

Materiaalvoorraad en stromen van het Nederlandse warmtesysteem van 2021-2050.

Onderdeel van het werkprogramma Monitoring & Sturing Circulaire Economie



Universiteit Leiden – Centrum voor Milieuwetenschappen (CML)

Teun Johannes Verhagen

Ester van der Voet

Voorwoord

Dit rapport is tot stand gekomen in het kader van het Werkprogramma Monitoring en Sturing Circulaire Economie 2019-2023. Dit werkprogramma is een samenwerkingsverband van het Centraal Bureau voor de Statistiek (CBS), Centrum voor Milieuwetenschappen Leiden (CML), het Centraal Planbureau (CPB), het Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM), RVO.nl, Rijkswaterstaat, TNO en de Universiteit Utrecht (UU) onder leiding van het Planbureau voor de Leefomgeving (PBL). Het kabinet streeft naar een volledig circulaire economie in 2050. Het doel van het werkprogramma is om de door het kabinet uitgezette koers naar 2050 te kunnen monitoren en te evalueren en de overheid te voorzien van de kennis die nodig is voor de vormgeving of bijsturing van beleid. Meer informatie over het Werkprogramma Monitoring en Sturing Circulaire Economie is te vinden op <https://www.pbl.nl/monitoring-circulaire-economie>.



**Universiteit
Leiden**



**Monitoring en Sturing
Circulaire Economie**

Samenvatting

In dit rapport is de warmtetransitie, waarbij de het gebruik van aardgas wordt afgebouwd, doorgerekend op de daarbij behorende vraag naar materialen. Enkele scenario's zijn doorgerekend met betrekking tot de opbouw van het nieuwe systeem, gebaseerd op combinaties van verschillende technologieën (warmtepompen, lage temperatuur warmtenetten en hoge temperatuur warmtenetten). Voor de opbouw van dit systeem zijn materialen nodig. Tegelijkertijd wordt het oude warmtesysteem uitgefaseerd, en komen daaruit materialen beschikbaar.

Naast de technologieën zelf is ook rekening gehouden met verbouw gerelateerd aan isolatie en vloerverwarming, en met de benodigde uitbreiding van het elektriciteitsnet. We hebben ons beperkt tot woningbouw.

De materiaalvraag van het nieuwe warmtesysteem is aanzienlijk, maar minder dan die van het nieuwe elektriciteitssysteem. Het gaat vooral om bulkmaterialen zoals zand en beton. Daarnaast vertegenwoordigen staal en kunststoffen nog een aanzienlijk aandeel.

Hoge temperatuur warmtenetten vragen het minste materiaal. Hiervoor zijn weinig veranderingen aan de woningen nodig, en de extra elektriciteitsvraag is beperkt. Lage temperatuur warmtenetten en warmtepompen scoren vergelijkbaar. Bij de afweging spelen vanzelfsprekend veel meer factoren een rol dan de materiaalvraag.

De materialen die beschikbaar komen uit het oude systeem zijn veelal niet dezelfde materialen als die nodig zijn voor het nieuwe systeem. Wel zouden deze buiten de sector gerecycled kunnen worden.

Een optie die niet is onderzocht maar wellicht interessant is, is een deel van de oude gasinfrastructuur te gebruiken voor op waterstof of groen gas gebaseerde verwarmingssystemen. Een groot deel van het huidige gasnet is hiervoor geschikt.

Inhoudsopgave

Voorwoord	2
Samenvatting	3
1. Introductie	5
2. Methode	6
2.1 Materiaalvoorraad van het huidige op aardgas gebaseerde warmtesysteem	7
2.2 Lage-emissie warmtetechnieken & aannames	7
2.3 Materiaalvraag per woning voor de implementatie van lage emissie warmtetechnieken	8
2.4 Invloed van de warmtetransitie op het elektriciteitssysteem.	9
2.5 Ontwikkelingspaden voor het warmtesysteem van Nederland van 2021-2050	9
2.6 Dynamisch voorraad model	10
3. Resultaten	12
3.1 Materiaalvoorraad van het huidige op aardgas gebaseerde warmtesysteem in 2020	12
3.2 Materiaalvraag van de opbouw van het lage-emissie warmtesysteem per woning	13
3.3 Materialenstromen en voorraden van het Nederlandse warmtesysteem over tijd (2021-2050)	14
3.3.1 Materiaalstromen en voorraden van het gas-gebaseerde warmtesysteem van 2021 tot 2050	14
3.3.2 Materiaalstromen en voorraden van het lage-emissie warmtesysteem van 2021 tot 2050	16
3.4 Vergelijking van materiaalvoorraden van het op aardgas-gebaseerde en lage-emissie warmtesysteem over tijd.	18
4. Conclusies en discussie	20
4.1 Conclusies	20
4.2 Discussie.....	20
4.3 Implicaties voor beleid.....	21
5. Literatuur	22
Bijlage.....	26
B1 – Gevolgen van de warmtetransitie voor het elektriciteitsnet.....	26
B2 – Levensduurverwachtingen van de onderdelen van het lage-emissie warmtesysteem	29
B3 – Excel bestanden met waardes per technologie en scenario	30

1. Inleiding

De samenstelling van het Nederlandse warmtesysteem gaat in de komende jaren sterk veranderen door de voorgenomen transitie naar een aardgasvrij systeem op basis van lage-emissie warmtetechnieken. Deze transitie naar lage-emissie warmtetechnieken wordt ook wel de *warmtetransitie* genoemd. Als gevolg van deze warmtetransitie is het waarschijnlijk dat het grootste deel van de woningen in Nederland gebruik gaat maken van verschillende warmtepomp-technologieën en een combinatie van lage en hoge temperatuur warmtenetten (Berenschot, 2020a; PBL, 2019).

Het doel van deze studie is om inzicht te verkrijgen in de dynamiek van de materiaalvoorraad van het Nederlandse warmtesysteem van nu tot en met 2050. De uitstroom van materialen uit dit systeem kunnen dienen als potentieel waardevolle *urban mine* van secundaire materialen in een circulaire economie (CE). In een eerdere rapportage is er een inventarisatie gemaakt van de materiaaldynamiek in het Nederlandse elektriciteitssysteem. Het verkennen van de materiaaldynamiek in het Nederlandse warmtesysteem is de volgende logische stap. Dit rapport voort op een eerdere rapportage waarin de materiaalvoorraad van het huidige op aardgas gebaseerde warmtesysteem is verkend (Verhagen et al., 2022). Wij bespreken de bevindingen in dit rapport in de context van de circulaire economie doelstellingen voor 2030 (50% reductie primair materiaalgebruik) en 2050 (volledig circulair) (Rijksoverheid, 2018b).

De warmtescenario's van Berenschot zijn als uitgangspunt genomen voor drie ontwikkelpaden van het Nederlandse warmtesysteem van 2021 tot 2050 (Berenschot, 2020b). Deze scenario's zijn gebaseerd op de beschikbare capaciteit voor lage emissie warmtetechnieken in Nederland, en verkennen ook in hoeverre het gas-gebaseerde systeem in gebruik blijft. Daarnaast wordt in voorliggende rapportage, in overleg met Stedin, ook rekening gehouden met de materiaalvraag van het verzwaren van het elektriciteitssysteem voor de implementatie van warmtepomp-technologieën. De materiaalstromen en -voorraden van het warmtesysteem worden ingeschat op basis van de bevolkingsgroei, de snelheid van de warmtetransitie en de levensduur van de technologieën. Daarnaast worden gerelateerde materiaalstromen, in kaart gebracht die te maken hebben met de benodigde aanpassingen aan woningen en aan het elektriciteitsnet.

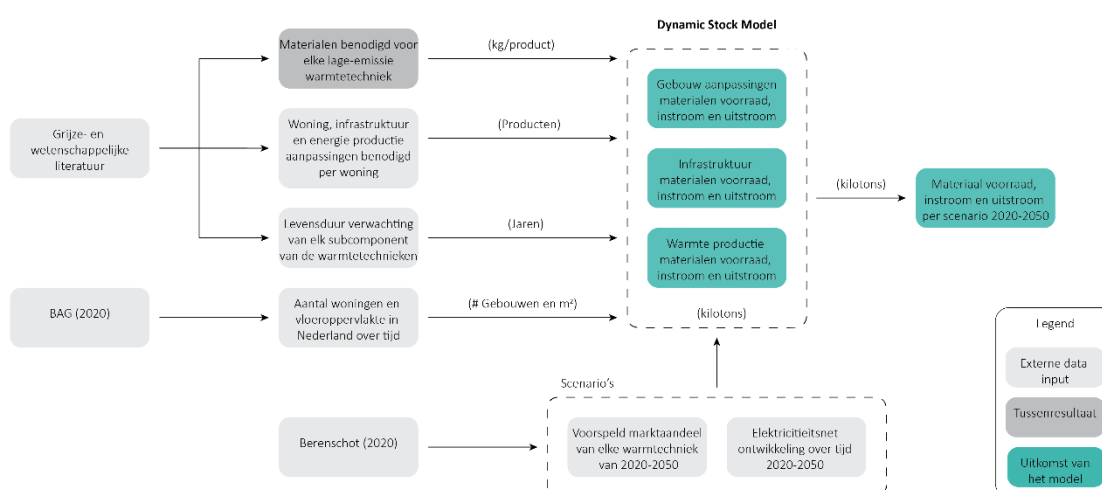
2. Methode

Binnen deze studie wordt er gekeken naar de ontwikkeling en afbouw van het huidige gas-gebaseerde warmtesysteem en de opbouw van het lage emissie warmtesysteem gerelateerd aan woningbouw.

De materiaalvoorraad in het huidige op aardgas-gebaseerde warmtesysteem voor 2020 is gebaseerd op onze eerdere verkenning voor het PBL (Verhagen et al., 2022). In dit rapport is de dynamiek van de materiaalstromen voor de periode 2020-2050 toegevoegd (sectie 2.6) voor drie mogelijke ontwikkelpaden van het huidige warmtesysteem (sectie 2.5.1). In deze ontwikkelpaden worden aannames gedaan over technologieën: een combinatie van hoge en lage temperatuur warmtenetten en (hybride) warmtepompen.

De huidige gebouwvoorraad in Nederland en samenstelling hiervan vormt de basis voor onze analyse. Per gebouw is er gekeken welke aanpassingen nodig zijn voor de implementatie van de warmtetechnieken. Bijvoorbeeld: een warmtepomp kan 1 losstaand huis verwarmen, of binnen een appartementencomplex meerdere woningen. Daarnaast vragen de lage-emissie warmtetechnieken aanpassingen aan de infrastructuur en andere bronnen van warmte en energie. De totale aanpassingen die hiervoor benodigd zijn, zijn berekend als het aantal benodigde installaties per gebouw. Op basis van de materialen-samenstelling van deze installaties is de materiaalvraag van het nieuwe warmtesysteem per woning berekend. Het marktaandeel van de verschillende warmtetechnieken over tijd wordt in de drie ontwikkelpaden verschillend ingeschat. Door de materiaalvraag per woning te vermenigvuldigen met het marktaandeel en de totale woningvoorraad per jaar is de materiaalvoorraad van deze transitie per jaar berekend. Met een levensduurverwachting voor de gemodelleerde onderdelen van het warmtesysteem, is ook de in- en uitstroom van materialen over tijd gekwantificeerd. In Figuur 1 wordt een visueel overzicht weergegeven van de werking van het model.

Figuur 1, overzicht van de benodigde informatie en de berekeningen:



2.1 Materiaalvoorraad van het huidige op aardgas gebaseerde warmtesysteem

Voor het berekenen van de materialen van het Nederlandse op aardgas gebaseerde warmtesysteem is er gekeken naar 3 onderdelen van het systeem: CV-ketels in woningen, aardgaspijpleidingen (infrastructuur) en aardgaswinningsinstallaties. Voor meer gedetailleerde uitleg over de berekening van de materiaalvoorraad van het aardgas-gebaseerde warmtesysteem verwijzen wij naar het voorgaande rapport (Verhagen et al., 2022). In Tabel 1 wordt er een overzicht weergegeven van de materialen die meegenomen zijn in de analyse van het gas-gebaseerde warmtesysteem.

Tabel 1, materialen geïnccludeerd in dit rapport voor de analyse van het gas-gebaseerde warmtesysteem:

Andere materialen	Metalen	Plastics
Cement	Messing	PE
Asbest-cement	Brons	(S)PVC
Beton	Koper	
	Gietijzer	
	Staal	

2.2 Lage-emissie warmtetechnieken & aannames

Voor het lage-emissie warmtesysteem worden de volgende warmtetechnieken onderzocht: hoge temperatuur (HT) warmtenetten, lage temperatuur (LT) warmtenetten, warmtepompen en hybride warmtepompen. Wij hebben drie deelcomponenten van het Nederlandse verwarmingssysteem geanalyseerd: de benodigde aanpassingen benodigd aan gebouwen (bijvoorbeeld de warmtepomp, isolatie, vloerverwarming en lage temperatuur radiatoren), de benodigde infrastructuur (warmtenet, elektriciteitsnet, enz.) en de warmte- en elektriciteitsproductie (geothermische stadsverwarming, zonnepanelen, windmolens, biogascentrale). Voor alle technologieën behalve de HT-verwarmingssystemen gingen we ook uit van de installatie van vloerverwarming in de gebouwen. Deze aanname is vrij rigoureuus – warmtepompen kunnen ook zonder dat functioneren, maar de grootste efficiëntie en effectiviteit van deze technologieën wordt bereikt met vloerverwarming. De woningen in Nederland zijn onderverdeeld in vijf bouwtypen: appartementen, hoekwoningen, rijtjeswoningen, twee-onder-een-kapwoningen en vrijstaande woningen. Dit komt overeen met de indeling die is gebruikt in de BAG-GIS dataset, de basis voor de inschatting van het aantal woningen en het vloeroppervlak per bouwtype.

Voor LT- en HT-warmtenetten hebben we de gebouw en infrastructuraanpassingen gebaseerd op de studie van Oliver-Solà et al., (2009b). We gaan uit van de installatie van een warmtewisselaar, extra interne distributieleidingen voor de lage-temperatuur warmte, en de aanleg van een HT of LT warmtenet op wijk-schaal (Moss et al., 2013; Sullivan, 2010). Op basis van het rapport van Berenschot (2020) wordt bij de warmtebron van HT-warmtenetten uitgegaan van de restwarmte van een biogascentrale, terwijl voor LT-warmtenetten is uitgegaan van aardwarmte (Basosi et al., 2020). In Nederland wordt aardwarmte gewonnen uit putten tot een diepte van 2000 meter (Ecofys, 2018). Voor de productie van HT-restwarmte zijn we ervan uitgegaan dat in de toekomst gasgestookte centrales op biogas of waterstof gaan draaien en dat deze centrales dezelfde materiaalsamenstelling houden (Spath & Mann, 2000; Vestas, 2019; Weinzettel et al., 2009).

De meest toegepaste warmtepomptechnologie in Nederland is de lucht/water-warmtepomp (Rijksoverheid, 2018a). Voor de materiaalinventarisatie van een 10 kW lucht/water-warmtepomp wordt het onderzoek van Greening & Azapagic, (2012) gebruikt. Voor elk bouwtype behalve appartementen wordt er uitgegaan van de installatie van een warmtepomp voor elke afzonderlijke woning. Voor appartementen gaan we uit van een warmtepomp per 150 m² vloeroppervlak, aangezien

een warmtepomp gedeeld kan worden over meerdere woningen in een appartementencomplex. Het gebruik van lucht/water-warmtepompen heeft invloed op de samenstelling van het elektriciteitsnet, waarop we in paragraaf 2.2.2. nader ingaan (Harrison et al., 2010; Jorge et al., 2012). Voor het elektriciteitsverbruik van de warmtepompen wordt uitgegaan van een combinatie van biogas gestookte elektriciteitscentrales, onshore en offshore windmolens en PV-panelen zoals gespecificeerd door Berenschot, (2020) (Berenschot, 2020b).

Voor de materiaalinventarisatie van hybride warmtepompen is er ook gebruik gemaakt van de studie van Greening & Azapagic, (2012). We hebben de materiaalinventarisatie verkleind van de 10 kW warmtepomp die in de bron wordt gebruikt naar een warmtepomp met een kleiner vermogen van 6 kW die wordt gebruikt in de hybride warmtepomptechnologie. Verder is ook de materiaalvoorraad van een kleine CV-ketel gespecificeerd in de materiaalinventarisatie van hybride warmtepompen (Oliver-Solà et al., 2009a). Net als de aannames voor lucht/water-warmtepompen, beïnvloedt het gebruik van een hybride warmtepomp de samenstelling van het elektriciteitsnet zoals besproken in paragraaf 2.4. Voor de piekketel in de hybride warmtepompen wordt uitgegaan van het gebruik van aardgas als energiebron. De toekomstige productiecapaciteit van waterstof of biogas, die een alternatief zouden kunnen zijn, is nog zo onzeker en de infrastructuur die daarmee samengaat nog zo onbepaald, dat we deze keuze hebben gemaakt.

2.3 Materiaalvraag per woning voor de implementatie van lage emissie warmtetechnieken

De materiaalvraag voor de implementatie van lage-emissie warmtetechnieken is berekend in kg materiaal per woning. Hieronder vallen de gebouwaanpassingen, infrastructuuruitbreidingen en de extra benodigde warmte- of elektriciteitsproductie. Een overzicht van de materialen die in het model zijn meegenomen wordt gegeven in Tabel 1.

De data gebruikt voor het berekenen van de benodigde materialen voor de implementatie van lage emissie warmtetechnologieën komen uit de wetenschappelijke literatuur, de grijze literatuur en de Ecoinvent-database. De verpakkingsmaterialen zijn uitgesloten van onze materiaalinventarisatie. De gedetailleerde specificatie van de benodigde materialen van elke warmtetechniek per huishouden kan worden gevonden in bijlage B3.

Voor het berekenen van het isolatieniveau dat geschikt is voor lage emissie warmtetechnieken in Nederlandse gebouwen, hebben we de studie van Koezjakov et al., (2018) gebruikt. De volgende isolatiematerialen zijn meegenomen in de analyse: geëxpandeerd en geëxtrudeerd polystyreen (begane grond en fundering), minerale wol (dak en muren), polyurethaanschuim (begane grond en gevel) en houtvezelplaat (fundering en gevel). Andere isolatiematerialen zoals cellulose en wol worden momenteel weinig gebruikt en zijn daarom buiten beschouwing gelaten. Voor de warmtenetten hebben we de isolatie voor fundering, gevel, dak en muur meegenomen. Voor de (hybride) warmtepomptechnologieën hebben we alle genoemde isolatiematerialen opgenomen, aangezien warmtepompen een hogere mate van isolatie nodig hebben om efficiënt te kunnen werken. Deze materialen zijn per techniek berekend in kg materiaalbehoefte per woning.

Tabel 1, materialen van het lage-emissie warmtesysteem, gespecificeerd in dit rapport:

Andere materialen	Metalen	Plastics
Cement	Aluminium	ABS
Baksteen	Messing	HDPE
Beton	Bronz	PE
Kalksteen	Gietijzer	Polyurethaan (schuim)
Zand	Koper	PVC
Houtvezelplaat	Gegalvaniseerd staal	Rubber
Minerale wol	Roestvast staal	Glasvezel
	Staal	Polystyrene
	Nikkel	
	Mangaan	
	Chroom	
	Molybdeen	
	Wolfram	
	Niobium	
	Vanadium	
	Titanium	
	Kobalt	
	Tantalum	
	Neodymium	

2.4 Invloed van de warmtetransitie op het elektriciteitssysteem.

In samenwerking met Stedin hebben wij gekeken naar de impact van (hybride) warmtepompen op het elektriciteitssysteem. Het bestaande elektriciteitssysteem zal moeten worden verzwaaard om de extra belasting van warmtepompen en hybride warmtepompen te kunnen dragen.

Om de impact van de integratie van warmtepompen en hybride warmtepompen in het elektriciteitssysteem te berekenen hebben we gekeken naar de mogelijke verhoging van de piekbelasting. Eerst hebben wij de huidige vraag naar elektriciteit berekend door het gemiddelde verbruik van huishoudens te nemen binnen een laagspanningsdistrict van een gemiddelde stad in Europa (IEEE, 2020). Daarna hebben wij warmtepompen aan het model toegevoegd en de benodigde extra capaciteit in het laagspanning elektriciteitssysteem berekend op basis van gegevens over het elektriciteitsgebruik van een warmtepomp. De materialen die benodigd zijn om in deze extra laagspanningscapaciteit te kunnen voorzien zijn gebaseerd op de extra laagspanningskabels en transformatorgebouwen die hiervoor benodigd zijn. In bijlage B1 wordt hier dieper op ingegaan, en staan alle berekeningen en gebruikte waardes. Warmtenetten leiden in ons model niet tot een hogere piekbelasting; hiervoor is aangenomen dat geen uitbreiding van het elektriciteitsnet nodig is.

2.5 Ontwikkelingspaden voor het warmtesysteem van Nederland van 2021-2050

Onze scenario's voor het lage-emissie warmtesysteem zijn gebaseerd op de rapportage *het warmtescenario* van Berenschot. In dit rapport worden meerdere ontwikkelpaden van het Nederlandse warmtesysteem verkend van 2020-2050, waarin ook de lokale beschikbaarheid en capaciteit van lage-emissie warmtebronnen in mee wordt genomen. Deze ontwikkelpaden verschillen in de dominante lage-emissie warmtetechniek. Een overzicht van de marktaandelen van de verschillende warmtetechnieken staat in Tabel 1. In het genoemde Berenschot rapport heeft elk ontwikkelpad een eigen samenstelling van de elektriciteitsopwekking. Deze hebben we gebruikt om verschillende ontwikkelingen te simuleren (overzicht hiervan in Tabel 2). We hebben, bij gebrek aan echte informatie, een lineaire toename van het marktaandeel van koolstofarme verwarmingstechnologieën ter vervanging van het bestaande aardgas gebaseerde warmtesysteem aangenomen.

Op basis hiervan hebben wij de volgende scenario's gedefinieerd:

- Scenario 1 is een gemengd scenario met voornamelijk LT-warmtenetten en warmtepompen
- Scenario 2 is een scenario met een hoog aandeel warmtepompen
- Scenario 3 heeft een hoog aandeel hybride warmtepompen.

De scenario's verkennen alleen de samenstelling van het toekomstige Nederlandse verwarmingssysteem. Er is geen variatie in de totale energievraag tussen de verschillende scenario's.

Tabel 2, samenstelling van de opwekking van elektriciteit in Nederland in 2050:

	Scenario 1 (Mix LT warmtenetten + warmtepompen)	Scenario 2 (Hoge intensiteit warmtepompen)	Scenario 3 (Hoge intensiteit hybride warmtepompen)
Biogascentrale	26 %	35 %	31 %
Wind onshore	10 %	7 %	12 %
Wind offshore	26 %	20 %	21 %
Zonne-energie (PV)	38%	38 %	36 %

Tabel 3, samenstelling van het warmtesysteem in Nederland in 2050 op basis van de Berenschot scenarios:

	Scenario 1 (Mix LT warmtenetten + warmtepompen)	Scenario 2 (Hoge intensiteit warmtepompen)	Scenario 3 (Hoge intensiteit hybride warmtepompen)
Hoge temperatuur warmtenetten	5 %	5 %	10 %
Lage temperatuur warmtenetten	40 %	20 %	25 %
Warmtepompen	35 %	55 %	25 %
Hybride warmtepompen	20 %	20 %	40 %

2.6 Dynamisch voorraad model

Met een voorraad-gedreven *Dynamic Stock Model* (DSM) zijn de voorraden, in- en uitstroom van materialen voor elke lage emissie warmtetechniek en subcomponenten (aanpassing aan woningen, infrastructuur en energieproductie) berekend. De berekening is gemaakt voor elke lage-emissie warmtetechniek op basis van het aantal woningen dat gebruikt maakt van de specifieke warmtetechniek, de materialen benodigd voor de implementatie van de lage-emissie warmtetechniek en de verwachte levensduur. De bevolkingsgroei van 2021 tot 2050 is gebruikt om de stijging van de woningvoorraad over tijd te berekenen (Pauliuk, 2018). Hierbij is gebruikt gemaakt van een Weibull functie voor de verdeling van de levensduurverwachting over tijd van elk sub component. De volgende functie is gebruikt voor het berekenen van de materiaalvoorraad op een specifiek moment (t)

$$Instroom(t) = Voorraad(t) - Voorraad(t - 1) + Uitstroom(t)$$

De in- en uitstroom van materialen voor elk jaar werd berekend op basis van de subcomponenten en hun gemiddelde levensduurverwachting met de DSM. Hierbij hebben wij gebruik gemaakt van de volgende formule

$$Uitstroom(t) = Instroom(t - L)$$

De instroom is berekend als het verschil tussen de toevoeging aan de voorraad en de berekende uitstroom in een jaar. In Bijlage B2 wordt een overzicht gegeven van de gemiddelde levensduur voor elke sub component van de lage-emissie warmtetechnieken. In totaal worden er twee materiaalvoorraden gemodelleerd, namelijk de afbouw van het huidige op aardgas gebaseerde warmtesysteem en de opbouw van het lage-emissie warmtesysteem.

3. Resultaten

3.1 Materiaalvoorraad van het huidige op aardgas gebaseerde warmtesysteem in 2020

Het Nederlandse op aardgas gebaseerde warmtesysteem bevat in 2020 1.080 kiloton aan materiaal (Verhagen et al., 2021). Onder aannames van de drie beschreven warmtetransitiescenario's wordt dit systeem overbodig. De erin opgeslagen materialen komen dan vrij.

Het grootste deel van deze voorraad bestaat uit staal (582 kiloton) en PVC/SPVC (320 kiloton). Kleinere materiaalgroepen zijn gietijzer (75 kiloton) en koper (55 kiloton), terwijl de kleinste materiaalgroepen PE, brons, cement, messing en beton (>25 kiloton) zijn.

Het grootste deel van deze voorraad, 750 kiloton, bevindt zich in de aardgasleidingen (infrastructuur). De aardgasleidingen bestaan voornamelijk uit staal (50%) en PVC en SPVC (37%). De kleinere materiaalgroepen zijn grijs gietijzer (6%), nodulair gietijzer (4%) en PE (3%). Daarnaast zit er nog een kleine fractie asbestcement in de huidige gasinfrastructuur (>1%).

De op één na grootste voorraad (290 kiloton) bevindt zich in de cv-ketels in woningen en bestaat voornamelijk uit staal, koper en PVC.

De aardgaswinningsinstallaties bestaan voornamelijk uit staal en vormen een relatief kleine voorraad (30 kiloton) in vergelijking met de rest van het op aardgas gebaseerde warmtesysteem. Daarnaast bevindt zich in dit onderdeel van het warmtesysteem een kleine voorraad beton (7.2 kiloton) en cement (3.1 kiloton).

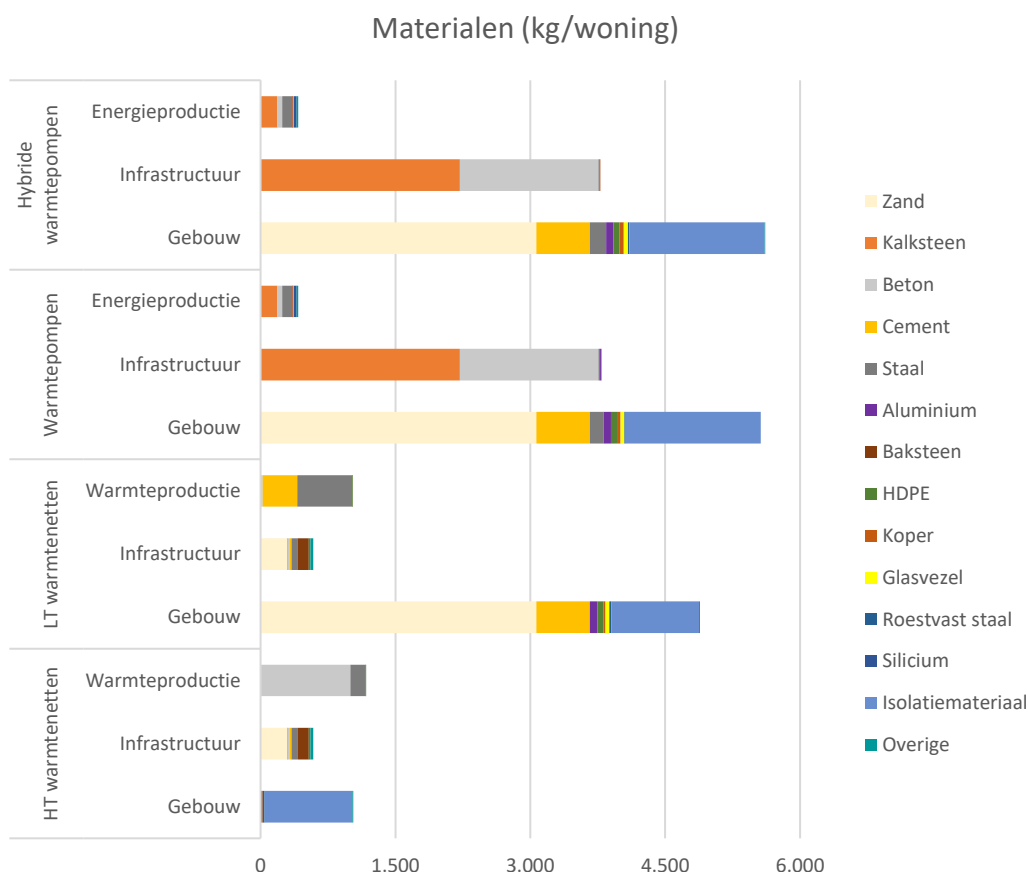
Tabel 4, overzicht van materialen in het Nederlandse of aardgas gebaseerde warmtesysteem in 2020 (kiloton) (gehaald uit Verhagen et al., (2022)):

	Messing	Bron	Koper	Gietijzer	PE	SPVC + PVC	Staal	Beton	Cement	Asbest cement	Totaal
Infrastructuur	0	0	0	73.8	23.7	277	376.5	0	0	1.4	752.5
CV-ketels	12.6	1.6	54.8	1.2	0.0	42.8	178.1	0	0	0	291.3
Aardgaswinning Installaties	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	26.6	7.2	3.1	0	36.9
Totaal	12.6	1.6	54.8	75.0	23.7	319.8	581.2	7.2	3.1	1.4	1080.7

3.2 Materiaalvraag van de opbouw van het lage-emissie warmtesysteem per woning

In totaal variëren de benodigde materialen voor het toepassen van lage-emissie warmtetechnieken per woning van 2.784 kg voor HT-warmtenetten, 6.495 kg voor LT-warmtenetten, 9.771 kg voor warmtepompen tot 9.808 kg voor hybride warmtepompen (Figuur 2). De warmtepomp- en hybride warmtepompen zijn de meest materiaal intensieve technologieën uit onze analyse. Voor deze twee technologieën komt een klein deel van hun materiaalbehoefte uit de warmte- en energieproductie, terwijl het grootste deel van hun materiaalbehoefte wordt gegenereerd door de benodigde infrastructuur en aanpassingen aan gebouwen. Voor de LT- en HT-warmtenetten wordt het grootste deel van hun materiaalbehoefte gegenereerd door gebouwaanpassingen en de benodigde warmteproductie. De materiaalbehoefte van HT-warmtenetten is aanzienlijk lager dan de materiaalbehoefte van de andere technologieën door het ontbreken van vloerverwarming. Zoals te zien in Figuur 2 ontbreken de bouwmaterialen zand, beton enz. voor HT-warmtenetten bij de categorie “gebouw”. Daarnaast is voor de warmtenetten minder materiaal nodig voor de infrastructuur. Bij de warmtepomptechnieken betreft het infrastructuurmateriaal vooral de verzwarening van het lage spanning elektriciteitsnet. Zand, kalksteen, beton en cement zijn de grootste categorieën. Meer impacts zullen gerelateerd zijn aan metalen als koper, staal en aluminium.

Figuur 2, materiaalvraag per onderdeel van het warmtesysteem per woning:



3.3 Materialenstromen en voorraden van het Nederlandse warmtesysteem over tijd (2021-2050)

Naarmate de opbouw van het lage-emissie warmtesysteem voortschrijdt, zal er ook steeds meer van het uitgaande op aardgas gebaseerde systeem uit gebruik worden genomen. Hierbij zal de materiaalvoorraad van het aardgas gebaseerde systeem als uitstroom beschikbaar komen. Voor het op aardgas gebaseerde warmtesysteem is er met de beschikbare informatie naar 10 verschillende materialen gekeken, terwijl voor het lage-emissie warmtesysteem er informatie beschikbaar was over 34 verschillende materialen. Hierdoor is het moeilijk om de in en uitstroom van beide systemen 1 op 1 te vergelijken, maar voor materialen welke in beide systemen aanwezig zijn is dit wel mogelijk.

In hoofdstuk 3.3.1 kijken wij eerst naar de materiaalstromen en voorraden van het huidige gas-gebaseerde warmtesysteem over tijd. Daarna kijken wij in hoofdstuk 3.3.2 naar de materiaalstromen en voorraden over tijd van het nieuwe lage-emissie warmtesysteem. Later in hoofdstuk 3.4 wordt er een vergelijking gemaakt van de materiaalvoorraden over tijd van beide systemen voor materialen die in beide systemen aanwezig zijn. Dit gebruiken wij om een inschatting te maken van de materiaal-intensiteit, en of deze is veranderd met de transitie naar lage-emissie warmtetechnieken.

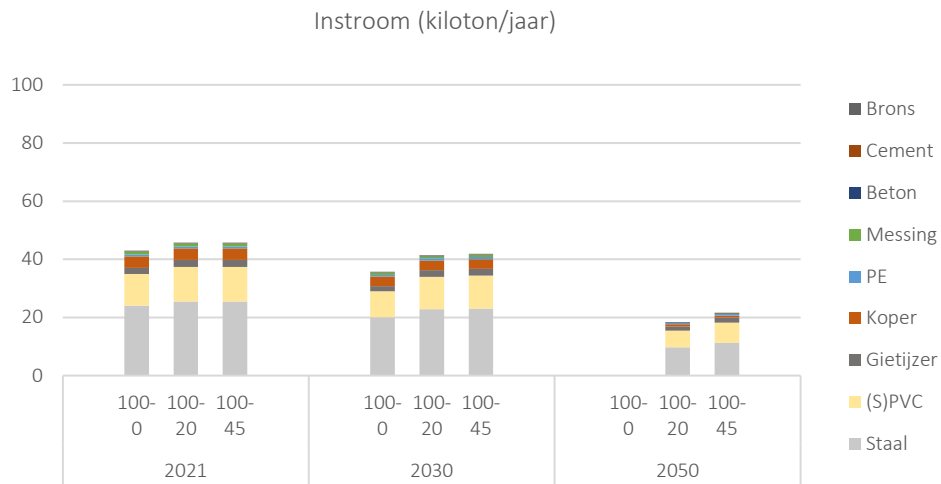
3.3.1 Materiaalstromen en voorraden van het gas-gebaseerde warmtesysteem van 2021 tot 2050

Over tijd zal de materiaalvoorraad in gebruik van het gas-gebaseerde warmtesysteem afnemen door de transitie naar het lage-emissie warmtesysteem. In 2050 is de voorraad die nog in gebruik is gereduceerd tot nul, onder de aannames van de scenario's in dit rapport.

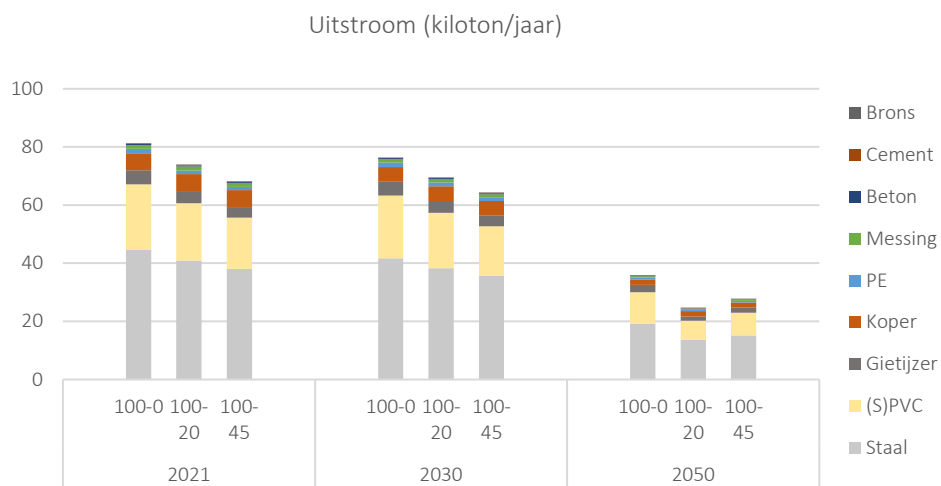
Dat wil niet zeggen dat er dan in de periode tot 2050 geen instromen meer zijn. Immers het resterende systeem moet nog steeds onderhouden worden. In Figuur 3 is te zien dat de instroom van het gas-gebaseerde warmtesysteem over tijd afneemt, uiteindelijk tot 0 in 2050. Ook de uitstroom van materialen zal afnemen over tijd, vanwege de krimpende voorraad die niet meer wordt aangevuld. Hierbij is er ook een reductie over tijd te zien van de uitstroom van ca. 80 kiloton in 2021 tot ca. 35 kiloton in 2050. De in-en uitstromen bestaan grotendeels uit staal, (S)PCV, koper en gietijzer.

De materialen die uit het gasgebaseerde systeem vrijkomen, met name die van het gasgrid, zullen in eerste instantie een winterslapende voorraad worden van materialen die niet meer gebruikt worden, maar ongebruikt in de grond blijven liggen. Wat hiermee te doen is een relevante vraag. Eén optie is om het materiaal op te graven en te recyclen. Een andere optie is hergebruik. De gasleidingen zijn in principe ook geschikt om groen gas of zelfs waterstof te vervoeren. Voor het toekomstige duurzame Nederlandse warmtesysteem is het mogelijk ook een deel van de warmte op te wekken met deze gassen. Dat zou ervoor pleiten de leidingen voorlopig te laten liggen, totdat duidelijker is wat mogelijk en wenselijk is op dat gebied.

Figuur 3, instroom van materialen van het gas-gebaseerde warmtesysteem voor 2021, 2030 en 2050. NB de waardes voor 2021 zijn modelberekeningen, geen metingen.



Figuur 3c, Uitstroom van materialen van het gas-gebaseerde warmtesysteem voor 2021, 2030 en 2050.

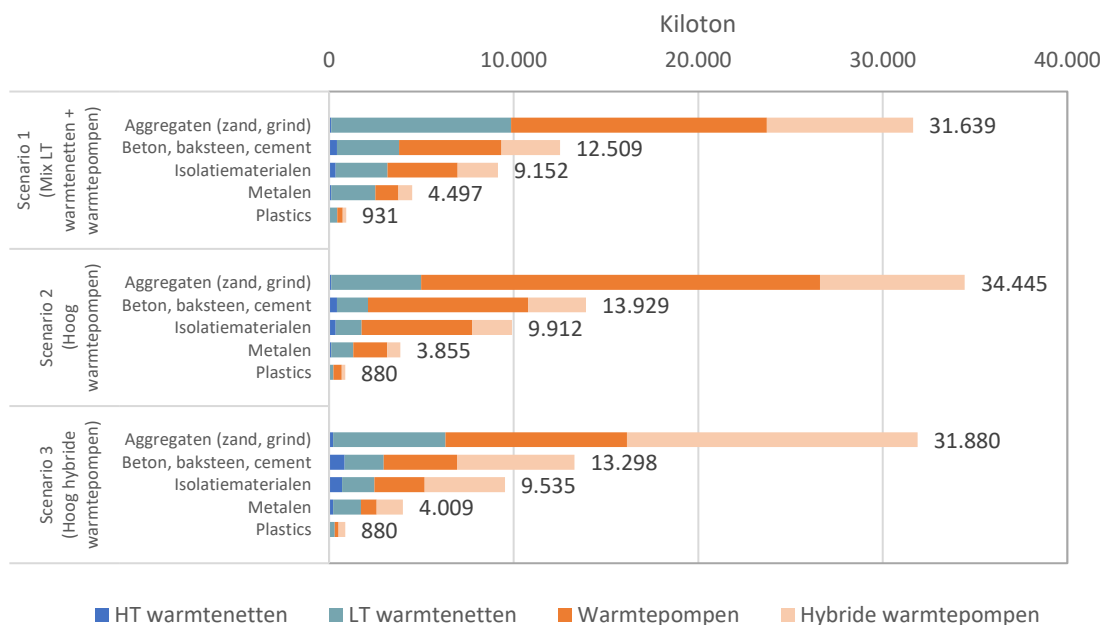


3.3.2 Materiaalstromen en voorraden van het lage-emissie warmtesysteem van 2021 tot 2050

In Figuur 4a is te zien dat de totale materiaalvoorraad van het Nederlandse warmtesysteem in 2050 varieert per scenario van 58.727 kiloton voor scenario 1 (Mix LT warmtenetten + warmtepompen), 59.603 kiloton voor scenario 3 (Hoog hybride warmtepompen) tot 63.020 kiloton in scenario 2 (Hoog warmtepompen). De grootste materiaalcategorie met 31.639 tot 34.445 kiloton zijn aggregaten (zand, grind). De op een na grootste materiaal categorie met 12.509 tot 13.929 kiloton zijn beton en cement. De voorraad isolatiematerialen varieert van 9.152 – 9.912 kiloton in 2050. Metalen en kunststoffen zijn een kleinere categorie met 3.855 tot 4.497 kiloton voor metalen en 880 tot 931 kiloton voor kunststoffen. Over het algemeen is er tussen de scenario's slechts een kleine variatie in de materiaalvoorraad.

Een groot deel van de materiaalvoorraad in elk scenario wordt bepaald door de warmtepompen en hybride warmtepompen. Van deze materiaalvoorraad bestaat het grootste deel uit zand, beton en cement, voortkomend uit de vloerverwarming en de transformatorgebouwen voor warmtepompen en hybride warmtepompen. De LT-warmtenetten zijn verantwoordelijk voor de grootste materiaalvraag in scenario 1 en 2, en de grootste metaalvraag in elk scenario. Dit komt door voornamelijk door de staalintensiteit van de warmtebron van de aardwarmtecentrale van de LT-warmtenetten. In Bijlage B3 zijn alle materiaalvoorraden per lage-emissie warmtetechniek en scenario beschreven.

Figuur 3a, materiaalvoorraad van het Nederlandse warmtesysteem in 2050 per scenario en opgesplitst in materiaal categorieën:



3.4 Vergelijking van materiaalvoorraden van het op aardgas-gebaseerde en lage-emissie warmtesysteem over tijd.

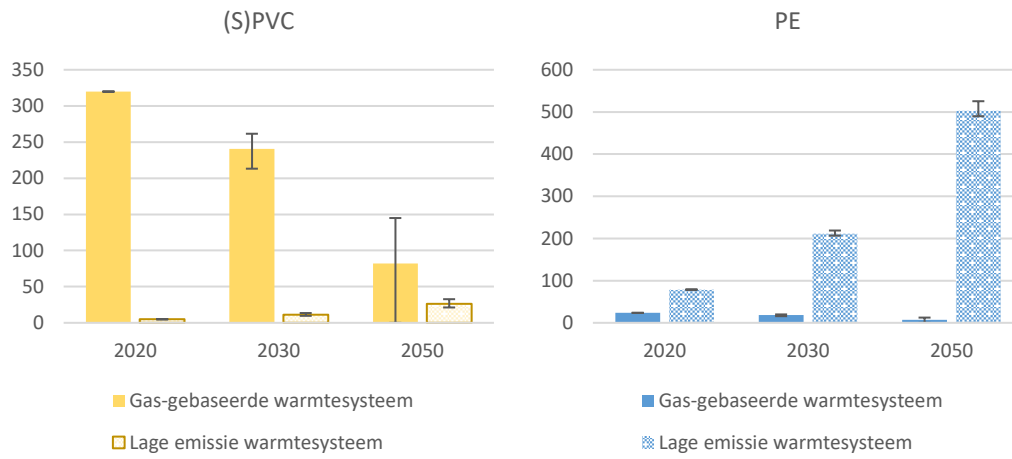
De totale materiaalvoorraad in gebruik van het lage emissie warmtesysteem bestaat grotendeels uit staal en koper, net als bij het aardgas gebaseerde warmtesysteem. Voor metalen zal de overgang naar een lage emissie warmtesysteem in 2050 vooral een toename van staal (5x) en koper (5x) zien ten opzichte van het huidige aardgas gebaseerde warmtesysteem in 2020 (Figuur 4a). Voor gietijzer blijft de voorraad ongeveer gelijk, terwijl voor brons de voorraad na verloop van tijd zelfs afneemt. In totaal zal de hoeveelheid metalen in het warmtesysteem fors toenemen door de toegenomen voorraad staal. Voor kunststoffen is de situatie iets anders, waar de voorraad PE in de overgang naar een lage emissie warmtesysteem met een factor 10-15x toeneemt, zal voor (S)PVC de voorraad met ongeveer 20x afnemen (Figuur 4b). Beide kunststofvoorraden zijn qua omvang vergelijkbaar met de kopervoorraad, maar beduidend kleiner dan de staalvoorraad in 2050.

Op basis van de hier getoonde materialen, zal het lage emissie warmtesysteem waarschijnlijk materiaal intensiever zijn. Vooral de metaalvoorraden in het Nederlandse verwarmingssysteem zullen in de loop van de tijd toenemen.

Figuur 4a, materiaalvoorraden in gebruik van metalen in het aardgas gebaseerde warmtesysteem en het lage emissie warmtesysteem in 2020, 2030 en 2050 (kiloton). De verschillende ontwikkelingstrajecten voor beide systemen worden weergegeven met de foutmarges.



Figuur 4b, materiaalvoorraad in gebruik voor kunststoffen in het gas gebaseerde warmtesysteem en het lage emissie warmtesysteem in 2020, 2030 en 2050 (kiloton). De verschillende ontwikkelingstrajecten voor beide systemen worden weergegeven met de foutmarges.



4. Conclusies en discussie

4.1 Conclusies

De materiaalvoorraad van het Nederlandse warmtesysteem zal toenemen: het nieuwe warmtesysteem is in alle scenario's materiaal-intensiever dan het oude gasgebaseerde warmtesysteem. In de periode 2021 t/m 2050 zal naar schatting zo'n 60-70 megaton aan materiaal in de opbouw van het lage-temperatuur warmtesysteem zal moeten worden geïnvesteerd. Daarbij gaat het vooral om bouwmaterialen als zand, cement, beton, en diverse isolatiematerialen. Daarnaast zijn staal, aluminium en HDPE belangrijk. Over deze periode wordt een materiaalvoorraad opgebouwd die oploopt tot 59-63 megaton.

De sterkste toename van de vraag zien we bij staal, nodig voor de constructie van warmtenetten en warmtepompen met ondersteunende infrastructuur en warmteproductie. Daarnaast is er een sterk verhoogde vraag naar isolatiemateriaal.

4.2 Discussie

Twee aannames zijn belangrijk voor deze uitkomsten:

- De aanname dat het elektriciteitsnet verzaamd moet worden voor de aanleg van een warmtesysteem gebaseerd op warmtepompen
- De aanname dat vloerverwarming aangelegd moet worden voor zowel warmtepompen als LT warmtenetten

Beide aannames zijn onzeker, en deze onzekerheden zijn op dit moment niet te reduceren.

De aannames over de verzwaring van het lage spanning elektriciteitsnet is ons inziens zo goed mogelijk onderbouwd, maar heeft wel betrekking op een stedelijke omgeving. Het is mogelijk dat in een landelijke omgeving de noodzaak tot verzwaring minder is. De overschatting die we hiermee gedaan hebben lijkt ons niet zo groot dat het de conclusies zou beïnvloeden. Ook om andere redenen kan netverzwaring aan de orde zijn, zoals bijvoorbeeld voor het omschakelen naar elektrische voertuigen. Het is lastig om daarin onderscheid te maken.

Dat ligt anders voor de aannames met betrekking tot vloerverwarming. Die zijn wel één op één gerelateerd aan de vernieuwing van het warmtesysteem. De technologieën zijn ook toepasbaar zonder vloerverwarming, maar leiden dan tot een minder efficiënt warmtesysteem. De extra materiaalvraag zou dan afgewogen moeten worden tegen de extra elektriciteitsvraag om dezelfde kamertemperatuur te bereiken. Dat hebben we in dit rapport niet gedaan.

Een vergelijking van het lage-emissie warmtesysteem met het elektriciteitssysteem schept mogelijk wat context. We hebben deze vergelijking gemaakt voor staal, als een essentieel materiaal in beide systemen. Het Nederlandse warmtesysteem heeft naar schatting een voorraad van circa 3,3 tot 4,2 miljoen ton staal in 2050 en een jaarlijkse instroom van metalen van 180 tot 250 kiloton per jaar. Dit betekent dat het Nederlandse warmtesysteem pakweg een factor 5 minder staalintensief is dan het toekomstige Nederlandse elektriciteitssysteem, dat in 2050 een staalvoorraad zal omvatten van

ongeveer 14.300-25.800 kiloton staal en een jaarlijkse metaalinstream van 800 tot 1.600 kiloton per jaar (van Oorschoot et al., 2020).

Nieuwe warmtetechnologieën zijn nog volop in ontwikkeling. Dat betekent dat ook de materialen die nodig zijn voor het nieuwe systeem nog aan verandering onderhevig zijn. Dat geldt echter niet voor de grote stromen die gerelateerd zijn aan bouwmaterialen en isolatiemateriaal. Die zijn in alle gevallen noodzakelijk.

4.3 Implicaties voor beleid

De opbouw van het lage-emissie warmtesysteem vraagt om veel materiaal. Net als het elektriciteitssysteem is het een voorraad in opbouw. Het zal nog decennia duren voordat de uitstroom uit deze voorraad op het peil komt van de instroom. Het sluiten van kringlopen is daarmee een lange termijn perspectief. Op korte termijn kan de energietransitie, waarvan de warmtetransitie onderdeel uitmaakt, ervoor zorgen dat de circulaire beleidsdoelen van 2030 en 2050 moeilijker gehaald worden.

Daar staat tegenover dat de afdanking van het huidige gasgebaseerde warmtesysteem leidt tot het beschikbaar komen van materialen uit de bijbehorende productie- en transportinfrastructuur. Deze materialen zouden opnieuw ingezet kunnen worden, niet perse in dezelfde sector, maar het zou toch kunnen leiden tot een lagere vraag naar primair materiaal op het niveau van de gehele economie.

Warmtenetten, vooral hoge-temperatuur, komen er in deze analyse het beste uit: de materiaalvraag is het laagst omdat de benodigde aanpassingen aan woningen en grid het kleinst zijn. Echter, de afweging tussen warmtenetten en warmtepompen is een complexe, waarbij veel meer komt kijken dan alleen materiaalgebruik. In de praktijk zal hier maatwerk geleverd moeten worden.

Een andere mogelijkheid is om te bezien of de huidige gasinfrastructuur opnieuw ingezet zou kunnen worden voor de distributie van bijvoorbeeld waterstof of groen gas. De netbeheerders stellen dat staal, PVC en PE gasleidingen geen merkbare degradatie ondervinden van deze gassen, en daarom in principe geschikt zouden zijn hiervoor (Netbeheer Nederland, 2018). Dit betekent dat op massa-basis meer dan 90% van het huidige gasnet geschikt is voor de distributie van deze gassen. Of dat ook in de praktijk mogelijk zal blijken te zijn is voornog onduidelijk, maar een route waarin deze optie wordt gecombineerd met warmtenetten en/of warmtepompen lijkt interessant.

5. Literatuur

- Basosi, R., Bonciani, R., Frosali, D., Manfrida, G., Parisi, M. L., & Sansone, F. (2020). Life Cycle Analysis of a Geothermal Power Plant: Comparison of the Environmental Performance with Other Renewable Energy Systems. *Sustainability*, *12*(7), 2786. <https://doi.org/10.3390/su12072786>
- Berenschot. (2020a). *Het warmtescenario*. https://www.berenschot.nl/media/352kcpid/cases-het_warmtescenario.pdf
- Berenschot. (2020b). *Klimaatneutrale energiescenario's 2050*. https://www.berenschot.nl/media/hl4dygfq/rapport_klimaatneutrale_energiescenario_s_2050_2.pdf
- Cetinay, H., Kuipers, F. A., & Van Mieghem, P. (2018). A Topological Investigation of Power Flow. *IEEE Systems Journal*, *12*(3), 2524–2532. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2016.2573851>
- Cetinay, H., Soltan, S., Kuipers, F. A., Zussman, G., & Van Mieghem, P. (2018). Analyzing Cascading Failures in Power Grids under the AC and DC Power Flow Models. *ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review*, *45*(3), 198–203. <https://doi.org/10.1145/3199524.3199559>
- Ecofys. (2018). *Collectieve warmte naar lage temperatuur*. <https://www.ecofys.com/files/files/collectieve-warmte-naar-lage-temperatuur.pdf>
- Greening, B., & Azapagic, A. (2012). Domestic heat pumps: Life cycle environmental impacts and potential implications for the UK. *Energy*, *39*(1), 205–217. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.01.028>
- Harrison, G. P., Maclean, E. (Ned). J., Karamanlis, S., & Ochoa, L. F. (2010). Life cycle assessment of the transmission network in Great Britain. *Energy Policy*, *38*(7), 3622–3631. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.02.039>
- IEEE. (2020). *Resources – IEEE PES Test Feeder*. <https://cmte.ieee.org/pes-testfeeders/resources/>

- Jorge, R. S., Hawkins, T. R., & Hertwich, E. G. (2012). Life cycle assessment of electricity transmission and distribution—part 2: Transformers and substation equipment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 17(2), 184–191. <https://doi.org/10.1007/s11367-011-0336-0>
- Koezjakov, A., Urge-Vorsatz, D., Crijs-Graus, W., & van den Broek, M. (2018). The relationship between operational energy demand and embodied energy in Dutch residential buildings. *Energy and Buildings*, 165, 233–245. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.01.036>
- Moss, R. L., Tzimas, E., Kara, H., Willis, P., & Kooroshy, J. (2013). The potential risks from metals bottlenecks to the deployment of Strategic Energy Technologies. *Energy Policy*, 55, 556–564. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.12.053>
- NEDU. (2020). Verbruiksprofielen. NEDU. <https://www.nedu.nl/documenten/verbruiksprofielen/>
- Netbeheer Nederland. (2018). *Toekomstbestendige gasdistributienetten*. https://www.netbeheernederland.nl/_upload/Files/Toekomstbestendige_gasdistributienetten_133.pdf
- Nyers, J., & Nyers, A. (2011). COP of heating-cooling system with heat pump. In *EXPRES 2011—3rd IEEE International Symposium on Exploitation of Renewable Energy Sources, Proceedings* (p. 21). <https://doi.org/10.1109/EXPRES.2011.5741809>
- Oliver-Solà, J., Gabarrell, X., & Rieradevall, J. (2009a). Environmental impacts of natural gas distribution networks within urban neighborhoods. *Applied Energy*, 86(10), 1915–1924. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.11.029>
- Oliver-Solà, J., Gabarrell, X., & Rieradevall, J. (2009b). Environmental impacts of the infrastructure for district heating in urban neighbourhoods. *Energy Policy*, 37(11), 4711–4719. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.06.025>
- Pauliuk, S. (2018). *dynamic_stock_model: Python class for efficient handling of dynamic stock models* (1.0) [Python; MacOS]. https://github.com/stefanpauliuk/dynamic_stock_model
- PBL. (2019). *Warmtetransitie in de praktijk*. 126.

- PBL. (2021, January 19). *Integrale Circulaire Economie Rapportage (ICER)* [Text]. PBL Planbureau voor de Leefomgeving. <https://www.pbl.nl/monitoring-circulaire-economie/icer>
- Rijksoverheid. (2018a). *IBO kostenefficiëntie CO2-reductiemaatregelen*.
<https://zoek.officielebekendmakingen.nl/blg-725127.pdf>
- Rijksoverheid. (2018b). *Nederland circulair in 2050*.
<https://www.circulaireeconomienederland.nl/rijksbreed+programma+circulaire+economie/default.aspx>
- Spath, P. L., & Mann, M. K. (2000). *Life Cycle Assessment of a Natural Gas Combined Cycle Power Generation System* (NREL/TP-570-27715, 776930; p. NREL/TP-570-27715, 776930).
<https://doi.org/10.2172/776930>
- Sullivan, J. (2010). *Life-cycle analysis results of geothermal systems in comparison to other power systems*. OSTI. <https://www.osti.gov/biblio/993694-wlvuul/>
- van Oorscot, J., van Straalen, V., & Delahaye, R. (2020). *Voorraden in de maatschappij: De grondstoffenbasis voor een circulaire economie*. 119.
- Verhagen, T. J., Cetinay, H. I., van der Voet, E., & Sprecher, B. (2022). Transitioning to Low-Carbon Residential Heating: The Impacts of Material-Related Emissions. *Environmental Science & Technology*. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c06362>
- Verhagen, T. J., Pieters, L., Voet, E. van der, Straalen, V. van, & Tunn, V. (2022). *Voorraden in de maatschappij: De grondstoffenbasis voor een circulaire economie - deel III: met case studies op gebied van het gassysteem, de spoorinfrastructuur en consumentengoederen*.
<https://hdl.handle.net/1887/3281618>
- Vestas. (2019). *Life cycle assessment of electricity production from an onshore V117-3.45 MW wind plant*. 137.
- Weinzettel, J., Reenaas, M., Solli, C., & Hertwich, E. G. (2009). Life cycle assessment of a floating offshore wind turbine. *Renewable Energy*, 34(3), 742–747.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.04.004>

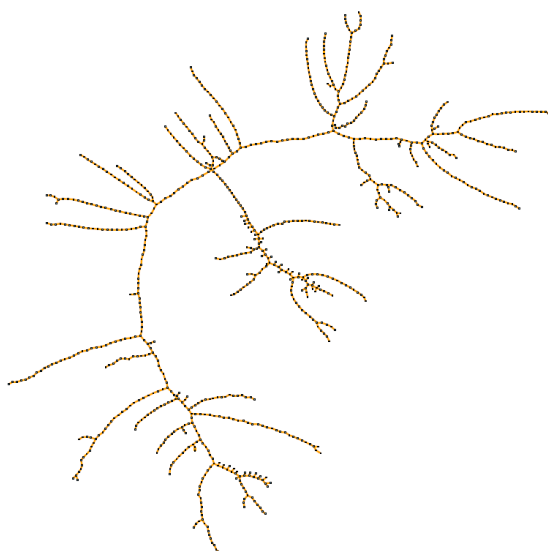
Zhang, C., Hu, M., Sprecher, B., Yang, X., Zhong, X., Li, C., & Tukker, A. (2021). Recycling potential in building energy renovation: A prospective study of the Dutch residential building stock up to 2050. *Journal of Cleaner Production*, 301, 126835.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126835>

Bijlage

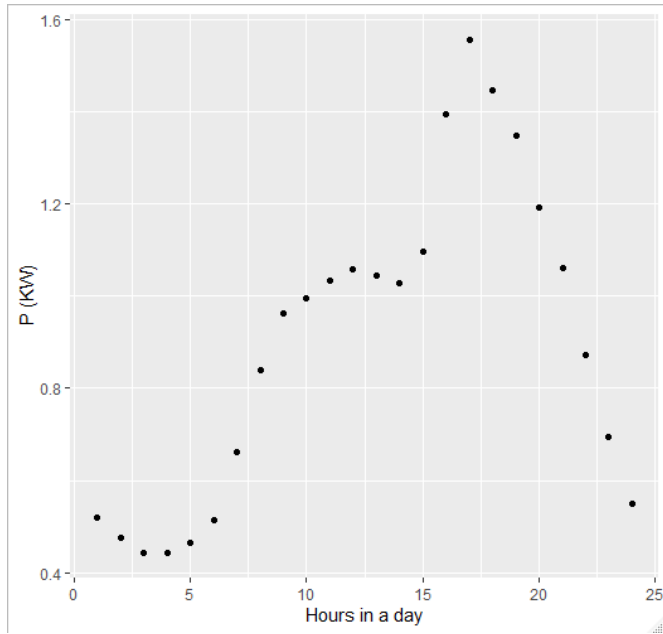
B1 – Gevolgen van de warmtetransitie voor het elektriciteitsnet

We gebruiken gedragsprofielen voor elektriciteitsverbruik van de vereniging Nederlandse Energie-Data Uitwisseling (NEDU), de overkoepelende organisatie van de Nederlandse elektriciteitsmaatschappijen, om een gemiddelde laagspanningsaansluiting in Nederland weer te geven (NEDU, 2020). We gebruiken het E1A-profiel, wat een laagspanningsaansluiting kleiner dan 3x25A representeert. Het elektriciteitsverbruik in Nederland inclusief grootverbruikers wordt per huishouden geschat op 6.000 kWh. De planning van de investeringen in het elektriciteitsnet zijn voornamelijk gebaseerd op de piekbelasting omstandigheden, dat wil zeggen wanneer de vraag naar elektriciteitsverbruik maximaal is. Volgens het NEDU-profiel vindt de piekbelasting plaats in de eerste week van januari met de maximale piekbelasting van 1,55 kW per huishouden zoals weergegeven in figuur S2.



Figuur S1. Europees laagspanningsnet met $N=906$ knooppunten en $L=905$ links. Het raster is een boomnetwerk, met andere woorden, er zijn geen lussen. Het netwerk begint vanaf de laagspanningszijde van de distributietransformator (knooppunt 1).

Figuur S1 geeft een typisch laagspanningsnet weer in een wijk in Europa (IEEE, 2020). Het netwerk heeft $N=906$ lv-aansluitingen (knooppunten), die zijn verbonden door $L=905$ lv-kabels (links) en 1 mv/lv-transformator. Figuur S1 is de grafische weergave van het raster, waarbij de knooppunten de lv-verbindingen voorstellen en de verbindingen de kabels tussen de verbindingen.



Figuur S2. Het elektriciteitsverbruik van een gemiddeld huishouden op de piekdag. De x-as geeft de uren in een dag weer, terwijl de y-as de elektriciteitsvraag in kW aangeeft.

We gebruiken de lineaire gelijkstroom stroomvergelijkingen om de stroom van elke link in het netwerk te vinden bij de omstandigheden van piekbelasting (Cetinay, Kuipers, et al., 2018). Na nemen we aan dat de thermische capaciteit c_l van een link l is $c_l = \min\{\text{mean}(\text{flows}), (1 + \alpha) \times f_l\}$ en een investeringsbeslissing wordt genomen wanneer de stroom f_l van een link hoger is dan zijn thermische capaciteit c_l (Cetinay, Soltan, et al., 2018). In dit rapport nemen we $\alpha = 0.5$.

We gaan ervan uit dat er in ons theoretische elektriciteitsnet in eerste instantie geen woningen met warmtepompen zijn. Vervolgens tellen we de belasting van de warmtepomp op bij de reguliere elektriciteitsvraag van het huishouden. Wij kiezen voor een warmtepomp met een capaciteit van 4 kW. Als we ons concentreren op de piekvraag naar stroom op een dag, gaan we ervan uit dat de warmtepomp op volle capaciteit zal werken met COP=1 waardoor de elektrische belasting van een warmtepomp 4 kW is (Nyers & Nyers, 2011). We nemen de gelijktijdigheidsfactor van de warmtepompen als 1, wat betekent dat de meeste mensen hebben waarschijnlijk een warmtepomp aan het werk op deze winterpiekdag. Als we de kans dat een huishouden een warmtepomp krijgt h_i is, wordt de totale belasting van een huishouden met warmtepomp $P_{i,max}^{HP}$.

$$P_{i,max}^{HP} = P_{i,max}^0 + h_i \times s_i$$

Waar s_i de grootte van de warmtepomp op aansluiting (knooppunt) i en $P_{i,max}^0 = 1.55$ is de initiële piekbelasting van de aansluiting i .

We gaan uit van een uniforme verdeling van de warmtepomp over de huizen, met andere woorden, elk huis heeft een even grote kans om een warmtepomp te krijgen. Onder deze aannames berekenen we de gelijkstroomstroom opnieuw om de stroom van elke link in het netwerk te berekenen en we vergelijken deze nieuwe stromen van de links met hun thermische capaciteiten om de overbelaste links te vinden. Daarnaast berekenen we aan de hand van de lengtes van de kabels in de datasets ook de totale lengte van de overbelaste schakels.

Om de gemiddelde additionele investering van lv-kabels en het aantal distributietransformatoren per huishouden in deze voorbeeldbuurt te berekenen, normaliseren we de integratie-effecten van de

warmtepomp met het aantal huishoudens N . Voor de distributietransformatoren zien we dat deze overbelast raakt wanneer $h_i = 0.2$ dus zijn investeringsbeslissing wordt een stapfunctie. Tabel 1 geeft de gemiddelde investeringen per aansluiting weer in het theoretische elektriciteitsnet. Om heel Nederland te beoordelen, kunnen we schalen per huishouden voor de benodigdheden van deze aansluitingen.

Tabel S1 Gemiddelde investeringslengte van lv-kabels en distributietransformatoren per huishouden versus de kans op integratie van warmtepompen

Waarschijnlijkheid van de integratie van warmtepompen h_i	Additionele lv kabellengte benodigd (m)	Additionele distributie transformatoren benodigd (units)
0	0	0
0.1	0.04	0
0.2	0.42	0.0011
0.3	0.42	0.0011
0.4	0.44	0.0011
0.5	0.45	0.0011
0.6	0.47	0.0011
0.7	0.48	0.0011
0.8	0.5	0.0011
0.9	0.51	0.0011
1	0.52	0.0011

Een gelijkaardige analyse is ook gedaan voor hybride warmtepompen, met de aanname dat de piekbelasting van de warmtepomp 3 kW is. In vergelijking met de volledig elektrische warmtepompen zien we dat de transformator overbelast raakt wanneer $h_i = 0.3$ en de extra investeringen in de lv-kabels iets lager zijn.

Tabel S2 Gemiddelde investeringslengte lv-kabels en distributietransformatoren per huishouden versus de kans op integratie hybride warmtepompen

Waarschijnlijkheid van de integratie van hybride warmtepompen h_i	Additionele lv kabellengte benodigd (m)	Additionele distributie transformatoren benodigd (units)
0	0	0
0.1	0.01	0
0.2	0.05	0
0.3	0.42	0.0011
0.4	0.42	0.0011
0.5	0.44	0.0011
0.6	0.45	0.0011

0.7	0.45	0.0011
0.8	0.47	0.0011
0.9	0.47	0.0011
1	0.49	0.0011

B2 – Levensduurverwachtingen van de onderdelen van het lage-emissie warmtesysteem

Tabel S3a, gemiddelde levensduur voor elke onderdeel van het lage-emissie warmtesysteem (jaren):

	Gebouw aanpassingen	Isolatie materialen	Infrastructuur	Elektriciteit en warmteproductie	Bronnen
HT warmtenetten	25	75	50	20	(Oliver-Solà et al., 2009b; Sullivan, 2010)
LT warmtenetten	25	75	50	30	(Basosi et al., 2020; Oliver-Solà et al., 2009b)
Warmtepompen	25	75	40	25	(Greening & Azapagic, 2012; Jorge et al., 2012; Spath & Mann, 2000; Vestas, 2019)
Hybride warmtepompen	25	75	40	25	(Greening & Azapagic, 2012; Jorge et al., 2012; Spath & Mann, 2000; Vestas, 2019)

Tabel S3b, Weibull-functieparameters gebruikt in het Dynamic Stock Model gebaseerd op de gemiddelde levensduur uit Tabel S3a:

	Gebouw aanpassingen		Isolatie materialen		Infrastructuur		Elektriciteit en warmteproductie	
	Schaal	Verdeling	Schaal	Verdeling	Schaal	Verdeling	Schaal	Verdeling
HT warmtenetten	2	28	67	2	2	57	2	23
LT warmtenetten	2	28	67	2	2	57	2	34
Warmtepompen	2	28	67	2	2	45	2	28
Hybride warmtepompen	2	28	67	2	2	45	2	28

B3 – Excel bestanden met waardes per technologie en scenario

Het volgende bestand bevat alle materiaalwaardes per technologie en huishouden:

- Materials_per_technology_v3

De volgende bestanden bevatten alle materiaalwaardes over tijd per scenario:

- DSM base scenario 1.2
- DSM base scenario 2.2
- DSM base scenario 3.2