

TNO PUBLIEK

Princetonlaan 6
3584 CB Utrecht
Postbus 80015
3508 TA Utrechtwww.tno.nlT +31 88 866 42 56
F +31 88 866 44 75**TNO-rapport****TNO 2021 R12317****Berekening duurzaamheid van
warmtebronnen**Datum 1 december 2021
Auteur(s) D. Dinkelman, M. MenkveldExemplaarnummer
Oplage
Aantal pagina's 17
Aantal bijlagen 0
Opdrachtgever
Projectnaam WarmingUP
Projectnummer 060.43190

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 2021 TNO

TNO PUBLIEK

Inhoudsopgave

1	Inleiding	3
2	Rekenmethode	4
2.1	Rekenregels elektriciteit o.a. voor hulpenergie	4
3	Warmtebronnen: omschrijving, berekening en aannames	6
3.1	WKK zonder elektriciteitsderving	6
3.2	WKK met elektriciteitsderving (aftapwarmte) (incl. AVI)	7
3.2.1	Aftapwarmte	7
3.2.2	AVI	8
3.3	Ketel	8
3.3.1	Aardgas	9
3.3.2	Biomassa	9
3.4	Restwarmte (zonder elektriciteitsproductie)	10
3.5	Warmte- en koude bron: ondiepe bodemenergie (met warmtepomp)	10
3.6	Warmte- en koude bron: oppervlaktewater (met WKO en warmtepomp)	11
3.7	Warmte- en koude bron: aardwarmte (geothermie)	14
4	Resultaten en discussie	17

1 Inleiding

Dit rapport is opgesteld als bijlage 1 bij de Factsheet Duurzaamheid Geothermie (Dinkelman et al., 2021). In deze factsheet is de CO₂-emissiefactor van verschillende warmtebronnen berekend om deze te vergelijken met de CO₂-emissiefactor van geothermie. Hiervoor is de rekenmethodiek beschreven in Harmelink (2019, update 2020) gebruikt. De berekeningen en aannames zijn beschreven in dit rapport.

2 Rekenmethode

De CO₂ emissiefactoren van de verschillende warmtebronnen zijn berekend volgens de rekenmethodiek beschreven in Harmelink (2019, update 2020)¹. De rekenmethodiek is conform de eisen van de Warmtewet voor de rapportageverplichting over de duurzaamheid van veelgebruikte bronnen in een warmtenet.

2.1 Rekenregels elektriciteit o.a. voor hulpenergie

Deze sectie beschrijft de rekenregels voor de emissiefactor van elektriciteit. De emissiefactor van elektriciteit wordt gebruikt bij veel warmtebronberekeningen voor het elektriciteitsgebruik door hulpenergie (pompen etc.). De formules/rekenregels zijn rechtstreeks overgenomen uit Harmelink (2019, update 2020).

Tabel 1 laat de emissiefactoren en standaardwaarden (incl. referentie) zien voor de verschillende jaartallen. Deze zijn gebruikt in de warmtebron berekeningen.

De volgende formules/rekenregels zijn van toepassing voor de berekening van elektriciteit voor o.a. hulpenergie (sectie 7.2 in Harmelink (2019, update 2002):

Primair fossiele energie-inzet elektriciteit landelijk net [GJp/GJe] = $[1 / \text{Landelijke rendement elektriciteitsproductiepark "Integrale methode" (Bovenwaarde) (\%)}]$

CO₂-emissiefactor elektriciteit landelijk net [kg/GJp] = $(\text{CO}_2\text{-emissiefactor "integrale methode" [kg CO}_2\text{/kWh]} * 1000 * \text{Landelijke rendement elektriciteitsproductiepark "Integrale methode" (Bovenwaarde) (\%)} / 3,6)$

CO₂-emissie (kg) = $(\text{Elektriciteitsgebruik voor hulpenergie [GJe]} - \text{Hernieuwbare elektriciteitsproductie fysiek gekoppelde aan het warmtenet [GJe]} * \text{Primair fossiele energie-inzet elektriciteit landelijk net} * \text{CO}_2\text{-emissiefactor elektriciteit landelijk net [kg/GJp])$

Tabel 1 - Emissiefactoren en standaardwaarden.

Emissiefactoren en standaardwaarden	Waarde	Eenheid	Referentie
Emissiefactor elektriciteit 2015	0.53	kg/kWh	<i>Integrale methode, Klimaat- en Energieverkenning 2019, p.234</i>
Emissiefactor elektriciteit 2020	0.30	kg/kWh	<i>Integrale methode, Klimaat- en Energieverkenning 2019, p.234</i>
Emissiefactor elektriciteit 2025	0.21	kg/kWh	<i>Integrale methode, Klimaat- en Energieverkenning 2021, p.235</i>
Emissiefactor elektriciteit 2030	0.09	kg/kWh	<i>Integrale methode, Klimaat- en Energieverkenning 2021, p.235</i>
Emissiefactor elektriciteit 20XX	0	kg/kWh	<i>Aanname, 20XX is het jaar waarin de elektriciteit volledig duurzaam wordt opgewekt</i>

¹ Harmelink (2019, update 2020). Duurzaamheid van warmte- en koudelevering. Voorstel voor de inhoud van de rapportageverplichting onder de Warmtewet.

Rendement op primair fossiel 2015	0.462		<i>Integrale methode, Klimaat- en Energieverkenning 2021, op bovenwaarde, uit technische bijlage</i>
Rendement op primair fossiel 2020	0.705		<i>Integrale methode, Klimaat- en Energieverkenning 2021, op bovenwaarde, uit technische bijlage</i>
Rendement op primair fossiel 2025	1.015		<i>Integrale methode, Klimaat- en Energieverkenning 2021, op bovenwaarde, uit technische bijlage</i>
Rendement op primair fossiel 2030	1.672		<i>Integrale methode, Klimaat- en Energieverkenning 2021, op bovenwaarde, uit technische bijlage</i>
Rendement op primair fossiel 20XX	3.455 ²		<i>Integrale methode, Klimaat- en Energieverkenning 2021, op bovenwaarde, uit technische bijlage</i>
CO ₂ -emissiefactor landelijk net 2015	68.0	kg/GJp	<i>Volgens berekening Harmelink (2020) hs 7.2</i>
CO ₂ -emissiefactor landelijk net 2020	58.8	kg/GJp	<i>Volgens berekening Harmelink (2020) hs 7.2</i>
CO ₂ -emissiefactor landelijk net 2025	59.2	kg/GJp	<i>Volgens berekening Harmelink (2020) hs 7.2</i>
CO ₂ -emissiefactor landelijk net 2030	41.8	kg/GJp	<i>Volgens berekening Harmelink (2020) hs 7.2</i>
CO ₂ -emissiefactor landelijk net 20XX	0.0	kg/GJp	<i>Volgens berekening Harmelink (2020) hs 7.2</i>
Emissiefactor aardgas 2020 - <i>onderwaarde</i>	56.4	kg/GJ	<i>Zijlema (2021)³</i>
Emissiefactor aardgas 2020 - <i>bovenwaarde</i>	50.8	kg/GJ	<i>Berekend met omrekenfactor in Harmelink (2020) van 1.11</i>
Rendement gasketel - <i>onderwaarde</i>	0.89	%	<i>TNO expert</i>
Rendement gasketel - <i>bovenwaarde</i>	0.8	%	<i>TNO expert</i>

² Dit is een waarde voor 2040 uit de KEV2021. Als alle elektriciteit met hernieuwbare bronnen wordt opgewekt dan doet deze primaire factor er niet meer toe, want die wordt vermenigvuldigd met nul emissie.

³ Aardgas uit Nederland betekend het gemiddelde van 112 gas velden in NL en het geïmporteerde gas uit België voor 2021. Zijlema (2020). Berekening van de standaard CO₂-emissiefactor aardgas t.b.v. nationale monitoring 2021 en emissiehandel 2021 Van: https://www.rvo.nl/sites/default/files/2021/05/Berekening%20van%20de%20standaard%20CO2-emissiefactor%20aardgas%202021_0.pdf

3 Warmtebronnen: omschrijving, berekening en aannames

De omschrijving van de warmtebronnen en de rekenregels zijn soms rechtstreeks overgenomen uit Harmelink (2019, update 2020). De parameter aannames in de volgende secties zijn de aannames voor het jaartal 2020.

3.1 WKK zonder elektriciteitsderving

Hierbij gaat het om gasmotoren en andere vormen van warmtekrachtinstallaties, waarbij de elektriciteitsproductie niet afneemt door het gebruik van warmte.

Gebruikte formule:

$$\text{CO}_2\text{-emissie (kg)} = (\text{Brandstofinzet voor WKK [GJp]} * \text{CO}_2\text{-emissiefactor brandstof WKK [kg/GJp]} - (\text{Elektriciteitsproductie door WKK [GJe]} * \text{Primair fossiele energie-inzet elektriciteit landelijk net [GJp/GJe]} * \text{CO}_2\text{-emissiefactor elektriciteit landelijk net [kg/GJp]})$$

Parameter aannames:

Parameter	Eenheid	Waarde	Opmerking
Brandstofinzet voor WKK	GJp	2.2	Zie Figuur 1
CO ₂ -emissiefactor brandstof WKK	kg/GJp	50.8	CO ₂ -emissiefactor aardgas op bovenwaarde
Elektriciteitsproductie door WKK	GJe	0.74	Zie Figuur 1
Primair fossiele energie-inzet elektriciteit landelijk net	GJp/GJe	1.42	Tabel 1, (1/rendement op primair fossiel)
CO ₂ -emissiefactor elektriciteit landelijk net	kg/GJp	58.8	Tabel 1

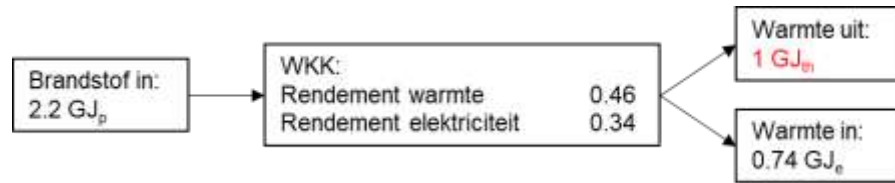
Brandstofinzet voor WKK [GJp] = 2.2

CO₂-emissiefactor brandstof WKK [kg/GJp] = 50.8 (CO₂ emissiefactor aardgas op bovenwaarde)

Elektriciteitsproductie door WKK [GJe] =

Primair fossiele energie-inzet elektriciteit landelijk net [GJp/GJe] =

CO₂-emissiefactor elektriciteit landelijk net [kg/GJp] =



Figuur 1 – Berekening benodigde hoeveelheid brandstof in WKK in GJp. Rendementen zijn de gemiddelden voor warmte en elektriciteit in WKK na 2006 voor hoge temperatuur (HT, > 50 °C) van 20 kW – 25 MW uit de NEN7125 (Figuur 2).

Bouwjaar WKK	Tot en met 2006		Na 2006		
	ϵ_{warmte} (-)	ϵ_{elektr} (-)	ϵ_{warmte} (-)	ϵ_{warmte} (-)	ϵ_{elektr} (-)
	-	-	LT ^a	HT	-
2 kW < Pe ≤ 20 kW	0,57	0,26	0,57	0,55	0,28
20 kW < Pe ≤ 200 kW	0,54	0,27	0,51	0,49	0,30
200 kW < Pe ≤ 500 kW	0,50	0,32	0,52	0,50	0,32
500 kW < Pe ≤ 1 000 kW	0,44	0,35	0,46	0,44	0,35
1 000 kW < Pe ≤ 25 MW	0,40	0,36	0,41	0,39	0,37

^a Voor indeling in LT of HT, zie tabel 7.
Het van toepassing zijn van LT behoort bijvoorbeeld met de ontwerpgegevens te worden aangetoond.

Figuur 2 – Thermisch en elektrisch omzettinggetal van WKK (forfaitaire waarden). Uit NEN7125, tabel 9.

3.2 WKK met elektriciteitsderving (aftapwarmte) (incl. AVI)

Dit zijn gasmotoren en andere vormen van warmtekrachtinstallaties waarbij bewust de keuze wordt gemaakt om de elektriciteitsproductie te laten afnemen om zo meer warmte te kunnen leveren. Dit is elektriciteitsderving en wordt vaak aangeduid als een aftapcentrale. Deze gedeerde elektriciteit moet dan ergens anders worden opgewekt.

Een afvalverbrandingsinstallatie (AVI) valt hier ook onder volgens de NEN7125 normen, en is in dit geval als voorbeeld genomen voor de berekening. In het geval van de afvalverbrandingsinstallatie wordt dan rekening gehouden met een hernieuwbare fractie van het afval.

3.2.1 Aftapwarmte

Gebruikte formule

$$\text{CO}_2\text{-emissie (kg)} = \text{Warmteproductie door aftap [GJth]} * \text{Elektriciteitsverliesfactor [GJe/GJth]} * \text{Primair fossiele energie-inzet elektriciteit landelijk net [GJp/GJe]} * \text{CO}_2\text{-emissiefactor brandstof af-tapcentrale of AVI [kg/GJp]}$$

Parameter aannames:

Parameter	Eenheid	Waarde	Opmerking
CO ₂ -emissiefactor brandstof WKK	kg/GJp	50.8	CO ₂ emissiefactor aardgas op bovenwaarde, Tabel 1

Elektriciteitsverliesfactor	GJe/GJth	0.18	Omzettingsfactor elektrisch/thermisch uit NEN7125, sectie 7.3.4.6.
Primair fossiele energie-inzet elektriciteit landelijk net	GJp/GJe	1.42	Tabel 1, (1/rendement op primair fossiel)

3.2.2 AVI

Gebruikte formule

$$\text{CO}_2\text{-emissie (kg)} = \text{Warmteproductie door aftap [GJth]} * \text{Elektriciteitsverliesfactor [GJe/GJth]} * \text{Primair fossiele energie-inzet elektriciteit landelijk net [GJp/GJe]} * \text{CO}_2\text{-emissiefactor brandstof af-tapcentrale of AVI [kg/GJp]}$$

Voor afval kan de CO₂-emissiefactor voor het meest recente jaar berekend worden met gegevens uit RIVM. Voor 2018 is de berekening: CO₂-emissiefactor afval (kg) = (Amount of fossil carbon (Gg) 1000 * 44/12) / Total waste incinerated (TJ) = (811 * 1000 * 44/12)/76.311= 39 kg CO₂/GJ (in 2017). Dit betreft berekening op onderste verbrandingswaarde. Op bovenwaarde is de CO₂-emissiefactor een factor 1,07 lager (bijlage 1 uit Harmelink, 2019). De CO₂-emissiefactor op bovenwaarde is dan 36 kg/GJp

Parameter aannames:

Parameter	Eenheid	Waarde	Opmerking
Hernieuwbare fractie uit afval	%	0.53	Data 2017, RIVM rapport tabel 7.6 ⁴
Elektriciteitsverliesfactor	GJe/GJth	0.18	Omzettingsfactor elektrisch/thermisch uit NEN7125, sectie 7.3.4.6.
Primair fossiele energie-inzet elektriciteit landelijk net	GJp/GJe	1.42	Tabel 1, (1/rendement op primair fossiel)
CO ₂ -emissiefactor van de brandstof die de AVI in gaat	kg/GJp	36	Data 2017, RIVM rapport tabel 7.6 ⁵

Tabel 2 - Compositie van verbrand afval. RIVM.

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017
Total waste incinerated (Gg)	2,780	2,913	4,896	5,503	6,459	7,564	7,796	7,627
Total waste incinerated (TJ)	22,746	27,903	51,904	55,058	63,818	75,299	77,392	76,311
Energy content (MJ/kg)	8.2	9.6	10.6	10.0	9.9	10	9,9	10.0
Fraction biomass (energy %)	58.2	55.2	50.4	47.8	53.1	54.2	53,8	53,1
Amount of fossil carbon (Gg)	164	221	433	561	675	780	809	811
Amount of biogenic carbon (Gg)	544	561	938	909	1,172	1,381	1,412	1,383

3.3 Ketel

Voor de berekening van de CO₂-emissie van een ketel is de berekening gedaan voor een ketel op aardgas en voor een ketel gestookt met biomassa.

⁴ <https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2019-0020.pdf>

⁵ <https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2019-0020.pdf>

3.3.1 Aardgas

Naast CV-ketels op aardgas worden ketels onder andere ingezet om de piekvraag op te vangen in een warmtenet. In deze berekening is uit gegaan van een ketel op aardgas.

Gebruikte formule:

$$\text{CO}_2\text{-emissie (kg)} = \text{Brandstofinzet [GJp]} * \text{CO}_2\text{-emissiefactor brandstofinzet ketel [kg/GJ]}$$

Parameter aannames:

Parameter	Eenheid	Waarde	Opmerking
Brandstofinzet in ketel	GJp	1.25	1 GJth/ 80% 80% rendement van een ketel (bovenwaarde), Tabel 1
CO ₂ -emissiefactor brandstofinzet in ketel	kg/GJ	50.8	Emissiefactor aardgas 2020 (bovenwaarde), Tabel 1

3.3.2 Biomassa

Ook is een berekening gedaan voor een ketel volledig op biomassa. Voor productie van warmte met ketels gestookt met hernieuwbare brandstoffen, hanteert het PMHE⁶ bij inzet van biomassa een output methode voor de situaties waarin de installatie warmte produceert voor derden. Dit betekent dat als hernieuwbare energieproductie wordt aangemerkt: alle warmte geproduceerd met de ketel, gestookt op biomassa.

Voor het rapporteren van emissies van biomassa gelden de volgende regels⁷:
Onder het Klimaatverdrag moeten de emissies van biomassa als memo-item worden gerapporteerd met behulp van de vermelde emissiefactoren. Voor vaste biomassa is dit 109,6 kgCO₂/GJ.

Onder het Kyoto Protocol geldt voor biomassa altijd een emissiefactor van nul. Onder EU ETS geldt voor biomassa een emissiefactor van nul, met uitzondering van vloeibare biomassa waar aanvullende criteria gelden om een emissiefactor van nul te mogen hanteren.

Er wordt gerekend met de primair fossiele energiefactor van ingezette brandstoffen berekend conform de NEN 7125. De primair fossiele energiefactor is 1 voor fossiele brandstoffen zoals aardgas, olie en kolen en voor duurzame biomassa is deze 0.

Gebruikte formule:

$$\text{CO}_2\text{-emissie (kg)} = \text{Brandstofinzet [GJp]} * \text{CO}_2\text{-emissiefactor brandstofinzet ketel [kg/GJ]}$$

⁶ Protocol Monitoring Hernieuwbare Energie. RVO (2015).

⁷ Zijlema (2020). Nederlandse lijst van energiedragers en standaard CO₂ emissiefactoren, versie januari 2020.

Parameter aannames:

Parameter	Eenheid	Waarde	Opmerking
Brandstofinzet in ketel	GJp	1.25	1 GJth/ 80% 80% rendement van een ketel (bovenwaarde), Tabel 1
CO ₂ -emissiefactor brandstofinzet in ketel	kg/GJ	0	Volgt uit primair fossiele energiefactor uit NEN7125

3.4 Restwarmte (zonder elektriciteitsproductie)

Bij het gebruik van restwarmte als warmtebron wordt als uitgangspunt genomen dat alle energie (elektriciteit) die nodig is om de restwarmte uit te koppelen en de warmte te leveren aan de eindgebruiker aan de restwarmte wordt toegeschreven. De standaard waarde voor de uitkoppeling van restwarmte is 0.1 GJe/GJth (NTA8800).

Gebruikte formule:

$$\text{CO}_2\text{-emissie (kg)} = \text{Elektriciteitsgebruik uitkoppeling [GJe]} * \text{Primair fossiele energie-inzet elektriciteit landelijk net [GJp/GJe]} * \text{CO}_2\text{-emissie elektriciteit landelijk net [kg/GJp]}$$

Parameter aannames:

Parameter	Eenheid	Waarde	Opmerking
Elektriciteitsgebruik uitkoppeling	GJe/GJth	0.1	NTA8800
CO ₂ -emissiefactor elektriciteit landelijk net	kg/GJp	58.8	Tabel 1
Primair fossiele energie-inzet elektriciteit landelijk net	GJp/GJe	1.42	Tabel 1, (1/rendement op primair fossiel)

3.5 Warmte- en koude bron: ondiepe bodemenergie (met warmtepomp)

Onder ondiepe bodemenergie wordt de seizoensopslag van warmte en koude in de ondiepe ondergrond (niet dieper dan 500 m) verstaan, dit wordt ook wel WKO (Warmte en Koude Opslag) genoemd.

Voor het gebruik van een WKO in een (hoge temperatuur) warmtenet is een warmtepomp nodig om de temperatuur uit de bodem (max. 25 graden) op te waarden tot de gewenste temperatuur; in deze berekening: 70°C. Voor de warmtepomp, maar ook voor het transporteren van het water (circulatie in het gebouw en in de putten in de ondergrond) en de regeneratie van de bron (voor de balans, dit kan met aquathermie) is elektriciteit nodig.

In deze berekening gaan we er vanuit dat de WKO alleen warmte levert en hierdoor worden de emissies door het elektriciteitsgebruik gealloceerd aan de geleverde warmte.

Regeneratie van de bron: niet

Gebruikte formule:

$\text{CO}_2\text{-emissie warmte (kg)} = (\text{Elektriciteitsgebruik warmtepomp [GJe]} * \text{Warmte geleverd via de warmtepomp [GJth]} + \text{Elektriciteitsgebruik pompenergie voor warmte [GJe]} * \text{Warmte onttrokken aan de bodem [GJth]}) * \text{Primair fossiele energie-inzet Elektriciteit landelijk net [GJp/GJe]} * \text{CO}_2\text{-emissiefactor brandstof elektriciteitsproductie landelijk net [kg/GJp]}$.

Parameter aannames:

Parameter	Eenheid	Waarde	Opmerking
Warmte onttrokken aan de bodem (Q_{bodem})	GJth	0.67	$Q_{\text{bodem}} = 1 - (1/\text{COP}_{\text{wp}})$ $\text{COP}_{\text{wp}} = 0.5 * (T_{\text{wp levering}} + 273)/(T_{\text{wp levering}} - T_{\text{bron}})$
Elektriciteitsgebruik voor de warmtepomp (E_{wp})	GJe/GJth	0.33	$E_{\text{wp}} = 1/\text{COP}_{\text{wp}}$
Elektriciteitsgebruik voor rondpompen van warmte ($E_{\text{bronnepomp}}$)	GJe/GJth	0.02	$\text{COP}_{\text{bronnepomp}} = 30$ (aanname) $E_{\text{bronnepomp}} = Q_{\text{bodem}} / \text{COP}_{\text{bronnepomp}}$
CO ₂ -emissiefactor elektriciteit landelijk net	kg/GJp	58.8	Tabel 1
Primair fossiele energie-inzet elektriciteit landelijk net	GJp/GJe	1.42	Tabel 1, (1/rendement op primair fossiel)



Figuur 3 - Afbeelding van rekensheet voor WKO met warmtepomp.

3.6 Warmte- en koude bron: oppervlaktewater (met WKO en warmtepomp)

Bij aquathermie wordt oppervlaktewater gebruikt voor de productie van warmte. Hiervoor is ook een warmtepomp nodig om te temperatuur op het gewenste niveau te krijgen (70 °C).

Dezelfde rekenregels als voor ondiepe bodemenergie zijn aangehouden, met aquathermie als balansvoorziening.

Gebruikte formule:

$\text{CO}_2\text{-emissie warmte (kg)} = (\text{Elektriciteitsgebruik warmtepomp [GJe]} * \text{Warmte geleverd via de warmtepomp [GJth]} + \text{Elektriciteitsgebruik pompenergie voor warmte [GJe]} * \text{Warmte onttrokken aan de bodem [GJth]}) + \text{Elektriciteitsgebruik pompenergie voor balansvoorziening [GJe]} * \text{Warmte onttrokken aan de bodem}$

[GJth]) * Primair fossiele energie-inzet Elektriciteit landelijk net [GJp/GJe] * CO₂-emissiefactor brandstof elektriciteitsproductie landelijk net [kg/GJp]

Parameter aannames:

Parameter	Eenheid	Waarde	Opmerking
Warmte onttrokken aan de bodem (Q_{bodem})	GJth	0.69	$Q_{\text{bodem}} = 1 - (1/\text{COP}_{\text{wp}})$ $\text{COP}_{\text{wp}} = 0.5 * (T_{\text{wp levering}} + 273) / (T_{\text{wp levering}} - T_{\text{bron}})$ $T_{\text{bron}} = 13 + (\text{fractie van totale balansvoorziening}^8 (75\%) * 100/25)$
Elektriciteitsgebruik voor de warmtepomp (E_{wp})	GJe/GJth	0.31	$E_{\text{wp}} = 1/\text{COP}_{\text{wp}}$
Elektriciteitsgebruik voor rondpompen van warmte ($E_{\text{bronnepomp}}$)	GJe/GJth	0.02	$\text{COP}_{\text{bronnepomp}} = 30$ (aanname) $E_{\text{bronnepomp}} = Q_{\text{bodem}} / \text{COP}_{\text{bronnepomp}}$
Elektriciteitsgebruik voor balansvoorziening (E_{balans})	GJe/GJth	0.01	$\text{COP}_{\text{balans}} = 60$ (aanname) $E_{\text{balans}} = \text{Fractie van totale balansvoorziening} (75\%) * \text{COP}_{\text{balans}}$
CO ₂ -emissiefactor elektriciteit landelijk net	kg/GJp	58.8	Tabel 1
Primair fossiele energie-inzet elektriciteit landelijk net	GJp/GJe	1.42	Tabel 1, (1/rendement op primair fossiel)

Omdat er vele configuraties voor aquathermie bestaan⁹, is gekeken naar de meest toepasselijke configuratie voor aquathermie in een 70-40°C warmtenet. Hiervoor zijn experts van Deltares gevraagd om mee te kijken naar de berekening voor aquathermie

Deltares:

Voor de bepaling van de CO₂-uitstoot van een aquathermiesysteem, is uitgegaan van toepassing in de bestaande bouw aangesloten op een warmtenet die met 70°C gevoed wordt. Verder is de aanname gedaan dat de WKO zomers gevoed wordt met warmte uit oppervlaktewater met een gemiddelde temperatuur van 18°C (Figuur 4).

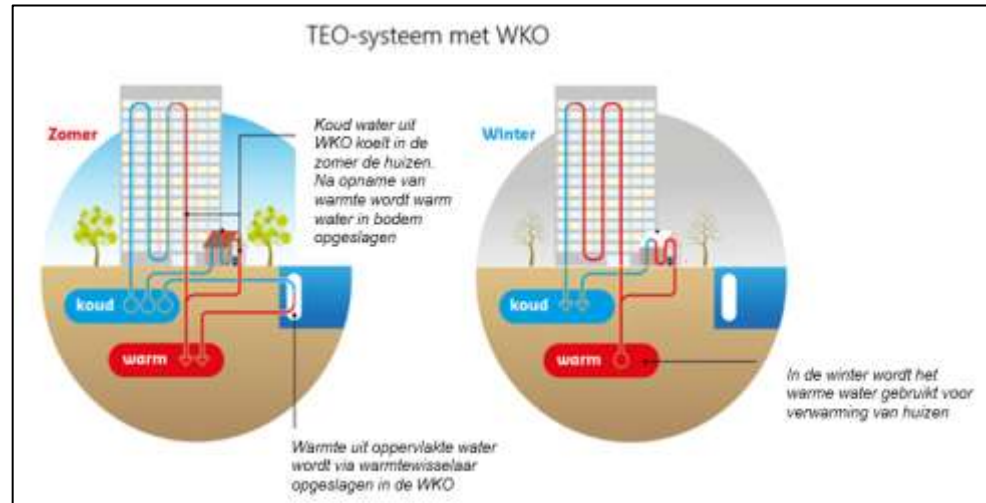
Het elektriciteitsverbruik van de warmtepompen is veruit de grootste bron van CO₂-uitstoot voor een aquathermiesysteem. Verbruik voor pompen om het water door warmtewisselaars te voeren, en voor het voeden van de WKO's is ordes kleiner. Verder gaan we uit van de CO₂-uitstoot voor het invoeden van aquathermie warmte in het warmtenet. Piekvoorziening met een andere bron is hierin niet meegenomen.

⁸ Tussen de 0 en 100%, bij woningen ca. 75%.

⁹ Dehens et al. (2020). Configuraties voor aquathermie. De afwegingen boven water. STOWA ISBN 978.90.5773.875.3. Van:

<https://www.stowa.nl/sites/default/files/assets/PUBLICATIES/Publicaties%202020/2020-13%20Configuratie%20Aquathermie/STOWA%202020-13%20Configuraties%20aquathermie.pdf>

In bestaande bouw zal dit grootschalig worden toegepast doormiddel van industriële warmtepompen die optimaal ontworpen worden op de gewenste temperatuursprong van 18°C naar 70°C. Hierdoor is een hoge systeemfactor mogelijk. De seizoensgemiddelde aanvoertemperatuur naar de condensor van de warmtepomp wordt geschat op 12°C.



Figuur 4 - Schematische weergave TEO systeem met WKO. Bron: Deltares.

De theoretisch maximale COP wordt hiermee $COP_{verwarming} = \frac{T_{warm}}{T_{warm} - T_{koud}} = \frac{343}{58} = 5.9$. In de praktijk is dit lager door systeemverliezen. Bij industriële warmtepompen wordt 70% hiervan gehaald, dus 4.1. Voor de berekening gaan we uit van een COP van 4. Dit leidt, met de gegeven CO₂-uitstoot van de elektriciteitsmix tot de volgende hoeveelheden CO₂-uitstoot, uitgewerkt in een casus grootschalige aquathermie Nijmegen¹⁰

Tabel 3 - Overzicht aquathermie CO₂-emissiefactor berekening voor de casus grootschalige aquathermie Nijmegen10. Bron: Deltares.

CO ₂ uitstoot elektriciteit en aardgas (waarden uit PBL)	
bron	CO ₂ uitstoot [megaton/PetaJoule th en el]
aardgas	0.05
elek 2019	0.10
elek 2030	0.04
CO ₂ uitstoot per warmtebron	
warmtebron	CO ₂ uitstoot [megaton CO ₂ /PetaJoule th]
aardgaswarmte	0.051 megaton CO ₂ /PJ
TEO systeem 2020	0.025 megaton CO ₂ /PJ
TEO systeem 2030	0.011 megaton CO ₂ /PJ
TEO systeem 2050	0 megaton CO ₂ /PJ

Dit voorbeeld van Deltares komt goed overeen met de berekening die in deze studie is gedaan (Figuur 5). De COP is lager berekend dan de COP aangegeven

¹⁰ <https://www.warmingup.info/documenten/grootschalige-aquathermie-realistische-warmteoptie.pdf>

door Deltares, 3.1 i.p.v. 4. Ook zijn iets andere waarden voor de emissiefactoren voor elektriciteit gebruikt bij de berekening van Deltares. Deze studie houdt de waarden uit de KEV2021 aan.

De uitkomsten van de totale CO₂ emissie voor 2020, 2030 en 20XX/2050 van beide studies zijn vergelijkbaar:

		Deltares	TNO
2020	kg/GJ	25	29
2030	kg/GJ	11	9
20XX/2050	kg/GJ	0	0



Figuur 5 - Afbeelding van rekensheet voor WKO met aquathermie en warmtepomp

3.7 Warmte- en koude bron: aardwarmte (geothermie)

Geothermie omvat de winning van aardwarmte op een diepte > 500 m. De gewonnen warmte kan rechtstreeks ingezet worden voor de productie van ruimteverwarming en warm tapwater. Uitgangspunten voor de berekening van de indicatoren zijn hetzelfde als beschreven voor benutting van restwarmte in paragraaf 7.6. Voor de benodigde hoeveelheid pompenergie wordt door Geothermie Nederland (voorheen Platform Geothermie) een COP van 20 gehanteerd op basis van gegevens van tot nu toe gerealiseerde bronnen (Platform Geothermie, 2018). Voor de rapportage moet gebruik gemaakt worden van de werkelijke waarde voor de pompenergie.

Wanneer bij de winning van aardwarmte als bijvangst aardgas vrijkomt wordt deze of afgefakkeld of verbrand in een ketel voor de productie van warmte. Bij affakkelen worden de CO₂-emissies gealloceerd aan de gewonnen aardwarmte en de emissiefactor voor aardgas gehanteerd uit de brandstoffenlijst (RVO, 2019). Bij de inzet van aardgas voor de productie van warmte in een ketel worden de uitgangspunten en rekenregels zoals beschreven in paragraaf 7.5 gehanteerd.

Gebruikte formules:

CO₂-emissie pompen (kg) = (Elektriciteitsgebruik voor hulpenergie [GJe] - Hernieuwbare elektriciteitsproductie fysiek gekoppelde aan het warmtenet [GJe]) * Primair fossiele energie-inzet elektriciteit landelijk net * CO₂-emissiefactor elektriciteit landelijk net [kg/GJp]

CO₂-emissie bijvangst (kg) = Brandstofinzet [GJp] * CO₂-emissiefactor brandstofinzet ketel [kg/GJ]

$\text{CO}_2\text{-emissie totale warmte (kg)} = \text{CO}_2\text{-emissie pompen [kg]} + \text{CO}_2\text{-emissie bijvangst [kg]} / \text{totaal geproduceerde warmte (uit water + bijvangst) [GJth]}$

$\text{Totaal geproduceerde warmte (uit water + bijvangst) [GJth]} = \text{CO}_2\text{-emissie totale warmte [kg]} / (\text{geproduceerde energie uit water [GJ/jaar]} + \text{geproduceerde energie uit bijvangst [GJ/jaar]})$

Parameter aannames:

Parameter	Eenheid	Waarde	Opmerking
Elektriciteitsgebruik voor hulpenergie	GJe	21545 (Perm) 13315 (Jura/Krijt)	Tabel 4
Primair fossiele energie-inzet landelijk net	GJp/GJe	1.42	Tabel 1, (1/rendement op primair fossiel)
CO ₂ -emissiefactor elektriciteit landelijk net	kg/GJp	58.8	Tabel 1
Brandstofinzet in ketel	GJp	14913 (Perm) 52050 (Jura/Krijt)	= debiet [m ³ /h] * verbrandingswaarde formatiegas [GJ/m ³] * draaiuren [uur/jaar], zie Tabel 4
CO ₂ -emissiefactor brandstofinzet in ketel	kg/GJ	73 (Perm) 64 (Jura/Krijt)	Emissiefactor formatiegas, zie Tabel 4
Geproduceerde energie uit water	GJth/jaar	337475 (Perm) 315966 (Jura/Krijt)	Uit data, Tabel 4
Geproduceerde energie uit bijvangst	GJth/jaar	11931 (Perm) 41640 (Jura/Krijt)	= brandstofinzet in ketel * rendement ketel

Tabel 4 - Doubletdata gebruikt voor berekeningen. Bron: Confidentiële data Geologische Dienst Nederland^{11,12}. En uitstootfactoren en verbrandingswaarden van het formatiegas¹³.

	Perm	Jura/Krijt
Aantal doubletten	8	9
Gemiddelde productietemperatuur [°C]	82	75
Gemiddelde injectie temperatuur [°C]	32	31
Gemiddeld debiet [m ³ /h]	213	183
Gemiddelde draaiuren [uur/jaar]	6657	8096
Gemiddelde geconsumeerde elektriciteit per doublet [GJ/jaar]	21545	13315*

¹¹ Confidentiële data Geologische Dienst Nederland. De data is geaggregeerd en wordt in het figuur geanonimiseerd weergegeven.

¹² Dijkstra et al. (2020). Duurzaamheid van geothermie in wamtenetten.

¹³ Dinkelman et al. (2021). Factsheet Duurzaamheid Geothermie.

Gemiddelde geproduceerde energie (uit geothermische water) per doublet [GJ/jaar]	337475	315966*
COP [-]	16 (15,7)	24* (23,7)
Gemiddelde hoeveelheid bijvangst per geproduceerd water [Nm ³ /m ³]	0,3	1,0
Gemiddelde geproduceerde energie uit bijvangst [GJ/jaar]		
Gemiddelde uitstootfactor formatiegas [kgCO ₂ /GJ]	73	64
Gemiddelde verbrandingswaarde formatiegas [MJ/m ³]	27	33

* op basis van 6 doubletten, door onvolledige elektriciteitsdata bij andere drie doubletten.

4 Resultaten en discussie

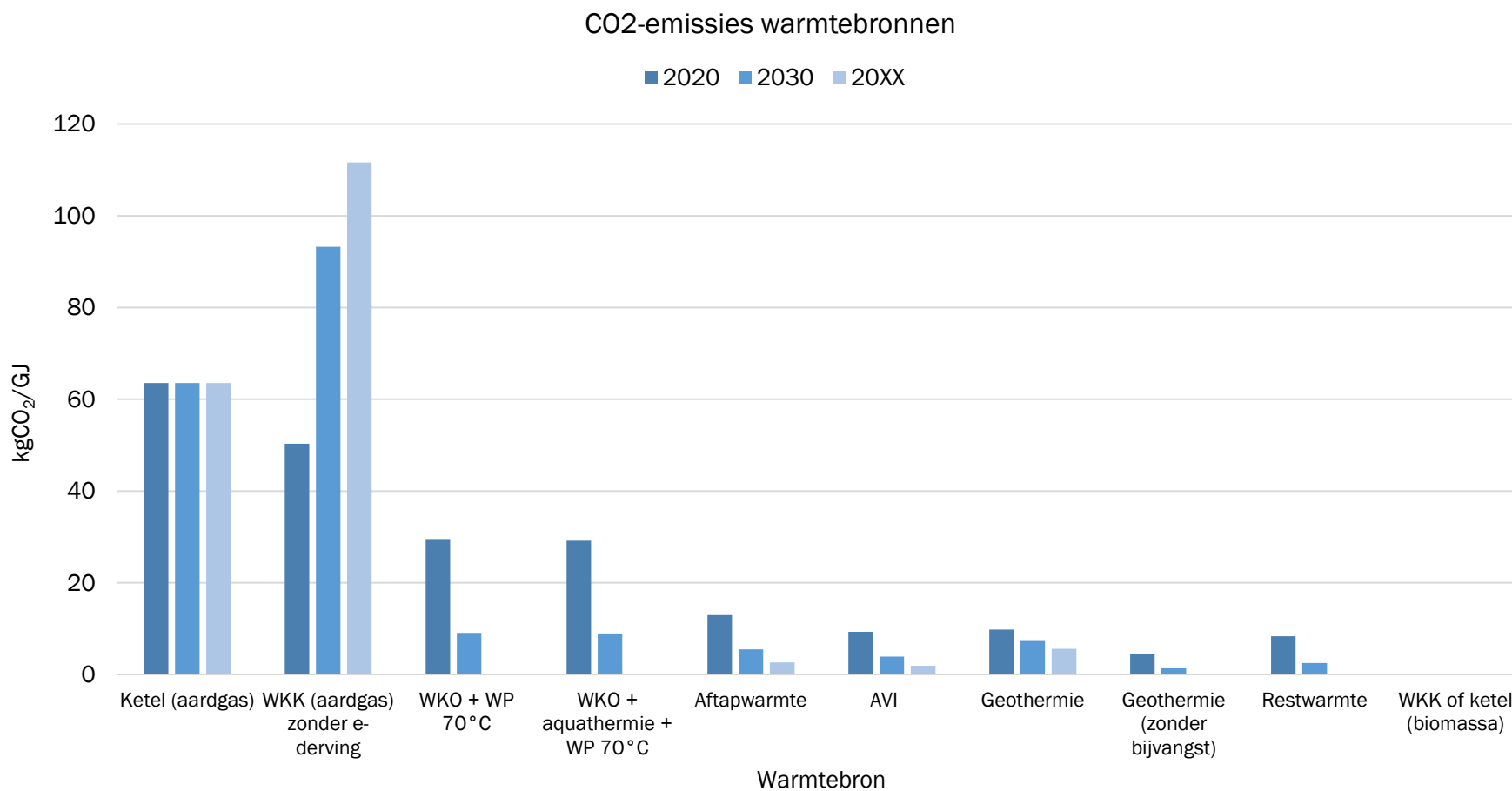
Tabel 5 en Figuur 6 laten de resultaten van de berekeningen voor verschillende jaartallen zien. Het jaartal 20XX is het jaar waarin de Nederlandse elektriciteitsmix volledig duurzaam is. Discussiepunten worden hieronder puntsgewijs besproken.

Discussiepunten:

- In de berekeningen is de aanname gemaakt dat de geleverde warmte minimaal 70°C is. Een ketel op aardgas kan hogere temperaturen leveren dan bijvoorbeeld ondiepe bodemenergie met een warmtepomp tot 70°C. Naast de duurzaamheid van de warmtebron, zullen dit soort karakteristieken ook belangrijk zijn voor de inpassing van de bron in het warmtenet.
- Voor de keuze van een bron in het warmtenet is het naast de uitstoot ook belangrijk te kijken naar de beschikbaarheid en levensduur van bronnen. Van bronnen als afval en biomassa zal in de toekomst wellicht minder beschikbaar zijn. Dit hangt dus af van de locatie waar het warmtenet wordt ontwikkeld.
- De projectie voor de emissiefactoren uit de KEV2021 is aangehouden voor de berekeningen. Deze projectie wordt elk jaar geactualiseerd, en zal dus ook moeten worden meegenomen in toekomstige berekeningen.
- Naast de emissies gerelateerd aan de warmtebron moeten de emissies gerelateerd aan het warmtenet ook altijd meegenomen worden.

Tabel 5 – Overzicht emissies warmtebronnen.

Emissies warmtebronnen (kg/GJ)	2020	2030	20XX
Ketel (aardgas)	64	64	64
WKK (aardgas) zonder e-derving	50	93	112
WKO + WP 70°C	30	9	0
WKO + aquathermie + WP 70°C	29	9	0
Aftapwarmte	13	5	3
AVI	9	4	2
Geothermie	10	7	6
Geothermie (zonder bijvangst)	4	1	0
Restwarmte	8	3	0
WKK of ketel (biomassa)	0	0	0



Figuur 6 - Overzicht emissies warmtebronnen.