jaar weer. Dit varieert van ruim € 50 naar € 120. Afhankelijk van het aantal personen dat aan het geluid blootgesteld wordt, kan een berekening worden gemaakt. Dit is locatieafhankelijk.

Tabel 13 - Milieuprijzen voor geluidsblootstelling verkeer bij een geluidsklasse van 45-50 dB(A) Lden

Type verkeer	Centrale waarde in € per persoon per jaar (2021)
Wegverkeer	€ 51
Spoorverkeer	€ 52
Vliegverkeer	€ 121

4.4.4 Impact op het elektriciteitsnet

Het elektriciteitsnet in Nederland wordt veel belast en op een aantal plekken is op dit moment al sprake van netcongestie. Met de verwachte elektrificatie (zoals elektrische auto's) en toename van duurzame opwek (zoals zon-pv) zal deze druk op netten in de wijk verder stijgen. Met de elektrificatie van de warmte- en koelvraag zal de vraag naar capaciteit verder toenemen.

De belasting van het elektriciteitsnet wisselt gedurende de dag. De lage elektriciteits-behoefte wordt ook wel de *basislast* genoemd. De *pieklast* vindt op bepaalde momenten plaats met een hoge vraag (of hoog aanbod). Met name de pieklast heeft de meeste impact op het net, omdat op die momenten de capaciteit onder druk kan komen te staan.

De basislast en pieklast verschillen tussen warmtetechnieken. Met name lucht-water-warmtepompen kunnen een hoge pieklast veroorzaken op koude momenten waarop de temperatuur van de buitenlucht laag is en er weinig warmte kan worden onttrokken. Voor bodemenergie is deze pieklast minder hoog, omdat de bodem een constantere temperatuur afgeeft. De maatschappelijke kosten van deze pieklast zijn zeer locatie-afhankelijk. Dit hangt sterk samen met de specifieke belasting op het netwerk binnen een bepaald gebied. Echter komt uit een recent onderzoek wel naar voren dat de warmte-transitie, en met name de plaatsing van elektrische lucht-warmtepompen, voor veel knelpunten zal zorgen op het elektriciteitsnet (CE Delft, 2023b).

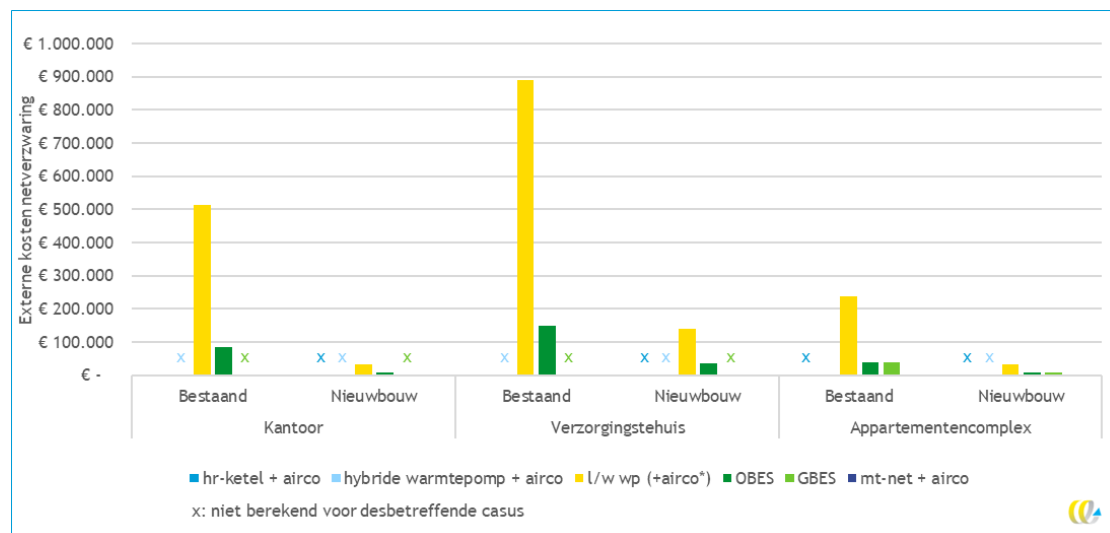
In een recente studie van Netbeheer Nederland wordt de impact op het elektriciteitsnet van verschillende warmtetechnieken met elkaar vergeleken (Netbeheer Nederland, 2022). Hieruit komt naar voren dat als een hele wijk overschakelt op lucht-waterwarmtepompen, dit al gauw tot een verdubbeling van het aantal transformatorstations kan leiden. In deze studie wordt er echter geen onderscheid gemaakt voor bodemenergie.

In een eerdere studie uit 2016 van CE Delft is onderzocht wat de kosten zijn van verschillende klimaatneutrale warmtevoorziening (CE Delft, 2016). In deze studie is een aanpak opgesteld om kosten van de impact op het elektriciteitsnet van warmtetechnieken te bepalen. Hierbij is gekeken naar de benodigde netverzwaring op zowel het laagspannings- als het middenspanningsnet bij een minimumtemperatuur van -10°C, met een gevoeligheidsanalyse voor -17°C.

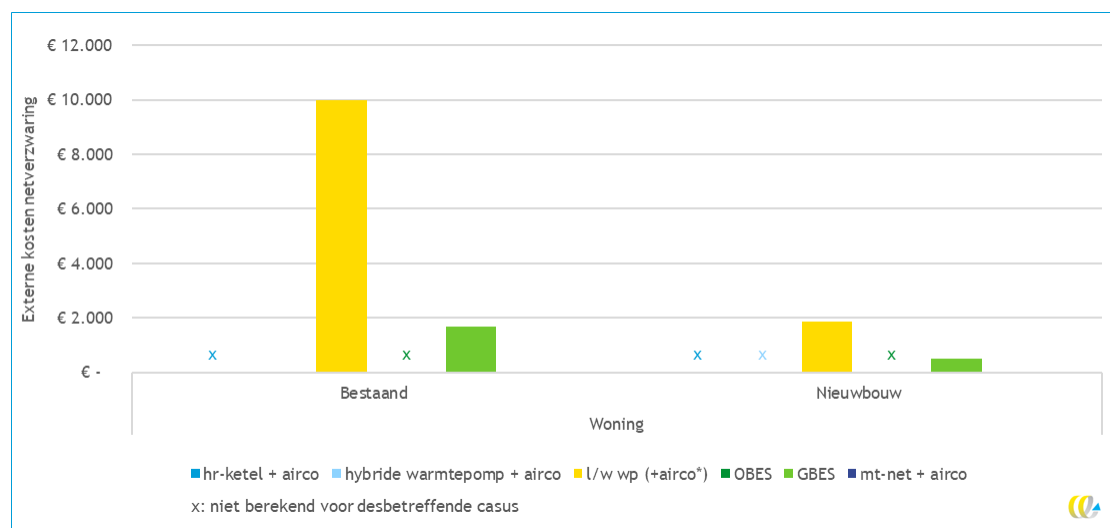
In deze studie is een inschatting gemaakt van de benodigde netverzwaring voor lucht-warmtepompen en bodemwarmtepompen. Voor hybride warmtepompen is er een aanname gedaan dat er geen verzwaring nodig is, omdat deze binnen de reserves van het netwerk past, en dat wanneer in een buurt volledig wordt overgeschakeld op hybride warmtepompen, er gestuurd moet worden op minimale netcongestie met een sturingsstelsel. Verder is de aanname gedaan dat de verzwarkosten bij de toepassing van klimaat-neutrale warmtetechnieken enkel de kosten voor de verzwaring van het laagspanningsnet gelden. In de studie worden de verzwarkosten van het laagspanningsnet geschat op € 826 per kW aansluitwaarde. Om te corrigeren voor inflatie en rekening te houden met dat

het gaat om een grove schatting, is in deze mkba de aanname gedaan dat de kosten € 1.000 zijn per kW aansluitwaarde. Verder gaat het om eenmalige verzwaringskosten bij de start van de looptijd van de mkba.

Figuur 28 - Totale effect 'Impact op het elektriciteitsnet' voor de casussen 'Kantoor', 'Verzorgingstehuis' en 'Appartementencomplex'



Figuur 29 - Totale effect 'Impact op het elektriciteitsnet' voor de casus 'Woning'



4.4.5 Bodemeffecten

Zowel bij open- als gesloten systemen kunnen bodemeffecten optreden. Dit kan effect hebben op de waterkwaliteit van het oppervlakte- en grondwater, beide aanwezig in de biosfeer (bovengrond en ondergrond tot een diepte van ongeveer 500 m). Het is belangrijk te beseffen dat veel van deze effecten pas invloed hebben op de mkba als er sprake is van een impact op mens, natuur en gebouwen (endpoints). In deze studie kijken we naar een aantal verschillende bodemeffecten:

- De waterkwaliteit van grondwater in watervoerende lagen kan gaan mengen wanneer de kleilaag (die een scheiding vormt tussen watervoerende lagen) niet goed wordt afgedicht. Dit kan leiden tot verontreiniging of menging van zout en zoet water (GBES en OBES).
- Onttrekking of beïnvloeding van bodemverontreiniging bij aquifers (OBES).
- Vermenging grondwater (OBES).
- Lekkage in de buis, waardoor circulatievloeistof in de bodem lekt (GBES).

Deze effecten worden, wegens gebrek aan data, alleen kwalitatief beschreven. In Paragraaf 5.3.2 gaan we echter dieper in op de risicoverkenningen van de bodemeffecten.

Voor de omvang van de effecten volgen we de volgende classificatie:

- (– – –) Er treedt een duidelijk effect in de biosfeer op.
- (– –) Er treedt een kleinschalig effect op.
- (–) De effecten zijn tijdelijk en herstelbaar, mits er juist gemonitord wordt.

Naast deze effecten worden er in de literatuur nog andere potentiële effecten genoemd, zoals introductie van een verontreiniging bij de aanleg, het openbarsten van de afdichting van een bron, en materiaal dat achterblijft na buitengebruikstelling. Over deze effecten is nog minder bekend dan bij de hierboven genoemde effecten, daarom zijn deze effecten kwalitatief niet meegenomen in deze mkba.

De technieken ‘hr-ketel’, ‘hybride warmtepomp’ en ‘lucht-waterwarmtepomp’ hebben geen effect op de bodem. Een warmtenet heeft bij de aanleg mogelijk wel effect op de bodem, met name op de temperatuur van drinkwaterleidingen. Zie toelichting hierover bij Paragraaf 4.4.2.

Niet correct aangevuld boorgat

Een eerste risico is kortsluitstroming en verspreiding van verontreinigingen door inadequaat herstel van doorboorde scheidende (klei)lagen. Wanneer een laag bij de aanleg van een bodemenergiesysteem wordt doorboord, kan kortsluitstroming ontstaan door het drukverschil tussen het grondwater boven en onder de doorboorde scheidende laag. Hierdoor kan menging optreden van verschillende watertypen (menging zoet en zout grondwater) en/of het naar grotere diepte verplaatsen van grondverontreiniging. Om dit te voorkomen, moeten boorgaten na installatie van OBES of GBES worden aangevuld, zodat de scheidende werking van de doorboorde kleilaag wordt hersteld. De regelgeving voor het afwerken van boorgaten voor BES zijn opgenomen in het protocol ‘Mechanisch boren’ (BRL 2.100 en BLR 11.000). Deze protocollen zijn van toepassing op een groot aantal boringen, waaronder die voor open en gesloten bodemenergiesystemen. Het protocol stelt een aantal eisen:

- Voorkom dat verontreiniging of verontreinigd grondwater vanaf maaiveld naar dieper gelegen lagen (en omgekeerd via kwel) kan stromen.
- Voorkom verspreiding van verontreinigingen.
- Voorkom de introductie van verontreiniging bij het afdichten.
- Voorkom menging van grondwater van verschillende kwaliteit.

- Voorkom dat afdichtingsmateriaal onvolledig afdicht.
- Voldoe, in het geval dat de mechanische boring wordt uitgevoerd om de realisatie van een verticale bodemwarmtewisselaar mogelijk te maken, tevens aan de ‘Kwaliteitseisen bodem en afwerking boorgat’ uit ISSO Publicatie 73.

Uit STOWA (2022) komt naar voren dat het risico op slecht aangevulde boorgaten het hoogst is bij gesloten bodemsystemen. De grootte van een lekkageflux wordt bepaald door het stijghoogteverschil tussen twee watervoerende pakketten en de weerstand over de tussenliggende scheidende laag. Het effect op de grondwaterkwaliteit is afhankelijk van het verschil in grondwaterkwaliteit tussen de verschillende watervoerende pakketten en is daardoor locatiegebonden. Wanneer de protocollen niet zouden worden nageleefd, kan de cumulatie van slecht aangevulde boringen in combinatie met ongunstige condities, zoals (groot waterkwaliteits- en stijghoogteverschil) gezamenlijk wel voor risico's op de waterkwaliteit van boven- of onderliggende aquifers zorgen. Aan de andere kant betekent dit ook dat als de omstandigheden niet ongunstig zijn of dat als protocollen wel worden nageleefd, de risico's beperkt zijn.

Er zijn verschillende onderzoeken gedaan om een gevoel te krijgen van hoe groot de lekkageflux kan zijn (Bonte et al., 2013) (Van Vliet et al., 2022). Een analytische en numerieke berekening heeft het mogelijke effect van kortsluitstroming in kaart gebracht. Een gemiddelde k-waarde van 10-5 m/dag is vereist voor aanvulmateriaal dat wordt toegepast. Indien er sprake is van een potentiële slechte aanvulling waarbij het invulmateriaal over de hele dikte van de doorboorde kleilaag een gemiddelde k-waarde van 1 m/dag heeft, is er een beperkt effect. Het is aannemelijk dat bij het overgrote deel van de gevallen waarin de boorgaten niet juist worden aangevuld, 1 m/dag een worst-casebenadering is. Het effect van dit risico achten we daarmee (– –).

In Van Vliet et al. (2022) is onderzocht welke aspecten van belang zijn voor de veilige aanleg van bodemenergie en hoe de landelijke beschermingskaart van doorboringen kan worden toegepast op een case study. Zo bleek in de toepassing voor Woerden dat bij een slechte afdichting van het boorgat of slechte afdichting van de (PE-)buizen van een warmte- of koudebron de invloed van de aanleg van bodemenergiesystemen op de grondwaterkwaliteit gering is. De onderzoekers bevelen aan dat het bij de aanleg van bodemenergiesystemen belangrijk is om na te gaan over in of nabij het systeem grondwaterverontreinigingen zitten. Daarnaast kan de landelijke beschermkaart een praktisch hulpmiddel zijn, omdat op basis hiervan het mogelijk is het risico op een potentiële lekkageflux te identificeren. Wel stellen de onderzoekers dat voor een gedetailleerd inzicht in de invloed van de aanleg van bodemenergiesystemen locatie-specifieke modellering noodzakelijk is.

Samenvatting effect ‘Niet correct aangevuld boorgat’

We adviseren dit effect, indien geen specifiek onderzoek bekend is, te waarderen op ‘– –’. Het is in de meeste gevallen bescheiden en aannemers/boorbedrijven moeten aan protocollen voldoen, waardoor het risico beheersbaar is of niet optreedt. Enkel als protocollen slecht worden nageleefd, ontstaat er een groter risico voor het bodemmilieu. Er is geen informatie over economische schade als het incident wel optreedt.



Vermenging grondwater

De exploitatie van een open systeem kan zorgen voor een menging van verschillende watertypen. Het effect hiervan op de grondkwaliteit is het grootst in watervoerende lagen waar verschillen aanwezig zijn in watersamenstelling, zoals zoutgehalte, pH of redoxcondities (Hartog et al., 2013). Een vermenging treedt op door de initiële menging bij het onttrekken en weer terugpompen van grondwater. Uit Bonte et al. (2011) komt naar voren dat door grondwatercirculatie van OBES-systemen de chemische kwaliteit van grondwater in diepere lagen kan worden beïnvloed. Echter zijn de geobserveerde veranderingen dusdanig klein dat ze geen negatieve invloed hebben op de waterkwaliteit voor drinkwaterproductie.

Samenvatting effect 'Vermenging grondwater'

We adviseren dit effect te waarderen op '–'. De vermenging van de kwaliteit van grondwater kan plaatsvinden bij de exploitatie van open bodemenergiesystemen. Er is geen informatie over de economische schade als dit effect optreedt.



Bodemverontreiniging ondiepe aquifer

Het komt voor dat in stedelijk gebied veel open bodemsystemen in elkaars hydrologische invloedssfeer staan, waardoor een eventuele bodemverontreiniging snel kan worden verspreid. Het effect is afhankelijk van de afstand tot andere watergebruikers. Hoe groter de afstand, des te meer verdunning van de bodemverontreiniging optreedt.

Aan de andere kant kan OBES ook een positieve bijdrage geven aan de verdunning van een verontreiniging. Dit effect is onderzocht in onder andere Zuurbier et al. (2013) en Sommer et al. (2013). Uit deze studie komt naar voren dat OBES gebruikt kan worden om verdunning te stimuleren onder bepaalde omstandigheden. Zo leek er bij de toepassing van een OBES in Eindhoven bij de eerste metingen na één jaar sprake te zijn van verbeterde omstandigheden voor afbraak.

Het effect van OBES in verontreinigd grondwater is sterk locatieafhankelijk. Als er sprake is van een bodemverontreiniging in de buurt, is het raadzaam om uit te zoeken of een verdunning hiervan potentiële risico's oplevert voor andere grondwatergebruikers. Aan de andere kant kan de toepassing van OBES potentieel ook bijdragen aan verbetering van de grondwaterkwaliteit als dit wordt gecombineerd met sanering.

Samenvatting effect 'Bodemverontreiniging ondiepe aquifer'

We adviseren dit effect mee te nemen als 'locatieafhankelijk'. Dit betekent dat dit bij de afweging van bodemenergie in het algemeen geen effect heeft. Enkel wanneer bij een specifieke locatie de rol van bodemenergie wordt afgewogen, adviseren we om na te gaan of er sprake is van bodemverontreiniging in de buurt. Indien dit het geval is, kan er worden bekeken of de toepassing van bodemenergie risico's oplevert voor andere gebruikers en of bodemenergie kan bijdragen aan de verbetering van de grondwaterkwaliteit. Er is geen informatie over economische schade als het incident wel optreedt.



Lekkage van circulatievloeistoffen

Zowel in open als gesloten systemen worden circulatievloeistoffen gebruikt voor het transport van warmte of koude in de installatie. Vaak wordt leidingwater als circulatievloeistof gebruikt in bijvoorbeeld de warmtewisselaar. Dit leidingwater kan echter bevriezen. Om deze reden worden soms antivriesmiddelen gebruikt in het water in de leidingen van de installatie. Enkele voorbeelden van antivriesmiddelen zijn ethyleenglycol, monopropyleenglycol en kaliumcarbonaat (STOWA, 2022).

Antivriesmiddelen vormen een groot aandeel in de samenstelling van de circulatievloeistoffen. Deze stoffen kunnen een milieurisico hebben, wat leidt tot een milieueffect.

Voor bodemsystemen zijn de volgende aspecten van belang:

- De mate van mobiliteit in de bodem (in hoeverre kan een stof zich verplaatsen na lekkage en op welke manier worden het grondwater en drinkwaterbronnen bereikt).
- De mate van afbreekbaarheid in de ondergrond.
- De mogelijke milieu- en/of gezondheidseffecten die de stoffen kunnen veroorzaken.

Wanneer er geen lekkages optreden, zijn de effecten op waterkwaliteit verwaarloosbaar - ervan uitgaande dat er geen milieuregels worden overtreden. Een lekkage van circulatiemiddelen kan echter wel leiden tot grondwaterverontreiniging. Het lekvolume is afhankelijk van de grootte en de opzet van het systeem, het type en de locatie van het lek, en de reactietijd van de beheerder van het systeem. Het effect op de grondwaterkwaliteit is afhankelijk van zowel het gelekte volume als de samenstelling van het circulatiemiddel. In een studie van het KWR (2013) (Bonte et al., 2013) wordt het risico van een lek met antivries en additieven als groot beschouwd, met een kleine kans, maar een groot potentieel effect, en is mede afhankelijk van het antivriesmiddel (**effect – – –**).

Samenvatting effect 'Lekkage van circulatievloeistoffen'

We adviseren dit effect te waarderen op '– – –'. De kans dat dit effect optreedt is klein, maar als het gebeurt wordt het potentiële effect als groot beschouwd. Wel hangt dit effect af van de keuze van de circulatievloeistof. Er is geen informatie over economische schade als het incident wel optreedt. Om een inschatting te geven hoe groot de potentiële schade moet zijn om invloed te hebben op de resultaten van de mkba, is er een risicoanalyse uitgevoerd.



Samenvatting bodemeffecten

Tabel 14 - Overzichtstabel bodemeffecten OBES en GBES

Effect	OBES	GBES	Effect	Kwantificeerbaar	Omschrijving
Niet correct aangevuld boorgat	x	x	– –	PM	Kleilagen kunnen gaan mengen wanneer de kleilaag niet goed wordt afgedicht. Dit kan leiden tot verontreiniging of menging van zout en zoet water.
Vermenging waterkwaliteit	x		–	PM	Vermenging grondwaterkwaliteit.
Verplaatsen bodemverontreiniging ondiepe aquifer	x		Locatie-afhankelijk	PM	Onttrekking/verplaatsing van bodemverontreiniging bij een ondiepe aquifer.
Lekkage van circulatievloeistof		x	– – –	Risicoanalyse	Lekkage van circulatievloeistof in de buis, waardoor antivriesstof in de bodem lekt.

Naast deze effecten worden er in de literatuur nog andere potentiële effecten genoemd, zoals introductie van een verontreiniging bij de aanleg, het openbarsten van de afdichting van een bron, en materiaal dat achterblijft na buitengebruikstelling. Over deze effecten is nog minder bekend dan bij de hierboven genoemde effecten, daarom zijn deze effecten kwalitatief niet meegenomen in deze mkba.

5 Mkba-resultaat

5.1 Inleiding

In dit hoofdstuk maken we de balans op en presenteren we het totaalsaldo van de mkba. Ook laten we zien hoe robuust de resultaten zijn, met behulp van een aantal gevoeligheidsanalyses en risicoverkenningen.

5.2 Totaalsaldo per casus

Hierna wordt per casus het mkba-resultaat vergeleken met het nulalternatief. Het nulalternatief is het ‘meest voor de hand liggende’ systeem dat toegepast wordt als er geen gebruik wordt gemaakt van bodemenergie. We gaan per casus in op de directe effecten en de externe effecten. De indirecte effecten zijn in alle gevallen nul.

Het totaalsaldo geeft dus het relatieve welvaartseffect weer per alternatief. Als dit saldo positief is, betekent dit dat er een positief effect optreedt voor de welvaart wanneer er voor dit projectalternatief wordt gekozen. Bij een negatief saldo is het nulalternatief gunstiger voor de welvaart in Nederland.

Kantoor

Het eindsaldo van de mkba voor de casus ‘Kantoor’ is weergegeven in Tabel 15.

Voor de casus ‘Kantoor - bestaande bouw’ zijn OBES, ‘lucht-waterwarmtepomp + airco’ en ‘mt-net + airco’ vergeleken met het nulalternatief ‘hr-ketel + airco’.

- **Directe effecten:** het valt op dat alle alternatieven een negatieve waarde hebben, wat betekent dat de kosten hoger liggen dan bij een hr-ketel + airco. Van de projectalternatieven heeft OBES het minst negatieve directe effect. Dit komt vooral door het gunstige saldo op energieverbruik. De investeringskosten van OBES liggen wel hoger dan bij de andere alternatieven.
- **Externe effecten:** alle projectalternatieven hebben een positief saldo, waarvan OBES het hoogste scoort. Het grootste gekwantificeerde externe effect is het effect op klimaat. OBES heeft hier het meest gunstige resultaat, wat vooral komt door het hoge rendement en het gebruik van elektriciteit met beperkte emissies. Verder heeft een lucht-waterwarmtepomp een licht negatief klimaateffect door het gebruik van koude-middel; het totale klimaateffect is per saldo wel ruim positief. De kwalitatieve effecten zijn positief voor OBES voor het hitte-eilandeffect, in vergelijking met een airco in het nulalternatief; de bodemeffecten zijn negatief beoordeeld vanwege de kleine kans op doorboring van kleilagen en vermenging van grondwater. Het risico op de verspreiding van bodemverontreiniging is locatieafhankelijk.
- **Totaalresultaat:** OBES heeft kwantitatief het meest gunstige mkba-saldo. Voor een gewogen afweging tellen ook de kwalitatieve aspecten mee.

Voor de casus 'Kantoor - nieuwbouw' zijn OBES en een 'mt-net + airco' vergeleken met het nulalternatief 'lucht-waterwarmtepomp'.

- **Directe effecten:** op directe financiële effecten heeft OBES een licht negatief resultaat, waarbij 'mt-net + airco' een fors negatief direct effect heeft. Bij OBES liggen met name de operationele kosten wat hoger dan bij het nulalternatief, maar is het effect op energieverbruik en herinvesteringen positief. Bij 'mt-net + airco' liggen de eenmalige investeringskosten fors hoger, net als de operationele kosten en het energieverbruik.
- **Externe effecten:** zowel OBES als 'mt-net + airco' hebben een positief resultaat voor externe effecten. Met name OBES heeft een positief effect op CO₂-besparing. Op impact op het elektriciteitsnet hebben beide projectalternatieven een positief effect, 'mt-net' iets positiever. Verder heeft OBES een positief effect op het hitte-eilandeffect, vergeleken met een lucht-waterwarmtepomp. De bodemeffecten zijn negatief beoordeeld vanwege de kleine kans op doorboring van kleilagen en vermenging van grondwater. Het risico op de verspreiding van bodemverontreiniging is locatieafhankelijk.
- **Totaalresultaat:** OBES heeft kwantitatief het meest gunstige mkba-saldo. Voor een integrale afweging is het van belang ook de kwalitatieve aspecten mee te nemen.

Tabel 15 - Overzichtstabel: eindsaldo van de mkba voor de casus 'Kantoor' en onderverdeling naar de verschillende posten

Welvaartseffecten t.o.v. nulalternatief (€ duizend)		Bestaande bouw Referentie: hr-ketel + airco			Nieuwbouw Referentie: l/w-warmtepomp	
		OBES	L/w-wp + airco	Mt-net + airco	OBES	Mt-net + airco
Directe effecten	Enmalige investeringskosten	-539	-333	-448	-12	-437
	Herinvesteringen	-149	-238	12	36	12
	Operationele kosten	-101	-112	-275	-158	-362
	Kosten energieverbruik	304	191	-577	54	-204
	Resterende waarde bodembron	0	0	0	0	0
	Subtotaal	-485	-491	-1.290	-80	-992
Indirecte effecten	Werkgelegenheid	0	0	0	0	0
Externe effecten	Klimaat (CO ₂ -emissies)	956	627	748	158	30
	Klimaat (lekage koelmiddel)	14	-42	0	9	-4
	Hitte-eiland	+	0	0	+	0
	Geluidshinder	0	0	0	0	0
	Impact op het elektriciteitsnet	-86	-513	0	23	31
	Bodem (niet correct aangevuld boorgat)	--	0	0	--	0
	Bodem (vermenging grondwater-kwaliteit)	-	0	0	-	0
	Bodem (bodemverontreiniging ondiepe aquifer)	Locatie-afhankelijk	0	0	Locatie-afhankelijk	0
	Bodem (lekage van circulatie-vloeistof)	0	0	0	0	0
	Subtotaal	884 + PM *	72 + PM	748 + PM	190 + PM	58 + PM
Totaalsaldo		399 + PM	-419 + PM	-541 + PM	110 + PM	-934 + PM

* PM betekent dat het betreffende welvaartseffect niet volledig is gekwantificeerd.

Verzorgingstehuis

Het eindsaldo van de mkba voor de casus ‘Verzorgingstehuis’ wordt weergegeven in Tabel 16.

Voor de casus ‘Verzorgingstehuis - bestaande bouw’ zijn OBES, ‘lucht-waterwarmtepomp + airco’ en ‘mt-net+ airco’ vergeleken met het nulalternatief ‘hr-ketel + airco’.

- **Directe effecten:** alle projectalternatieven hebben een negatief direct effect. Dit heeft met name te maken met de hogere investeringskosten ten opzichte van het nulalternatief. Hierbij valt op dat de investeringskosten bij OBES een groter negatiever saldo hebben dan een ‘lucht-waterwarmtepomp + airco’. Op kosten van het energieverbruik heeft OBES een positiever resultaat. Het ‘mt-net + airco’ komt het minst goed uit de vergelijking op bijna alle posten. Alles bij elkaar opgeteld scoren OBES en een lucht-waterwarmtepomp ongeveer gelijk op directe (financiële) effecten.
- **Externe effecten:** alle drie de projectalternatieven hebben een positief resultaat bij externe effecten. Hierin heeft CO₂-besparing het grootste aandeel. Met name OBES heeft een zeer positief resultaat. Lekkage van koelmiddel heeft een licht negatief effect bij de l/w-warmtepomp, bij impact op het elektriciteitsnet is er wel een negatief effect. Kwalitatief is te zien dat OBES een positief effect heeft op het hitte-eilandeffect in vergelijking met de andere alternatieven. De bodemeffecten zijn negatief beoordeeld vanwege de kleine kans op een slecht afgedicht boorgat en vermenging van grondwaterkwaliteit. Het risico op de verspreiding van bodemverontreiniging is locatieafhankelijk.
- **Totaalresultaat:** OBES heeft kwantitatief het meest gunstige mkba-saldo. Voor een gewogen afweging tellen ook de kwalitatieve aspecten mee.

Voor de casus ‘Verzorgingstehuis - nieuwbouw’ zijn OBES en een ‘mt-net + airco’ vergeleken met het nulalternatief ‘lucht-waterwarmtepomp’.

- **Directe effecten:** OBES heeft een positief direct effect, terwijl ‘mt-net + airco’ een negatief resultaat heeft. Bij OBES is te zien dat de investeringskosten en operationele kosten hoger liggen in vergelijking met het nulalternatief, maar dat de kosten voor energieverbruik en herinvesteringen lager liggen. Hierdoor is het netto directe effect positief voor OBES. Voor ‘mt-net + airco’ zijn op herinvesteringen na alle posten negatief.
- **Externe effecten:** zowel OBES als ‘mt-net + airco’ hebben een positief extern effect. Dit heeft vooral te maken met het positieve effect op CO₂-besparing en impact op het elektriciteitsnet. Kwalitatief heeft OBES een positief effect op het hitte-eilandeffect, in vergelijking met de andere alternatieven. De bodemeffecten zijn negatief beoordeeld vanwege de kleine kans op doorboring van kleilagen en vermenging van grondwater. Het risico op de verspreiding van bodemverontreiniging is locatieafhankelijk.
- **Totaalresultaat:** OBES heeft kwantitatief het meest gunstige mkba-saldo. Voor een gewogen afweging tellen ook de kwalitatieve aspecten mee.

Tabel 16 - Overzichtstabel: eindsaldo van de mkba voor de casus 'Verzorgingstehuis' en onderverdeling naar de verschillende posten

Welvaartseffecten t.o.v. nulalternatief (€ duizend)		Bestaande bouw Referentie: hr-ketel + airco			Nieuwbouw Referentie: l/w-warmtepomp	
		OBES	L/w-wp + airco	Mt-net + airco	OBES	Mt-net + airco
Directe effecten	Enmalige investeringskosten	-917	-541	-996	-90	-714
	Herinvesteringen	-297	-388	26	109	210
	Operationele kosten	-131	-178	-623	-69	-632
	Kosten energieverbruik	677	446	-1.595	167	-1.051
	Resterende waarde bodembron	0	0	0	0	0
	Subtotaal	-667	-661	-3.188	118	-2.187
Indirecte effecten	Werkgelegenheid	0	0	0	0	0
Externe effecten	Klimaat (CO ₂ -emissies)	2.460	1.786	2.202	487	318
	Klimaat (lekkage koelmiddel)	12	-74	0	38	22
	Hitte-eiland	+	0	0	+	0
	Geluidshinder	0	0	0	0	0
	Impact op het elektriciteitsnet	-149	-891	0	103	139
	Bodem (niet correct aangevuld boorgat)	--	0	0	--	0
	Bodem (vermenging grondwater-kwaliteit)	--	0	0	--	0
	Bodem (bodemonverontreiniging ondiepe aquifer)	Locatie-afhankelijk	0	0	Locatie-afhankelijk	0
	Bodem (lekkage van circulatie-vloeistof)	0	0	0	0	0
	Subtotaal	2.324 + PM *	821 + PM	2.202 + PM	627 + PM	479 + PM
Totaalsaldo		1.656 + PM	160 + PM	-986 + PM	744 + PM	-1.708 + PM

* PM betekent dat het betreffende welvaartseffect niet volledig is gekwantificeerd.

Appartementencomplex

Het eindsaldo van de mkba voor de casus 'Appartementencomplex' is weergegeven in Tabel 17.

Voor de casus 'Appartementencomplex - bestaande bouw' zijn OBES, GBES, 'lucht-water-warmtepomp + airco' en 'mt-net+ airco' vergeleken met het nulalternatief 'hybride warmtepomp + airco'.

- **Directe effecten:** in tegenstelling tot de andere casussen, valt het op dat bij de directe effecten OBES, GBES en de lucht-waterwarmtepomp een positief saldo hebben. Enkel 'mt-net + airco' heeft een negatief saldo bij directe effecten. OBES heeft een positiever effect op investeringskosten, GBES heeft een beter saldo op operationele kosten en heeft daarnaast een resterende waarde van de bodembron. Het 'mt-net + airco' heeft een negatief saldo dankzij hogere kosten voor het energieverbruik en investeringskosten.
- **Externe effecten:** bij de externe effecten valt het op dat OBES, GBES en 'mt-net + airco' een positief resultaat hebben. Dit ligt vooral aan de CO₂-besparing. De lucht-waterwarmtepompscoort een licht negatief resultaat ten opzichte van het nulalternatief, vooral dankzij de negatieve impact op het net. Kwalitatief hebben OBES en GBES allebei een positief effect op het hitte-eilandeffect. De bodemeffecten bij OBES zijn negatief beoordeeld vanwege de kleine kans op een slecht aangevuld boorgat en vermenging van grondwater. Het risico op de verspreiding van bodemverontreiniging is locatieafhankelijk. Voor GBES speelt naast de kleine kans op doorboring van kleilagen ook mee dat er een kleine kans is op lekkage van circulatievloeistof naar de bodem.
- **Totaalresultaat:** GBES heeft kwantitatief het meest gunstige mkba-saldo, gevolgd door OBES. Voor een gewogen afweging tellen ook de kwalitatieve aspecten mee.

Voor de casus 'Appartementencomplex - nieuwbouw' zijn OBES, GBES en een 'mt-net + airco' vergeleken met het nulalternatief 'lucht-waterwarmtepomp'.

- **Directe effecten:** zowel OBES als GBES hebben een positief resultaat bij directe effecten, terwijl 'mt-net + airco' een negatief resultaat heeft. Met name op investeringskosten en herinvesteringen hebben OBES en GBES een positief resultaat. Dit heeft te maken met de langere levensduur van deze systemen.
- **Externe effecten:** alle drie de projectalternatieven hebben een positief resultaat op externe effecten, wat voornamelijk komt door CO₂-besparing, en een klein positief resultaat op impact op het elektriciteitsnet. Kwalitatief hebben OBES en GBES allebei een positief effect op het hitte-eilandeffect. De bodemeffecten bij OBES zijn negatief beoordeeld vanwege de kleine kans op een slecht aangevuld boorgat en vermenging van grondwater. Het risico op de verspreiding van bodemverontreiniging is locatieafhankelijk. Voor GBES speelt naast de kleine kans op doorboring van kleilagen ook mee dat er een kleine kans is op lekkage van circulatievloeistof naar de bodem.
- **Totaalresultaat:** OBES heeft kwantitatief het meest gunstige mkba-saldo, gevolgd door GBES. Voor een gewogen afweging tellen ook de kwalitatieve aspecten mee.

Tabel 17 - Overzichtstabel: eindsaldo van de mkba voor de casus 'Appartementencomplex' en onderverdeling naar de verschillende posten

Welvaartseffecten t.o.v. nulalternatief (€ duizend)		Bestaande bouw <i>Nulalternatief: hybride warmtepomp + airco</i>				Nieuwbouw <i>Nulalternatief: l/w-warmtepomp</i>		
		OBES	GBES	L/w-wp + airco	Mt-net + airco	OBES	GBES	Mt-net + airco
Directe effecten	Eenmalige investeringskosten	199	70	-51	-189	339	198	-199
	Herinvesteringen	239	239	-37	249	283	201	232
	Operationele kosten	228	358	164	-84	-3	88	-342
	Kosten energieverbruik	242	242	187	-774	50	50	-686
	Resterende waarde bodembron	0	69	0	0	0	22	0
	Subtotaal	909	979	264	-798	669	558	-994
Indirecte effecten	Werkgelegenheid	0	0	0	0	0	0	0
Externe effecten	Klimaat (CO ₂ -besparing)	370	370	209	349	145	145	107
	Klimaat (lekkage koelmiddel)	19	19	-18	0	8	8	-10
	Hitte-eiland	+	+	0	0	+	+	0
	Geluidshinder	0	0	0	0	0	0	0
	Impact op het elektriciteitsnet	-40	-40	-238	0	24	24	32
	Bodem (niet correct aangevuld boorgat)	--	--	0	0	--	--	0
	Bodem (vermenging grondwaterkwaliteit)	-	0	0	0	-	0	0
	Bodem (bodemverontreiniging ondiepe aquifer)	Locatie-afhankelijk	0	0	0	Locatie-afhankelijk	0	0
	Bodem (lekkage van circulatievloeistof)	0	--	0	0	0	--	0
	Subtotaal	349 + PM *	349 + PM	-46 + PM	349 + PM	177 + PM	177 + PM	128 + PM
Totaalsaldo		1.258 + PM	1.328 + PM	217 + PM	-449 + PM	846 + PM	736 + PM	-866 + PM

* PM betekent dat het betreffende welvaartseffect niet volledig is gekwantificeerd.

Woning

Het eindsaldo van de mkba voor de casus 'Woning' wordt weergegeven in Tabel 18. Deze gegevens zijn gewijzigd ten op zichte van de vorige versie in september 2023.

Voor de casus 'Woning - bestaande bouw' zijn GBES en een 'lucht-waterwarmtepomp + airco' vergeleken met het nulalternatief 'hybride warmtepomp + airco'.

- **Directe effecten:** bij direct effecten zien we dat zowel een GBES als een lucht-waterwarmtepomp een positief resultaat heeft; het subtotaal verschilt minder dan bij de andere casussen. Wel valt op dat er bij de posten onderling verschillen zijn. Zo heeft GBES duidelijk een lager saldo bij eenmalige investeringskosten, maar bij kosten energieverbruik juist een positief saldo. Daarnaast speelt hier ook de resterende waarde van de bodembron mee.
- **Externe effecten:** GBES heeft duidelijk een positief extern effect, lucht-waterwarmtepomp scoort hier neutraal. Op CO₂-besparing hebben beide technieken een gunstig effect (GBES groter dan lucht-waterwarmtepomp), maar bij impact op het elektriciteitsnet is te zien dat met name de l/w-warmtepomp een negatief effect heeft. Kwalitatief is te zien dat GBES een positief effect heeft op het hitte-eilandeffect. De bodemeffecten bij GBES zijn negatief beoordeeld vanwege de kleine kans op een slecht aangevuld boorgat en lekkage van circulatievloeistof naar de bodem.
- **Totaalresultaat:** GBES heeft kwantitatief het meest gunstige mkba-saldo. Voor een gewogen afweging tellen ook de kwalitatieve aspecten mee.

Voor de casus 'Woning - nieuwbouw' is GBES vergeleken met het nulalternatief 'lucht-waterwarmtepomp' en 'mt-net + airco'.

- **Directe effecten:** GBES heeft een licht negatief saldo bij direct effecten. Dit ligt vooral aan de eenmalige investeringskosten. De kosten van het energieverbruik liggen wel lager bij GBES dan bij het nulalternatief. 'Mt-net + airco' scoort slechter op de directe effecten, met name door hogere kosten voor het energieverbruik en operationele kosten.
- **Externe effecten:** de externe effecten zijn positief bij GBES, vooral dankzij de CO₂-besparing. Verder heeft GBES een licht voordeel op de impact op het elektriciteitsnet. Kwalitatief is te zien dat GBES een positief effect heeft op het hitte-eiland effect. De bodemeffecten bij GBES zijn negatief beoordeeld vanwege de kleine kans op doorboring van kleilagen en lekkage van circulatievloeistof naar de bodem. 'Mt-net + airco' scoort ook positief op de externe effecten, met name vanwege de vermeden impact op het elektriciteitsnet en CO₂-besparing.
- **Totaalresultaat:** GBES heeft kwantitatief het meest gunstige mkba-saldo. Voor volledige afweging tellen ook de kwalitatieve aspecten mee.

Tabel 18 - Overzichtstabel: eindsaldo van de mkba voor de casus 'Woning' en onderverdeling naar de verschillende posten

Welvaartseffecten t.o.v. nulalternatief (€ duizend)		Bestaande bouw <i>Nulalternatief: hybride warmtepomp + airco</i>			Nieuwbouw <i>Nulalternatief: l/w-warmtepomp</i>	
		GBES	L/w-wp + airco	Mt-net + airco	GBES	Mt-net + airco
Directe effecten	Enmalige investeringskosten	-7	-2	-6	-4	-5
	Herinvesteringen	-1	-1	6	-1	6
	Operationele kosten	6	4	-3	0	-9
	Kosten energieverbruik	9	6	-26	2	-19
	Resterende waarde bodembron	2	0	0	1	0
	Subtotaal	9	6	-28	-2	-27
Indirecte effecten	Werkgelegenheid	0	0	0	0	0
Externe effecten	Klimaat (CO ₂ -besparing)	18	11	17	5	3
	Klimaat (lekkage koelmiddel)	0	-1	0	0	0
	Hitte-eiland	+	0	0	+	0
	Geluidshinder	0	0	0	0	0
	Impact op het elektriciteitsnet	-2	-10	0	1	2
	Bodem (niet correct aangevuld boorgat)	--	0	0	--	0
	Bodem (vermenging grond-waterkwaliteit)	0	0	0	0	0
	Bodem (bodemverontreiniging ondiepe aquifer)	0	0	0	0	0
	Bodem (lekkage van circulatie-vloeistof)	--	0	0	--	0
	Subtotaal	16 + PM *	1 + PM	17 + PM	7 + PM	5 + PM
Totale resultaat		26 + PM	7 + PM	-12 + PM	5 + PM	-21 + PM

* PM betekent dat het betreffende welvaartseffect niet volledig is gekwantificeerd.

5.3 Gevoeligheidsanalyse

5.3.1 Scenario's

Voor de gevoeligheidsanalyse zijn de volgende scenario's onderzocht:

1. Conservatieve inschatting van de kosten van bodemenergie, op basis van de aangeleverde input van Bodemenergie NL.
2. Optimistische inschatting van de kosten van bodemenergie, op basis van de aangeleverde input van Bodemenergie NL.
3. Hoge energieprijzen, waarbij is uitgegaan van een verhoging van de gas- en elektriciteitsprijs van 50%. De warmteprijs is constant gehouden.
4. Lage energieprijzen, waarbij is uitgegaan van een verlaging van de gas- en elektriciteitsprijs van 50%. De warmteprijs is constant gehouden.
5. Verandering van de vraag naar ruimteverwarming en koude (bijvoorbeeld door klimaatverandering), waarbij is uitgegaan van een verlaging van de functionele vraag naar ruimteverwarming van 25% en een verhoging van de functionele vraag naar koude van 25%.

In Tabel 19 tot en met Tabel 22 zijn de resultaten van de gevoeligheidsanalyse weergegeven per casus. Uit de tabellen komt naar voren dat enkel het scenario 'Kosten bodemenergie

conservatief' zorgt voor een verschuiving van de uitkomst van de mkba, in het nadeel van bodemenergie. In de andere scenario's blijven de verhoudingen gelijk aan de uitkomst in de mkba. We concluderen dat de uitkomsten robuust zijn voor de energieprijzen en de vraag naar ruimteverwarming en tapwater. Als de kosten van bodemenergie conservatief uitvallen, oftewel hoger uitvallen dan gepland, dan kan dit wel impact hebben op de uitkomsten van de mkba.

Tabel 19 - Resultaten gevoeligheidsanalyse casus 'Kantoor'

Welvaartseffecten t.o.v. nulalternatief (€ duizend)	Bestaande bouw <i>Nulalternatief: hr-ketel + airco</i>			Nieuwbouw <i>Nulalternatief: l/w-warmtepomp</i>	
	Bestaand OBES	Bestaand l/w-wp + airco	Bestaand mt-net + airco	Nieuwbouw OBES	Nieuwbouw mt-net + airco
Kosten bodemenergie conservatief	-1.026	-442	-468	-164	-879
Kosten bodemenergie optimistisch	839	-442	-468	204	-879
Energiekosten hoog	517	-358	-246	137	-849
Energiekosten laag	236	-526	-690	83	-908
Minder ruimteverwarming, meer koude	395	-457	-535	109	-934
Mkba-resultaat	376	-442	-468	110	-879

Tabel 20 - Resultaten gevoeligheidsanalyse casus 'Verzorgingstehuis'

Welvaartseffecten t.o.v. nulalternatief (€ duizend)	Bestaande bouw <i>Nulalternatief: hr-ketel + airco</i>			Nieuwbouw <i>Nulalternatief: l/w-warmtepomp</i>	
	Verzorgingstehuis bestaand - OBES	L/w-wp + airco	Mt-net + airco	Verzorgingstehuis nieuwbouw - OBES	Mt-net + airco
Kosten bodemenergie conservatief	-775	193	-741	-472	-1.696
Kosten bodemenergie optimistisch	2.609	193	-741	1.215	-1.696
Energiekosten hoog	2.044	433	-105	828	-1.452
Energiekosten laag	1.334	-46	-1.377	661	-1.939
Minder ruimteverwarming, meer koude	1.390	-23	-911	618	-1.793
Mkba-resultaat	1.689	193	-741	744	-1.696

Tabel 21 - Resultaten gevoeligheidsanalyse casus 'Appartementencomplex'

Welvaartseffecten t.o.v. nulalternatief (€ duizend)	Bestaande bouw <i>Nulalternatief: hybride warmtepomp + airco</i>				Nieuwbouw <i>Nulalternatief: l/w-warmtepomp</i>		
	OBES	GBES	L/w-wp + airco	Mt-net + airco	OBES	GBES	Mt-net + airco
Kosten bodemenergie conservatief	493	875	87	-77	569	788	-432
Kosten bodemenergie optimistisch	1.360	1.357	87	-77	953	1.006	-432
Energiekosten hoog	1.184	1.254	116	58	871	761	-367
Energiekosten laag	1.071	1.142	59	-212	821	711	-496
Minder ruimteverwarming, meer koude	1.160	1.246	60	-31	882	822	-407
Mkba-resultaat	1.127	1.198	87	-77	846	736	-432

Tabel 22 - Resultaten gevoeligheidsanalyse casus 'Woning'

Welvaartseffecten t.o.v. nulalternatief (€ duizend)	Bestaande bouw <i>Nulalternatief: hybride warmtepomp + airco</i>		Nieuwbouw <i>Nulalternatief: l/w-warmtepomp</i>
	GBES	L/w-wp + airco	GBES
Kosten bodemenergie conservatief	0	4	-14
Kosten bodemenergie optimistisch	24	4	4
Energiekosten hoog	18	6	-2
Energiekosten laag	13	3	-4
Minder ruimteverwarming, meer koude	18	2	-3
Mkba-resultaat	15	4	-3

5.3.2 Risicoverkenning bodemeffecten

De bodemeffecten zijn kwalitatief beschreven, dit maakt het moeilijk om tot een duidelijke interpretatie van het saldo te komen. We voeren daarom een risicoverkenning uit op de drie effecten. We schatten daarbij in hoe groot de schade van de bodemeffecten zou moeten zijn om een ander alternatief beter te laten scoren dan bodemenergie. Wanneer de hiervoor benodigde schade groter is dan realistisch voor mogelijk kan worden gehouden, kunnen we concluderen dat het mkba-saldo robuust is: wanneer we bodemeffecten wel goed zouden kunnen kwantificeren, zou dit de uitkomsten niet significant doen veranderen.

Voor de risicoverkenning hanteren we een '*kans maal impact*'-methode. We maken eerst een schatting van de kans op een incident op basis van de beschikbare literatuur en expert-inschatting, waarbij we de kans op een incident vermenigvuldigen met de schadekosten om tot het welvaartseffect te komen⁵.

Het grootste bodemeffect betreft de lekkage van circulatievloeistof (STOWA, 2022). In het rapport van KWR (2013) is de lekkans van een GBES ingeschat op één lekkage per jaar per 435 bodemlussen (Bonte et al., 2013). Hierbij is de kans op lekkage in horizontale deel (1:625) groter ingeschat dan in het verticale deel (1:1428). Over het algemeen geldt dat de kans op lekkage toeneemt met de lengte van het leidingwerk en het aantal gebruikte koppelingen.

De database onder deze inventarisatie is gebaseerd op storingen uit de periode 2009-2013. Sindsdien zijn de protocollen BRL SIKB 11000 en 11001 ingevoerd, waardoor het ontwerp, realisatie, beheer en onderhoud van bodemenergiesystemen sinds deze periode worden gereguleerd. In principe zouden bodemlussen sinds de invoering van de protocollen niet lek kunnen zijn, tenzij er sprake is van veroudering of aangraving. Hierover ontbreekt echter praktijkinformatie (STOWA, 2022). Het is dus aannemelijk dat de kans op lekkage van nieuwere systemen is afgenomen in vergelijking met de geanalyseerde systemen in (Bonte et al., 2013). Dit betekent dat de schade nog hoger moet zijn om werkelijk invloed te hebben op de uitkomst van de mkba.

⁵ Deze berekeningsmethode sluit aan bij het wiskundeconcept van een verwachtingswaarde. Wanneer iemand meedoet aan een loterij en een kans van 1 op 1.000 heeft om € 100,00 te winnen, dan is de verwachtingswaarde gelijk aan $1/1.000 \text{ maal } 100 = € 0,10$.

Risico op lekkage circulatievloeistof in de bodem bij een appartementencomplex

Het verschil tussen de scenarioresultaten van GBES en een lucht-waterwarmtepomp voor een 'appartementencomplex bestaande bouw' is ruim € 1.100.000 in het voordeel van GBES. Op basis van de 'een kans maal impact'-berekening zou een lekkage de Nederlandse samenleving in het horizontale deel bijna € 700 miljoen en in het verticale deel € 1,6 miljard schade moeten kosten om het alternatief (een lucht-waterwarmtepomp) beter te laten scoren dan GBES. Bij nieuwbouw is het verschil tussen GBES en een lucht-waterwarmtepomp ruim € 700.000. Hierbij zou de schade bij het horizontale deel ruim € 450 miljoen en in het verticale deel € 1 miljard moeten bedragen, wil de uitkomst van de mkba omslaan.

Risico op lekkage circulatievloeistof in de bodem bij een woning bestaande bouw

Het verschil tussen de scenario-resultaten van GBES en een lucht-waterwarmtepomp voor een bestaande bouw is ruim € 11.000 in het voordeel van GBES. Op basis van de 'kans maal impact'-berekening zou een lekkage de Nederlandse samenleving in het horizontale deel bijna € 7 miljoen schade en in het verticale deel € 16 miljoen schade moeten kosten om het alternatief (een lucht-waterwarmtepomp) beter te laten scoren dan GBES.

Interpretatie gevoeligheidsanalyse en risicoverkenning

Voor een appartementencomplex lijkt het zeer onwaarschijnlijk dat een mogelijke lekkage hogere schadekosten heeft dan hiervoor verkend. Voor een woning lijkt dit vooralsnog onwaarschijnlijk. Zoals hiervoor is toegelicht, zijn er protocollen opgesteld om de kans op lekkage en andere bodemrisico's te minimaliseren, en wordt er in veel systemen een circulatiemiddel gebruikt dat natuurlijk kan worden afgebroken in de bodem. In een scenario waarin op grotere schaal GBES wordt aangelegd en hierbij de protocollen niet goed worden gevolgd en er fouten worden gemaakt in de aanleg, zou er potentieel wel een grotere schadepost kunnen ontstaan. Uiteindelijk zal het in zo'n geval nodig zijn de schadepost te kwantificeren om deze af te kunnen wegen met de andere maatschappelijke kosten en baten.

Op basis van deze onzekerheidsverkenning concluderen we dat, wanneer systemen volgens de juiste protocollen worden aangelegd, het in ieder geval op kleinere schaal onwaarschijnlijk lijkt dat de lekkagerisico's van circulatievloeistof het mkba-saldo significant doet veranderen. Het mkba-resultaat achten we daarmee robuust. Vanwege het ontbreken van data over de potentiële economische schade, is het lastig om op voorhand te zeggen of de toepassing van GBES op grotere schaal tot een ander mkba-resultaat leidt. Hiervoor adviseren we om in zulke situaties de grondwaterisico's in de omgeving nader in beeld te brengen en te kwantificeren, zodat deze kwantitatief meegewogen kunnen worden.

In vergelijking met de gevoeligheidsanalyse lijken de kosten van bodemenergiesystemen zelf een grotere impact te hebben op het mkba-resultaat dan schade door lekkage van circulatievloeistof in de bodem.

Conclusie risicoanalyse

De investeringskosten van bodemenergiesystemen lijken voorlopig de grootste invloed te hebben op het resultaat van de mkba.

We adviseren bij de afweging van de aanleg van individuele systemen het risico op lekkage van circulatievloeistof in overweging mee te nemen, maar niet het resultaat van de mkba te laten beïnvloeden. Wel is het van belang dat systemen volgens de protocollen worden aangelegd.

We adviseren bij de afweging van de toepassing van systemen op grotere schaal (zoals bij aanleg van woonwijken) dit effect in overweging mee te nemen en waar mogelijk te kwantificeren (op mogelijke potentiële economische schade), zodat een afweging met de andere posten op de mkba mogelijk is.



6 Conclusie en aanbevelingen

6.1 Conclusie

Deze ‘mkba bodemenergie’ is de eerste mkba waarin op gebouwniveau de verschillende directe en externe effecten van bodemenergie zijn vergeleken met andere warmte-technieken. De resultaten uit deze mkba zijn alleen van toepassing op de vastgestelde casussen en kunnen gelden niet in algemene zin. Deze mkba is opgesteld met de gedachte om de technieken op een objectieve en vergelijkbare manier met elkaar te kunnen afwegen. Het is gebleken dat het complex is om dat op een goede manier te doen.

Er zijn twee typen bodemenergiesystemen: open en gesloten bodemenergiesystemen. Open bodemenergiesystemen (OBES) worden vooral toegepast bij grote warmte- en koudevraag, zowel utiliteitsbouw als appartementencomplexen. Gesloten bodemenergiesystemen (GBES) worden toegepast in vrijstaande woningen en gestapelde bouw, zoals appartementencomplexen. Dit onderscheid is meegenomen in de projectalternatieven per casus.

Voor bestaande bouw vormen de hr-ketel + airco (voor utiliteitsbouw) en hybride warmtepomp + airco voor woningbouw het nulalternatief, en bestaan de projectalternatieven uit een bodemenergiesysteem (OBES en/of GBES), de lucht-waterwarmtepomp en mt-net + airco. In de nieuwbouwcasussen vormt de lucht-waterwarmtepomp het projectalternatief, en bestaan de projectalternatieven uit een bodemenergiesysteem (OBES en/of GBES) en een mt-net + airco.

Binnen de mkba zijn alle relevante effecten in kaart gebracht en met elkaar vergeleken. Een kwantitatieve vergelijking is mogelijk voor de directe financiële effecten (eenmalige investeringskosten, herinvesteringen, kosten voor het onderhoud, kosten voor het energieverbruik en de resterende waarde van de bodembron), en de externe effecten CO₂-besparing, lekkage van koelmiddel en impact op het elektriciteitsnet. Daarmee geeft deze mkba een generiek inzicht in de verdeling van kosten en baten bij de verschillende technieken en casussen. Voor andere effecten is het door gebrek aan beschikbare kennis en data op dit moment niet mogelijk om deze in euro's uit te drukken, bijvoorbeeld voor het hitte-eilandeffect en bodemeffecten. Deze effecten zijn vooral relevant in de lokale omgeving, en zijn sterk locatieafhankelijk.

Sinds de publicatie van het oorspronkelijke rapport in september 2023 zijn er actuelere gegevens beschikbaar gekomen over de kosteninschatting van het onderhoud van gesloten bodemenergiesystemen (GBES). Deze gegevens zijn verwerkt in deze geüpdatete versie.

Bodemenergie in alle gevallen meest positieve mkba-resultaat

In alle vier de geanalyseerde casussen van zowel de bestaande bouw als van de nieuwbouw heeft bodemenergie het meest positieve resultaat. Over het algemeen is te zien dat bij de meeste casussen de investeringskosten van bodemenergie hoger liggen dan de andere technieken. Daar staat tegenover dat de kosten voor het energieverbruik gunstiger zijn. Daarnaast spelen ook de externe effecten een rol: met name het klimaateffect (door CO₂-besparing en lekkage koelmiddel) en - in kleinere mate - een lagere impact op het elektriciteitsnet leiden netto tot een positief resultaat in de mkba.

Effecten op hitte-eiland, geluidsoverlast en bodem nog niet kwantitatief

Voor een aantal effecten binnen deze mkba is er onderzoek gedaan om deze kwantitatief (in euro's) uit te drukken. Dit geldt voor het hitte-eiland en geluidsoverlast van warmtepompen. Het geluidseffect is in theorie nul als alle technieken onder de gestelde drempelwaardes blijven. Naar verwachting zal er in de praktijk echter toch sprake zijn van geluidsoverlast door (lucht-water)warmtepompen. Voor het hitte-eilandeffect geldt dat dit afhangt van de lokale omstandigheden. In gebieden waar het hitte-eilandeffect nu al sterker is, bijvoorbeeld in stedelijke gebieden met weinig groen, speelt dit effect een grotere rol dan in gebieden waar er minder sprake is van een hitte-eiland. Bij de kwalitatieve inschatting van het hitte-eilandeffect is te zien dat met name lucht-waterwarmtepompen en airco's hier een potentieel negatief effect op hebben, waarbij bodemenergiesystemen hier geen invloed op hebben.

Afweging bodemrisico's

De bodemeffecten hebben we kwalitatief ingeschat, maar er is op dit moment nog onvoldoende onderzoek/gegevens om kwantitatief een vergelijking te maken. Wel is er op basis van beschikbaar onderzoek in deze mkba is een risicoanalyse opgenomen over de lekkans van circulatievloeistof bij gesloten bodemenergiesystemen (GBES). Dit houdt in dat er is onderzocht hoe groot de schade zou moeten zijn om het resultaat van de mkba te wijzigen. Uit deze analyse komt naar voren dat het voor een appartementencomplex zeer onwaarschijnlijk is, en voor een woning onwaarschijnlijk is dat een mogelijke schade door lekkage van circulatievloeistof het resultaat van deze mkba significant doet veranderen. In andere woorden, is het positieve welvaartseffect van een GBES bij woning groter dan het risico op schade door lekkage van circulatievloeistof. Wel geldt dat voor de aanleg van GBES op grotere schaal, zoals bij woonwijken, de kans op lekkage toeneemt en de verhouding met de corresponderende schade moeilijker op voorhand in te schatten is.

We adviseren bij de afweging van de aanleg van individuele systemen het risico op lekkage van circulatievloeistof in overweging mee te nemen, maar niet het resultaat van de mkba te laten beïnvloeden. Wel is het van belang dat systemen volgens de protocollen worden aangelegd. We adviseren bij de afweging van de toepassing van systemen op grotere schaal (zoals bij aanleg van woonwijken) dit effect in overweging mee te nemen en waar mogelijk te kwantificeren (op mogelijke potentiële economische schade), zodat een afweging met de andere posten op de mkba mogelijk is.

Hoewel experts aangeven dat er in theorie risico's zijn die effect hebben op de waterkwaliteit van grondwater en oppervlaktewater, zijn er nog geen studies die een overzicht geven van bekende gevallen van de andere bodemeffecten met nadelige gevolgen, zoals verontreinigingen of vermenging van grondwater. Het is daarmee op basis van de huidige bekende kennis niet mogelijk om een kwantitatieve inschatting te maken wat het risico is dat deze effecten optreden en hoe groot de schade dan zou zijn. Bovendien speelt mee dat de effecten locatiespecifiek zijn, met name het risico op verspreiding van verontreiniging.

In het algemeen verwachten we dat - rekening houdend met zowel de kwantitatieve en kwalitatieve uitkomsten in deze mkba - onder voorwaarde dat er rekening wordt gehouden met de lokale omstandigheden en de aanleg en beheer van bodemenergiesystemen zorgvuldig gebeurt, de potentiële bodemrisico's naar verwachting niet opwegen tegen de baten voor de Nederlandse samenleving. Meer monitoring moet leiden tot meer inzicht in de potentiële schade wanneer een effect optreedt, en tot aanpassingen van de gegevens en conclusies van deze mkba.

Door klimaatverandering nemen positieve effecten van bodemenergie toe

Verder zal in de toekomst door klimaatverandering de koelvraag toenemen en de warmtevraag afnemen. Omdat bodemenergiesystemen een hoger rendement behalen voor koeling, zullen de positieve effecten van bodemenergiesystemen op het gebied van energieverbruik en klimaateffect verder toenemen ten opzichte van de andere alternatieven.

Bodemenergie heeft baat bij integrale afweging

Overkoepelend komt uit deze mkba naar voren dat de effecten van bodemenergie positiever uitpakken wanneer externe effecten, zoals klimaatimpact en impact op het elektriciteitsnet worden meegenomen in de integrale afweging tussen warmte- en koudetechnieken. Voor andere effecten, zoals het hitte-eilandeffect en bodemeffecten, is het van belang de lokale situatie nader te onderzoeken.

6.2 Aanbevelingen

Maatschappelijke effecten meenemen in besluitvorming

Neem in besluitvormingsprocessen rondom warmte- en koudetechnieken niet enkel de directe (financiële) effecten mee, maar neem waar mogelijk ook maatschappelijke effecten mee. Met deze studie geven we handvatten om dit per project in te schatten. Door het meenemen van deze maatschappelijke effecten is de maatschappelijk terugverdientijd veel korter dan de financiële terugverdientijd en kunnen de voor- en nadelen van warmte- en koudetechnieken beter afgewogen worden. Dit kan betekenen dat op individueel en op wijkniveau een andere uitkomst wenselijker is vanuit maatschappelijk perspectief.

Kosten van lokale effecten kwantificeren

Er is meer onderzoek nodig om de posten ‘bodemeffecten’, ‘geluidseffecten’ en ‘hite-eilandeffect’ kwantitatief mee te kunnen nemen in de vergelijking. Voor al deze drie effecten geldt dat ze lokaal optreden.

Voor bodemrisico's geldt dat er al diverse onderzoeken zijn gedaan naar de potentiële risico's. Echter hebben we in het kader van deze mkba geen studies kunnen vinden waarvan een schadepost bekend is. Voor de kwantificering van de kosten van bodemeffecten in de toekomst is het van belang dat er goede monitoring plaatsvindt, zodat eventuele effecten tijdig worden herkend en waar mogelijk worden gekwantificeerd, ook als de schade nul is.

Er is meer onderzoek nodig om de effecten van geluidshinder van warmtepompen in beeld te brengen en waar potentiële risico's liggen. Op dit moment geldt er een norm van 40 db. Het is van belang te monitoren of deze geluidsnorm inderdaad wordt gehaald of dat deze wordt overschreden. Voor zover bekend, spelen lokale bebouwingskenmerken, bevolkingsdichtheid, schaal en aantal bestaande (lucht-water)warmtepompen een rol. In gebieden waar een hoge bebouwingsdichtheid is en/of al veel bestaande warmtepompen zijn geplaatst, kan het potentieel tot geluidshinder bij omwonenden zorgen. Vanwege de potentiële (gezondheids-)risico's is ook hierbij monitoring en meer onderzoek van belang.

Ook voor het hitte-eilandeffect geldt dat er meer onderzoek nodig is, zowel voor de potentiële bijdrage van airco's en lucht-waterwarmtepompen als de impact van het hitte-eiland effect op de maatschappij. Dit kan lokaal bovendien sterk variëren. Als er meer informatie beschikbaar komt over de effecten van airco's en lucht-waterwarmtepompen, kan dit mogelijk ondersteuning geven voor beleidsmakers om maatregelen te nemen om de effecten te beperken. Een mogelijke toepassing is om het hitte-eilandeffect mee te nemen in het opstellen van wijkuitvoeringsplannen en zo lokaal rekening te houden met het (inperken van) het hitte-eilandeffect.

Blijven actualiseren

Naast het kwantificeren van lokale effecten bevelen we aan om ook de andere effecten te blijven actualiseren, zoals in deze update is gedaan. Zoals ook hierboven staat omschreven is er meer onderzoek nodig naar de maatschappelijke effecten van technieken en is kennis vaak diffuus. Door continu te blijven zoeken naar betere getallen en inzichten kan er meer grip worden gekregen op de maatschappelijke effecten, en daarmee de voor- en nadelen, van verschillende warmte- en koudesystemen.

7 Referenties

- aircowijs.nl. (lopend). Split airco. In: Aircowijs.nl.
- Arcadis. (2008). *Groene daken Rotterdam: maatschappelijke kosten-batenanalyse*.
- BodemenergieNederland. (2023). Soorten bodemenergie. In: Branchevereniging Bodemenergie Nederland.
- Bonte, M., Mesman, G., Kools, S., Meerkerk, M., Schriks, M., & Kooiman, J. W. (2013). *Effecten en risico's van gesloten bodemenergiesystemen*.
- Bonte, M., Stuyfzand, P. J., Van den Berg, G. A., & Hijnen, W. A. M. (2011). Effects of aquifer thermal energy storage on groundwater quality and the consequences for drinking water production: a case study from the Netherlands. *Water Science & Technology*, 2011. <https://iwaponline.com/wst/article-abstract/63/9/1922/16787/Effects-of-aquifer-thermal-energy-storage-on?redirectedFrom=fulltext>
- CE Delft. (2016). *Een klimaatneutrale warmtevoorziening voor de gebouwde omgeving : update 2016*.
- CE Delft. (2023a). *Handboek Milieuprijzen 2023. Methodische onderbouwing van kengetallen gebruikt voor waardering van emissies en milieu-impacts*.
- CE Delft. (2023b). *Impact van de warmtetransitie op het lokale elektriciteitsnet*.
- CE Delft. (lopend). Alle warmtetechnieken voor bewoners. In (Vol. 2021).
- CPB, & PBL. (2013). *Algemene leidraad voor maatschappelijke kosten-batenanalyse*.
- Department of Energy & Climate Change. (2014). *Impacts of Leakage from Refrigerants in Heat Pumps*.
- Hartog, N., Drijver, B., Dinkla, I., & Bonte, M. (2013). *Field assessment of the impacts of Aquifer Thermal Energy Storage (ATES) systems on chemical and microbial groundwater composition* European Geothermal Conference, Pisa, Italy. https://www.researchgate.net/publication/265601612_Field_assessment_of_the_impacts_of_Aquifer_Thermal_Energy_Storage_ATESsystems_on_chemical_and_microbial_groundwater_composition
- Kluck, K., Klok, L., Solcerová, A., Kleerekoper, L., Wilschut, L., Jacobs, C., & Loeve, R. (2020). *De hittebestendige stad: een koele kijk op de inrichting van de buitenruimte*.
- KWR. (2022). *Invloed warmtenetten op temperatuur drinkwater*.
- Ministerie van BZK. (2022). *Kamerbrief namens de minister voor Klimaat en Energie, d.d. 17 mei 2022 m.b.t. Normering hybride warmtepompen*. Tweede Kamer der Staten-Generaal.
- Ministerie van Financiën. (2015). *Rapport Werkgroep Discontovoet 2015*.
- Netbeheer Nederland. (2022). *Netimpact van warmtealternatieven. Vuistregels voor gemeentelijke planvorming*.
- nieuwecvketel.be. (lopend). *Stille CV-ketel*. nieuwecvketel.be. <https://www.nieuwecvketel.be/verwarmingsketel-kopen/stille-verwarmingsketel/>
- PBL. (2021). *Functioneel Ontwerp Vesta MAIS 5.0*.
- PBL. (2022). *Klimaat- en Energieverkenning (KEV) 2022*.
- Rafiee, A., Dias, E., & Koomen, E. (2016). Local impact of tree volume on nocturnal urban heat island: A case study in Amsterdam. *Urban forestry & urban greening*, 16. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S161886671600008X?via%3Dihub>
- Rijksoverheid. (2021, 23-03-2021). *Geluidseisen warmtepompen en airco's worden aangescherpt*. Rijksoverheid. <https://www.rijksoverheid.nl/actueel/nieuws/2021/03/23/geluidseisen-warmtepompen-en-airco%E2%80%99s-worden->



[aangescherpt#:~:text=Per%201%20april%202021%20worden,geluid%20veroorzaken%20bij%20de%20buren.](#)

RVO. (2017). *Referentie gebouwen BENG (Bijna EnergieNeutrale Gebouwen)*.

RVO. (2022). Uniforme maatlat rekenmodel 5.03 - 2022 05 30. In.

Sommer, W., Drijver, B., Verburg, R., Slenders, H., De Vries, E., Dinkla, I., Leusbrock, I., & Grotenhuis, T. (2013). *Combining shallow geothermal energy and groundwater remediation* European Geothermal Congress, Pisa, Italy.

<https://edepot.wur.nl/264023>

STOWA. (2022). *Deltafact Effecten van bodemenergiesystemen op de grondwaterkwaliteit*.

STOWA. <https://www.stowa.nl/deltafacts/waterkwaliteit/kennisimpuls-waterkwaliteit/effecten-van-bodemenergiesystemen-op-de#2498>

TNO. (2021). *Energievraag van ruimtekoeling in woningen*.

Van Vliet, M., Huizer, S., Marsman, A., van der Schans, M., & Zaadnoordijk, W. J. (2022). *Kortsluitstroming bij doorboringen*.

Warmtepompberekenen.nl. (2023). Koudemiddelen. In.

Zuurbier, K. G., Hartog, N., Valstar, J., Post, V. E. A., & Van Breukelen, B. M. (2013). The impact of low-temperature seasonal aquifer thermal energy storage (SATES) systems on chlorinated solvent contaminated groundwater: Modeling of spreading and degradation. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2013.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169772213000144?via%3Dihub>