



HOE NAAR EEN AARDGASVRIJE GEBOUWDE OMGEVING IN 2050?

Voorstudie voor het PBL-project Trajectverkenning Klimaatneutraal 2050

Nico Hoogervorst

26 april 2024

PBL

Colofon

Hoe naar een aardgasvrije gebouwde omgeving in 2050? Vorstudie voor het PBL-project Trajectverkenning Klimaatneutraal 2050

© PBL Planbureau voor de Leefomgeving
Den Haag, 2024
PBL-publicatienummer: 5504

Contact

Steven.vanpolen@pbl.nl

Auteur

Nico Hoogervorst

Met dank aan

De auteur is dank verschuldigd aan de diverse interne en externe reviewers, meedenkers en data-verzamelaars. Drie collega's hebben een extra grote bijdrage geleverd aan dit rapport. Boris van Beijnum heeft een grote bijdrage geleverd aan de verwerking en analyse van de benodigde data. Wouter Wetzels heeft de datavoorziening over de dienstensector verbeterd. Ruud van den Wijngaart bewaakte de consistentie met de Startanalyse 2020 en leverde een grondige tekstcontrole. Externe reviewers Lex Bosselaar (RVO), Sabine Jansen (BZK), Joop Oude Lohuis (zelfstandig adviseur), Benno Schepers (CE Delft), en Casper Tigchelaar (TNO) hebben nuttig commentaar gegeven op de conceptversie. Ook PBL-collega's Bert Daniels, Caren Herbstritt, Frans Schilder, Bart Strenegers, Martine Uyterlinde, Rutger Wolthuis hebben kritische vragen gesteld en bruikbare tekstsuggesties gedaan. Jarry Porsius en Folckert van der Molen adviseerden over methodische kwesties.

Redactie figuren

Beeldredactie PBL

Eindredactie en productie

Uitgeverij PBL

Delen uit deze publicatie mogen worden overgenomen op voorwaarde van bronvermelding: Nico Hoogervorst (2024), Hoe naar een aardgasvrije gebouwde omgeving in 2050?; Voorstudie voor het PBL-project Trajectverkenning Klimaatneutraal 2050, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving.

Het Planbureau voor de Leefomgeving (PBL) is het nationale instituut voor strategische beleidsanalyses op het gebied van milieu, natuur en ruimte. Het PBL draagt bij aan de kwaliteit van de politiek-bestuurlijke afweging door het verrichten van verkenningen, analyses en evaluaties waarbij een integrale benadering vooropstaat. Het PBL is vóór alles beleidsgericht. Het verricht zijn onderzoek gevraagd en ongevraagd, onafhankelijk en wetenschappelijk gefundeerd.

Inhoud

Samenvatting	5
De opgave voor een klimaatneutrale gebouwde omgeving	5
Traject 1: Na-isoleren eerst	10
Ontwikkeling van de energiebehoefte in traject 1	14
Traject 2: Potenties warmtenetten benutten	14
Ontwikkeling van de energiebehoefte in traject 2	20
Traject 3: Schone gassen	21
Ontwikkeling van de energiebehoefte in traject 3	26
Traject 4: All-electric	27
Ontwikkeling van de energiebehoefte in dit traject 4	30
Vergelijking van de vier trajecten	31
Beleidsmatige implicaties	34
1 Inleiding	36
1.1 Op weg naar klimaatneutraliteit	36
1.2 Doel van dit rapport	37
1.3 Leeswijzer	37
1.4 Methodische verantwoording	38
2 Warmtetransitie in de gebouwde omgeving	44
2.1 Klimaatopgave voor de gebouwde omgeving	44
2.2 Stand van zaken in de warmtetransitie	45
2.3 Technische opties voor klimaatneutraal verwarmen, de bouwstenen	48
2.4 Overwegingen bij de selectie van trajecten naar klimaatneutraliteit	52
3 Raakvlakken met andere onderwerpen	56
3.1 Nieuwbouwopgave woningen	56
3.2 Dynamiek in de dienstensector: sloop en nieuwbouw	57
3.3 Mondiale en nationale energiemarkten	59
3.4 Krapte op de arbeidsmarkt	61
4 Traject “Na-isoleren eerst”	63
4.1 Inleiding	63
4.2 Waarom energie besparen?	63
4.3 Hoeveel energiebesparing is mogelijk met selectiever verwarmen in woningen?	67
4.4 Hoeveel energiebesparing is haalbaar met na-isolatie van woningen?	68
4.5 Woningen efficiënter verwarmen	78
4.6 Energie besparen in woningen versnellen	84
4.7 Energiebesparing in de dienstensector	94
4.8 Mogelijk tempo van vergaande na-isolatie	108
5 Traject “Potenties van warmtenetten benutten”	113

5.1	Inleiding	113
5.2	Waarom warmtenetten?	113
5.3	Nationale kosten van warmtenetten	117
5.4	Hoeveel nieuwe warmtenetten zijn kosten-efficiënt?	120
5.5	Meer warmte-aansluitingen realiseren	123
5.6	Mogelijk tempo uitbreiding warmtenetten	135
6	Traject “Schone gassen”	139
6.1	Inleiding	139
6.2	Waarom verwarmen met schone gassen?	139
6.3	Hoeveel schoon gas is haalbaar?	146
6.4	Hoeveel schoon gas is nodig in 2050?	148
6.5	Benodigde maatregelen in dit traject	153
6.6	Denkbaar transitietempo naar verwarmen met schone gassen	162
7	Traject “All-electric verwarmen”	164
7.1	Inleiding	164
7.2	Waarom all-electric verwarmen?	164
7.3	Is all-electric verwarmen overal mogelijk?	165
7.4	Op weg naar overal elektrisch verwarmen	168
7.5	Het transitietempo naar all-electric verwarmen	175
8	Vergelijking van de vier trajecten	177
8.1	Inleiding	177
8.2	Uitvoerbaarheid	178
8.3	Robuustheid	184
8.4	Kosten van maatregelen	187
8.5	Ruimtegebruik buiten gebouwen	190
8.6	Tempo van CO ₂ -reductie tot 2050	191
8.7	Conclusies	192
9	Referenties	198
	Bijlage 1: Toelichting op kostenberekeningen in de Startanalyse 2020	207

Samenvatting

De opgave voor een klimaatneutrale gebouwde omgeving

Onze regering streeft naar klimaatneutraliteit in 2050. Dat betekent dat de uitstoot van broeikasgassen dan tot (bijna) nul moet zijn teruggebracht, ook in de gebouwde omgeving. Bij uitvoering van het huidige vastgestelde en voorgenomen beleid daalt die uitstoot van de gebouwde omgeving echter niet snel genoeg, ondanks de beleidsintensivering die de afgelopen jaren heeft plaatsgevonden. Om in 2050 klimaatneutraal te zijn is dus een herbezinning op de gekozen aanpak nodig.

Beëindigen van broeikasgasemissies in de gebouwde omgeving betekent stoppen met het gebruik van aardgas voor verwarming van gebouwen en tapwater en overstappen op andere, klimaatneutrale energiedragers zoals groene stroom, duurzame warmte, groengas of klimaatneutrale waterstof. Om die andere energiedragers efficiënt te kunnen toepassen, zal de vertrouwde HR-ketel bijna overal vervangen moeten worden door andere verwarmingsinstallaties zoals elektrische of hybride warmtepompen en warmtewisselaars bij een warmtenetaansluiting. Daarnaast kan de behoefte aan klimaatneutrale energiedragers worden beperkt met na-isolatie van gebouwen. Al die aanpassingen in woningen en utiliteitsgebouwen (zie Tabel 1) vragen in de eerste plaats actiebereidheid van gebouweigenaren en van bewoners, bedrijven en instellingen die die gebouwen gebruiken. Vervolgens zal de energieproductie en distributie moeten worden afgestemd op veranderingen in het energieverbruik in gebouwen.

Gebouweigenaren zijn nog terughoudend

Veel gebouweigenaren aarzelen nog over na-isolatie en aardgasvrij maken van hun energievoorziening. Ze zien niet alleen veel praktische bezwaren maar zijn ook onzeker over wat uiteindelijk in hun situatie de beste techniek zal zijn en wat het hen gaat kosten. Klimaatneutraal verwarmen is in veel gevallen nu nog duurder dan verwarmen met aardgas, ook met subsidie. Door extreem hoge gasprijzen van 2022 is het gasverbruik in woningen met 15% gereduceerd en de interesse in na-isolatie toegenomen. Het is de vraag of die interesse blijvend is nu de gasprijzen weer dalen en de overheid de stijging beperkt en compenseert om ongewenst koopkrachtverlies tegen te gaan. Bij de afweging van voor- en nadelen blijkt dat de belangen van gebouweigenaren en gebruikers niet altijd parallel lopen. Gebruikers hebben belang bij een betrouwbare comfortabele verwarmingsinstallatie en een lage energierekening terwijl gebouweigenaren de kosten dragen voor de aanleg, het onderhoud en de verduurzaming ervan. Eigenaren die hun gebouw zelf gebruiken, kunnen de kosten zelf afwegen tegen de baten van comfort en energiebesparing. Eigenaren die hun gebouw verhuren moeten met hun huurders tot overeenstemming komen over verduurzaming van de gebouwen, wat lastig is zolang de voor- en nadelen aan verschillende partijen toevallen.

Tabel 1Schematische ordening van technieken voor CO₂-reductie in de gebouwde omgeving.

Toepassing:	Woningen ruimteverwarming	Woningen warm tapwater	Woningen koken	Diensten ruimteverwarming	Diensten productieprocessen
Aardgasverbruik 2019^{a)}	224 PJ/jaar	46 PJ/jaar	6 PJ/jaar	100 PJ/jaar	20-25 PJ/jaar
Maatregelen energiebesparing	Na-isoleren; Zuinige installaties; zuiniger stoken.	Minder, korter douchen; WTW's		Na-isoleren; Zuinige installaties; zuiniger stoken.	Zuinige installaties en productieprocessen
Klimaatneutrale energiedragers	Groengas, groene stroom, restwarmte, omgevingswarmte, waterstof	Groengas, groene stroom	Groengas, groene stroom	Zelfde als bij woningen	Zelfde als bij woningen
Apparaten	Hybride warmtepomp, warmtewisselaar, elektrische warmtepomp	Ketel, geiser, boiler	Gasfornuis, elektrisch fornuis, oven	Zelfde als bij woningen	Divers, afhankelijk van proces.

- a) Globale schatting van het gasverbruik voor tapwater en koken in woningen en voor productieprocessen in de dienstensector. Volgens de KEV-2021 was het gasverbruik in 2019 (na temperatuurcorrectie) in woningen 276 PJ en in de dienstensector 122 PJ. In woningen is het energieverbruik voor warm tapwater hier mogelijk overschat en dat voor ruimteverwarming onderschat.

De overheid kan onzekerheid verkleinen en gunstige condities scheppen

Het collectieve belang van een lagere CO₂-uitstoot blijft doorgaans buiten de afweging van private voor- en nadelen van verduurzaming. Dat is logisch zolang het beperken van CO₂-uitstoot grote offers vraagt en de kans op succes (minder klimaatverandering) klein en onzeker is. Die succeskansen worden alleen groter als iedereen meedoet, zodat de totale CO₂-uitstoot substantieel afneemt. In democratische samenlevingen is gelegitimeerd overheidsbeleid nodig om burgers en bedrijven maatregelen te laten nemen die het collectieve belang dienen ten koste van het eigenbelang (op korte termijn). Daarom maakt de Nederlandse overheid al enkele decennia klimaatbeleid. Daarin wordt een balans gezocht tussen wat maatschappelijk wenselijk is (snelle emissiereductie) en wat haalbaar is met betrekking tot de maatregelen die burgers en bedrijven bereid zijn daarvoor te nemen. Met allerlei regelingen, voorschriften, belastingen, heffingen en subsidies creëert de overheid condities die het voor burgers en bedrijven (vaak financieel) aantrekkelijker maken om maatregelen te nemen die de uitstoot van broeikasgassen reduceren.

Voor nul-emissie in 2050 is meer en ander beleid nodig

In de gebouwde omgeving stimuleert de rijksoverheid de verduurzaming met een breed pakket beleidsinstrumenten dat in 2022 is beschreven in het programma Versnelling Verduurzaming Gebouwde Omgeving en in 2023 is aangevuld met aangescherpte regelingen en extra financiële middelen. Het programma is vooral gericht op het bereiken van het emissieplafond van 13,2 Mton CO₂-equivalenten in 2030, maar wil ook verdere emissiereductie ondersteunen. De meeste stimulansen zijn gericht op het na-isoleren van gebouwen en het installeren van hybride warmtepompen. Verder komen vrijwel alle technieken die bijdragen aan CO₂-reductie in aanmerking voor subsidie, die kan oplopen tot 30%. Naast gebouweigenaren worden ook installatiebedrijven en andere overheden gestimuleerd om hun bijdrage aan de warmtetransitie te leveren. Met uitvoering van alle vastgestelde en voorgenomen beleidsmaatregelen daalt de verwachte uitstoot naar 18 Mton CO₂-equivalenten in 2030 en naar 14,4 Mton in 2040. Als alle geagendeerde beleidsintensivering ook worden doorgevoerd dan kan de uitstoot in 2030 volgens de Klimaat- en

Energieverkenning 2023 zijn gedaald naar 12-18 Mton. Al dat beleid is echter niet toereikend om de uitstoot in 2050 op nul te krijgen. Om dat doel te halen is dus meer of ander beleid nodig.

Systemanalyses kunnen beleidsvernieuwing ondersteunen

Het verduurzamen van een heel energiesysteem en van alle bestaande gebouwen is ingrijpend en complex. Er zijn wel veel technische opties beschikbaar en in ontwikkeling, maar het is nog moeilijk daar een keuze uit te maken omdat de gevolgen van die keuzes nog onduidelijk en onzeker zijn. Dat hindert de ontwikkeling van een heldere strategie voor de warmtetransitie. Op dit moment, in deze fase van de transitie, stimuleert de overheid alle technieken die kunnen bijdragen aan minder CO₂-uitstoot. Dat versnipperd de ontwikkelkracht van de samenleving en is op den duur waarschijnlijk niet houdbaar voor de overheidsfinanciën. Versnelling van de warmtetransitie is gebaat bij meer focus en een duidelijk verhaal voor burgers en bedrijven. Om die duidelijkheid te kunnen verschaffen, is inzicht nodig in de te verwachten gevolgen van bepaalde typen maatregelen. Die gevolgen strekken zich uit over alle actoren in het energiesysteem: gebouweigenaar en gebruikers, netbeheerders, energieleveranciers en -producenten, installateurs, bouwvakkers, opleiders en overheden. In de warmtetransitie bestaan allerlei dwarsverbanden die individuele beslissers moeilijk kunnen overzien. Het vergt een analyse op systeemniveau om de gevolgen voor alle betrokken partijen goed in kaart te brengen.

Vorbereiding van een systemanalyse: vier trajecten

Doel en plaatsbepaling van dit rapport

Dit rapport presenteert de resultaten van een voorstudie, als bijdrage aan het PBL-project Trajectverkenning Klimaatneutraal 2050 (TVKN2050). Hier worden voor de gebouwde omgeving vier trajecten naar klimaatneutraliteit uitgewerkt. In elk traject staat een andere technische aanpak van de warmtetransitie centraal; een techniek die veel aanhangers heeft in het maatschappelijk debat. Waar die techniek op zichzelf niet toereikend is om volledige klimaatneutraliteit te realiseren, wordt die aangevuld met passende andere technieken. De trajecten houden rekening met de grote diversiteit binnen de bestaande gebouwvoorraad, met de technische mogelijkheden en eisen van de toe te passen installaties en met verwachte productiekosten van maatregelen en energiedragers. Op grond van die gegevens wordt een maatregelenpakket samengesteld waarmee de gehele gebouwde omgeving in 2050 zonder aardgas kan worden verwarmd, inclusief nieuwbouw. Vervolgens worden de obstakels voor realisatie van zo'n traject in kaart gebracht en worden suggesties geïnventariseerd om die te overwinnen. Dat resulteert in een taakstellend tijdpad voor implementatie van alle benodigde maatregelen.

Deze vier trajecten hebben (slechts) betrekking op het deel van het energiesysteem *binnen* de gebouwde omgeving. De interacties met leveranciers van elektriciteit, warmte en duurzame gassen buiten de gebouwde omgeving zijn kwalitatief verkend en met behulp van veronderstellingen verwerkt in de berekeningen. In het TVKN-project worden die interacties in meer detail geanalyseerd met behulp van een computermodel dat het hele Nederlandse energiesysteem simuleert. De resultaten van die analyse worden apart gepubliceerd. De input voor die analyse is afkomstig van de trajecten die in dit rapport zijn beschreven. Welke informatie uit deze voorstudie bij die analyse is gebruikt, wordt gedocumenteerd in het TVKN-Achtergrondrapport gebouwde omgeving (Wetzels, Hoogervorst, Van Beijnum, Daniëls, & Strengert, 2024).

Relevantie van dit rapport voor de strategische beleidsontwikkeling

Met de uitwerking van vier trajecten naar een klimaatneutrale gebouwde omgeving wordt informatie gepresenteerd die kan helpen bij het beantwoorden van de volgende strategische vragen:

- Welke hindernissen staan versnelling in de weg?
- Hoe wordt de warmtetransitie betaalbaar?
- Waar ligt de balans tussen energie besparen en energie verduurzamen?

Voor elk traject worden technische, economische en organisatorische hindernissen benoemd en wordt verkend hoe die opgeheven zouden kunnen worden. Daarbij is ook aandacht voor situaties waarin bestaande beleidsinstrumenten elkaar in de weg (kunnen) zitten.

Om de betaalbaarheid van de warmtetransitie in beeld te krijgen, worden de nationale kosten van elk traject geschat en wordt aangegeven hoe die kosten worden vertaald (bij de regelingen en subsidies die in 2020 van kracht waren) naar kosten voor eindgebruikers. Grote verschillen in nationale kosten kunnen aanleiding zijn het beleid meer te richten op maatregelen met lage nationale kosten.

De berekeningen voor dit rapport tonen aan dat vergaand na-isoleren van bestaande gebouwen met MT-warmtenetverwarming en hybride warmtepompen tot hogere systeemkosten leidt dan beperkt na-isoleren tot schillabel D. Dat roept de vraag op of de huidige strategie met overal na-isolatie tot de isolatiestandaard niet onnodig duur wordt en beslag legt op materialen en personeel die beter voor andere verduurzamingsmaatregelen kunnen worden ingezet.

Uit vergelijking van de trajecten blijkt dat verwarmen met klimaatneutrale gassen veruit de goedkoopste optie wordt, ook bij grote variatie in de toekomstige kosten van groengas en waterstof. Het is echter onduidelijk hoe snel de productie daarvan gaat stijgen en hoezeer een eventuele toedeling ervan aan de gebouwde omgeving nadelig zal zijn voor de verduurzaming van de industrie en de vervoerssector. In een all-electric traject kunnen gebouwen concurreren met de industrie om elektriciteitslevering op piekmomenten. Die concurrentie tussen sectoren om schaarse energiedragers wordt verkend in de systeemanalyse in het TVKN-project. Dit rapport verkent de daarvoor benodigde informatie uit de gebouwde omgeving en schetst de gevolgen voor de gebouwde omgeving van een beperkte én onbeperkte toepassing van groengas of waterstof voor verwarming van gebouwen.

Voor dit rapport is maximaal gebruik gemaakt van bestaande informatie die medio 2023 beschikbaar was. Op onderdelen was die informatie echter ontoereikend voor een evenwichtige analyse, met name van technische mogelijkheden in de dienstensector. Bij andere onderdelen is nog discussie over de beste manier om toekomstige ontwikkelingen te kwantificeren. Zo zijn hier schattingen van te verwachten energiebesparing door isolatiemaatregelen gebaseerd op praktijkgegevens van het aardgasverbruik in woningen terwijl modellen die zich baseren op bouwfysische kenmerken van woningen meer energiebesparing berekenen (zie hoofdstuk 4). Ook zijn de toekomstige kosten van maatregelen en klimaatneutrale energiedragers (groene stroom, warmte, groengas en waterstof) moeilijk te voorspellen en is daarom gewerkt met onderbouwde schattingen (zie bijlage 1).

De vier trajecten in vogelvlucht

In deze studie zijn de volgende vier trajecten naar een klimaatneutrale gebouwde omgeving ontwikkeld:

- In traject 1 is energiebesparing door middel van na-isolatie van bestaande gebouwen tot de isolatiestandaard de belangrijkste maatregel. Daar kan snel mee worden begonnen, het maakt Nederland minder afhankelijk van energie-import en huishoudens minder gevoelig van fluctuerende energieprijzen. De resterende warmtebehoefte van goed geïsoleerde gebouwen wordt

tegen de laagste nationale kosten geleverd met een mix van elektrische warmtepompen, warmtenetaansluitingen en hybride warmtepompen.

- Traject 2 benut de potentie van warmtenetten maximaal. Zo benutten we energiebronnen die er al zijn en anders onbenut blijven, zoals restwarmte (MT en LT), aardwarmte en aquathermie. Benutting van MT-restwarmte en geothermie is het goedkoopst in combinatie met matige na-isolatie van gebouwen. Warmtenetten met LT-bronnen zouden een beperkt aantal gebouwen kunnen verwarmen. De resterende bouwvoorraad wordt dan verwarmd met elektrische warmtepompen of hybride warmtepompen, afhankelijk van de beschikbare hoeveelheid klimaatneutraal gas.
- Traject 3 verkent de gevolgen van een ruime beschikbaarheid van klimaatneutrale gassen, zoals groengas of waterstof. Bestaande warmtenetten blijven in gebruik tot het eind van hun technische levensduur. Deze aanpak is het minst ingrijpend voor bestaande woningen en bedrijfspanden omdat minder na-isolatie nodig is en omdat het eenvoudiger is om cv-ketels te vervangen door een hybride warmtepomp dan door een aansluiting op een warmtenet. Het is tot nu toe echter onzeker hoeveel klimaatneutraal gas tegen 2050 beschikbaar zal zijn voor de gebouwde omgeving.
- Traject 4 verkent de gevolgen van volledig elektrisch verwarmen van alle gebouwen. Dit traject heeft het voordeel van de eenvoud en de flexibiliteit in de uitvoering van gebouwmaatregelen, zoals na-isoleren tot schillabel B, eventueel aanpassen van radiatoren, ventilatie en kooktoestellen. Die flexibiliteit wordt mogelijk begrensd in gebieden waar verzwaring van het elektriciteitsnetwerk niet tijdig wordt gerealiseerd. Bestaande warmtenetten blijven in gebruik tot het eind van hun technische levensduur.

De constructie van deze vier GO-trajecten bouwt voort op eerder PBL-onderzoek naar de nationale kosten van technieken voor aardgasvrij verwarmen van gebouwen: de Startanalyse aardgasvrije buurten (PBL 2020w). Daarin werden kosten berekend van 24 combinaties van technieken om de hele bestaande gebouwde omgeving klimaatneutraal te maken. Het ging daarbij om het na-isoleren van gebouwen tot twee verschillende isolatieniveaus en het toepassen van verschillende typen elektrische warmtepompen, warmtenetten met verschillende soorten midden- en lage temperatuur bronnen, hybride warmtepompen en HR-ketels. In alle gevallen werd aardgas vervangen door een klimaatneutrale energiedrager: elektriciteit, warmte, groengas of klimaatneutrale waterstof. De kostenberekening is uitgevoerd voor elk van de circa acht miljoen gebouwen in Nederland in 2019 en de resultaten zijn geaggregeerd tot data voor ruim 13.600 buurten en ontsloten via een website (PBL, 2020w).

Minimaliseren van nationale kosten beperkt de transitielast

Bij het samenstellen van de vier GO-trajecten is steeds een andere selectie gemaakt uit deze 24 varianten. Uit alle varianten die voldeden aan de uitgangspunten van een traject is per buurt de variant met de laagste **nationale kosten** geselecteerd en in het traject opgenomen. Dat is gedaan om rekening te houden met grote verschillen tussen buurten in de kosten per traject. Die kosten variëren tussen nul en 1000 euro per ton CO₂-reductie. Door te selecteren op laagste nationale kosten ontstaat een beeld van de maatregelen waarmee een bepaald traject op de minst ingrijpende manier doorlopen zou kunnen worden. Nationale kosten zijn afgeleid van productiekosten, exclusief belastingen, heffingen en subsidies. Ze zijn daarmee een indicator voor de inspanningen die geleverd moeten worden om een techniek toe te passen en van de totale kosten die de samenleving daarvoor moet maken. De toekomstige nationale kosten van maatregelen zijn afgeleid van de huidige kosten plus verwachtingen over mogelijke kostendalingen tot 2030. Deze benadering geeft een redelijk beeld van de te verwachten *kostenverschillen tussen* trajecten maar is minder accuraat

voor schatting van absolute kostenniveaus op termijn. Het absolute kostenniveau is echter niet nodig om te weten met welke set van maatregelen een traject tegen de laagste nationale kosten kan worden doorlopen.

Kostenverdeling staat in beginsel los van techniekeuze

Nationale kosten wijken af van **private kosten** die burgers en bedrijven betalen. De rijksoverheid beïnvloedt de verdeling van nationale kosten over groepen burgers en bedrijven door middel van voorschriften, belastingen, heffingen en subsidies. Met name in de energievoorziening speelt de overheid een grote rol in de herverdeling van productiekosten, zoals bij de NMDA-regels voor bepaling van warmtetarieven, de ODE-heffing om SDE-subsidies te financieren, de tariefregels voor levering van gas en stroom, de degressieve tarieven van energiebelasting voor grootverbruikers, etc. Met subsidies kan de overheid het toepassen van bepaalde maatregelen voor bepaalde groepen aantrekkelijk maken. Daarmee gaan de kosten niet weg, maar worden ze verschoven naar andere partijen. Herverdelen van nationale kosten kan problematisch worden als het om grote bedragen gaat, zoals in de warmtetransitie. Bij lagere nationale kosten is de kans op problemen bij de kostenverdeling kleiner. Dat pleit ervoor om, binnen bepaalde randvoorwaarden, een maatregelenpakket te kiezen met de laagste nationale kosten (zoals ook in het Klimaatakkoord is afgesproken) en *vervolgens* te bezien op welke manier die kosten het beste verdeeld kunnen worden over partijen binnen de samenleving. De huidige regels over kostenverdeling stammen uit het tijdperk van fossiele energie. Aanpassing van die regels kan er voor zorgen dat maatregelen met de laagste nationale kosten ook de laagste private kosten krijgen. Dat maakt die maatregelen financieel aantrekkelijk voor burgers en bedrijven en zal het transitietempo versnellen.

Traject 1: Na-isoleren eerst

Voordelen van na-isolatie

Goed geïsoleerde gebouwen hebben minder externe energie nodig om binnen een behaaglijke temperatuur te creëren dan slecht geïsoleerde gebouwen. Met na-isolatie van bestaande gebouwen kan de energiebehoefte dus worden verlaagd en krijgen bewoners (doorgaans) een lagere energierekening. Schommelingen in energieprijzen hebben dan minder effect op het vrij besteedbaar inkomen. Waar na-isolatie leidt tot minder tocht, vocht en schimmelvorming komt dat ook de gezondheid van bewoners ten goede.

Naast deze private voordelen zijn er ook maatschappelijke voordelen. Besparing van fossiele energiedragers leidt tot minder uitstoot van broeikasgassen. Een lagere nationale energiebehoefte reduceert ook de behoefte en bijbehorende afhankelijkheid van energie-importen en komt de voorzieningszekerheid ten goede, zowel bij fossiele als klimaatneutrale energiedragers.

Hoeveel energiebesparing is mogelijk met na-isolatie?

Isolatie kan in verschillende gradaties worden aangebracht in gebouwen, variërend van wat minimaal is voorgeschreven in het Bouwbesluit tot zo vergaand dat nog nauwelijks externe energie hoeft te worden toegevoegd om de binnentemperatuur in de winter op minimaal 21 graden te houden. In dit traject (na-isoleren eerst) hanteren we het isolatieniveau van de isolatiestandaard voor woningen die het kabinet in 2021 vaststelde (Ollongren, 2021). Die isolatiestandaard is zo gekozen dat elk gebouw daarmee geschikt is voor verwarming met water van 50 graden en hoger. Met die ontwerp-eis kunnen verschillende soorten verwarmingsinstallaties en klimaatneutrale energiedragers worden toegepast. Dat maakt het mogelijk om alvast met na-isoleren te beginnen, ook als de

keuze van een bepaald klimaatneutraal verwarmingssysteem nog jaren op zich laat wachten. In het Klimaatakkoord werd dat daarom 'spijtvrij isoleren' genoemd. De isolatiestandaard is uitgedrukt in een wiskundige formule voor berekening van het maximale verbruik aan primaire energie per vierkante meter vloeroppervlak. Om de standaard minder abstract te maken, vermeldt elk nieuw energielabel de maatregelen die huiseigenaren nog kunnen nemen om aan de standaard te voldoen. Nieuwe woningen moeten voldoen aan de eisen uit het Bouwbesluit en voldoen daarmee ook aan de isolatiestandaard; na-isolatie is daar dus niet nodig.

Voor de berekeningen in deze studie is verondersteld dat de isolatiestandaard voor woningen ongeveer overeen komt met schillabel B¹. Voor elke bestaande woning is bepaald welke maatregel-pakket nodig is om schillabel B te bereiken, wat daarvan de nationale kosten zijn en hoeveel energie daarmee kan worden bespaard. Uit registraties van energielabels en schattingen van het gasverbruik van woningen zonder label is afgeleid dat in 5,7 miljoen woningen, ofwel 73% van alle woningen in 2019, nog na-isolatie nodig is om aan de isolatiestandaard te voldoen (zie Figuur 5). Daarmee kan 20% worden bespaard op de energiebehoefte voor ruimteverwarming, wat overeenkomt met 44 PJ aardgas (bij toepassing van een HR-ketel).

Voor utiliteitsgebouwen is nog geen isolatiestandaard bepaald maar worden wel routekaarten ontwikkeld naar klimaatneutraliteit. Voor de berekeningen hier is verondersteld dat ook bestaande utiliteitsgebouwen uiteindelijk worden na-geïsoleerd tot schillabel B en dat nieuwbouw moet voldoen aan strengere eisen. Het effect van na-isolatie van alle utiliteitsgebouwen in 2019 is geschat op 43% besparing op de functionele warmtevraag ofwel 59 PJ. In de Startanalyse is die besparing geschat op 39 PJ. Schattingen lopen uiteen door verschillen in afbakening van de dienstensector en door gebrek aan gedetailleerde data over het energieverbruik in de dienstensector. Een deel van de bestaande utiliteitsgebouwen wordt de komende jaren waarschijnlijk gesloopt en vervangen door (andersoortige) beter geïsoleerde nieuwbouw.

Verwarmingstechnieken voor goed geïsoleerde gebouwen

Elke verwarmingstechniek, die radiatorwater van minimaal 50 graden maakt, is technisch geschikt om goed geïsoleerde gebouwen comfortabel te verwarmen met een acceptabel verbruik van elektriciteit, warmte of gas. Dat was immers de eis aan de isolatiestandaard. Verwarmingstechnieken met lagere temperaturen kunnen ook comfortabel verwarmen als de radiatoren daarop worden afgestemd. Omdat elke techniek het gewenste comfort kan leveren, zijn voor de keuze van te installeren verwarmingsinstallaties andere criteria relevant, zoals de lokale beschikbaarheid van bepaalde typen energiedragers, de te verwachten kosten, de complexiteit van omschakelen naar een nieuw type installatie, etc. In dit traject krijgt elke buurt de verwarmingstechniek die daar tegen de laagste nationale kosten kan worden gerealiseerd. De argumentatie voor het gebruik van dat criterium is hierboven al beschreven.

Uit de Startanalyse 2020 is gebleken dat verwarmen met groengas of waterstof in vrijwel alle buurten de laagste nationale kosten vergen. Wegens de huidige onzekerheid over de toekomstige beschikbaarheid van deze gassen, veronderstellen we dat op termijn maximaal 2 bcm (70 PJ) groengas beschikbaar komt voor de gebouwde omgeving. Daarvan is 0,5 bcm bestemd voor de hulpketels van warmtenetten. Met de resterende 1,5 bcm groengas kunnen dan 2,4 miljoen

¹ Een schillabel is het energielabel (bepaald volgens NEN7120) van een woning met een HR-ketel zonder PV-panelen.

woningequivalenten (weq) worden verwarmd. Voor 1,2 miljoen weq zijn MT-warmtenetten de goedkoopste optie en bij 0,2 miljoen weq zijn dat LT-warmtenetten. Tegen de laagste nationale kosten is de elektrische warmtepomp bij 6,4 miljoen weq te installeren, inclusief kosten voor na-isolatie, (waar nodig) aanpassing van radiatoren en ventilatie en overstappen op elektrisch koken.

Belemmeringen voor na-isoleren

Na-isoleren van woningen bezorgt bewoners (meestal kortstondig) overlast tijdens de uitvoering. Spouwmuurisolatie levert meestal weinig overlast, evenals vloerisolatie, mits er een begaanbare kruipruimte aanwezig is. Plaatsen van isolatieglas en dakisolatie vereisen meestal dat een deel van de woning daarvoor wordt vrijgemaakt.

Woningeigenaren hebben zich vóór de daadwerkelijke uitvoering al verdiept in de technische opties, hebben een aannemer gezocht, onderhandeld over de prijs en financiering geregeld. Bij spouwmuurisolatie is tegenwoordig een vleermuizenonderzoek verplicht, wat 1000 – 4000 euro per gebouw kost en maanden vertraging kan veroorzaken.

In 2019 was bijna 40% van alle woningeigenaren geïnteresseerd in verduurzaming terwijl bij de meerderheid sprake was van inertie en mogelijk ook weerstand (SCP, 2021). Die groep is nu mogelijk kleiner geworden door de grote gasprijsstijgingen van 2022. Dat heeft er in ieder geval voor gezorgd dat meer mensen nu *weten* dat ze met na-isolatie hun gasverbruik kunnen reduceren. Veel mensen vinden de kosten van isolatie een belangrijke belemmering. De overheid voedt dat kostenargument door te benadrukken dat de transitie ‘haalbaar en betaalbaar’ moet zijn en door maatregelen sterk te subsidiëren. Het blijft voor gebouweigenaren echter moeilijk te bepalen of de kosten van na-isolatie opwegen tegen de toekomstige besparing op de gasrekening. Daarnaast ervaren veel mensen ook andere belemmeringen, zoals verhuisplannen, geen tijd of prioriteit of problemen met financiering.

Verhuurders combineren de uitvoering van isolatiemaatregelen bij voorkeur met periodiek groot onderhoud. Die planning is moeilijk te beïnvloeden met beleidsimpulsen die na-isolatie willen versnellen. Door het huidige huurpuntenstelsel en afspraken met huurders kunnen niet alle kosten worden doorberekend aan de huurders, wat na-isoleren onrendabel maakt voor verhuurders. Verhuurders hebben toestemming nodig van minstens 70% van alle bewoners van een pand. Het vergt vaak veel overleg om dat percentage te halen. Huurders krijgen de financiële voordelen van een lagere gasrekening in ruil voor een beperkte huurverhoging. Dat financiële voordeel zal de acceptatie van maatregelen vergroten maar is niet voor elke huurder doorslaggevend.

In de dienstensector komt na-isolatie traag op gang ondanks stimulansen daarvoor in de Wet Milieubeheer. Veel scholen en zorginstellingen hebben onvoldoende geld voor verduurzaming. Bedrijven en instellingen hebben doorgaans meer aandacht voor hun primaire (productie)-proces waardoor energiebesparing vaak weinig aandacht krijgt. Zo zouden alle kantoren vanaf 2023 minimaal energielabel C moeten hebben maar op 1 januari voldeden 21.000 panden (58%) niet aan die norm. Strengere handhaving van bestaande regels en verdere aanscherping ervan kan daar verandering in brengen.

Na-isoleren bespaart minder energie dan technisch mogelijk

Naast belemmeringen voor het toepassen van na-isolatie zijn er ook factoren die het energiebesparende effect van getroffen maatregelen verkleinen. In alle bouwtypen zorgt suboptimale uitvoering van isolatiemaatregelen voor een lager rendement. In woningen wordt het stookgedrag vaak aangepast nadat isolatiemaatregelen zijn genomen (reboundeffect). Daardoor wordt een deel van de energiebesparing ingeruild voor een hogere binnentemperatuur. Mogelijk gaan bewoners ook

meer kamers verwarmen of langer verwarmen dan strikt noodzakelijk. De afzonderlijke invloed van deze factoren is niet te kwantificeren (door gebrek aan data) maar de totale invloed in de hele woningvoorraad is wel te bepalen met behulp van energieverbruiksdata uit de praktijk. Met die praktijkdata berekenen we dat na-isolatie van de hele woningvoorraad tot schillabel B de warmtevraag met 20% verlaagt. Zonder reboundeffect en met perfecte uitvoering van isolatiemaatregelen zou 27% bespaard kunnen worden (zie paragraaf 4.4.2).

Beleid voor meer en sneller na-isoleren

Het rijksbeleid voor de gebouwde omgeving stimuleert het na-isoleren van gebouwen al meer dan 40 jaar. In 2019 kreeg dat beleid een extra impuls door het Klimaatakkoord (2019). Daarin is afgesproken een isolatiestandaard te ontwikkelen waar alle gebouwen op termijn minimaal aan moeten voldoen. In 2020 nam het parlement vier moties aan waarin het kabinet werd aangespoord om het na-isoleren van gebouwen krachtig te stimuleren. In 2021 lanceerde de EU-commissie het “Fit for 55” pakket, inclusief een aangescherpte richtlijn voor energieprestaties van gebouwen (EPBD), die minimum eisen stelt aan energielabels van bestaande gebouwen. Vervolgens publiceerde het kabinet zijn Nationaal Isolatieprogramma (2022) met allerlei regelingen om gebouweigenaren te stimuleren slechte energielabels te verbeteren en de nationale isolatiestandaard zo snel mogelijk toe te passen. Die regelingen variëren van verruimde subsidies en afspraken met verhuurders over na-isolatie van gebouwen tot voorlichting over zuiniger stoken (o.a. met de campagne “Zet jij ook de knop om naar 19 graden?”).

Het is moeilijk te bepalen of al deze beleidsinstrumenten voldoende zijn om het tempo van na-isolatie te versnellen. Omdat de isolatiekosten de laatste jaren minder dalen dan in de berekeningen (uit 2020) is verondersteld, is op termijn meer subsidie nodig om na-isolatie financieel aantrekkelijk te maken. Eerdere beleidsanalyses (PBL, 2014), (CE Delft, 2022d) concludeerden dat versnelling alleen mogelijk is met meer dwingend beleid. Maar politici zijn (tot nu toe) terughoudend bij het instellen van verplichtingen. Zo werd in het Klimaatakkoord aangekondigd dat de isolatiestandaard verplicht zou worden, maar dat is tot nu toe nog niet gebeurd. In 2022 werd de voorwaarde voor subsidie van minimaal 2 isolatiemaatregelen in één keer uit te voeren geschrapt omdat men dat oneerlijk vond voor mensen die één maatregel per keer nemen (en dat zijn de meesten). Dat maakt de subsidieregeling misschien wel eerlijker maar ook minder doelmatig, zie KEV 2022. Er is dus wel beleid denkbaar dat de benodigde versnelling kan realiseren, zoals verplichte normering, maar het is onduidelijk of politici en burgers dat acceptabel vinden.

Welk uitvoeringstempo is nodig?

In dit traject is niet alleen vergaande na-isolatie nodig (tot de isolatiestandaard) maar moeten overall ook andere verwarmingsinstallaties worden aangebracht, zie Tabel 2. We veronderstellen in dit traject aanscherping van het huidige isolatiebeleid zodat na-isolatie van woningen iets sneller wordt uitgevoerd dan het tempo waarin de cv-ketels worden vervangen door hun klimaatneutrale alternatief. In de dienstensector veronderstellen we een lineair verloop van de benodigde na-isolatie.

Tabel 2

Uitvoeringstempo van traject 1 in de bestaande bouw, in miljoen woningequivalenten met een bepaald type verwarmingsinstallatie per zichtjaar.

Type installatie	2020	2030	2040	2050
Elektrische warmtepomp		0,5	3,0	6,4
Aansluiting MT-net	0,4	0,6	0,8	1,2
Aansluiting LT-net			0,1	0,2
Hybride warmtepomp		1,0	1,2	2,4
Totaal	0,4	2,1	5,1	10,2

Ontwikkeling van de energiebehoefte in traject 1

Op grond van het geschetste uitvoeringstempo is de ontwikkeling van de behoefte aan energiedragers voor de gebouwde omgeving berekend. Ondanks vergaande na-isolatie daalt de totale energiebehoefte van de hele gebouwde omgeving nauwelijks: van 673 naar 644 PJ in 2050, zie Tabel 3. Dat is het gevolg van de toenemende energiebehoefte in de nieuwbouw. Door de groeiende toepassing van warmtepompen wordt echter een toenemend deel van de energiebehoefte gedekt uit omgevingswarmte; dat stijgt van 11 naar 197 PJ in 2050. Daardoor daalt het verbruik van finale (op te wekken) energie van 662 naar 447 PJ, waarvan 108 PJ in 2050 nodig is in de nieuwbouw. Het finale energieverbruik van de bestaande bouw daalt tussen 2019 en 2050 met 215 PJ ofwel met ruim 32 procent door toepassing van na-isolatie en efficiëntere verwarmingsinstallaties.

Tabel 3

Ontwikkeling energieverbruik (in PJ/jaar) in bestaande bouw en nieuwbouw tussen 2019 en 2050 in traject 1.

	2019	2030	2040	2050
Bestaande bouw 2019	662	585	457	340
Nieuwbouw woningen	0	19	31	36
Nieuwbouw utiliteitsgebouwen	0	30	55	71
subtotaal (finaal verbruik)	662	634	544	447
Omgevingswarmte (saldo)	11	35	107	197
Totaal input energie	673	669	651	644

PM: een uitsplitsing naar type energiedragers staat aan het eind van hoofdstuk 4.

Traject 2: Potenties warmtenetten benutten

Voordelen van warmtenetten

Warmtenetten faciliteren het gebruik van restwarmte, omgevingswarmte en hernieuwbare energiebronnen voor het verwarmen van gebouwen. Dat komt de technische efficiëntie van het energiesysteem ten goede: voor dezelfde hoeveelheid warmte in gebouwen hoeft dan minder energie te worden opgewekt. Daardoor wordt Nederland ook minder afhankelijk van energie-import en daalt het ruimtebeslag. Warmtenetten kunnen ook een rol spelen bij energieopslag (in het netwerk zelf en in WKO's) en bij balancering van het elektriciteitsnet (met elektrische boilers). Warmtenetten (met WKO's) bieden ook mogelijkheden om koeling van gebouwen (in de zomer of jaarrond) te combineren met verwarmen in de winter.

Hoeveel warmte-aansluitingen zijn mogelijk?

In 2020 waren ongeveer 444.000 gebouwen aangesloten op een warmtenet met HT- en MT-bronnen². Onder invloed van het bestaande beleid groeit dat aantal tot 2030 met 110.000 aansluitingen (KEV-2022) maar de overheid ontwikkelt aanvullend beleid om 500.000 nieuwe aansluitingen te realiseren tot 2030. Het *potentiële* aantal aansluitingen op warmtenetten is onder andere afhankelijk van de toekomstige fysieke beschikbaarheid van geschikte warmtebronnen en van de warmtebehoefte in gebouwen. Bedrijven die nu HT- en MT-restwarmte hebben, zullen hun energiehuishouding (ook) moeten verduurzamen onder invloed van het klimaatbeleid. Dat zal restwarmte op termijn wel volledig hernieuwbaar maken, maar de beschikbare capaciteit en volumes zullen afnemen. Een inventarisatie in 2020 van warmtebronnen voor levering aan HT- en MT-warmtenetten voor gebouwen leverde een langdurige beschikbaarheid op van ruim 13.600 MW thermisch vermogen. Met deze restwarmte zouden (in theorie) 5 miljoen woningequivalenten (weq) verwarmd kunnen worden. Geothermie wordt nu vooral in de glastuinbouw toegepast maar diverse gemeenten hebben plannen ontwikkeld voor toepassing bij woningen. Het Masterplan Aardwarmte beoogt een productiegroei van de huidige 5,6 PJ naar 200 PJ in 2050. Als de aanleg van MT-warmtenetten wordt beperkt tot gebieden met meer dan 50% kans op geothermie in de ondergrond, dan zouden ruim 8 miljoen weq aangesloten kunnen worden. Met beide brontypen samen zou dat in theorie ruim 9 miljoen weq kunnen worden.

In de praktijk zullen die aantallen niet worden bereikt omdat alternatieve verwarmingstechnieken op veel plaatsen aanmerkelijk goedkoper kunnen worden aangelegd. De kosten van warmtenetten worden voor gemiddeld 45-60% bepaald door de kosten van de transport- en distributieleidingen, berekend over 5 miljoen aansluitingen. Aansluitingen dicht bij de warmtebron en aansluitingen met korte onderlinge afstand (compacte bouw) zijn aanmerkelijk goedkoper dan aansluitingen verder weg. Dat maakt warmtenetten vooral (financieel) aantrekkelijk in stedelijk gebied. Bij verwarmen met elektriciteit of gas heeft de afstand tot de bron veel minder invloed op de kosten.

Warmtenetten met lage-temperatuurbronnen (LT) zijn nu nog zeldzaam. LT-bronnen, zoals oppervlaktewater en koelinstallaties, zijn op veel plaatsen aanwezig en blijven op termijn beschikbaar. De broncapaciteit is vaak beperkt en het aanbodprofiel sluit niet altijd aan bij het vraagprofiel van warmtenetten. Dat maakt LT-netten relatief duur en beperkt hun toepassingspotentie. In de Startanalyse is die geschat op 1,2 miljoen weq.

Verdeling van verwarmingstechnieken

De totale kosten van de warmtetransitie in Nederland worden zoveel mogelijk beperkt, als elke buurt de verwarmingsoptie kiest die daar de laagste nationale kosten heeft. Als de gebouwde omgeving tot 2050 jaarlijks maximaal 2 bcm groengas kan inzetten voor verwarming van gebouwen, dan beperkt minimalisering van nationale kosten de potentie van warmtenetten tot ruim 3 miljoen weq voor MT-netten en 0,3 miljoen weq voor LT-netten. Als 0,5 bcm groengas worden gebruikt voor de hulpketels van warmtenetten, dan resteert 1,5 bcm voor verwarming van maximaal 2,6

² De voorvoegsels HT en MT in dit rapport (en in de Startanalyse) duiden op de temperatuur van het water dat aan warmtenetten wordt aangeboden. HT staat voor 'hoge temperatuur' en betekent 80 – 100 graden Celsius. MT staat voor 'midentemperatuur' en betekent 55 – 80 graden Celsius. Andere studies gebruiken die aanduiding voor de aflevertemperatuur van water uit warmtenetten, die doorgaans lager is dan de temperatuur van de bronnen.

miljoen weq woningen en utiliteitgebouwen. De resterende 4,2 miljoen weq bestaande gebouwen worden dan verwarmd met elektrische warmtepompen.

Bij deze verdeling krijgen woningen met warmtenetten en hybride warmtepompen na-isolatie tot minimaal schillabel D. Kostenberekeningen (PBL, 2020w) wijzen namelijk uit dat de totale kosten bij dat isolatieniveau aanmerkelijk lager zijn dan bij na-isolatie tot schillabel B, wat bij traject 1 is verondersteld. Met schillabel D zijn de jaarlijkse energiekosten weliswaar hoger, maar dat wordt ruimschoots gecompenseerd door lagere kosten voor afschrijving en rente op investeringen in isolatie, zie paragraaf 4.4.2.

In de praktijk zal een keuze voor een warmtenet niet alleen worden bepaald door verschillen in nationale kosten ten opzichte van alternatieven. Die keuze zal ook worden beïnvloed door de private kosten, die mede afhankelijk zijn van subsidies en belastingen, en door andere overwegingen.

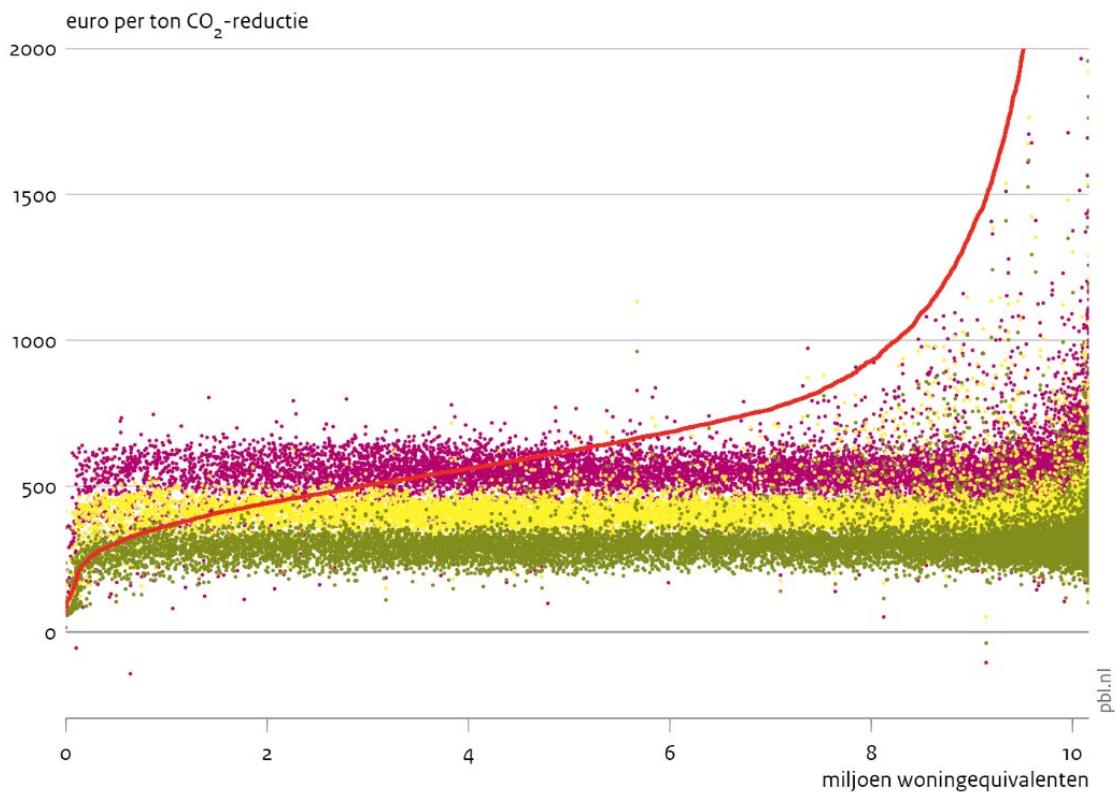
In nieuwbouwprojecten is aanleggen van warmtenetten eenvoudiger dan in de bestaande bouw. De aanlegkosten zijn daar lager en er is minder afstemming nodig met aanwezige bewoners. Bovendien kon daar (tot voor kort) bespaard worden op de aanleg van een gasnet. Nu nieuwe gasnetten verboden zijn, moeten warmtenetten in nieuwbouwwijken, met goed geïsoleerde woningen, concurreren met elektrische warmtepompen. In dit traject is verondersteld dat tot 2050 nog 0,9 miljoen nieuwbouwwoningen op een warmtenet worden aangesloten. Voor de dienstensector is verondersteld dat de helft van de nieuwbouw (0,6 miljoen weq) op een warmtenet wordt aangesloten, met name op bedrijfsterreinen.

Belemmeringen voor meer warmtenetten

In Nederland is het imago van warmtenetten niet onverdeeld positief. Bij veel mensen leeft het beeld van monopolistische bedrijven die veel winst maken met hoge warmtetarieven. Maar warmtetarieven zijn wettelijk gemaximeerd en gerapporteerde historische rendementen geven geen indicatie van buitensporige winsten. De beeldvorming is echter hardnekkig en dat heeft minister Jetten, op aandringen van gemeenten en provincies, doen besluiten in de nieuwe warmtewet (Wcw) te bepalen dat warmtebedrijven voortaan (voor meer dan 50%) publiek eigendom moeten zijn. Ook moeten warmtetarieven gebaseerd worden op de werkelijke kosten in plaats van worden afgeleid van de prijs van aardgas. De minister verwacht dat deze aanpassingen de acceptatie van nieuwe warmtenetten gaat vergroten.

De nieuwe eigendomsverhoudingen van warmtebedrijven zijn een radicale breuk met de huidige situatie waarin private partijen de warmtelevering verzorgen én eigenaar zijn van de netwerken en (vaak ook van) de bronnen. In de publieke warmtebedrijven krijgen gemeenten meer invloed. Het is nog erg onduidelijk of het gemeenten lukt zulke nieuwe bedrijven op te richten en of bestaande private warmtebedrijven bereid zijn om hun expertise in te zetten in publieke warmtebedrijven.

Figuur 1
Nationale kosten aardgas verwarmen in buurten, geordend naar oplopende kosten van verwarmen met een warmtenet gevoed door een MT- of HT-warmtebron



Verwarming per buurt (13.600 buurten, 54.400 datapunten)

- All-electric
- Waterstof
- Groengas
- Warmtenet met midden temperatuur warmtebron

Bron: PBL

De kosten van warmtenetten zijn een belangrijke belemmering

In veel buurten is verwarmen met een warmtenet nu duurder dan verwarmen met aardgas. Ook bij overstappen op klimaatneutrale systemen blijven warmtenetten op veel plaatsen veel duurder dan de alternatieven. Die hogere kosten worden vooral veroorzaakt door de aanleg van nieuwe warmtetransport- en distributieleidingen. In buurten met dichte bebouwing op korte afstand van warmtebronnen zijn die kosten per aansluiting lager dan elders. Dat veroorzaakt een grote spreiding tussen buurten in de totale kosten van verwarmen met warmtenetten, dus inclusief de kosten van warmte-opwek, transport, distributie en benodigde aanpassingen in gebouwen. Figuur 1 laat zien dat die spreiding van de nationale kosten van MT-netten (rode lijn) varieert van 50 tot meer dan 1800 euro per ton CO₂-reductie. Die figuur laat ook zien dat de nationale kosten van verwarmen met groengas (groene stippen) vrijwel overal lager zijn dan die van MT-netten. Bij meer dan 2-3 miljoen weq warmtenetaansluitingen geldt dat ook voor de kosten van verwarmen met waterstof (gele stippen) en vanaf 3-5 miljoen weq vergt all-electric verwarmen (paarse stippen) minder nationale kosten dan verwarmen met MT-netten. De nationale kosten van LT-netten (niet getoond in de grafiek) zijn vergelijkbaar met die van all-electric of iets hoger. Bij uitbreiding van het aantal warmtenetaansluitingen zullen de kosten per aansluiting toenemen (zie de rode lijn) en slinkt het kostenverschil met all-electric verwarmen. Dat maakt het op termijn steeds moeilijker om extra warmte-

netten aan te leggen, zeker als de kosten van warmtepompen sneller of verder dalen dan in deze berekeningen is verondersteld.

Ook voor eindgebruikers zijn warmtenetten vaak duurder dan alternatieven

Voor de acceptatie van warmtenetten zijn de private kosten (of eindgebruikerskosten) waarschijnlijk belangrijker dan de nationale kosten. De geldende belastingen, heffingen, subsidies en regelingen bepalen hoe nationale kosten worden verdeeld over burgers, bedrijven en overheden. De getoonde spreiding in nationale kosten geeft een goed beeld van de spreiding in private kosten. Er zijn dus buurten waar warmtenetten tegen lage private kosten kunnen worden aangelegd. Gemiddeld per woning zijn private kosten van warmtenetten lager dan nationale kosten omdat a) de warmteprijs die consumenten betalen gemaximeerd is volgens het NMDA-principe³ en b) omdat gebouw eigenaren subsidie krijgen op de eenmalige aansluitkosten. Omdat isolatiemaatregelen, warmtepompen en groengas ook gesubsidieerd worden, wijken de private kostenverschillen tussen warmtenetten en de andere opties af van de nationale kostenverschillen. Bij de regelingen die in 2020 van kracht waren, wordt in 2030 verwarmen met een warmtenet jaarlijks gemiddeld 530 euro per woning duurder (569-38) dan verwarmen met groengas en 475 euro duurder dan all-electric verwarmen. Bij die raming was gerekend met een bijdrage in de aansluitkosten (BAK) van 3728 euro per aansluiting terwijl warmtebedrijven aangeven dat 8-9000 euro per aansluiting nodig is voor een sluitende businesscase. Dat gat kan worden gedicht met de recent aangekondigde WIS-regeling, die per aansluiting tot 6000 euro subsidie mag verstrekken. Invoering van de WIS betekent dus niet dat de hier genoemde private kosten kunnen worden verlaagd.

Kostendaling is mogelijk bij meer zekerheid

Bewoners zullen niet warm lopen voor een warmtenet als ze het vooruitzicht hebben dat ze meer gaan betalen dan met een ander klimaatneutraal systeem. Er zijn allerlei voorstellen voor kostenreductie, zoals betere samenwerking, beperken van het volloopriscio⁴, verlaging van in pandige kosten door dat werk beter te organiseren, en optimaliseren van financieringscondities. Al die voorstellen zijn alleen uitvoerbaar als er meer duidelijkheid komt over de wenselijkheid van een warmtenet in een bepaald gebied. Gemeenten hebben daarin een regierol gekregen maar hun eerste lichte Transitievisies Warmte hebben die duidelijkheid nog niet gegeven. Dat is begrijpelijk, gezien de vele onduidelijkheden over de nieuwe warmtewet en over de toekomstige beschikbaarheid van alternatieven, zoals groengas, waterstof en voldoende verzwaarde elektriciteitsnetten.

Energiebesparing kan groei warmtenetten afremmen

Het huidige beleid voor verduurzaming van de gebouwde omgeving stimuleert de na-isolatie van gebouwen en de toepassing van elektrische en hybride warmtepompen. Die stimulansen werken generiek, dus ook in buurten waar warmtenetten nu nog tegen relatief lage kosten zouden kunnen worden aangelegd omdat de warmtebehoefte per hectare daar hoog is. Als woningeigenaren hun warmtebehoefte reduceren met na-isolatie en een warmtepomp, dan wordt daarna de overstap

³ Het NMDA-principe (Niet Meer Dan Anders) koppelt de warmteprijs aan de prijs van aardgas en is ingesteld om consumenten te beschermen tegen de marktmacht van warmtebedrijven. De NMDA-prijs in 2030 is naar verwachting lager dan de gemiddelde nationale leveringskosten van warmte in 2030 die onderdeel zijn van de nationale kosten in Tabel 27.

⁴ Het volloopriscio is het risico voor een warmtebedrijf dat uiteindelijk meer potentiële klanten niet of later worden aangesloten dan vooraf bij de investeringsbeslissing was verondersteld. Daardoor blijven de inkomsten lager dan vooraf geraamd.

naar een warmtenet voor hen financieel minder aantrekkelijk. Zij moeten dan immers eerst een eenmalige aansluitbijdrage betalen van enkele duizenden euro's en krijgen daarna jaarlijks een energierekening die waarschijnlijk hoger is.

Voor het toekomstige warmtebedrijf betekent dat minder deelnemers per warmtekavel en dus minder klanten om de vaste kosten van het netwerk over te verdelen. Dit kan zich vooral voordoen in buurten met laagbouw, waar woningen voldoende ruimte hebben om een warmtepomp te installeren. Bewoners met een hybride warmtepomp zouden dan nog wel tot een overstap kunnen worden gedwongen als de levering van gas wordt beëindigd, maar gebouwen met een elektrische warmtepomp kunnen een warmtenetaansluiting weigeren. Op dit moment is deze potentiële dynamiek nog niet op gang gekomen, maar als de onduidelijkheid rond de nieuwe warmtewet nog lang voortduurt zou het een rem kunnen zetten op de ontwikkeling van nieuwe warmtenetten.

Ook na aanleg van een warmtenet blijft concurrentie met warmtepompen actueel. Particuliere gebouweigenaren kunnen elk moment overstappen op een elektrische warmtepomp. Individuele huurders hebben die mogelijkheid niet, maar verhuurders hebben die mogelijkheid wel. In appartementen is die concurrentie mogelijk minder aanwezig omdat daar doorgaans weinig plaats is voor individuele warmtepompen. Maar daar kunnen collectieve warmtepompen een alternatief zijn.

Beleid voor sneller meer warmtenetten

Een uitbreiding van warmtenetten is op korte termijn het meest gediend met snelle afronding van de politieke besluitvorming rond de nieuwe warmtewet. Dat geeft duidelijkheid aan potentiële investeerders en biedt gemeenten het mandaat om een publiek warmtebedrijf op te richten, waar ze dat willen. Een publiek meerderheidsbelang in het lokale warmtebedrijf kan het draagvlak en de acceptatie onder bewoners vergroten, wat de deelname aan een nieuw warmtenet kan verhogen en het volloprisico kan verkleinen. Misschien kunnen inspraakprocedures rond de aanwijzing van warmtekavels en het uitwerken van wijkuitvoeringsplannen worden verkort. Het is op voorhand niet te voorspellen of het inzetten van dwingender instrumentarium (zoals het beëindigen van de gaslevering of verlagen van het aandeel huurders dat moet instemmen) tot versnelling zal leiden of juist meer verzet zal uitlokken en tot vertraging gaat leiden.

Als snel duidelijk wordt waar warmtenetten worden aangelegd, kunnen betrokken partijen afspraken maken over betere samenwerking, wat tot kostenverlaging zou kunnen leiden. Bij een kleiner volloprisico en publiek eigendom kunnen de risicopremies op leningen omlaag, wat de kosten van warmtenetten zal drukken. De concurrentiepositie ten opzichte van warmtepompen kan worden verbeterd door bestaande subsidies op warmtepompen en vergaande isolatie te beperken in gebieden waar een warmtenet wordt overwogen. De overheid kan de kosten voor eindgebruikers verlagen door investeringen in warmtenetten te subsidiëren. Het is echter niet efficiënt om met de ene subsidie de nadelen van een andere subsidie te corrigeren.

Welk uitvoeringstempo is nodig?

Het groeitempo van het aantal aansluitingen op warmtenetten (in bestaande bouw plus nieuwbouw) wordt de komende jaren sterk bepaald door het jaar waarin de nieuwe warmtewet (inclusief AMvB's en ministeriële regelingen) van kracht wordt. De aannahme in dit traject van 0,5 miljoen nieuwe aansluitingen in de bestaande bouw tussen 2020 en 2030 (zie Tabel 4) plus 0,7 miljoen aansluitingen in de nieuwbouw in diezelfde periode lijkt nu erg optimistisch. Maar vertragingen in dat tijdvak kunnen na 2030 nog wel worden ingelopen als het lukt om met aanvullend beleid gunstige condities te creëren. De toepassing van hybride warmtepompen wordt met het huidige beleid gestimuleerd en groeit de komende jaren snel tot 1 miljoen in 2030. Bij maximaal 1,5 bcm groengas

voor gebouwen in 2050 wordt de toepassing van hybride warmtepompen beperkt tot 2,6 miljoen. Het aantal elektrische warmtepompen groeit aanvankelijk trager dan het aantal hybriden, maar wordt na 2040 het dominante type. We veronderstellen dat na-isolatie van woningen in hetzelfde tempo wordt uitgevoerd als het tempo waarin cv-ketels worden vervangen door hun klimaatneutrale alternatief. In de dienstensector veronderstellen we een lineair verloop van de benodigde na-isolatie.

Tabel 4

Uitvoeringstempo van traject 2 in de bestaande bouw, in miljoen weq met een bepaald type installatie per zichtjaar.

Type installatie	2020	2030	2040	2050
Elektrische warmtepomp		0,4	1,0	4,2
Aansluiting MT-net	0,4	0,9	1,9	3,0
Aansluiting LT-net			0,1	0,3
Hybride warmtepomp		1,0	2,0	2,6
Totaal	0,4	2,4	5,0	10,2

Ontwikkeling van de energiebehoefte in traject 2

Op grond van het geschetste uitvoeringstempo is de ontwikkeling van de behoefte aan energiedragers voor de gebouwde omgeving berekend. Ondanks na-isolatie tot schillabel B in 60% van de bestaande bouw daalt de totale energiebehoefte van de hele gebouwde omgeving nauwelijks: van 673 in 2019 naar 661 PJ in 2050, zie Tabel 5. Dat is het gevolg van de toenemende energiebehoefte in de nieuwbouw. Door de groeiende toepassing van warmtepompen wordt echter een toenemend deel van de energiebehoefte gedekt uit omgevingswarmte; dat stijgt van 11 naar 117 PJ. Daardoor daalt het verbruik van finale (op te wekken) energie van 662 naar 544 PJ in 2050 (zie het *subtotaal* in tabel 5), waarvan dan 137 PJ in de nieuwbouw wordt verbruikt. Het finale energieverbruik van de bestaande bouw daalt tussen 2019 en 2050 met 118 PJ ofwel met bijna 18 procent. Die daling is minder dan in traject 1 omdat hier meer warmtenetten worden aangelegd (die minder efficiënt zijn dan warmtepompen) en omdat de woningen met warmtenetten en groengas hier na-isolatie tot schillabel D i.p.v. B krijgen.

Tabel 5

Ontwikkeling energieverbruik (in PJ/jaar) in bestaande bouw en nieuwbouw tussen 2019 en 2050 in traject 2.

	2019	2030	2040	2050
Bestaande bouw 2019	662	621	560	407
Nieuwbouw woningen	0	24	39	45
Nieuwbouw utiliteitsgebouwen	0	32	64	92
subtotaal (finaal verbruik)	662	676	663	544
Omgevingswarmte (saldo)	11	32	56	117
Totaal input energie	673	708	720	661

PM: een uitsplitsing naar type energiedragers staat aan het eind van hoofdstuk 5.

Traject 3: Schone gassen

Voordelen van verwarmen met schone gassen

Het vervangen van aardgas door een ander, klimaatneutraal gas is vanuit de eenvoudigste manier om de gebouwde omgeving klimaatneutraal te maken. In theorie zijn groengas (gemaakt van biomassa) en waterstof (gemaakt uit aardgas plus CCS of uit elektrolyse van water) daarvoor geschikte kandidaten. In de toekomstige praktijk moet blijken of er tijdig voldoende van die 'schone gassen' beschikbaar kunnen komen voor de gebouwde omgeving. Mocht dat lukken, dan zijn de voordelen in de gebouwde omgeving groot, met name omdat veel ingrijpende en dure maatregelen voor alternatieve, gasloze verwarmingssystemen dan achterwege kunnen blijven.

Klimaatneutraal verwarmen met schone gassen heeft de volgende voordelen:

1. Het bestaande landsdekkende gasdistributienet kan worden benut voor groengas of tegen relatief lage kosten geschikt worden gemaakt voor waterstof. Alternatieve energie-infrastructuur, zoals warmtenetten en verzwaarde stroomnetten zijn dan niet of minder nodig.
2. In de bouwvoorraad zijn relatief weinig ingrepen nodig. Gebouwen kunnen met de bestaande verwarmingsinstallaties en warmteafgiftesystemen comfortabel worden verwarmd en na-isolatie is in de helft van alle woningen ook niet perse nodig. Er hoeven dus minder huishoudens gemotiveerd te worden om in actie te komen en er zijn veel minder vaklieden nodig om maatregelen uit te voeren.
3. Schone gassen maken de toepassing mogelijk van hybride warmtepompen, die gas verbruiken als er veel warmte nodig is en elektriciteit in de rest van het jaar. De verhouding gas/elektriciteit kan flexibel worden ingesteld, wat erg handig is bij grote schommelingen in de variabele stroomproductie uit zon en wind.
4. Door pieken in de warmtevraag met gas op te vangen, kunnen dure piekvoorzieningen in warmtenetten of in de stroomproductie worden vermeden. Het huidige gasnet (inclusief opslagen) heeft voldoende capaciteit om op koude winterdagen pieken in de energiebehoefte te kunnen leveren.
5. Als gevolg van bovengenoemde verschillen met alternatieve, klimaatneutrale verwarmingssystemen zijn de nationale kosten van verwarmen met schone gassen veel lager. Schone gassen zijn (of worden) duurder dan duurzame warmte of groene stroom, maar dat kostenverschil is jaarlijks miljarden euro's kleiner dan het voordeel van lagere investeringskosten in energie-infrastructuur en gebouwaanpassingen (zie Tabel 10).

Hoeveel schoon gas is nodig?

Voor de inrichting van de gasinfrastructuur is een keuze tussen groengas of waterstof belangrijk maar voor schatting van de benodigde hoeveelheid gas in de gebouwde omgeving is die keuze niet heel relevant.

Zonder maatregelen zoals na-isolatie of andere vormen van energiebesparing verbruiken de (in 2019) bestaande gebouwen in 2050 naar schatting 375 PJ aardgas. Als dat vervangen wordt door

evenveel groengas dan stijgen de jaarlijkse nationale kosten met 5 miljard euro⁵. Dat zou de eenvoudigste en goedkoopste manier zijn om de hele gebouwde omgeving klimaatneutraal te maken. Met groene waterstof bedragen de extra nationale kosten dan 7,6 miljard euro per jaar voor het gas plus 1,1 miljard voor kapitaalslasten van investeringen in aanpassing van distributienetten en leidingen in gebouwen plus 0,4 miljard voor extra onderhoud; samen 9,1 miljard euro per jaar.

Om te anticiperen op toekomstige, blijvende schaarste aan groengas en waterstof, kan de behoefte aan gas gereduceerd worden met na-isolatie. Na-isoleren van alle bestaande woningen tot minimaal schillabel D verlaagt de gasbehoefte in 2050 met 16 PJ en na-isoleren tot minimaal schillabel B bespaart 44 PJ gas. Na-isolatie van alle gebouwen in de dienstensector tot schillabel B scheelt 33 PJ gas. Door na-isolatie dalen de kosten van groengas maar stijgen de jaarlijkse isolatiekosten meer. Bij na-isolatie van alle bestaande gebouwen tot schillabel B zijn de jaarlijkse isolatiekosten 3,6 miljard euro hoger dan de jaarlijkse besparing op groengas. Dat betekent dat de transitiekosten van een traject met groengas door na-isolatie zullen oplopen van 5 miljard euro per jaar zonder na-isolatie tot 8,6 miljard bij na-isolatie van alle bestaande gebouwen tot schillabel B (5 + 3,6). Bij gebruik van waterstof zijn de netto kosten van na-isolatie plus energiebesparing 0,5 miljard euro lager omdat waterstof duurder is dan groengas en een gelijke hoeveelheid gasbesparing (in PJ's) dus meer euro's bespaart. De totale transitiekosten zouden dan oplopen tot 12,2 miljard euro per jaar (9,1 + 3,1).

Soortgelijke kostenberekeningen op gebouwniveau voor de Startanalyse 2020 leidden tot de conclusie dat na-isoleren van alle bestaande woningen tot minimaal schillabel D (in plaats van B, zoals hierboven werd becijferd) en van utiliteitsgebouwen tot schillabel B een jaarlijkse gasbesparing van 49 PJ oplevert en de nationale kosten (netto) verhoogt met 1,4 miljard euro per jaar bij groengas en met 1 miljard euro per jaar bij waterstof.

Passende verwarmingstechnieken

Hoeveel gas bespaard kan worden is niet alleen afhankelijk van na-isolatie maar ook van het type verwarmingsinstallatie. Een deel van de huidige bouwvoorraad is nu al goed geïsoleerd (schillabel B en beter) en zou dus ook volledig elektrisch verwarmd kunnen worden. Verwarmen met een bestaand warmtenet blijft bij 340.000 woningequivalenten nationaal economisch het goedkoopst. Dat betekent dat op termijn 95% van de bestaande bouwvoorraad tegen de laagste nationale kosten verwarmd kan worden met schone gassen.

Bij gasgestookte gebouwen met een relatief lage warmtevraag zijn de nationale kosten van verwarmen met een HR-ketel lager dan met een hybride warmtepomp. Daar wegen de meerkosten van een hybride warmtepomp niet op tegen de lagere energiekosten. Dat geldt voor 75% van de huidige bouwvoorraad nadat alle woningen na-isolatie tot minimaal schillabel D hebben gekregen. Bij een optimale verhouding tussen HR-ketels en hybride warmtepompen daalt het gasverbruik dan naar 260 PJ per jaar. Als alle gebouwen hybride warmtepompen krijgen in plaats van HR-ketels, dan daalt het gasverbruik met 110 PJ naar 150 PJ in 2050. Tegelijkertijd stijgt echter de stroombehoefte voor ruimteverwarming en warm tapwater van 22 naar 56 PJ. Ook lopen de kosten iets op. Bij een besparing van 42% op de benodigde hoeveelheid groengas stijgen de totale

⁵ Berekend bij nationale kosten van aardgas (25 cent/m³), groengas (67 cent/m³) en waterstof (95 cent/m³ aardgasequivalent), gebruikt in de Startanalyse 2020 en afgeleid van verwachte productiekosten in 2030.

jaarlijkse nationale kosten met 4%, van gemiddeld 630 naar 653 euro per woning per jaar. Wegens dat geringe kostenverschil is het gebruik van HR-ketels uitgesloten in dit traject met schone gassen.

In de *nieuwbouw* zijn nieuwe aardgasaansluitingen voor kleinverbruikers nu verboden, maar in een traject dat toepassing van schone gassen mogelijk maakt en stimuleert, zou dat verbod heroverwogen kunnen worden. Nieuwe woningen op inbrei-locaties zouden kunnen worden aangesloten op gasleidingen die al aanwezig zijn. In de dienstensector kunnen grootverbruikers nu nog wel een gasaansluiting krijgen. Als 50% van alle nieuwbouw hybride warmtepompen gaat toepassen met schone gassen en de rest alleen elektrische warmtepompen, dan groeit tot 2050 hun energieverbruik voor ruimteverwarming naar 33 PJ schone gassen en 93 PJ elektriciteit. Op korte termijn kan het vertraging in de nieuwbouw voorkomen als er gebrek is aan netcapaciteit en als een warmtenet daar geen optie is. Als op lange termijn onvoldoende schoon gas beschikbaar komt, kan alsnog worden doorgeschakeld naar volledig elektrisch verwarmen.

Belemmeringen voor verwarmen met schone gassen

De grootste belemmering voor realisatie van een transitietraject met schone gassen is de onzekerheid over de toekomstige beschikbaarheid van groengas of waterstof. Daarnaast moet de productie en de installatiecapaciteit van hybride warmtepompen worden opgeschaald en moet bij de bevolking draagvlak worden gevonden voor dit traject, maar dat lijkt minder cruciaal.

Geen zekerheid over toekomstige levering voldoende groengas

De binnenlandse productie van groengas wordt gestimuleerd met een bijmengverplichting in het aardgasnet van 56 PJ in 2030. Het nationale productiedoel is 70 PJ in 2030. Verdere productiegroei in Nederland wordt beperkt door de beschikbare hoeveelheid biomassa. Met efficiëntere vergasstechnieken zou uit die biomassa nog wel meer groengas geproduceerd kunnen worden maar dat vergt verdere ontwikkeling van die technieken. Import van groengas is ook een optie maar daar is tot nu toe geen ervaring mee. Andere sectoren hebben ook interesse in biomassa en groengas. Hoe de toekomstige verdeling over sectoren zal uitpakken is nu nog erg onzeker.

Geen zekerheid over toekomstige levering voldoende waterstof

Soortgelijke onzekerheid heerst over de toekomstige toepassing van waterstof voor verwarmen van gebouwen. Uitbreiding van de productie van groene waterstof concurreert met andere bedrijven om de beschikbare hoeveelheid groene stroom, waarvan de productie ook gestimuleerd wordt. De productie van blauwe waterstof uit aardgas krijgt momenteel weinig aandacht. Dat vereist uitbreiding van CO₂-opslag, dat nog in de pilotfase verkeert, en leidt tot hogere aardgasimporten, die tegenwoordig niet populair zijn. Om waterstof te kunnen importeren, moet eerst de buitenlandse productie op gang worden gebracht. Het is nu nog erg onduidelijk waar die productie zal gaan plaatsvinden en of dat tot substantiële exportvolumes zal gaan leiden.

In internationale studies over allocatie van waterstof wordt vaak geconcludeerd dat schaarse waterstof beter buiten de gebouwde omgeving kan worden ingezet omdat daar geen of minder koolstof-arme alternatieven zijn en omdat verwarmen met waterstof (veel) duurder is/wordt dan verwarmen met warmtepompen en warmtenetten (Rosenow 2021). Uit nadere analyse (Teunis 2023) blijkt dat die studies vaak uitgangspunten hanteren die niet aansluiten bij Nederlandse omstandigheden. Voor Nederland (met zijn uitgebreide gasinfrastructuur) komt de Startanalyse 2020 tot lagere kostenramingen. In de systeemanalyse van het TVKN-project onderzoekt PBL de concurrentie om schaarse waterstof (en biomassa) tussen sectoren. Voor het traject Schone gassen, dat

input levert voor het TVKN-project, hanteren we daarom de werkhypothese dat er op termijn, tegen 2050, voldoende schone gassen beschikbaar komen voor de gebouwde omgeving.

Overstappen op waterstof vereist regionale planning

Het is denkbaar om in de gebouwde omgeving zowel groengas als waterstof te gaan gebruiken, maar dat moet dan wel in gescheiden gasnetten. Groengas kan traploos worden gemengd met aardgas tot uiteindelijk een mengsel van 100% groengas door de distributienetten vloeit. Bijmengen van waterstof verlaagt de calorische waarde van het gasmengsel en is nu wettelijk beperkt tot 0,5%. Bij hogere aandelen waterstof gaan branders minder goed functioneren, variërend per type brander en toepassing. Voor een grote groep Nederlandse huishoudens lijkt bijmengen tot 20% waterstof technisch mogelijk maar voor industriële toepassingen is 3% het maximum (KIWA, 2020). Het is efficiënter om branders in één keer aan te passen aan 100% waterstof. Het toepassen van een beperkte hoeveelheid waterstof is goedkoper en levert meer CO₂-reductie op als het zonder bijmenging wordt toegepast (in een beperkt gebied) dan wanneer het wordt bijgemengd in het nationale gasnet (Fraunhofer IEE, 2022). Overstappen op 100% waterstof verloopt daarom het beste via een integrale omschakeling in één keer van alle gebruikers binnen een distributienetdeel. Dat vereist een goede regionale planning, die gebouwegenaren tijdig in staat stelt om hun installaties (zo nodig) om te bouwen en netbeheerders de gelegenheid biedt om de transport- en distributienetten daarvoor geschikt te maken.

Opschalen productie en installatiecapaciteit hybride warmtepompen nodig

De installatiebranche is volop bezig installateurs voor hybride warmtepompen op te leiden en de productiecapaciteit ervan uit te breiden sinds de regering normering heeft aangekondigd die vanaf 2026 de HR-ketel gaat vervangen door hybride warmtepompen. De lange levertijden van 2022 lijken inmiddels grotendeels achter de rug. Er zullen nog kinderziektes overwonnen moeten worden en uitbreiding van vraag en aanbod kunnen tijdelijk minder synchronoos gaan lopen, maar de algemene verwachting is dat zich hier de komende decennia geen structurele belemmeringen zullen voordoen. Sommige woningtypen (zoals galerijflats) hebben onvoldoende ruimte voor een hybride warmtepomp in zijn huidige vorm. Voor die woningtypen zullen compactere uitvoeringen of collectieve hybride systemen ontwikkeld moeten worden.

Beleid voor sneller meer schone gassen voor gebouwen

Worden hybride warmtepompen teveel gestimuleerd?

Vervanging van de HR-ketel door een hybride warmtepomp (plus na-isoleren tot schillabel D) wordt snel financieel voordelig in bijna alle typen woningen. Bij 20% subsidie en verwachte gasprijzen van vóór corona zouden hybrides in 2030 in bijna alle woningtypes rendabel zijn (TNO, 2021b) (Tabel 42). Inmiddels is de subsidie verhoogd naar 30% en verwachten we in 2030 hogere aardgas-prijzen. In de dienstensector zijn hybrides vermoedelijk aantrekkelijker dan bij woningen. Door de aangekondigde normering ontstaat vanaf 2026 extra druk om een hybride warmtepomp aan te schaffen. Het lijkt erop dat er de komende jaren ruim voldoende stimulansen zijn om de toepassing van hybride warmtepompen te versnellen.

Wie gaat de schaarse gassen verdelen?

Omdat Nederlandse gasnetten in publieke handen zijn, kan de overheid de allocatie van groengas of waterstof beïnvloeden door bepaalde groepen producenten en consumenten wel of geen toegang te geven tot de netwerken van deze gassen. Daarmee hebben overheden een instrument in handen voor de verdeling van schone gassen over sectoren. Voor het bepalen van wat een efficiënte allocatie voor de Nederlandse samenleving is, kan gekeken worden naar de economische waarde van groengas en waterstof in de bestrijding van broeikasgasemissies in verschillende sectoren. Die waarde is niet alleen afhankelijk van ontwikkelingen in productie, vraag en kosten, maar ook van volume- en kostenontwikkelingen in *alternatieve* energiedragers met bijbehorende installaties (substituten) die in een zelfde behoefte kunnen voorzien. De prijsvorming van schone gassen is dus mede afhankelijk van de prijzen van alternatieve, gasloze methoden voor verwarming, transport en industriële productie van goederen en diensten.

Om de gewenste toekomstige gasnetten af te stemmen op de waarde van klimaatneutrale gassen, is een gasmarkt nodig waarop die waarde wordt bepaald. Maar een gasmarkt kan pas functioneren nádat de gasnetten zijn aangelegd. Dit kip-ei-probleem kan doorbroken worden door te werken met schattingen van de toekomstige waarde van klimaatneutrale gassen in verschillende toepassingen en locaties. Dergelijke schattingen zijn te verkrijgen uit simulaties met computermodellen. Het is echter heel moeilijk om betrouwbare waardeschattingen te maken, zeker voor de lange termijn. Dat komt omdat de uitkomsten sterk afhankelijk zijn van het type rekenmodel dat wordt gebruikt en van de gehanteerde veronderstellingen over toekomstige ontwikkelingen in relevante factoren. Die informatie is in handen van potentiële producenten en afnemers en verandert bovendien voortdurend.

Het risico op 'foute' beslissingen (die achteraf veel te duur blijken te zijn) kan worden beperkt door het bestaande gasnet stapsgewijs aan te passen aan de klimaatneutrale toekomst, zodat geleerd kan worden van de ervaringen met voorgaande stappen. Dat aanpassen kan zowel betrekking hebben op het geschikt maken voor groengas of waterstof als op het weghalen van het gasnet. Zolang de kosten van die aanpassingen hoog zijn en de onzekerheid over de toekomstige waarde van klimaatneutrale gassen groot is, kan het behouden en/of conserveren van het aardgasnet een aantrekkelijke optie zijn.

Welk uitvoeringstempo is haalbaar?

Uit voorgaande beschrijving volgt dat het transitietempo in dit traject bijna volledig bepaald gaat worden door het tempo waarin schone gassen geleverd gaan worden aan de gebouwde omgeving. Dat tempo is op dit moment niet te bepalen. Het is wel mogelijk een schatting te maken van het tempo waarin de gebouwde omgeving zich kan voorbereiden op de komst van schone gassen door gasnetten aan te passen en hybride warmtepompen te installeren.

Voor distributie van groengas zijn weinig aanpassingen in gasnetten nodig, dus dat zal het transitie-tempo waarschijnlijk niet nadelig beïnvloeden. Voor distributie van waterstof ligt dat anders. Daar is ombouwen van het gasnet pas mogelijk als er waterstof beschikbaar is. Dat maakt het lastig in een buurt te anticiperen op toekomstige levering van waterstof. Omdat de opschaling van waterstoflevering vermoedelijk traag op gang komt, zal het transitietempo bij waterstof waarschijnlijk lager zijn dan bij groengas. We baseren het uitvoeringstempo in dit traject daarom op de toepassing van groengas. In die variant is de timing van gebouwmaatregelen niet afhankelijk van het tempo waarin groengaslevering kan worden opgevoerd.

De installatiebranche denkt dat het mogelijk is om 1,5 miljoen hybride warmtepompen te installeren tot 2030. Dat is geëxtrapoleerd naar 4,8 miljoen weq's met een hybride warmtepomp in 2040 en 9,7 miljoen weq's in 2050. Het na-isoleren van woningen is daarvoor geen technische voorwaarde en de financiële aantrekkelijkheid daarvan zal worden bepaald door ontwikkelingen in de

gasprijzen, isolatiekosten en subsidies. We veronderstellen hier dat na-isolatie (gemiddeld over heel Nederland) het zelfde tempo volgt als installatie van hybride warmtepompen in bestaande gebouwen, zie onderstaande tabel.

Tabel 6

Uitvoeringstempo van traject 3 in de bestaande bouw, in miljoen weq met een bepaald type installatie per zichtjaar.

Type installatie	2020	2030	2040	2050
Elektrische warmtepomp		0,0	0,1	0,1
Aansluiting MT-net	0,4	0,4	0,4	0,3
Aansluiting LT-net			0,0	0,0
Hybride warmtepomp		1,5	4,8	9,7
Totaal	0,4	2,0	5,3	10,2

Ontwikkeling van de energiebehoefte in traject 3

Op grond van het geschetste uitvoeringstempo is de ontwikkeling van de behoefte aan energiedragers voor de gebouwde omgeving berekend. Ondanks na-isolatie tot schillabel D in bijna alle bestaande woningen en tot schillabel B in de hele dienstensector daalt de totale energiebehoefte van de hele gebouwde omgeving vrijwel niet: van 673 in 2019 naar 670 PJ in 2050, zie Tabel 7. Dat komt onder andere door de toenemende energiebehoefte in de nieuwbouw. Door de groeiende toepassing van hybride warmtepompen wordt een toenemend deel van de energiebehoefte gedekt uit omgevingswarmte; dat stijgt van 11 naar 141 PJ. Daardoor daalt het verbruik van finale (op te wekken) energie van 662 naar 529 PJ in 2050, waarvan dan 126 PJ in de nieuwbouw wordt verbruikt. Het finale energieverbruik van de bestaande bouw daalt tussen 2019 en 2050 met 133 PJ ofwel met 20 procent. Die daling is kleiner dan in traject 1 en 2 omdat hier veel meer hybride warmtepompen worden toegepast (die minder efficiënt zijn dan elektrische warmtepompen) en omdat woningen met hybriden hier na-isolatie krijgen tot schillabel D i.p.v. B.

Tabel 7

Ontwikkeling energieverbruik (in PJ/jaar) in bestaande bouw en nieuwbouw tussen 2019 en 2050 in traject 3.

	2019	2030	2040	2050
Bestaande bouw 2019	662	622	555	459
Nieuwbouw woningen	0	21	34	39
Nieuwbouw utiliteitsgebouwen	0	30	60	87
subtotaal (finaal verbruik)	662	660	619	529
Omgevingswarmte (saldo)	11	29	78	141
Totaal input energie	673	688	696	670

PM: een uitsplitsing naar type energiedragers staat aan het eind van hoofdstuk 6.

Traject 4: All-electric

Voordelen van elektrisch verwarmen

In dit traject verwarmen elektrische warmtepompen de gebouwen. Die zijn geïsoleerd tot de isolatiestandaard en voorzien van lage temperatuur afgiftesystemen, om voldoende comfort te kunnen bieden tegen acceptabele stroomkosten. Dit traject lijkt dus op traject 1 maar dan zonder warmtenetten en zonder 2 bcm hernieuwbare gassen met hybride warmtepompen. Dat levert een aantal voordelen op. Zo kunnen gebouweigenaren vaker zelf het moment van omschakeling bepalen omdat ze niet afhankelijk zijn van collectieve besluitvorming over warmtenetten (met hun complexe, lange implementatietrajecten) en geen last hebben van de onzekerheid over levering op termijn van groengas of waterstof. Daar staat tegenover dat een lokaal beperkte capaciteit van het elektriciteitsnet een grootschalige toepassing van warmtepompen kan vertragen of belemmeren. Omdat warmtepompen van alle opties de minste elektriciteit gebruiken per geleverde hoeveelheid nuttige warmte, is met dit traject ook makkelijker te voldoen aan de EU-doelen voor energie-efficiëntie (EED) en energiebesparing. Ook wordt het land ten opzichte van traject 1 minder afhankelijk van importen van groengas of waterstof maar op piekmomenten is mogelijk wel import van elektriciteit nodig.

Hoeveel elektrisch verwarmen is mogelijk?

In dit traject wordt in 2050 de hele energiebehoefte van de hele gebouwde omgeving (inclusief nieuwbouw) uit elektriciteit gedekt, zowel voor verwarming, koeling, productieprocessen in de dienstensector als voor het gebruik van huishoudelijke apparaten. Daardoor groeit de behoefte aan elektriciteit van 193 PJ in 2019 naar 363 PJ in 2050. We veronderstellen dat die hoeveelheden op termijn geleverd kunnen worden (uit nationale productie, opslag of import) op de momenten dat die stroom nodig is.

De extra elektriciteitsvraag is sterk geconcentreerd in de winter en met name in koude periodes. Naarmate het verschil tussen de binnen- en buitentemperatuur groter is, moet de warmtepomp meer warmte produceren om de gewenste binnentemperatuur te behouden. Op die momenten werken warmtepompen juist minder efficiënt en vragen dus meer stroom. Het stelt hoge eisen aan het elektriciteitssysteem om te garanderen dat op deze momenten voldoende elektriciteit kan worden geleverd. Hiervoor zijn grote investeringen in elektriciteitsproductievermogen of -opslagcapaciteit nodig. Die worden echter alleen benut als het aanbod van stroom uit zon en wind beperkt is. Dat zorgt in koude periodes voor hoge elektriciteitskosten. Met flexibele vraagsturing kunnen kostenpieken worden gedempt en mogelijk voorkomen, maar de technologie daarvoor moet nog ontwikkeld worden.

Bovendien moet het elektriciteitsnet voldoende capaciteit hebben om de piekvraag te kunnen leveren. Net-congestie is momenteel al een groot probleem. Netbeheerders willen daarom de netcapaciteit de komende tien jaar verdubbelen maar worden daarin gehinderd door gebrek aan ruimte, personeel en materiaal (NBNL, 2022). Daarna is verdere uitbreiding nodig, niet alleen voor het gebruik van warmtepompen maar ook voor het aansluiten van PV-panelen en voor het opladen van elektrische voertuigen. Dat betekent dat het tempo waarin netcongestie wordt opgelost bepalend kan worden voor het tempo waarin elektrische warmtepompen kunnen worden aangesloten. Dat is met name relevant in nieuwbouwwijken waar nieuwe netaansluiting nodig zijn.

Passende elektrische verwarmingstechnieken

Gebouwen kunnen elektrisch worden verwarmd met warmtepompen, infraroodpanelen en/of weerstandsverwarming (zoals straalkachels, elektrische vloerverwarming en elektrische cv-ketels). Infraroodverwarming en straalkachels geven stralingswarmte af en worden meestal gebruikt als bijverwarming en weerstandsverwarming is bijna altijd (veel) duurder dan verwarmen met een warmtepomp. Een warmtepomp bestaat uit een binnen- en buitenunit die allebei ruimte vergen. Binnen-units kunnen de plaats van een cv-ketel innemen maar in appartementen met blokverwarming is dat vaak geen optie. Daar zou een collectieve warmtepomp een optie kunnen worden. De buitenunit kan geluidsoverlast veroorzaken (ook na isolatie) en kan daarom niet overal geplaatst worden. Er komen wel steeds stillere modellen op de markt. In de berekeningen veronderstellen we dat een elektrische warmtepomp op termijn overal geplaatst kan worden.

Voor volledige toepassing van all-electric verwarming in de bestaande bouw is na-isolatie tot schil-label B nodig bij 5,7 miljoen bestaande woningen en de helft van alle bestaande utiliteitsgebouwen. Daarnaast moet het warmteafgiftesysteem goed werken met water van lage temperaturen. Beide aanpassingen vergen grote investeringen maar verlagen de variabele energiekosten en verhogen het comfort in het gebouw. Recent onderzoek geeft aanwijzingen dat mogelijk meer bestaande woningen zonder aanpassingen geschikt zijn voor elektrisch verwarmen dan tot voor kort werd gedacht en daarom in de berekeningen voor dit rapport is verondersteld.

Belemmeringen voor elektrisch verwarmen

Onduidelijkheid, kosten en gedoe voor bewoners

In bestaande gebouwen zijn veel aanpassingen nodig om te kunnen overschakelen op volledig elektrisch verwarmen: na-isolatie tot minimaal schillabel B in 5,7 miljoen weq's, cv-ketel vervangen in 9,8 miljoen weq's, radiatoren vervangen door een lage temperatuur afgiftesysteem, luchtventilatie aanbrengen of verbeteren, en elektrische kooktoestellen installeren. Vaak zal ook de aansluiting op het elektriciteitsnet verzwaaard moeten worden naar 3x25 Ampère. Dat alles kost niet alleen veel moeite en inspanningen van bewoners maar ook veel geld. De benodigde investeringen variëren bijvoorbeeld van 12.000 tot 45.000 euro voor een gemiddelde twee-onder-een-kapwoning, afhankelijk van het huidige energielabel en het type warmtepomp. Bovendien is voor veel mensen nog niet duidelijk of all-electric verwarmen het beste alternatief is voor verwarmen met aardgas. Voor veel bewoners zijn onduidelijkheid, kosten en rompslomp (gedoe) belemmeringen om over te stappen op all-electric verwarmen.

Voor installateurs vormen gebrek aan apparaten en goed opgeleide vakmensen een beperking om snel meer warmtepompen te kunnen verkopen. Dat type belemmeringen kan binnen enkele jaren worden opgelost met extra productiecapaciteit en bijscholing en opleidingen, maar dan moet de installatiebranche wel de zekerheid hebben dat de vraag naar elektrische warmtepompen structureel blijft stijgen.

Verzwarende elektriciteitsnetten is een voorwaarde

Voldoende zware distributienetten (en buurtbatterijen) zijn een voorwaarde voor grootschalige toepassing van elektrische warmtepompen. Of verzwarende lokaal nodig is hangt af van de capaciteit op het huidige laagspanningsnet en de capaciteit van de bestaande gebouwaansluitingen. Op lange termijn is vrijwel overal netverzwarende nodig om ook het groeiend aantal PV-panelen te kunnen aansluiten en elektrische voertuigen te kunnen opladen. De netbeheerders kunnen de elektriciteitsnetten nu niet op een adequaat tempo uitbreiden, onder meer vanwege een tekort aan technici, langlopende ruimtelijke procedures, beperkte ruimte in de ondergrond en beperkte financierings-

mogelijkheden (NBNL, 2021). Het zal niet makkelijk zijn om de fasering en locatiekeuze van netver-zwaring volledig af te stemmen op de installatie van elektrische warmtepompen omdat die zich nu nog moeilijk laat voorspellen en omdat andere aanspraken op netcapaciteit ook gehonoreerd wil-len worden. Netcongestie kan het groeitempo van elektrische warmtepompen vertragen.

Backup nodig voor elektriciteitspieken in de winter

Elektrische warmtepompen verbruiken de meeste stroom in de winter. Met vergaande isolatie en technische innovaties zoals vraagsturing kan die vraagpiek in bepaalde mate worden afgevlakt maar hij blijft bestaan. Met batterijen kunnen korte dalingen in de stroomproductie uit zon en wind worden opgevangen. In langere perioden met beperkte stroomproductie uit zon en wind zal echter backup-vermogen beschikbaar moeten zijn voor de warmtepompen. Dat vergt grote investeringen en resulteert in dure stroom. Het is de vraag of bewoners bereid zijn die dure stroom af te nemen of tijdelijk met minder verwarming genoegen nemen.

Beleid voor sneller meer warmtepompen

Het huidige beleid, met BENG-eisen voor nieuwbouw en subsidies voor elektrische warmtepompen en na-isolatie voor de bestaande bouw, geeft al sterke stimulansen. De aangekondigde normering van verwarmingsinstallaties vanaf 2026 zal niet alleen de toepassing van hybride maar ook van elektrische warmtepompen stimuleren. Een verdere aanscherping van die normering kan in het voordeel werken van volledig elektrische warmtepompen.

Elektrisch verwarmen betaalbaar maken voor bewoners

Rond 2030 is elektrisch verwarmen in goed geïsoleerde woningen met schillabel A of B waarschijnlijk goedkoper dan verwarmen met aardgas, ook zonder subsidie. Dat komt door de aangekon-digde verschuivingen in energielasting van gas naar elektriciteit en door de verwachte kosten-daling van elektrische warmtepompen. In slechter geïsoleerde woningen zijn de jaarlijkse kosten dan nog wel 250 tot 1380 euro hoger en met subsidies kan dat dalen naar 50 tot 850 euro per jaar, afhankelijk van woningtype en huidig energielabel. Dat duidt erop dat subsidies op elektrische warmtepompen op termijn niet meer nodig zijn om de overstap financieel aantrekkelijk te maken, maar subsidies op na-isolatie nog wel. Omdat de isolatiekosten minder dalen dan in deze bereke-ningen (uit 2020) is verondersteld, is op termijn meer dan 20% subsidie nodig om na-isolatie finan-cieel aantrekkelijk te maken. Het is de vraag of dat past binnen de rijksbegroting.

Planning faciliteert versnelling

Zowel installateurs als netbeheerders zijn gebaat bij een duidelijke planning (naar tijd en plaats) van de groei van het aantal elektrische warmtepompen. Dat maakt het makkelijker hun productiecapaciteit op te schalen. Ook veel bewoners zullen pas in actie komen als ze weten dat binnen enkele jaren de levering van aardgas wordt beëindigd en een warmtenet geen optie wordt. Zonder duide-lijke planning lijkt het onmogelijk om in 2050 alle gebouwen met elektrische warmtepompen te kunnen verwarmen.

Gemeenten zijn aangewezen om duidelijke Transitievisies Warmte (TVW's) en wijkuitvoeringsplan-nen op te stellen. De eerste TVW's uit 2022 waren nog niet erg concreet maar voor 2026 staan actu-alisaties gepland. Voor drastische ingrepen in woningen en in de energievoorziening (zoals beëindigen van de levering van aardgas) is draagvlak nodig onder bewoners en lokale politici.

Welk uitvoeringstempo is denkbaar?

In het all-electric-traject is verondersteld dat tot 2030 in de bestaande bouw 1,5 miljoen bestaande woning-equivalenten kunnen worden voorzien van een elektrische warmtepomp en zijn geïsoleerd tot minimaal schillabel B. In 2040 moet dat aantal zijn gegroeid tot zes miljoen en in 2050 tot 10,2 miljoen woningequivalenten. In 2019 hadden 2 miljoen woningen al een energielabel B of beter, zodat de grootste uitdaging tot 2030 ligt bij de installatie van elektrische warmtepompen. Na 2030 moet ook bij na-isolatie een versnelling worden gerealiseerd. Met een combinatie van gecoördineerde planning, financiële stimulering en normering zou dat haalbaar kunnen zijn.

Tabel 8

Uitvoeringstempo van traject 4 in de bestaande bouw, in miljoen weq met een bepaald type installatie per zichtjaar.

Type installatie	2020	2030	2040	2050
Elektrische warmtepomp		1,5	6,0	9,8
Aansluiting MT-net	0,4	0,4	0,4	0,3
Aansluiting LT-net				0,0
Hybride warmtepomp				0,0
Totaal	0,4	1,9	6,4	10,2

Ontwikkeling van de energiebehoefte in dit traject 4

Op grond van het geschetste uitvoeringstempo is de ontwikkeling van de behoefte aan energiedragers voor de gebouwde omgeving berekend. Ondanks vergaande na-isolatie daalt de totale energiebehoefte van de hele gebouwde omgeving nauwelijks: van 673 naar 638 PJ in 2050, zie Tabel 9. Dat is het gevolg van de toenemende energiebehoefte in de nieuwbouw. Door de groeiende toepassing van warmtepompen wordt echter een toenemend deel van de energiebehoefte gedekt uit omgevingswarmte; dat stijgt van 11 naar 259 PJ in 2050. Daardoor daalt het verbruik van finale (op te wekken) energie van 662 naar 379 PJ, waarvan 103 PJ in 2050 nodig is in de nieuwbouw. Het finale energieverbruik van de bestaande bouw daalt tussen 2019 en 2050 met 283 PJ ofwel met bijna 43 procent door na-isolatie en efficiëntere verwarmingsinstallaties.

Tabel 9

Ontwikkeling energieverbruik (in PJ/jaar) in bestaande bouw en nieuwbouw tussen 2019 en 2050 in traject 4.

	2019	2030	2040	2050
Bestaande bouw 2019	662	591	419	276
Nieuwbouw woningen	0	17	28	32
Nieuwbouw utiliteitsgebouwen	0	30	55	71
subtotaal (finaal verbruik)	662	637	502	379
Omgevingswarmte (saldo)	11	58	168	259
Totaal input energie	673	696	670	638

PM: een uitsplitsing naar type energiedragers staat aan het eind van hoofdstuk 7.

Vergelijking van de vier trajecten

De voorgaande beschrijving van de vier trajecten ging vooral over de te nemen technische maatregelen, het mogelijke implementatietempo en de gevolgen voor de ontwikkeling van de energiebehoefte. Daarnaast zijn tal van andere kenmerken van belang om de aantrekkelijkheid van deze trajecten te kunnen beoordelen, zoals: hun bijdrage aan CO₂-reductie, de kosten, het ruimtebeslag, de complexiteit van (bestuurlijke) besluitvorming, acceptatie bij burgers en bedrijven, et cetera. Met behulp van de kwantitatieve data over de vier trajecten is een schatting gemaakt⁶ van de relatieve verschillen tussen trajecten van een aantal kwalitatieve kenmerken van deze trajecten. De resultaten daarvan zijn samengevat in onderstaande tabel. Uit de vergelijking van de onderzochte trajecten naar een klimaatneutrale gebouwde omgeving zijn de volgende conclusies te trekken.

Geen significant verschil in CO₂-reductie

Het hoofddoel van elk traject is CO₂-reductie, maar er is waarschijnlijk geen significant verschil in de cumulatieve CO₂-reductie die de 4 trajecten tot 2050 gaan realiseren. De berekende verschillen zijn klein (3-6%) en de onzekerheden bij het bepalen van het te verwachten tempo waarin beoogde maatregelen zullen worden uitgevoerd zijn groot.

Duidelijke verschillen in de nationale kosten van de vier trajecten.

Nadat alle benodigde maatregelen zijn genomen om klimaatneutraal te worden, zijn de jaarlijkse nationale kosten van overal overstappen op groengas het laagst (6,6 miljard euro) en die van overstappen op elektrisch verwarmen het hoogst (11,4 miljard euro).

Als traject 3 volledig wordt uitgevoerd met waterstof in plaats van groengas, dan worden de jaarlijkse nationale kosten 2,2 miljard euro hoger en daalt het kostenvoordeel van traject 3 ten opzichte van de andere trajecten fors. Die meerkosten van waterstof worden deels veroorzaakt door extra investeringen in gasdistributienetwerken (0,2 mld.) en in leidingwerk en gasmeters in gebouwen (0,9 mld.). Daarnaast zijn de verwachte productiekosten van waterstof hoger (0,7 mld.) en wordt bedrijfsvoering en onderhoud in gebouwen en netwerken duurder (0,4 mld.).

Deze kostenramingen zijn een benadering van de kostenverschillen tussen trajecten die de komende jaren kunnen ontstaan. Ze zijn afgeleid van kosten in 2019 en toenmalige verwachtingen over kostendalingen die tot 2030 zouden kunnen optreden door schaalvergroting en innovatie. Door inflatie en schaarste aan materialen en arbeidskrachten zijn maatregelen de afgelopen jaren echter duurder geworden in plaats van goedkoper. Als dat zo blijft, dan vergroot dat de kostenverschillen tussen trajecten met veel en weinig investeringen en (dus) kapitaalslasten. Tegelijk zijn de toekomstige kosten van groengas en waterstof onzeker. Groengas zou 150% duurder moeten worden dan hier verondersteld (stijgen van 67 cent/m³ naar 167 cent/m³) voordat de nationale kosten van traject 3 hoger worden dan die van traject 2 of 4 en 200% bij traject 1. Als productie van groene waterstof goedkoper wordt dan €3,60 per kilo dan groeit het kostenvoordeel ten opzichte van de andere trajecten. De potentie voor kostendaling is groot (projecties in internationale studies (IEA 2022; DNV 2022) gaan tot 1,50 tot 2 dollar per kilo rond 2050) maar het is onduidelijk wanneer die dalingen gaan optreden en wanneer Nederland daarvan kan profiteren.

⁶ De gebruikte methode wordt toegelicht in hoofdstuk 8.

Tabel 10

Raming van jaarlijkse nationale kosten van vier trajecten naar klimaatneutraal verwarmen van bestaande gebouwen, in miljard euro per jaar. Bron: Startanalyse 2020.

Kostenposten	Traject 1 Isoleren eerst (mld. €/j)	Traject 2 Warmte- netten (mld. €/j)	Traject 3 Schone gassen ^{a)} (mld. €/j)	Traject 4 All- electric (mld. €/j)
Elektriciteitsnet verzwaren	0,2	0,2	0,1	0,4
Gasnetten verwijderen/aanpassen	0,5	0,4	0,0/0,2	0,6
Warmtenetten aanleg	0,4	1,5	0,1	0,0
Gebouw-schil na-isoleren	5,6	3,6	2,6	5,6
Gebouw-installaties vervangen	4,0	3,2	2,1/3,0	5,5
subtotaal jaarlijkse kapitaalslasten	10,6	8,8	4,9/6,0	12,1
Besparing inkoop aardgas	-4,2	-4,2	-4,2	-4,2
Inkoop warmte	0,1	0,3	0,1	0,1
Inkoop groengas/waterstof	1,4	1,7	3,3/4,0	0,1
Inkoop elektriciteit	2,7	2,2	2,2	3,6
B&O in gebouwen	0,1	-0,1	0,4/0,7	0,2
B&O warmtenetten	0,2	0,6	0,0	0,0
B&O elektriciteits- en gasnetten	-0,3	-0,2	0,0/0,1	-0,4
subtotaal jaarlijkse variabele kosten	-0,1	0,2	1,8/2,8	-0,7
Totaal jaarlijkse nationale kosten	10,5	9,0	6,6/8,8	11,4
verschil met laagste nationale kosten	3,9	2,4	0,0/2,2	4,8

a) In traject 3 geldt het eerste bedrag voor groengas, het tweede voor waterstof.

Kapitaalslasten domineren de kostenverschillen tussen trajecten

De totale kostenverschillen tussen trajecten worden hoofdzakelijk veroorzaakt door verschillen in benodigde investeringen in verwarmingsinstallaties, na-isolatie en energienetwerken. De jaarlijkse kapitaalslasten van die investeringen variëren tussen 4,9 en 12,1 miljard euro (zie Tabel 10). De kosten voor energiedragers (electriciteit, warmte en schone gassen) variëren tussen -0,7 en 2,8 miljard euro per jaar en hebben dus veel minder invloed op de verschillen in totale jaarlijkse kosten. In discussie over aardgasvrije verwarmingsopties krijgt de onzekerheid over toekomstige prijzen van waterstof en groengas veel aandacht. Uit berekeningen van de totale transitiekosten blijkt echter dat die onzekerheid weinig invloed heeft op de te verwachten kostenverschillen tussen opties.

Grootste onzekerheid bij traject met laagste nationale kosten

Beschikbaarheid van groengas of waterstof is een cruciale voorwaarde voor realisatie van het Schone gassen-traject. Daarom krijgt dat kenmerk een zwaar gewicht in het maatschappelijk debat. De toekomstige beschikbaarheid voor de gebouwde omgeving kan op twee manieren worden vergroot: 1) door vergroting van toekomstige beschikbare volumes voor Nederland als geheel en 2) door een groter deel van de beschikbare volumes voor de gebouwde omgeving te bestemmen. Beide ontwikkelingen hebben gevolgen voor de manier waarop andere Nederlandse sectoren hun klimaatdoelen kunnen halen. De mogelijkheden en gevolgen daarvan worden in de systeemanalyse van het TVKN-project onderzocht.

Tabel 11

Overzicht van de vergelijking van vier trajecten op relevante kenmerken ^{a)}.

Kenmerk	Traject 1 Isoleren eerst	Traject 2 Warmte- netten	Traject 3 Schone gassen	Traject 4 All- electric
CO ₂ -emissie cumulatief 2020-2050 (Mton)	484	474	489	460
Nationale kosten jaarlijks (miljard € ₂₀₁₈ /jaar) ^b	10,5	9,0	6,6/8,8	11,4
Investerings tot 2050 (miljard € ₂₀₁₈) ^b	183	154	80/96	200
Elektrische warmtepomp (mln. weq) ^c	6,4	4,2	0,1	9,8
MT-warmtenet-aansluiting (mln. weq) ^c	1,2	3,3	0,3	0,3
LT-warmtenet-aansluiting (mln. weq) ^c	0,2	0,3	0,0	0,0
Hybride warmtepomp (mln. weq) ^c	2,4	2,6	9,7	0,0
Na-isolatie bestaande woningen (miljoen) ^c	5,7	4,2	3,9	5,7
Inspanning van bewoners (score)	36	26	15	41
Behoeftte vaklieden gebouwen (score)	48	34	26	50
Inpandige ruimtebehoefte	XXXX	XXX	XXXXX	XXXXX
Uitvoerbaarheid netwerken (mld. € invest.) ^b	24	40	4/9	26
Complexiteit lokale besluitvorming (score)	13	17	11	11
Zekerheid voldoende energiedragers	****	***	*	*****
Afhankelijkheid van importen	**	**	*****	*
Flexibiliteit energiesysteem (score)	16	19	30	11
Ruimtegebruik energienetwerken	**	***	*	*
Ruimtegebruik energie-opwek ^b	00	00	0/00000	000

a) Per kenmerk is de score die minstens 50% beter is dan alle andere scores cursief afgedrukt.

b) In traject 3 geldt het eerste bedrag voor groengas, het tweede voor waterstof.

c) Dit betreft alleen bestaande gebouwen anno 2019.

Traject 3 scoort gunstig op meeste kenmerken

De vier trajecten zijn op een aantal kwantitatieve en kwalitatieve kenmerken vergeleken, zie Tabel 11. De kwalitatieve kenmerken zijn ongelijksoortig, waardoor hun scores niet optelbaar zijn. Bovendien wordt het belang van die kenmerken door verschillende partijen verschillend gewogen, zoals zichtbaar is in het maatschappelijk debat over de warmtetransitie. Wel blijkt uit bovenstaande tabel dat het traject Schone gassen op de meeste onderzochte kenmerken het beste scoort, op enige afstand gevolgd door het traject All-electric. Tegelijk kent dit traject de grootste onzekerheid over de toekomstige beschikbaarheid van voldoende energiedragers. Gezien de vele voordelen van verwarmen met schone gassen lijkt het de moeite waard om te proberen de beschikbaarheid ervan voor de gebouwde omgeving te vergroten.

Beleidsmatige implicaties

Anno 2023 stimuleert de overheid vrijwel alle technieken die kunnen bijdragen aan reductie van de CO₂-uitstoot van de gebouwde omgeving. Dat is nuttig in de beginfase van een transitieproces waarin de potenties van veel opties verkend moeten worden. Voor versnelling van de transitie is meer duidelijkheid nodig over de toe te passen technieken.

Transitietempo is moeilijk te versnellen

De meeste CO₂-reductie is (cumulatief) te bereiken door snel maatregelen te nemen; snelheid is belangrijker dan grote stappen ineens. Maar bij veel maatregelen blijkt het moeilijk om de toepassing te versnellen. Zo gebeurt het na-isoleren van bestaande woningen meestal met één maatregel per keer en is de stimulans om dat uit te breiden naar twee maatregelen per keer door het huidige kabinet (Rutte IV) afgeschaft. Het is nog onduidelijk of de verhoging van de subsidie, die daarvoor in de plaats kwam, wel voor een versnelling gaat zorgen. Ook komt de uitbreiding van warmtenetten in de bestaande bouw maar moeizaam van de grond. De Startmotor die in het Klimaatakkoord van 2019 werd aangekondigd heeft niet voor de beoogde snelle uitbreiding gezorgd. De koerswijziging ten aanzien van het publieke eigendom van warmtenetten, die in 2022 is ingezet, heeft weerstand opgeroepen bij partijen die traditioneel voor uitbreiding van warmtenetten zorgden. Dat loopt nu vertraging op. De verkopen van hybride warmtepompen zijn recent wel gestegen en mogelijk gaat de aangekondigde normering ervoor zorgen dat het huidige groeitempo wordt volgehouden. Dat kan alleen als de installatiebranche erin slaagt om snel meer personeel op te leiden en de productiecapaciteit van hybride warmtepompen uit te breiden. Beheerders van het elektriciteitsnet kunnen het gewenste tempo van netverzwaring niet bijbenen. Ondanks forse uitbreiding van hun investeringsprogramma kan ruimtelijk geconcentreerde toepassing van elektrische warmtepompen vertraging oplopen. Voor alle trajecten geldt, dat de structurele krapte op de arbeidsmarkt het transitietempo kan afremmen.

Omgaan met complexiteit

Deze analyse van vier trajecten naar een klimaatneutrale gebouwde omgeving heeft getoond dat de warmtetransitie complex en ingrijpend is. Die complexiteit is in kaart gebracht door vier verschillende pakketten van samenhangende maatregelen te analyseren op hun kansen, effecten en te overwinnen hindernissen. Goed inzicht in de complexiteit en de samenhangen binnen het energiesysteem is een voorwaarde voor effectief beleid. Het biedt de mogelijkheid om de verschillende voor- en nadelen van beleidsopties te bespreken met alle betrokken actoren en zo tot een transparante afweging van belangen en breed gedragen beleidskeuzes te komen. In de warmtetransitie is acceptatie van beleid van groot belang omdat de te nemen maatregelen sterk ingrijpen in de directe leefomgeving, de woning van bijna elke burger.

Inzicht in samenhangen biedt ook aanknopingspunten om bestaande beleidsinstrumenten beter op elkaar af te stemmen, zodat ze elkaar minder tegenwerken of een groter gezamenlijk effect genereren. Een aantal subsidieregelingen voor warmtenetten, warmtepompen en na-isolatie lenen zich hiervoor.

Omgaan met onzekerheden

Dit rapport heeft laten zien dat er nog tal van onzekerheden zijn over de te verwachten technologische ontwikkelingen en over het tempo waarin burgers en bedrijven de maatregelen gaan nemen om hun gebruik van aardgas te beëindigen. Met gericht beleid kunnen sommige onzekerheden worden weggenomen, maar niet tot elke prijs. Zo hechten veel politieke partijen aan de keuzevrijheid van burgers en bedrijven. Daardoor willen ze hen wel stimuleren en verleiden om bepaalde

maatregelen te nemen maar (voorlopig nog) niet dwingen. Daarmee blijft de onzekerheid over de investeringsbereidheid van burgers en bedrijven tot op zekere hoogte bestaan.

Onzekerheid over de toekomstige beschikbaarheid van groengas en waterstof voor de gebouwde omgeving heeft grote invloed op de te kiezen strategie voor de warmtetransitie. Deze trajectverkenning laat zien dat een Schone-gassen-traject veel voordelen heeft ten opzichte van de andere trajecten, niet alleen in termen van nationale en private kosten maar ook met betrekking tot de benodigde inzet van arbeidskrachten, materialen en publieke ruimte, de complexiteit van lokale besluitvorming, de flexibiliteit van het nationale energiesysteem en de benodigde inspanning van bewoners. Wie nu voor zekerheid kiest laat die voordelen liggen. Die keuze kan ook worden uitgesteld om met gericht beleid te proberen de kansen op levering van groengas en waterstof te vergroten.

1 Inleiding

1.1 Op weg naar klimaatneutraliteit

Er wordt al jaren beleid ontwikkeld om de uitstoot van broeikasgassen uit de gebouwde omgeving te verlagen. Uit analyses van de te verwachten effecten van het huidige vastgestelde en voorgenoemen klimaatbeleid (PBL, 2022kev) blijkt echter dat we niet op koers liggen om in 2050 geheel klimaatneutraal te zijn, zie ook paragraaf 2.2. Er is dus reden voor bezinning op de huidige aanpak. Dit rapport presenteert daartoe vier mogelijke trajecten om de gebouwde omgeving tussen nu en 2050 klimaatneutraal te maken. Een traject beschrijft de stappen die tot 2050 gezet moeten worden om een sector op een bepaalde manier klimaatneutraal te maken. Die ‘bepaalde manier’ heeft betrekking op een bepaalde set technische maatregelen die genomen gaan worden en het tempo waarin dat kan plaatsvinden, in wisselwerking met nieuw of aangepast beleid dat daarvoor ontwikkeld zou kunnen worden.

In beginsel zijn veel trajecten naar klimaatneutraliteit denkbaar. Hier presenteren we vier hoofd-routes die aansluiten bij dominante denkrichtingen binnen het domein van de gebouwde omgeving. Elk traject heeft belangrijke voordelen die door protagonisten met verve onder de aandacht worden gebracht van deelnemers aan het publieke debat. Er zijn echter ook hindernissen, die soms moeilijk zijn te overwinnen, en nadelen die lastig zijn af te wegen tegen de voordelen. In dit rapport brengen we de voordelen, hindernissen en nadelen van de onderzochte trajecten in kaart en verkennen we de condities waaronder elk traject succesvol doorlopen zou kunnen worden. Daarbij is speciale aandacht voor de mogelijkheden om met rijksbeleid gunstige condities te creëren.

Het klimaatneutraal maken van de gebouwde omgeving betekent vooral dat aardgas, gebruikt voor verwarmen van gebouwen, moet worden vervangen door klimaatneutrale energiedragers met hun bijbehorende transportnetwerken. Die omschakeling wordt ook wel de warmtetransitie genoemd. Als alternatief voor aardgas komen – op hoofdlijnen – drie opties beschikbaar:

1. Groene stroom via te verzwaren elektriciteitsnetten,
2. Warm water via nieuw aan te leggen warmtenetten, en
3. Klimaatneutrale gassen via het bestaande of aangepaste aardgasnet.

Ook andere delen van de samenleving (industrie, transport, land- en tuinbouw) zullen overschakelen op klimaatneutrale energiedragers. De beschikbaarheid van klimaatneutrale energiedragers (uit binnenlandse productie plus import) zal de komende decennia fors moeten stijgen om in de totale nationale energiebehoefte te kunnen voorzien. De benodigde hoeveelheden en de verdeling over de soorten energiedragers zal worden bepaald door tal van factoren, waaronder: de technische mogelijkheden per bedrijfstak om de productie en consumptie te verduurzamen, de kosten van die opties en de prijsontwikkeling op de internationale markten voor klimaatneutrale energiedragers, zoals groene stroom, biomassa en klimaatneutrale waterstof. Dat betekent dat het Nederlandse energiesysteem de komende decennia grondig zal worden herzien, in wisselwerking met de verduurzaming van alle onderdelen van de Nederlandse samenleving. Hoewel deze studie zich richt op verduurzaming van de gebouwde omgeving, zal daarom ook de wisselwerking met toekomstige veranderingen in het energiesysteem en andere sectoren in de analyse moeten worden betrokken.

1.2 Doel van dit rapport

Dit rapport doet verslag van het PBL-onderzoek naar de voor- en nadelen van de belangrijkste opties voor uitwerking van de warmtetransitie in de gebouwde omgeving tot nu toe. Het bouwt voort op het onderzoek dat in 2020 resulteerde in de Startanalyse aardgasvrije buurten, die gemeenten informeerde over mogelijkheden om hun gebouwen zonder aardgas te verwarmen. Daarvoor zijn voor elk gebouw de nationale kosten van 24 maatregelpakketten voor aardgasvrij verwarmen berekend met het Vesta MAIS-model. Die data waren bedoeld als startpunt voor het opstellen van Transitievisies Warmte, die elke gemeente in 2021 moest opleveren. Om dat proces niet te verstoren, zijn (tot op heden) geen landsdekkende analyses van die data gepubliceerd. Wel zijn beleidmakers geïnformeerd over de inzichten die uit partiële analyses van die data zijn verkregen. Met dit rapport worden die inzichten nu ook publiek toegankelijk gemaakt.

De Startanalyse biedt een zeer gedetailleerd beeld van de te verwachten kostenverschillen tussen alternatieve manieren om de CO₂-uitstoot in de gebouwde omgeving (GO) tot nul te reduceren. Die studie geeft echter geen inzicht in de toekomstige beschikbaarheid van klimaatneutrale energiedragers voor de gebouwde omgeving. Voor zo'n analyse zijn computermodellen nodig die de interacties tussen alle sectoren en het Nederlandse energiesysteem simuleren. Met dat doel is PBL in 2022 gestart met het project 'Trajectverkenning naar klimaatneutraal in 2050 (TVKN)'. Daarin wordt per sector verkend hoe Nederland klimaatneutraal kan worden en wat daarvoor nodig is. Er zijn studies uitgevoerd over de energievraagsectoren industrie, gebouwde omgeving (dit rapport), mobiliteit en landbouw en over elektriciteitsproductie, beschikbaarheid van biograndstoffen en waterstofproductie. De samenhang tussen de verschillende vraag- en aanbodsectoren is onderzocht met behulp van het OPERA-model dat het functioneren van het Nederlandse energiesysteem simuleert in de periode 2030 – 2050. De resultaten van dat systeemonderzoek worden beschreven in het hoofdrapport van het TVKN-project (PBL, 2024).

Dit rapport is (mede) bedoeld om toe te lichten hoe het OPERA-model is voorzien van informatie over mogelijkheden om de gebouwde omgeving klimaatneutraal te maken (zie paragraaf 1.4). Die informatie is ontleend aan de Startanalyse aardgasvrije buurten, die PBL in 2020 publiceerde. Een analyse van de simulaties met het OPERA-model valt buiten de scope van dit rapport.

1.3 Leeswijzer

De methodische aspecten van deze studie worden kort beschreven in de volgende paragraaf. Daar wordt uitgelegd hoe we de resultaten van een eerdere, gedetailleerde bottom-up analyse van verduurzamingsopties in de gebouwde omgeving (de Startanalyse 2020) gebruiken en verwerken tot input voor een integrale analyse van het Nederlandse energiesysteem. Daarbij komen ook de sterke en minder sterke kenmerken van beide benadering aan bod.

Hoofdstuk 2 beschrijft de huidige stand van zaken in de warmtetransitie. De afgelopen jaren is de uitstoot van broeikasgassen uit de gebouwde omgeving al substantieel gedaald. Met het huidige en voorgenomen beleid is nog verdere reductie te verwachten. Het verwachte reductietempo is echter te laag om in 2050 volledig klimaatneutraal te worden. Dat vraagt om een heroriëntatie op de te volgen strategie. We beschrijven in algemene termen langs welke denklijnen die heroriëntatie zou kunnen plaatsvinden en hoe een keuze gemaakt zou kunnen worden uit de vele technische opties die momenteel of binnenkort beschikbaar zijn. Dat resulteert in de identificatie van vier trajecten

naar klimaatneutraliteit in de gebouwde omgeving. Die trajecten worden verder uitgewerkt in hoofdstukken 4 tot en met 7.

Eerst schetst hoofdstuk 3 nog een aantal toekomstige ontwikkelingen die van invloed zijn op de transitieopgave in elk van die vier trajecten. We tonen de gehanteerde veronderstellingen voor nieuwbouw van woningen en voor sloop, transformaties en uitbreiding in de dienstensector. Die laten de energiebehoefte in de gebouwde omgeving groeien. Daarna beschouwen we de te verwachten dynamiek op internationale energiemarkten voor aardgas en elektriciteit en de invloed daarvan op de realisatiekansen van de onderzochte trajecten. Tenslotte schetsen we de mogelijke toekomstige schaarste aan vaklieden die nodig zijn om alle maatregelen in de gebouwde omgeving uit te voeren.

De beschrijving van de vier trajecten in de hoofdstukken 4 tot en met 7 is gelijkvormig opgebouwd maar is niet identiek. Elk hoofdstuk start met de voordelen van een traject, schets dan de potenties, de hindernissen, en enkele mogelijkheden om die te overwinnen en eindigt met een mogelijk uitvoeringstempo met bijbehorende energiebehoefte. Tussendoor komen specifieke aspecten van elk traject aan bod die de beoogde standaard opbouw hier en daar, noodgedwongen, doorkruisen. Dat gebeurt het sterkst in hoofdstuk 4, waar gepoogd is inzicht te geven in de potenties en effecten van na-isolatie en daarbij onderscheid te maken tussen woningen en utiliteitsgebouwen. Omdat voor woningen veel meer data beschikbaar waren, kon de analyse daar uitgebreider zijn dan voor utiliteitsgebouwen.

Hoofdstuk 8 vergelijkt de vier trajecten op een aantal kwantitatieve en kwalitatieve kenmerken, zoals de geraamde cumulatieve CO₂-uitstoot tot 2050, benodigde investeringen, geraamde jaarlijkse nationale kosten, en indicaties van de behoefte aan vaklieden, inspanning van bewoners, complexiteit van lokale besluitvorming, zekerheid van voldoende energiedragers en diverse vormen van ruimtegebruik.

1.4 Methodische verantwoording

1.4.1 Bottom-up analyse: Startanalyse aardgasvrije buurten

In de Startanalyse aardgasvrije buurten (PBL, 2020w) zijn 24 maatregelpakketten voor aardgasvrij verwarmen van gebouwen geanalyseerd. Daarvoor berekende het Vesta MAIS-model voor elk van de circa 9 miljoen bestaande gebouwen in de gebouwde omgeving de kosten en effecten van die maatregelpakketten op het energieverbruik voor ruimteverwarming, warm tapwater, koken en koeling. De maatregelen hebben betrekking op na-isolatie tot twee isolatieniveaus, vervangen van cv-ketels door hybride of elektrische warmtepompen of door een aansluiting op een warmtenet met MT-bronnen of LT-bronnen, vervangen van aardgas door groene stroom, duurzame warmte, groengas of klimaatneutraal waterstof. Bijlage 1 geeft hiervan een uitgebreidere beschrijving.

De gebruikte technische parameters in het model reflecteren de stand van de wetenschap en ervaringskennis anno 2019. In dat jaar zijn validatiesessies georganiseerd om de modelparameters te toetsen aan inzichten van Nederlandse experts. De kosten van isolatiemaatregelen en installaties zijn begin 2020 vastgesteld. De kostendaling tot 2030 is gebaseerd op het gemiddelde van een optimistische en pessimistische kostenontwikkeling. De gehanteerde waarden zijn gedocumenteerd in het Achtergronddocument (van Polen, et al., 2022). Er zijn ook aparte studies uitgevoerd naar de praktijkeffecten van na-isolatie (van den Wijngaart & van Polen, 2020), de productiekosten van

blauwe en groene waterstof in 2030 (Hoogervorst, 2020) en naar de nationale kosten van klimaat-neutrale elektriciteit in 2030 (Hoogervorst, 2020e).

De belangrijkste inhoudelijke kenmerken van de Startanalyse zijn:

- Het simuleert het potentieel en de kosten van technieken van een aardgasvrije toekomst in 2050, zonder groeipaden daar naar toe.
- De toekomstige energiebehoefte van gebouwen is afgeleid van de verwachte klimaatverandering tot 2050. Dat impliceert een reductie van de warmtevraag met 11% ten opzichte van het klimaat-gecorrigeerde verbruik in 2019;
- De energiebehoefte wordt bepaald op jaarbasis. Invloeden van dag-nacht-patronen en seizoen fluctuaties worden verwerkt in jaargemiddelde parameters, zoals SPF's (Seasonal Performance Factors).
- Het model berekent jaarlijkse nationale kosten van maatregelen, inclusief besparing op de nationale kosten van aardgasverbruik. Nationale kosten van groengas en waterstof zijn afgeleid van verwachte productiekosten in 2030 en houden geen rekening met mogelijke tijdelijke kostenverhoging door concurrentie.

De resultaten van de Startanalyse zijn ontsloten via een website met links naar databestanden voor elk van de 13600 buurten in Nederland en naar het Gemeenterapport met toelichting op die bestanden. De website toont ook landkaarten met kostenramingen per buurt voor elk van de 24 maatregelpakketten. Daarnaast is een kaart opgenomen die per buurt de optie met de laagste nationale kosten laat zien (de LN-kaart), onder de veronderstelling dat waterstof niet beschikbaar is en dat groengas beperkt is tot 0,5 bcm (billion cubic meter) voor hulpketels van warmtenetten en 1,5 bcm voor verwarming van gebouwen. Bovendien is die 1,5 bcm groengas toegewezen aan buurten waar de meeste nationale kosten kunnen worden uitgespaard door inzet van groengas, zie Bijlage 1 voor verdere toelichting.

Analyses op de data uit de Startanalyse leiden tot enkele belangwekkende conclusies:

- a. Na-isoleren tot schillabel D heeft bij de meeste maatregelpakketten lagere nationale systeemkosten dan na-isoleren tot schillabel B; alleen bij maatregelpakketten met elektrische warmtepompen is dit niet onderzocht, zie Tabel 12.
- b. Bij een onbeperkte hoeveelheid groengas zijn de nationale kosten van integrale maatregelpakketten in vrijwel alle buurten het laagst bij toepassing van groengas; daarna waterstof, zie Figuur 31.

1.4.2 Van 24 varianten naar 4 trajecten

Alle sectoren van de Nederlandse samenleving ontwikkelen maatregelen om de uitstoot van broeikasgassen te reduceren. Het TVKN-project verkent de gevolgen daarvan voor het energiesysteem en analyseert de interactie tussen de energievraag en -aanbod met het OPERA-model. Als startpunt van die analyse zijn voor elke sector trajecten opgesteld om in 2050 klimaatneutraal te worden. Voor de gebouwde omgeving zijn vier trajecten naar klimaatneutraliteit opgesteld die in dit rapport worden beschreven. De kwantitatieve invulling van die trajecten is gebaseerd op de resultaten van de Startanalyse 2020. Voor de hoofdoriëntatie van elk traject is aangesloten bij dominante gedachten in het maatschappelijk debat over de warmtetransitie: energie besparen is altijd goed, warmtenetten benutten energie die anders verloren gaat, waterstof kan aardgas vervangen, warmtepompen hebben de toekomst.

Elk traject bestaat uit een beschrijving van een set technische maatregelen die tussen 2020 en 2050 worden toegepast, de obstakels die daarvoor overwonnen moeten worden en het mogelijke realisatietempo. In de bestaande bouw zijn andere maatregelen nodig dan in de nieuwbouw. Voor de bestaande bouw zijn voor elk traject selecties gemaakt uit de 24 varianten (maatregelpakketten) uit de Startanalyse die passen bij de kenmerken van het traject. Die selectie zocht in elk van de 13.600 buurten naar het maatregelpakket (passend bij het traject) met de laagste nationale kosten. In de nieuwbouw zijn voor elk traject bijpassende typen verwarmingsinstallaties en energiedragers gekozen.

Deze trajecten zijn geen blauwdruk maar een logische combinatie van technieken en tijdspaden die passen bij bepaalde voorkeuren en mogelijke toekomstige omstandigheden. Ze kunnen dienen om overzicht te krijgen in de voor- en nadelen van verschillende routes naar klimaatneutraliteit en om de kans op realisatie ervan beter te kunnen inschatten. Het is niet perse nodig te kiezen tussen een van deze trajecten; mengvormen zijn ook denkbaar, al kan het lastiger zijn om daarvoor efficiënt beleid te ontwikkelen.

De onderlinge verschillen tussen de vier trajecten zijn kleiner dan die tussen de 24 varianten uit de Startanalyse maar de verschillen zijn nog steeds substantieel. Voor TVKN was behoefte aan gematigde, realistische trajecten; geen uitersten van het speelveld. In de gebouwde omgeving is grote behoefte aan duidelijkheid over de te volgen koers maar er is nog veel debat over de juiste richting. Het is complexe materie, moeilijk te overzien. Vooral de afhankelijkheden van het energiesysteem en de financiële consequenties voor burgers en bedrijven zijn moeilijk te doorgronden. Maar er is wel iets te kiezen. De inrichting van de energievoorziening voor gebouwen kan nationaal worden bepaald, binnen de context van het Europese beleid en de werking van internationale energiemarkten. Met de 3 integrale trajecten plus 30 varianten op randvoorwaarden van het TVKN-project is die context gekwantificeerd en met het OPERA-model is verkend wat de mogelijkheden zijn voor realisatie van deze 4 GO-trajecten, in combinatie met trajecten van andere sectoren.

1.4.3 Top-down analyse van het nationale energiesysteem

Het OPERA-model is een dynamisch optimalisatiemodel dat binnen bepaalde randvoorwaarden de meest kosteneffectieve manier berekent om het Nederlandse energiesysteem – en een aantal andere activiteiten die broeikasgasemissies veroorzaken – te laten functioneren. Het model kan werken met een hoge tijdsresolutie, enkele zichtjaren en een ruimtelijke differentiatie naar regio's. Het bevat een database met a) een breed palet aan technieken voor gebruik, winning en productie, omzetting en opslag van energie, b) een breed palet aan fossiele en alternatieve energiebronnen en energiedragers, en c) 'doelthema's' (bijvoorbeeld emissies) waaraan een grens (op basis van beleidsdoelen) of een prijs (als weergave van bijvoorbeeld een emissiehandelssysteem) gekoppeld kunnen worden. De dynamische versie die in de TVKN-studie is gebruikt kan scenario's of trajecten in samenhang doorrekenen voor de periode 2030 – 2050 in tijdstappen van 5 jaar.

Bij de berekeningen voor de gebouwde omgeving werkt OPERA als volgt:

- De gebouwde omgeving wordt gezien als één regio. Het model houdt dus geen rekening met verschillen in kosten die afhankelijk zijn van afstanden, zoals kosten van warmtenetten.
- OPERA onderscheidt veel minder typen gebouwen dan Vesta MAIS.
- Er is wel aandacht voor energievraagprofielen (timeslices). Dat is voor de gebouwde omgeving relevant omdat de jaarlijkse warmtevraag ongelijk verdeeld is over seizoenen en uren van de dag. OPERA stemt de energieproductie op uurbasis af op de energievraag.
- Energiekosten worden endogeen berekend, met schaduwpreisen.

- Het model selecteert technische opties om tegen de laagste nationale kosten de uitstoot van broeikasgassen in 2050 tot nul te reduceren. Het is dus een optimalisatiemodel dat ook rekening houdt met kosten van maatregelen buiten de gebouwde omgeving.
- OPERA behandelt isolatiemaatregelen en vervanging van verwarmingsinstallaties als aparte maatregelen die afzonderlijk en in combinatie kunnen worden ingezet.

De technische parameters en kostendata van OPERA zijn vastgesteld en gedocumenteerd door TNO en zijn voor alle scenario's hetzelfde. Scenario-variabelen voor de gebouwde omgeving bestaan uit cijfers over het maximale aantal gebouwen (van bepaalde types) waar een bepaald type maatregel in een bepaald zichtjaar kan worden toegepast. OPERA onderscheidt:

- Drie woningtypen: appartementen, rijwoningen, overige woningen;
- Vier energielabelklassen A&A, B, C&D, E&F&G;
- Vijf typen utiliteitsgebouwen: kantoren, educatie, industriële bedrijfshallen, zorginstellingen, en overige utiliteitsgebouwen.

Het Vesta MAIS-model onderscheidt 6 woningtypen, 11 bouwperiodes, 7 energielabels (A t/m G), en 9 gebruiksfuncties voor utiliteitsgebouwen (zie Tabel 14). De resultaten van de Startanalyse (in het format van het Vesta MAIS-model) moesten dus geaggregeerd worden om aan te sluiten bij de bouwcategorieën in het OPERA model. De resultaten daarvan staan in de bijlagen van het achtergrondrapport bij de TVKN-studie over de gebouwde omgeving (Wetzels, Hoogervorst, Van Beijnum, Daniëls, & Strengert, 2024).

In het TVKN-project is het OPERA-model gebruikt om drie 'integrale trajecten door te rekenen die zich onderscheiden in veronderstellingen over de toekomstige beschikbaarheid van biograndstoffen en waterstof (ruim of beperkt) en in specifieke eisen die gesteld worden aan het toekomstige energiesysteem (pragmatisch of selectief)⁷. In elk integraal traject worden alle sectorale trajecten aangeboden. Het model kiest daaruit de goedkoopste combinatie van maatregelen. Dat betekent dat de (integrale) resultaten per sector zullen bestaan uit een mix van elementen uit de aangeboden sectorale trajecten.

1.4.4 Verschillen tussen beide methoden

De verschillen in de structuur en werking van Vesta MAIS en OPERA veroorzaken waarschijnlijk verschillen in de doorrekening van overeenkomstige trajecten. Die verschillen konden binnen de beschikbare tijd niet systematisch worden onderzocht. Op grond van kennis over de werking van beide modellen kunnen wel enkele oorzaken van te verwachten verschillen worden genoemd.

Kosten van energiedragers: exogeen voor de GO (Vesta MAIS) of exogeen voor NL (OPERA)

Het Vesta MAIS-model simuleert alleen ontwikkelingen binnen de gebouwde omgeving en heeft dus data over kosten en beschikbaarheid van energiedragers nodig die buiten het model (exogeen) zijn bepaald. Voor de Startanalyse zijn de nationale kosten van energiedragers afgeleid van de verwachte productiekosten in 2030. Die houden geen rekening met mogelijke kostenverhogingen door binnenlandse concurrentie met andere sectoren. Het OPERA-model simuleert de Nederlandse

⁷ In "Pragmatisch" worden alle technieken toegestaan, in "Selectief" worden per sector bepaalde technieken ingeperkt of uitgesloten, zoals kernenergie, import van waterstof en biograndstoffen of CCS. Bij de gehanteerde uitgangspunten voor de combinatie Beperkt en Selectief is geen klimaatneutraal energiesysteem mogelijk. Dat vierde integrale traject is daarom niet verder uitgewerkt.

energiehuishouding, inclusief energie producerende bedrijven, en berekent binnenlandse energieprijzen op grond van vraag en aanbod uit verschillende typen installaties en import. Op deze manier kan OPERA rekening houden met effecten van binnenlandse concurrentie om elektriciteit, warmte, groengas en waterstof bij verschillende (exogeen bepaalde) veronderstellingen over importvolumes en importkosten.

Simulaties met OPERA kunnen dus inzicht bieden in de mate waarin toekomstige schaarste aan elektriciteit, groengas of waterstof van invloed zijn op de kostenverschillen van verduurzamingsopties in de gebouwde omgeving. Het kan ook inzicht bieden in de gevolgen voor andere sectoren wanneer besloten zou worden om een bepaalde hoeveelheid groengas of waterstof voor de gebouwde omgeving te reserveren. Eerste resultaten van dit type analyses worden beschreven in het hoofdrapport van de TVKN-studie.

Kosten van isolatiemaatregelen en installaties verschillen

De kostendata voor beide modellen zijn langs verschillende routes tot stand gekomen en verschillen daardoor. Bij een globale vergelijking van isolatiekosten zijn geen systematische verschillen gevonden. Bij toepassing van elektrische warmtepompen houdt OPERA geen rekening met de kosten van aanpassing van de warmteafgiftesystemen en Vesta MAIS wel. Een recente studie (Pothof, Vreeken, & van Meerkerk, 2022) geeft aan dat die aanpassing in een deel van de bestaande woningen niet nodig lijkt te zijn.

Ruimtelijke detaillering: gevolgen voor kostenraming van warmtenetten

Het Vesta MAIS-model onderscheidt individuele gebouwen met hun locatie en kan zo rekening houden met regionale verschillen in de kosten van de energievoorziening. Dat is met name relevant voor de kosten van nieuwe warmtenetten, die sterk afhankelijk zijn van de afstanden tussen aan te sluiten gebouwen. OPERA behandelt de gebouwde omgeving als één regio en kan dus geen rekening houden met kosten die afhankelijk zijn van afstanden. De kosten van warmtenetten in OPERA zijn daarom gebaseerd op landelijk gemiddelde kosten. Op gunstige locaties, met lager dan gemiddelde kosten, rekent OPERA dus met hogere kosten voor warmtenetten en voor ongunstige locaties met lagere dan werkelijke kosten. Dat kan ertoe leiden dat OPERA, dat optimaliseert op laagste nationale kosten, meer nieuwe aansluitingen op warmtenetten berekent dan het Vesta MAIS-model omdat OPERA de lokale kosten op ongunstige locaties onderschat. De potentie van warmtenetten op gunstige locaties (met lager dan gemiddelde kosten) kunnen dus worden onderschat en op ongunstige locaties overschat.

Na-isolatie en switchen van installaties tegelijk (Vesta MAIS) of na elkaar (OPERA)

OPERA behandelt isolatiemaatregelen en vervanging van verwarmingsinstallaties als aparte maatregelen die afzonderlijk en in combinatie kunnen worden ingezet. Dit wijkt af van de aanpak in de Startanalyse, waar is gerekend met vaste combinaties van na-isolatie en installatiekeuzes. Dat is één van de mogelijke oorzaken van verschillen tussen OPERA en Startanalyse in uitkomsten voor 2050. Als OPERA bijvoorbeeld in 2030 kiest voor na-isolatie tot schillabel B en in 2045 aardgas vervangt door groengas met hybride warmtepompen, dan ontstaat een eindbeeld van hybride warmtepompen met schillabel B terwijl de Startanalyse concludeerde dat die oplossing duurder is (voor de gebouwde omgeving!) dan de combinatie met schillabel D.

Optimalisatie handmatig (Vesta MAIS) of modelmatig (OPERA)

Het OPERA-model selecteert technische opties om tegen de laagste nationale kosten de uitstoot van broeikasgassen in 2050 tot nul te reduceren. Het is dus een optimalisatiemodel dat ook

rekening houdt met kosten van maatregelen buiten de gebouwde omgeving. In de Startanalyse 2020 werden alleen de kosten voor de gebouwde omgeving geminimaliseerd.

Bij het samenstellen van trajecten uit Startanalyse-data heeft geen modelmatige optimalisatie plaatsgevonden. Daar is per buurt een maatregelenpakket met de laagste nationale kosten gekozen, binnen de randvoorwaarden van het betreffende traject. Deze aanpak houdt gedeeltelijk rekening met afhankelijkheden tussen buurten bij de bepaling van kosten van warmtenetten⁸. OPERA houdt daar helemaal geen rekening mee.

Beperkt beschikbare hoeveelheden groengas zijn in de Startanalyse toegewezen aan buurten met de duurste gasloze opties om de nationale kosten voor de GO als geheel te minimaliseren. Omdat OPERA minder bouwtypen onderscheidt en geen regionale differentiatie kent, zal de allocatie van energiedragers aan type gebouwen minder fijnmazig zijn en kan OPERA minder opties voor kostenminimalisatie benutten.

⁸ Bij het berekenen van de kosten van warmtenetten voor de Startanalyse 2020 is rekening gehouden met afhankelijkheden tussen buurten. Daar is per bron de buurt met de laagste marginale aansluitkosten als eerste aangesloten en zijn buurten met oplopende aansluitkosten toegevoegd zolang de broncapaciteit daarvoor ruimte bood. Daarbij is verondersteld dat alle buurten op een warmtenet worden aangesloten. Zo zijn de warmtenetkosten per buurt bepaald. Die kosten verschillen *onder andere* doordat de lengte en capaciteit van de warmtetransportleiding per buurt verschilt.

Bij het samenstellen van trajecten wordt per buurt de techniek gekozen met de laagste nationale kosten. Daarbij kan het gebeuren dat een aaneengesloten verzorgingsgebied van een warmtenet wordt onderbroken door een buurt waar een andere techniek lagere kosten heeft. Dat kan gevolgen hebben voor de kosten van warmtenetaansluitingen in naastliggende buurten. Die gevolgen zijn NIET meegenomen in de kostenberekeningen van trajecten. Dat zou arbeidsintensieve optimalisatieberekeningen met Vesta MAIS vergen, waarvoor de tijd en de capaciteit ontbrak. Bovendien zijn de verwachte kostenmutaties klein, zeker in verhouding tot de onzekerheden in de ramingen van totale kosten.

2 Warmtetransitie in de gebouwde omgeving

2.1 Klimaatopgave voor de gebouwde omgeving

De Nederlandse overheid maakt sinds 2001 expliciet klimaatbeleid om de nationale uitstoot van broeikasgassen te reduceren⁹. Sindsdien zijn de doelstellingen voor de maximale uitstoot stapsgewijs verlaagd. In het Coalitieakkoord van 2022 heeft de regering bepaald dat Nederland in 2050 bijna klimaatneutraal wil zijn en dat de uitstoot in 2030 al minimaal 55% lager moet zijn dan in 1990. Die nationale doelstellingen zijn vertaald in doelstellingen voor de volgende vijf sectoren: industrie, energie, verkeer en vervoer, gebouwde omgeving en landbouw en landgebruik.

Gebouwde omgeving = woningen + gebouwen in de dienstensector

De gebouwde omgeving bestaat uit alle woningen en alle utiliteitsgebouwen van de dienstensector. Utiliteitsgebouwen zijn alle gebouwen die geen woning zijn, zoals winkels, kantoren, bedrijfspanden en gevangenissen. Sommige gebouwen bieden onderdak aan zowel woningen als utiliteitsfuncties, bijvoorbeeld bij een tandarts met praktijk aan huis. Zulke gebouwen worden hier tot de woningen gerekend. Utiliteitsgebouwen die eigendom zijn van de industrie (kantoren) of de landbouw (kassen, boerderijen) worden niet tot de dienstensector gerekend. Met deze afbakening had Nederland in 2020 ruim 7,5 miljoen woningen en ruim 400 miljoen vierkante meter gebruiksoppervlak in de dienstensector, ofwel 3,1 miljoen woningequivalenten (weq), zie Tabel 11. In dit rapport hanteren we de eenheid woningequivalent (weq) voor de omvang van de bouwvoorraad¹⁰.

Tabel 12

Ontwikkeling bouwvoorraad 2010-2050 in miljoen woningequivalenten.

Categorie	2010	2020	2025	2030	2040	2050
Gebouwde woningen (miljoen)	6,9	7,5	7,8	8,2	8,7	8,9
Gebouwen dienstensector (miljoen weq)	2,9	3,1	3,2	3,3	3,6	3,8
Totale bouwvoorraad (miljoen weq)	9,8	10,6	11,0	11,5	12,3	12,7

⁹ In 1991 stuurde het kabinet zijn Nota Klimaatverandering naar de Tweede Kamer, waarin voor het eerst reductiedoelen voor broeikasgasemissies werden aangekondigd. Die zouden vooral via het energiebeleid gerealiseerd moeten worden. Het duurde tot 1999 voordat specifieke emissie-reducerende maatregelen werden aangekondigd in de Uitvoeringsnota Klimaatbeleid, als uitwerking van de EU-verplichting in het Kyoto-protocol van de VN (Anon., 1999).

¹⁰ Eén woning is gelijk aan één woningequivalent en gebouwen in de dienstensector worden omgerekend naar woningequivalenten op basis van hun bruto vloeroppervlak en het gemiddelde energieverbruik per vierkante meter. In 2019, het referentiejaar van de berekeningen in dit rapport, kwam het energieverbruik per 130 vierkante meter bruto vloeroppervlak (bvo) in de dienstensector overeen met het energieverbruik van een gemiddelde woning. Daarom is 1 weq gelijk aan 130 m² bvo.

Minder broeikasgas uitstoten betekent minder aardgas verbranden

De gebouwde omgeving veroorzaakt anno 2020 ongeveer 13% van de nationale uitstoot van broeikasgassen, ofwel jaarlijks 23,7 Mton CO₂-equivalenten, na temperatuurcorrectie (PBL, 2022keV). Daarvan stoot de dienstensector 0,5 Mton uit in de vorm van methaan en lachgas; de resterende uitstoot van 23,1 Mton (ofwel 98 procent) bestaat uit CO₂-emissies. Die CO₂-emissies zijn vrijwel volledig afkomstig uit het verbranden van aardgas. In woningen werd in 2020 naast 288 PJ aardgas ook nog 16 PJ biomassa verstoekt en minder dan 1 PJ olieproducten en kolen. In de dienstensector werd 115 PJ aardgas verbrand naast 2 PJ biomassa en een kleine hoeveelheid olieproducten. Dit betekent dat de klimaatopgave voor de gebouwde omgeving bijna gelijk is aan het vervangen van aardgas door klimaatneutrale energiedragers.

In bepaalde bedrijfstakken binnen de dienstensector wordt aardgas niet alleen gebruikt voor ruimteverwarming maar ook voor productieprocessen zoals brood bakken, drogen van producten en verwarmen van sauna's en zwembadwater. Het is onduidelijk hoeveel aardgas momenteel voor die productieprocessen wordt gebruikt; een ruwe schatting komt op 20 – 25 PJ per jaar. Dat betekent dat het overgrote deel van het aardgasverbruik in de gebouwde omgeving (288 + 115 = 403 PJ) wordt gebruikt voor ruimteverwarming, warm tapwater en koken. Daarom wordt de klimaatopgave van de gebouwde omgeving ook wel aangeduid met de *warmtetransitie*.

2.2 Stand van zaken in de warmtetransitie

2.2.1 Een korte historische schets van gevoerd beleid

Een lange aanloop

Vanaf de tweede oliecrisis in 1978 zijn actoren in de gebouwde omgeving zich bewust van het belang van energiebesparing. Bij het ontwerpen van *nieuwe* gebouwen diende de 'trias energetica' als leidraad. Volgens die vuistregel moesten gebouwonwerpen op de eerste plaats gericht zijn op vermindering van energieverpilling, door middel van compacter bouwen en goede isolatie van gevels, daken en vloeren. Om het energieverbruik in *bestaande* gebouwen te reduceren, stimuleert de rijksoverheid al decennia het toepassen van spouwmuurisolatie, het aanbrengen van dubbel glas en het vervangen van kachels door ketels met steeds hogere rendementen. Na afsluiting van het Energieakkoord uit 2013 werden voor de gebouwde omgeving een aanvullend convenant afgesloten om 10 PJ energie extra te besparen.

Het Klimaatakkoord 2019

Het Klimaatakkoord uit 2019 (SER, 2019) was gericht op snellere emissiereductie tot 2030. Verder werd expliciet afgesproken om het verbruik van aardgas stapsgewijs te beperken en uiterlijk in 2050 volledig te stoppen. Gemeenten kregen een regierol bij het vormgeven van de warmtetransitie. Zij moesten uiterlijk in 2021 Transitievisies Warmte (TVW's) opstellen, waarin per buurt werd beschreven hoeveel gebouwen vóór 2030 al aardgasvrij gemaakt zouden worden en welke energiedrager(s) aardgas zouden kunnen vervangen.

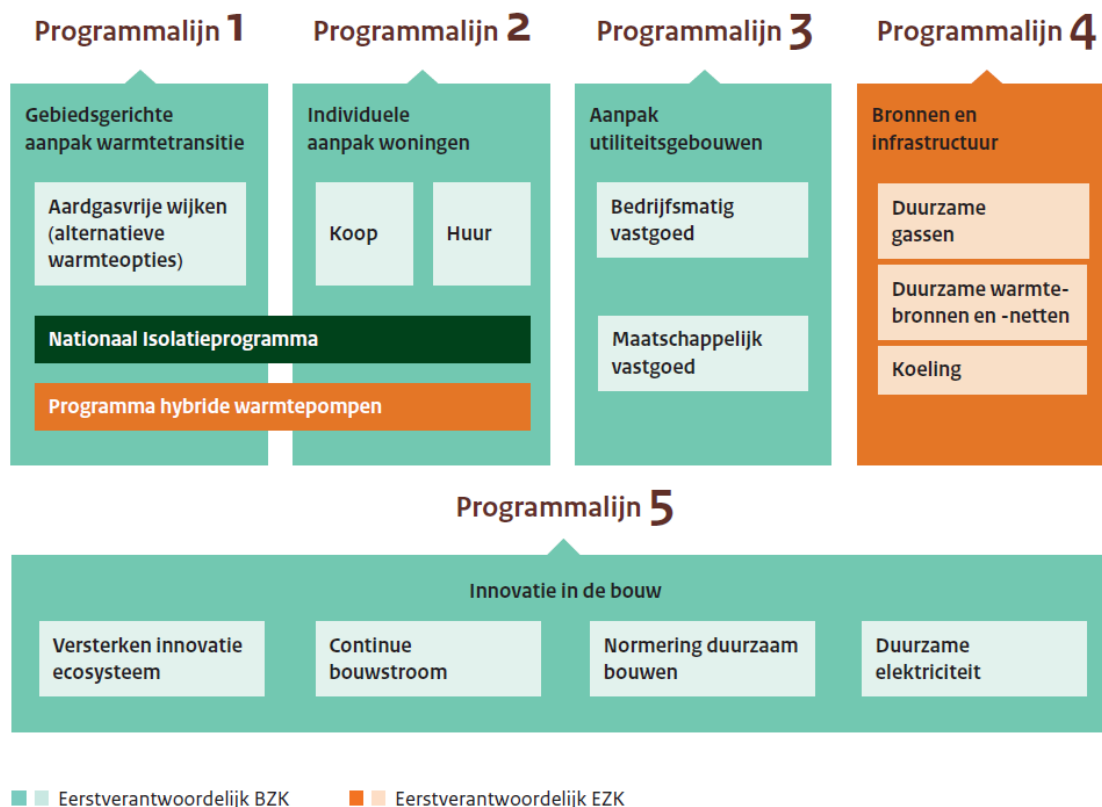
Programmatisch versnellen in 2022

In de zomer van 2022 presenteerde minister Hugo de Jonge zijn beleidsprogramma Versnellen Verduurzaming Gebouwde Omgeving, PVGO (Ministerie van BZK, 2022), dat voortbouwt op het Klimaatakkoord maar ook nieuwe accenten legt. Naast de gebiedsgerichte aanpak in programmalijn 1, die voortbouwt op de TVW's van het Klimaatakkoord, worden 4 andere programmalijnen

ontwikkeld. Die zijn ook gerelateerd aan onderdelen van het Klimaatakkoord, maar lijken nu meer aandacht te krijgen. Met name de toepassing van hybride warmtepompen in woningen wordt in dit VVGO-programma nadrukkelijk gestimuleerd, zowel met subsidies als met een aangekondigde normering die zo streng wordt dat hij de facto als een verplichting zal gaan werken.

Figuur 2

Samenstelling Programma Versnellen Verduurzaming Gebouwde Omgeving. Bron: (Ministerie van BZK, 2022).



Medio 2022 zijn de afspraken uit het Klimaatakkoord en het VVGO deels omgezet in vastgesteld en voorgenomen beleid. Volgens de jaarlijkse KEV resulteert dat beleid in een daling van de uitstoot van broeikasgassen in de gebouwde omgeving naar circa 18 Mton CO₂-equivalenten in 2030 en ruim 14 Mton in 2040 (PBL, 2022kev). Daarmee worden de doelen van maximaal 10 Mton uitstoot in 2030 en circa 0 uitstoot in 2050 nog niet gehaald. Er is dus nog een forse versnelling van het geraamde reductietempo nodig om die doelen op tijd te kunnen halen.

Het voorjaarspakket 2023

In het Voorjaarspakket 2023 heeft het kabinet het emissiedoel voor de gebouwde omgeving aangepast van 10 naar 13,2 Mton in 2030 en tegelijkertijd de bijdrage van groen gas, die eerst onder de gebouwde omgeving werd meegerekend naar de categorie Sector-overstijgend verplaatst. Het voorjaarspakket bevat een aantal nieuwe beleidsvoornemens, waaronder:

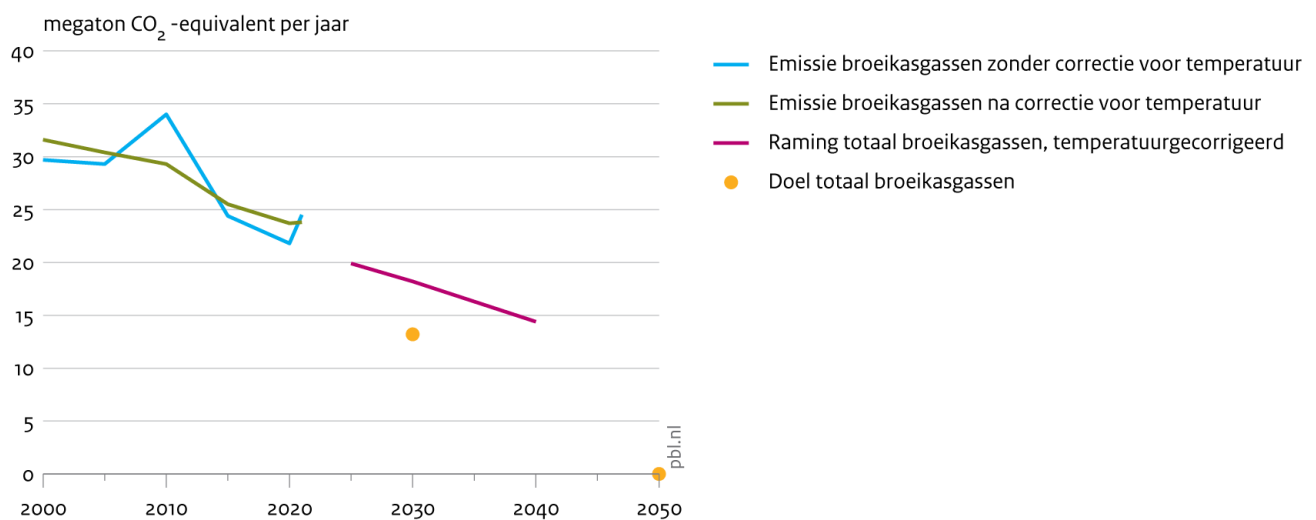
- Bij huurwoningen zijn vanaf 2029 geen EFG-labels meer toegestaan en moet bij renovatie direct de isolatiestandaard worden toegepast;
- Voor koopwoningen komen nog geen verplichtingen maar wel extra stimulansen voor toepassing van de isolatiestandaard met de verplichte opname van financieringsopties verduurzaming als onderdeel van het hypotheekadvies, differentiatie in leennormen én de introductie van de Zero Emissions Buildings-norm per 1-1-2050 voor alle gebouwen.

- Uit het klimaatfonds komt 1,5 miljard euro beschikbaar voor de ontwikkeling van nieuwe warmtenetten en lage temperatuur geothermie bronnen;
- In de utiliteitsbouw moeten de 15% gebouwen met de slechtste energieprestatie per 1-1-2027 zijn verduurzaamd en de volgende 10% per 1-1-2030.
- In totaal is 28 miljard euro uit het Klimaatfonds beschikbaar gesteld om de warmtetransitie verder te versnellen.

2.2.2 Nog te realiseren emissiereductie

Met alle beleid dat op 1 mei 2022 van kracht was of was voorgenomen en concreet was uitgewerkt, zou de uitstoot van broeikasgassen uit de gebouwde omgeving kunnen dalen tot 18,2 Mton in 2030 en 14,4 Mton in 2040, zie Figuur 3 (PBL, 2022kev). De emissiedoelstelling voor 2030 bedraagt 13,2 Mton en in 2050 zou de uitstoot tot nul moeten zijn teruggebracht. Met de beleidsaanscherpingen van 2023 en aangekondigde beleidsvoornemens zou de uitstoot in 2030 kunnen dalen naar 12-18 Mton (KEV-2023). Daarmee lijkt het doel voor 2030 binnen bereik te komen. Om het doel voor 2050 te halen is echter een forse versnelling nodig van het emissiereductietempo.

Figuur 3
Uitstoot van broeikasgassen in de gebouwde omgeving



Bron: PBL, Klimaat- en Energieverkenning 2022

2.2.3 Hoe verder in de warmtetransitie?

Om voldoende voortgang te boeken in de warmtetransitie zijn heldere antwoorden nodig op een aantal strategische vragen. Dit rapport beoogt daaraan een bijdrage te leveren.

Hoe kunnen we tempo maken?

Beleidsmakers hebben nu met name zorgen om het tempo van na-isolatie en uitbreiding van warmtenetten. Tempo maken vereist heldere keuzes over te nemen maatregelen maar er is nog veel onzeker over mogelijkheden en consequenties. Die keuzes zijn aan de politiek. Deze studie kan dat keuzeprocess en het omgaan met de onzekerheden ondersteunen door de voor- en nadelen van relevante opties op een rij te zetten. Daarnaast schetsen we een beeld van het implementatietempo dat nodig is om in 2050 klimaatneutraal te zijn en welke beleidsinstrumenten dat tempo nog zouden kunnen versnellen.

Hoe wordt de warmtetransitie betaalbaar?

Elk klimaatneutraal verwarmingssysteem is de komende decennia duurder dan verwarmen met aardgas. Desondanks streeft de overheid naar een woonlasten-neutrale transitie. Betaalbaarheid is deels afhankelijk van te kiezen technieken (en hun kosten) en deels afhankelijk van beleidsinstrumenten die de kostenverdeling beïnvloeden. De techniekkeuze wordt hier verkend met behulp van ramingen van nationale kosten uit de Startanalyse 2020. In het TVKN-project wordt de inpasbaarheid in het nationale energiesysteem verkend. We schetsen de impact van bestaande beleidsinstrumenten op de kosten voor eindgebruikers in de verschillende trajecten. De gevolgen voor betaalbaarheid zullen in andere studies onderzocht moeten worden.

Waar ligt de balans tussen energie besparen en energie verduurzamen?

Kosten van beide typen maatregelen zijn verkend in de Startanalyse 2020 (partiële analyse bottom-up) en met het OPERA-model (nationale systeemanalyse). Naast kosten zullen andere kenmerken en implicaties van beide typen maatregelen de keuze beïnvloeden, zoals ruimtegebruik, arbeidsbehoefte, en acceptatie bij burgers. Een aantal kenmerken van technische opties worden hier in beeld gebracht maar dat kan in nader onderzoek nog verder worden uitgewerkt.

Hoe concurreert de gebouwde omgeving met andere sectoren om groengas en waterstof?

Uit de Startanalyse 2020 (en uit dit rapport) blijkt dat verwarmen met groengas of waterstof voor de gebouwde omgeving aanmerkelijk minder nationale kosten vergt dan andere klimaatneutrale verwarmingsopties. Volgens huidige inzichten zal Nederland tot 2050 onvoldoende groengas en waterstof hebben om aan de wensen van alle sectoren te kunnen voldoen. Hier dient zich dus een verdelingsvraagstuk aan waar de overheid een belangrijke rol in zal spelen. Het TVKN-project onderzoekt de technische en financiële gevolgen van verschillende verdelingen van schaarse energiedragers over economische sectoren. Dit rapport is een voorstudie voor dat project vanuit de gebouwde omgeving. De eerste resultaten staan in het TVKN-hoofdrapport. Nader onderzoek zal nodig zijn.

2.3 Technische opties voor klimaatneutraal verwarmen, de bouwstenen

Het klimaatneutraal maken van de gebouwde omgeving wordt in veel studies gezien als een technologische opgave. Technologische oplossingen zijn te verdelen in technieken voor energiebesparing, die het jaarlijkse energieverbruik per gebouw verlagen, en technieken die de energie die nodig is voor gebouwen op een klimaatneutrale wijze produceren. In theorie kan de gebouwde omgeving klimaatneutraal worden zonder energiebesparing, door aardgas en grijze stroom te vervangen door klimaatneutrale energiedragers zoals groene stroom, restwarmte, omgevingswarmte, vaste biomassa, groengas of klimaatneutrale waterstof. Maar omdat deze energiedragers naar verwachting (de komende jaren) duurder zijn en blijven dan aardgas en grijze stroom, kán het rendabel zijn om één of meer energiebesparende maatregelen te nemen. Daarnaast zijn er andere argumenten voor energiebesparing, zoals beperken van het ruimtebeslag voor de (binnenlandse) productie van hernieuwbare energie of beperken van de afhankelijkheid van importen. De gewenste balans in de toepassing van energiebesparing en energieverduurzaming is slecht te voorspellen omdat de kostenontwikkeling (ook die van aardgas en grijze stroom) en de groeikansen van alle opties nog onzeker zijn. We zetten de belangrijkste onzekerheden op een rij.

2.3.1 Energie besparen langs twee routes

Het huidige energieverbruik in woningen bestaat voor 69% uit aardgas, 22% uit elektriciteit, 4% uit biomassa en 3% uit warmtenetten; de rest (2%) komt uit overige hernieuwbare bronnen, voornamelijk omgevingswarmte. In de dienstensector bestaat het energieverbruik voor 46% uit aardgas, 47% uit elektriciteit, 4% uit warmtenetten en 3% uit overige hernieuwbare energie, voornamelijk omgevingswarmte (PBL, 2021k).

Elektriciteit vormt dus een substantieel deel van het energieverbruik in woningen en bedrijven maar besparen op het stroomverbruik door gebouweigenaren krijgt toch relatief weinig aandacht. Weliswaar worden producenten van apparaten (via de Ecodesign richtlijn) aangespoord steeds efficiëntere elektrische apparaten te ontwikkelen, maar het *gebruik* van elektrische apparaten wordt nauwelijks ontmoedigd. Dat komt mogelijk doordat het (naar verwachting) *relatief* eenvoudig is om de productie van elektriciteit klimaatneutraal te maken. Bij aardgas ligt dat anders.

Aardgas wordt in de gebouwde omgeving hoofdzakelijk gebruikt voor verwarming van gebruiksruimten en tapwater. Door gebouwen beter te isoleren en door de warmteproductie binnen en (in geval van stadsverwarming) buiten gebouwen efficiënter te maken, kan behoorlijk worden bezuinigd op de hoeveelheid energie die moet worden aangevoerd om warmteverliezen van gebouwen te compenseren. Sinds de oliecrises van 1973 en 1978 stimuleert de overheid het isoleren van gebouwen en stelt het steeds strengere eisen aan de energetische kwaliteit van nieuwbouwwoningen. De afgelopen 20 jaar is het energieverbruik voor verwarmen van een gemiddelde woning met 33% gedaald; bij bedrijven daalde het verbruik per vierkante meter met 29% (PBL, 2021k). Er is dus al veel bereikt, gemiddeld, maar de genoemde dalingen zijn voor een belangrijk deel het gevolg van nieuwbouw, die steeds energiezuiniger werd. Bij bestaande gebouwen is het tempo van energiebesparing echter nog laag, zeker in het licht van de beoogde totale verduurzaming in 2050.

Verlagen van de gemiddelde temperatuur in gebouwen en beperken van het gebruik van elektrische apparaten wordt gezien als inleveren van comfort en kwam tot voor kort nauwelijks aan bod bij het verkennen van opties. De energiebesparing in woningen is voor een aanzienlijk deel bereikt door gevelkachels en oude cv-ketels te vervangen door efficiëntere HR-ketels. Dat ging relatief eenvoudig omdat vervangingsmomenten min of meer vanzelf ontstonden. Maar bij het na-isoleren van muren, ramen, dak en vloer is dat niet zo en mede daarom ging na-isolatie (in ieder geval tot 2022) vaak in kleine stapjes, meestal één maatregel per keer. Veel isolatiemaatregelen zijn niet rendabel omdat de jaarlijkse kosten hoger zijn dan de resulterende besparingen op de energie-uitgaven (zie hoofdstuk 4). Veel woningeigenaren hebben het geld niet om te investeren in energiebesparing, willen of kunnen het niet lenen of besteden het liever aan andere zaken. Er zijn dus stevige stimulansen nodig om de energiebesparing in gebouwen te versnellen. Dat verklaart de beleidsintensivering die de afgelopen jaren is doorgevoerd.

2.3.2 Energiedragers verduurzamen: stroom, water, gas

Om de gebouwde omgeving klimaatneutraal te maken, moet alle elektriciteit volledig groen worden en alle aardgas worden vervangen door alternatieve klimaatneutrale energiedragers. Momenteel komen daar vier alternatieve energiedragers voor in aanmerking: groene stroom, warm water, groen gas en klimaatneutrale waterstof. Op beperkte schaal (ruim 4%) wordt in woningen en utiliteitsgebouwen ook vaste, houtige biomassa gebruikt, zoals hout en houtpellets. Dat verbruik kan de komende jaren nog licht toenemen (volgens de KEV2021 van 17 PJ in 2020 naar 19 PJ in 2040) maar biomassa wordt niet gezien als grootschalig alternatief voor aardgas. Biomassa wordt ook

toegepast in warmtenetten die de gebouwde omgeving van warmte voorzien. In het SER-advies over biomassa (SER, 2020) wordt het gebruiken van houtige biomassa voor verwarming gezien als een overgangstoepassing. “Het kabinet kiest conform het SER-advies voor een verantwoorde inzet van biograndstoffen met een voortvarende aanpak voor tijdige afbouw van de stimulering van laagwaardige toepassingen zoals elektriciteit en warmte, ...” (IenW, 2020). Omdat we in deze studie zoeken naar energiesystemen voor de lange termijn, werken we het verwarmen van woningen en utiliteitsgebouwen met houtige biomassa hier niet verder uit. Bij warmtenetten kan het gebruik van biomassa de komende jaren eerst nog toenemen maar op lange termijn moet dat volgens het kabinet worden vervangen door andere hernieuwbare energiebronnen.

Verwarmen met groene stroom: all-electric

Gebouwen kunnen elektrisch worden verwarmd met weerstandsverwarming (zoals straalkachels, wandkachels, vloerverwarming), infraroodpanelen en/of warmtepompen. Van deze opties gebruiken warmtepompen de minste elektriciteit per geleverde hoeveelheid nuttige warmte. Zij halen warmte uit de omgeving (lucht, water of bodem) en ‘comprimeren’ die tot energie waarmee water wordt verwarmd tot circa 30-55 graden. Bij wateraanvoer van 30 graden zijn lage-temperatuur-radiatoren of vloerverwarming nodig om een ruimte te verwarmen. Er wordt geëxperimenteerd met warmtepompen die cv-water tot hogere temperaturen kunnen verwarmen zodat bestaande radiatoren gebruikt kunnen worden; die zijn echter wel 20-30% minder efficiënt. In een slecht geïsoleerd gebouw heb je een grote (dure) warmtepomp nodig die relatief veel stroom verbruikt. Voor comfortabele verwarming met een elektrische warmtepomp wordt daarom een isolatieniveau van minimaal schillabel B geadviseerd. Warmtepompen kosten nu 8-20.000 euro, afhankelijk van type en vermogen. In combinatie met hoge isolatiekosten is all-electric verwarmen nu nog een relatief dure optie. Het is onduidelijk in welk tempo deze kosten gaan dalen. Naast kosten voor de gebouwde-eigenaar zijn er ook kosten voor de netbeheerders en stroomleveranciers. Netbeheerders verwachten dat verzwaren van de netten op veel plaatsen al nodig is vanwege de toename van zon-PV en het opladen van elektrische auto’s zodat elektrische verwarming meestal geen extra knelpunten oplevert. Leveranciers moeten zorgen voor extra stroomaanbod om in koude perioden bij beperkt aanbod van stroom uit zon en wind toch voldoende elektriciteit te kunnen leveren. De elektriciteit op die piekmomenten (uit opslag of back-up vermogen) is veel duurder dan gemiddeld en zal op een of andere manier met afnemers verrekend moeten worden.

Verwarmen met warm water: warmtenetten

Warmtenetten transporteren warm water ofwel warmte, die buiten de gebouwde omgeving wordt geproduceerd, naar woningen en utiliteitgebouwen. Die warmteproductie is nu nog voor meer dan 65 procent gebaseerd op fossiele energiedragers¹¹ maar in een klimaatneutrale toekomst is alleen plaats voor warmtenetten met hernieuwbare energiebronnen zoals geothermie, aquathermie, (groene) restwarmte en biomassa. Het gebruik van biomassa voor warmtenetten nam de laatste jaren toe en bestaande plannen duiden op een verdere groei met 50% (PBL, 2020b). Die toename kan helpen om nieuwe warmtenetten tot ontwikkeling te brengen, maar is geen structurele oplossing voor verduurzaming van de warmteproductie.

¹¹ Er zijn geen gedetailleerde data beschikbaar over de samenstelling van de energie-input van alle warmtenetten tezamen. In 2020 werd naar schatting 32 PJ warmte aan warmtenetten geleverd (PBL, 2021k). Daarvan werd 5 PJ geleverd uit biomassa (PBL, 2020b), 5 PJ door AVI’s en 1 PJ was industriële restwarmte. Dat impliceert dat 67% van de warmte-inzet afkomstig was van fossiele bronnen. De warmteproductie met biomassa zal de komende jaren nog toenemen tot 7,4 PJ in 2023.

In 2019 waren ongeveer 444.500 woningen en bedrijven op een warmtenet aangesloten¹². Dat aantal zou in theorie nog sterk kunnen groeien omdat nog veel restwarmte van bedrijven en installaties wordt geloosd. Dat geldt niet alleen voor industriële bedrijven, maar ook voor kantoren, supermarkten, ziekenhuizen, datacenters, zwembaden, et cetera. Door de energietransitie zullen deze bedrijven hun energieverbruik moeten verduurzamen, wat ervoor zorgt dat hun restwarmte automatisch ook duurzamer wordt. Ze zullen ook efficiënter met hun energie omgaan en daardoor op termijn waarschijnlijk minder restwarmte 'over hebben'. Desondanks blijft er ruimte voor uitbreiding van de levering aan warmtenetten. Daarnaast kunnen nog veel hernieuwbare warmtebronnen ontsloten worden, zoals geothermie en aquathermie.

Huidige warmtenetten worden gevoed uit hoge en midden-temperatuur bronnen en leveren water van circa 90 graden aan gebouwen. Dat is warm genoeg om gebouwen te verwarmen met behulp van een eenvoudige warmtewisselaar en standaard radiatoren. Verder isoleren dan tot schillabel D of C is doorgaans niet rendabel, zie hoofdstuk 5.

Het buizenstelsel voor warmtetransport en distributie vormt een grote kostenpost. Dat maakt dat warmtenetten vooral aantrekkelijk zijn op plaatsen waar op (relatief) korte afstand van een bron veel warmte kan worden toegepast, bijvoorbeeld doordat woningen dicht op elkaar staan. Als je per gigajoule afgeleverde warmte veel buizen moet aanleggen dan wordt de levering van die energie snel duurder dan een alternatief.

Er wordt geëxperimenteerd met warmtenetten die gevoed worden uit bronnen met een lage temperatuur (LT-bronnen van 30 tot 60 graden), zoals restwarmte van koelinstallaties (in supermarkten, datacenters, kantoren, etc.), waterzuiveringsinstallaties en riolen. Soms worden ook ZLT-bronnen gebruikt zoals oppervlaktewater (0-20 graden). Door koppeling aan een warmte-koelopslag (WKO) kan warmte in de zomer worden opgeslagen om te gebruiken in de winter. Warmtenetten met LT-bronnen kunnen gebouwen direct verwarmen als die goed geïsoleerd zijn en LT-afgiftesystemen hebben, maar ook indirect met behulp van een warmtepomp, die de watertemperatuur verhoogt tot benodigde niveaus, van 30 tot 70 graden en meer. Per gebouw of per groep gebouwen kan een afweging worden gemaakt tussen extra isoleren of verhogen van de aanvoertemperatuur. LT-warmtenetten zijn doorgaans beperkt van omvang omdat de LT-bronnen vaak een kleine capaciteit hebben. Ze zijn over het algemeen relatief duur, zeker in combinatie met een warmtepomp en bij slecht geïsoleerde gebouwen.

Verwarmen met groengas

Voor gebouweigenaren is groengas vaak een aantrekkelijk klimaatneutraal alternatief voor aardgas. De verwachte productiekosten in 2030 zijn wel 3-4 keer die van aardgas maar je kunt je huidige cv-ketel blijven gebruiken voor ruimteverwarming en warm tapwater. Na-isolatie is niet per se noodzakelijk, tenzij je een slecht geïsoleerd gebouw hebt. Vervanging van een HR-ketel door een hybride warmtepomp kan het gasverbruik ongeveer halveren doordat een deel van de verwarming met een kleine elektrische warmtepomp wordt gedaan. Alleen in koude perioden is dan nog gas nodig, hetgeen verhoging van de stroomproductie op piekmomenten (zoals bij all-electric verwarmen) overbodig maakt. Het huidige gasnet kan in gebruik blijven en is al gedimensioneerd op piekvragen in de winter. Het is echter erg onzeker hoeveel groengas op termijn beschikbaar kan komen

¹² Dit is exclusief woningen op blokverwarming. Het exacte aantal aansluitingen op warmtenetten is onbekend. Deze schatting komt uit de Startanalyse 2020 (PBL, 2020g). Andere publicaties, zoals de Warmtemonitor en het Nationale Trendrapport Warmte 2021, komen op soortgelijke aantallen.

om gebouwen te verwarmen en wat groengas voor huishoudens gaat kosten. Dat laatste is niet alleen afhankelijk van de mate waarin de productiekosten (door innovatie) gaan dalen, maar ook van de mate waarin concurrentie om groengas de marktprijs gaat opdrijven en van de belastingen die op groengas geheven gaan worden.

Verwarmen met waterstof

Voor waterstof gelden soortgelijke overwegingen als voor groengas. Het bestaande gasnet is tegen geringe kosten geschikt te maken voor transport van waterstof en cv-ketels kunnen met aangepaste branders ook op waterstof draaien. Anders dan bij groengas kan de overstap op waterstof niet geleidelijk (via bijmenging) plaatsvinden maar moeten alle gebouwen in een buurt of wijk in één keer overstappen. Klimaatneutrale (blauwe of groene¹³) waterstof produceren is voorlopig nog duurder dan groengas maar de technologie is nog volop in ontwikkeling en de kosten kunnen nog lang dalen¹⁴. Het is onzeker hoeveel klimaatneutrale waterstof op termijn beschikbaar komt voor verwarming van gebouwen. Dat hangt niet alleen af van de toekomstige binnenlandse productie, de geïmporteerde hoeveelheden en de behoefte aan waterstof in andere sectoren¹⁵, maar ook van de vraag of en waar gasbedrijven hun gasnet geschikt maken voor waterstof, voor groengas of buiten bedrijf stellen wegens onvoldoende afzet.

2.4 Overwegingen bij de selectie van trajecten naar klimaatneutraliteit

De gebouwde omgeving heeft in theorie veel technische mogelijkheden om gebouwen klimaatneutraal te verwarmen. Ze zijn hierboven kort geschetst. Er zijn echter allerlei onzekerheden over de uitvoerbaarheid van die mogelijkheden, zoals over de toekomstige kosten van die technieken en toekomstige beschikbaarheid van de benodigde energiedragers. Die onzekerheden worden niet vanzelf kleiner. Om in een periode van nog geen 30 jaar in de hele gebouwde omgeving klimaatneutrale verwarming te realiseren, moet het transitieproces nu in gang worden gezet. Dat betekent keuzes maken onder onzekerheid. Ramingen van systeemkosten kunnen behulpzaam zijn bij het uitstippelen van routes naar klimaatneutraliteit in 2050. Met dat doel heeft PBL in 2020 een Startanalyse van aardgasvrije buurten uitgevoerd, waarin de nationale kosten van 24 opties voor klimaatneutraal verwarmen zijn berekend (PBL, 2020g).

Die 24 opties verschillen van elkaar op tal van kenmerken. Naast nationale kosten zijn ook kosten voor verschillende typen eindgebruikers relevant, evenals bijvoorbeeld de gevolgen voor het ruimtegebruik, de uitstoot van stikstofoxiden, de gevoeligheid voor fluctuaties in energieprijzen en de mate waarin de benodigde energiedragers nationaal geproduceerd kunnen worden of

¹³ Blauwe waterstof wordt gemaakt uit aardgas waarbij de CO₂-uitstoot grotendeels wordt afgevangen en opgeslagen. Groene waterstof wordt gemaakt uit elektrolyse van water; daar komt geen CO₂ bij vrij. Er zijn ook nog andere kleuren waterstof: turquoise (uit methaanpyrolyse) of paars (uit kernenergie). Waterstof kan ook gemaakt worden door biomassa te vergassen, waarbij de vrijkomende CO₂ opgeslagen kan worden. Dit wordt meestal ook groene waterstof genoemd, maar ook de kleur geel of oranje wordt soms gebruikt.

¹⁴ In de achtergrondrapportage over waterstof die in het kader van het TVKN-project is geschreven, wordt uitgebreid ingegaan om de mogelijke kostenontwikkeling van waterstof.

¹⁵ Zie de TVKN-rapportages over waterstof, industrie, mobiliteit en elektriciteit.

geïmporteerd moeten worden. De opties verschillen ook in de mate waarin woningeigenaren of huurders zelf actie kunnen ondernemen en in de mate waarin collectieve besluitvorming en afstemming nodig is.

In het Klimaatakkoord is afgesproken dat minimaliseren van nationale kosten een belangrijk criterium moet zijn bij de selectie van aardgasvrije verwarmingssystemen in buurten. Op die manier worden de transitiekosten voor Nederland als geheel geminimaliseerd. Daarnaast is een eerlijke verdeling van die transitiekosten van groot belang voor de acceptatie en realisatie van de gekozen aanpak. Het is de taak van de overheid om de kostenverdeling in goede banen te leiden met belastingen, heffingen, subsidies en normeringen. Met die beleidsinstrumenten vertaalt de overheid de nationale kosten in eindgebruikerskosten voor alle betrokken partijen. Die taak wordt minder complex wanneer de totale nationale kosten beperkt gehouden kunnen worden; vandaar het streven naar oplossingen met de laagste nationale kosten.

De 24 opties voor klimaatneutraal verwarmen zijn in de Startanalyse gegroepeerd in 5 warmtestrategieën, gekoppeld aan 5 klimaatneutrale energiedragers. De kostenberekeningen zijn uitgevoerd per gebouw en de resultaten zijn gepubliceerd¹⁶ voor elk van de ruim 13.600 buurten in Nederland. In de bijlage is een korte beschrijving opgenomen van het begrip nationale kosten en van de belangrijkste uitgangspunten die in de berekeningen zijn gehanteerd. Tabel 12 toont de gemiddelde jaarlijkse kosten in 2030 per woningequivalent¹⁷ (weq) en per ton CO₂-reductie als elk van de vijf strategieën (met twee isolatieniveaus) in heel Nederland zou worden toegepast op de gebouwenvoorraad in 2019. Die bestond toen uit 7,4 miljoen woningen en circa 1 miljoen utiliteitsgebouwen, samen 10,2 miljoen woningequivalenten. Er zit een grote spreiding in de kosten per woningequivalent omdat gebouwen onderling sterk verschillen. Het is daardoor onzeker of de onderzochte technische maatregelen in alle bestaande gebouwen toegepast kunnen worden, zoals in de analyse is verondersteld. Er zit ook een grote onzekerheid in die kosten omdat de ontwikkeling van techniekkosten en energiekosten tussen nu en 2030 onzeker is¹⁸. Niettemin geeft de tabel enkele interessante indicaties.

Tabel 13

Gemiddelde nationale kosten in 2030 van vijf aardgasvrije warmtestrategieën voor de bestaande bouw bij twee isolatieniveaus; in euro per woningequivalent (weq) per jaar en in euro per ton CO₂-reductie.

Warmtestrategie	Schillabel D (€/weq,j)	Schillabel B (€/weq,j)	Schillabel D (€/ton CO ₂)	Schillabel B (€/ton CO ₂)
All-electric	n.b.	1121	n.b.	526
MT-warmtenet op restwarmte	1143	1365	729	871
LT-warmtenet + elec. warmtepomp	1132	1170		
Groengas + HR-ketel	642	878	301	412
Waterstof + HR-ketel	889	1115	417	523

Zo lijken – bij de hier gehanteerde aannames voor de kosten van energiedragers, apparaten en materialen – bij elke strategie de integrale kosten van beperkt na-isoleren (naar schillabel D) lager dan van vergaand na-isoleren (naar schillabel B). Te midden van alle onzekerheden lijkt na-isoleren

¹⁶ Zie de website Startanalyse 2020: <https://themasites.pbl.nl/leidraad-warmte/2020/>

¹⁷ 1 weq is gelijk aan 1 gemiddelde woning en 130 m² vloeroppervlak in de dienstensector.

¹⁸ De documentatie bij de Startanalyse bevat uitgebreide toelichtingen en onderbouwing van de gehanteerde kostenschattingen. In de Startanalyse is voor elke buurt een gevoeligheidsanalyse gemaakt.

naar ten minste schillabel D dus een keuze die de nationale kosten minimaliseert. Alleen bij all-electric is beperkt na-isoleren buiten de analyse gelaten omdat deskundigen inschatten¹⁹ dat die optie op zeer koude dagen onvoldoende warmte kan produceren of dan erg hoge stroomkosten oplevert. We verkennen isolatie verder in traject 1 “volop energie besparen” (hoofdstuk 4).

De beschikbaarheid van energiedragers kan regionaal verschillen en dat is niet alleen afhankelijk van productievolumes maar ook van de aanleg van bijpassende netwerken. Netwerkkosten veroorzaken grote regionale verschillen in de kosten van warmteopties. Regionale kostenverschillen ontstaan ook door regionale verschillen in de energetische kwaliteit van gebouwen en dus in de maatregelen die nodig zijn om een gewenst isolatieniveau te bereiken. Regionale verschillen in kosten en beschikbaarheid van bronnen is met name²⁰ relevant bij de ontwikkeling van warmtenetten. Met de verwachte toekomstige hoeveelheid HT- en MT-restwarmte kan bijvoorbeeld slechts de helft van de bestaande gebouwde omgeving worden verwarmd. In sommige delen van het land kan restwarmte worden aangevuld met geothermie, maar niet overal. In traject 2 (hoofdstuk 5) verkennen we de mogelijkheden om de potentie van warmtenetten maximaal te benutten.

Tabel 12 laat zien dat verwarmen met groengas in de Startanalyse gemiddeld de minst dure optie is, gevolgd door waterstof. Het is echter onzeker of de kosten van deze opties zich op termijn zullen ontwikkelen zoals in de Startanalyse is geschat. Kostenontwikkelingen van nieuwe energietechnieken laten zich moeilijk voorspellen, zoals we hebben gezien bij de kosten van PV-panelen en windturbines. Veel deskundigen denken dat de productiekosten van groengas en klimaatneutrale waterstof zullen dalen ten opzichte van nu, waarschijnlijk verder dan de kosten van warmtenetten en de kosten van klimaatneutrale elektriciteit. Die veronderstellingen zijn in de Startanalyse toegepast²¹. Mogelijk kunnen stroomkosten verder dalen als goedkope technieken voor grootschalige seizoensopslag beschikbaar komen, maar die staan nu nog helemaal in de kinderschoenen. Dat betekent dat de kans bestaat dat verwarmen tegen de laagste nationale kosten op termijn met groengas en klimaatneutrale waterstof gerealiseerd kan worden.

Het is nog wel onzeker *hoeveel* groengas en schone waterstof op termijn beschikbaar komt voor verwarming van gebouwen. Andere toepassingen strijden om voorrang. In de komende periode, waarin de productie nog moet opschalen, kan dat leiden tot hoge marktprijzen voor deze gassen, hoger dan de productiekosten die in de Startanalyse zijn gehanteerd. Daarom veronderstellen velen dat deze gassen eerst zullen worden toegepast in de industrie en het (vlieg-)verkeer en dat de gebouwen pas aan bod komen bij grote productievolumes. Zij vinden het daarom risicovol om deze strategieën in de gebouwde omgeving nu al volledig te omarmen. Dat is echter geen reden om de voor- en nadelen van deze optie in kaart te brengen. In traject 3 (hoofdstuk 6) verkennen we de voor- en nadelen van een strategie met schone gassen en hoe de risico's afgedekt kunnen worden. Vervolgens werken we uit hoe een schone gassen traject succesvol doorlopen zou kunnen worden. In de systeemanalyse voor het TVKN-project (PBL, 2024) wordt verkend in welke mate Nederlandse

¹⁹ Die inschatting is tijdgebonden. Er worden nu al warmtepompen ontwikkeld die genoemde nadelen (deels) ondervangen. Dat zet vraagtekens bij de noodzaak tot vergaand na-isoleren. Dit werken we verder uit in hoofdstuk 7.

²⁰ Er zijn ook regionale verschillen in temperatuur die leiden tot regionale verschillen in energieverbruik en energiekosten voor verwarming van soortgelijke woningen. Die kostenverschillen zijn echter klein ten opzichte van verschillen in kosten voor energienetwerken en voor na-isolatie. De energiekosten in de Startanalyse zijn berekend met temperatuur-gecorrigeerde data voor energieverbruik per woning.

²¹ De kostenberekeningen worden toegelicht in de bijlage en in (PBL, 2022a) en (Hoogervorst, Waterstof voor de gebouwde omgeving; operationalisering in de Startanalyse 2020, 2020).

sectoren concurreren om waterstof en biomassa en wat dat kan betekenen voor de kansen op toepassing van klimaatneutrale gassen voor verwarming van gebouwen.

In hoofdstuk 7 doordenken we ten slotte de kansen van een all-electric strategie, waarin vrijwel de hele gebouwde omgeving met elektriciteit van energie wordt voorzien, het aardgasnet volledig overbodig zou worden en, in het uiterste geval, wordt afgezien van de uitbreiding van warmtenetten. Het laat de potentie van warmtenetten onbenut, maar heeft wel minder tijd nodig voor (vaak langdurige) afstemming over de aanleg van collectieve voorzieningen. Gebouweigenaren kunnen in hun eigen tempo benodigde maatregelen treffen en netbeheerders zouden planmatig kunnen werken aan verzwaring van het elektriciteitsnet. Een warmtestrategie met een groot aandeel all-electric is bestuurlijk waarschijnlijk eenvoudiger te realiseren dan andere strategieën, maar vergt wel hoge kosten voor netverzwaring en extra stroomproductie in de winter.

3 Raakvlakken met andere onderwerpen

De reductie van de uitstoot van broeikasgassen in de gebouwde omgeving wordt niet alleen bepaald door de emissiebeperkende maatregelen die in de gebouwde omgeving worden genomen, maar ook door ontwikkelingen buiten de gebouwde omgeving en door te verwachten veranderingen in de omvang en samenstelling van de bouwvoorraad. Dit hoofdstuk behandelt kort enkele onderwerpen die van belang zijn voor de kwantificering van het tempo waarin de uitstoot van broeikasgassen in gebouwde omgeving kan worden verlaagd.

3.1 Nieuwbouwopgave woningen

Nederland kent al jaren een overspannen woningmarkt, met meer vraag dan aanbod. Daarom heeft de overheid in het Programma Woningbouw een doel gesteld om tot 2030 circa 0,9 miljoen extra woningen te realiseren (VRO, 2022). Nieuwe woningen moeten aan strenge isolatienormen voldoen en krijgen geen aansluiting op het aardgasnet meer. Hoewel het verwarmen van nieuwe woningen daardoor aanmerkelijk minder energie vergt dan van bestaande woningen, zal de energiebehoefte van 1 miljoen nieuwe woningen voor verwarmen plus andere activiteiten toch substantieel zijn. Om die energiebehoefte te kunnen schatten, is dus een raming nodig van het nieuwbouwtempo van woningen.

De ontwikkeling van het aantal gebouwen in Nederland is tot nu toe niet merkbaar beïnvloed geweest door de beschikbare hoeveelheid energie; die was altijd ruim voorhanden. In de toekomst is dat misschien minder vanzelfsprekend omdat klimaatneutrale energie moeilijker te produceren is. In de regelgeving voor nieuwbouw wordt daar al rekening mee gehouden door scherpe isolatie-eisen te stellen. Dat maakt gebouwen wel duurder, maar zal de ontwikkeling van het aantal woningen waarschijnlijk niet merkbaar beïnvloeden. In dit essay baseren we de berekeningen daarom op projecties van de bouwvoorraad uit de KEV-2021 tot 2040. De ontwikkeling van het aantal woningen extrapoleren we met de recente bevolkingsprognose van CBS (CBS, 2020), zie Tabel 13.

Tabel 14

Ontwikkeling van aantal inwoners en woningen. Bron: KEV-2021 en extrapolatie 2050

	2000	2010	2020	2025	2030	2040	2050
Bevolking (miljoen)	15,9	16,6	17,4	17,9	18,4	19,1	19,5
Particuliere huishoudens (miljoen)	6,8	7,4	8,0	8,3	8,6	9,0	9,3
wv eenpersoonshuishoudens (miljoen)	2,3	2,7	3,1	3,3	3,5	3,8	4,1
Gemiddelde huishoudensgrootte	2,3	2,2	2,2	2,2	2,1	2,1	2,1
Bewoonde woningen (miljoen)	6,3	6,9	7,5	7,8	8,2	8,7	8,9
Extra woningen t.o.v. 2019 (miljoen)			0,0	0,3	0,7	1,2	1,4

Volgens die projecties komen er tot 2050 netto nog 1,4 miljoen bewoonde woningen bij. Dat is het gevolg van bevolkingsgroei én van afname van de gemiddelde huishoudomvang. Het bijbouwen gaat minder snel dan het kabinet wil; in 2030 zijn er in bovenstaande projectie 0,7 miljoen extra woningen in plaats van de beoogde 1 miljoen. Nieuwe woningen zijn (door aangescherpte voorschriften) veel beter geïsoleerd dan bestaande woningen en verbruiken (bij gelijke omvang) dus minder energie per vierkante meter. Als er voornamelijk voor eenpersoonshuishoudens wordt

gebouwd, dan zijn nieuwe woningen gemiddeld kleiner dan bestaande woningen en is het energieverbruik navenant lager. Maar in die woningen is het gemiddelde energieverbruik per persoon dan wel hoger.

3.2 Dynamiek in de dienstensector: sloop en nieuwbouw

De dienstensector kent een grote diversiteit aan dienstverlenende activiteiten in de private en publieke sector. De gebouwvoorraad van de dienstensector bestaat uit uiteenlopende typen gebouwen, waaronder kantoren, bedrijfshallen, winkels, scholen en zorginstellingen.

Om een verkenning te kunnen maken van de toekomstige energiebehoefte van de dienstensector is inzicht nodig in de ontwikkeling van de gebouwvoorraad. Volgens de KEV 2022 blijft de dienstensector groeien en neemt het gebruiksoppervlak tot 2040 met ongeveer 0,6 procent per jaar toe. Het gebruiksoppervlak (excl. leegstand) neemt toe van 406 miljoen m² in 2020 naar 462 miljoen m² in 2040. Deze projectie is gebaseerd op prognoses voor het bruto binnenlands product, de werkgelegenheid en de bevolkingsomvang. Met een regressie analyse is onderzocht hoe het gebruiksoppervlak samenhangt met deze indicatoren.

Het CBS gebruikt de Standaard Bedrijfsindeling (SBI) om economische activiteiten in te delen naar hun hoofdactiviteit. Alle activiteiten in de SBI-secties G t/m S en U worden tot de dienstensector gerekend (Menkveld M. , 2020). In 2020 hebben de handel (31%), vervoer en opslag (11%), de gezondheids- en welzijnszorg (10%) en het onderwijs (9%) relatief grote aandelen in het gebruiksoppervlak. De totale gebruiksoppervlakte van *publieke* instellingen was in 2020 circa 113 miljoen vierkante meter, inclusief leegstand (Menkveld & Sipma, 2022b). Dit betreft ongeveer een kwart van het gebruiksoppervlak in de dienstensector.

Tabel 15

Ontwikkeling oppervlakte bestaande gebouwen in de dienstensector, in miljoen vierkante meter gebruiksoppervlak en in miljoen woningequivalenten (weq's), ingedeeld naar gebruiksfuncties in Vesta MAIS. Bron: KEV-2022 voor data t/m 2040 en eigen extrapolatie naar 2050.

Gebruiksfunctie (mln. m ²)	2020	2030	2040	2050	Afname 2020-2050
Bijeenkomst	29,9	27,6	25,6	23,2	22%
Cel	0,9	0,8	0,8	0,8	16%
Gezondheidszorg	30,6	28,2	26,0	23,9	22%
Industrie	155,1	147,1	141,4	135,1	13%
Kantoor	66,1	63,5	61,0	58,6	11%
Logies	18,0	17,0	16,0	15,2	16%
Onderwijs	33,5	30,0	27,0	24,3	28%
Sport	18,1	17,1	16,2	15,3	16%
Winkel	54,4	49,7	45,6	41,2	24%
Totaal	406,5	381,0	359,5	337,5	17%
idem [in mln. weq's]	3,1	2,9	2,8	2,6	

Het energieverbruik in bedrijfsgebouwen verschilt niet alleen sterk per type bedrijf maar ook per type gebouw. Om de toekomstige energiebehoefte te kunnen schatten is dus inzicht nodig in de

ontwikkeling van de hoeveelheid gebouwen per bouwtype. Een deel van de bestaande bouwvoorraad zal de komende jaren worden gesloopt of worden getransformeerd naar andere functies. De verwachte ontwikkeling daarvan is weergegeven in Tabel 14. Door sloop en transformatie verdwijnen gebouwen die doorgaans veel energie per vierkante meter verbruiken. Dat draagt dus bij aan verlaging van het aardgasverbruik en de bijbehorende CO₂-emissies. De meeste sloop wordt verwachten bij onderwijsinstellingen (28%) en winkels (24%). Bij alle gebruiksfuncties (behalve bij de groothandel) zal ook nieuwbouw plaatsvinden met energiezuinige gebouwen.

Verwachte nieuwbouw in de dienstensector

De verwachte toekomstige nieuwbouw en netto gebouwtransformaties per type gebruiksfunctie zijn weergegeven in **Tabel 15**. De ontwikkeling tot 2040 is ontleend aan de KEV-2022; voor deze studie zijn die geëxtrapoleerd tot 2050. Die tabel laat zien dat de grootste uitbreiding (in absolute zin) wordt verwacht in bij gebouwen met een industriefunctie, waar bouwtypen in gebruik zijn met een hoog elektriciteitsverbruik, zoals bedrijfshallen met koeling en datacenters. Alle nieuwbouw moet aan BENG-eisen voldoen, wat het energieverbruik per vierkante meter voor ruimteverwarming aanmerkelijk verlaagt. In de gezondheidszorg, hotels en zwembaden blijft dat verbruik wel hoger dan bij andere gebruiksfuncties in de dienstensector.

Tabel 16:

Ontwikkeling nieuwbouw en netto transformaties in de dienstensector vanaf 2020, in miljoen vierkante meter gebruiksoppervlak en in miljoen woningequivalenten (weq's), ingedeeld naar gebruiksfuncties in Vesta MAIS. Bron: KEV-2022 voor data t/m 2040 en eigen extrapolatie naar 2050.

Gebruiksfunctie (mln. m ²)	2020	2030	2040	2050	Toename 2020-2050
Bijeenkomst	0,0	0,9	1,8	4,0	13%
Cel	0,0	0,1	0,4	0,6	68%
Gezondheidszorg	0,0	6,1	12,8	12,5	41%
Industrie	0,0	25,1	50,9	74,1	48%
Kantoor	0,0	5,4	8,9	12,2	19%
Logies	0,0	3,7	7,4	12,3	68%
Onderwijs	0,0	2,2	5,2	10,4	31%
Sport	0,0	4,8	10,9	16,2	90%
Winkel	0,0	1,6	3,9	8,0	15%
Totaal	0,0	50,0	102,2	150,3	37%
idem [in mln. weq's]	0,0	0,4	0,8	1,2	

3.3 Mondiale en nationale energiemarkten

Het Nederlandse energiesysteem is sterk verknoot met dat van de omringende landen, zowel in fysieke zin door middel van gas- en stroomnetwerken, als in economische zin door de internationale handel en prijsvorming van aardgas en elektriciteit. We stippen hier kort de gevolgen aan van die internationale verbondenheid voor de warmtetransitie in de Nederlandse gebouwde omgeving.

3.3.1 Beschikbaarheid en prijzen van elektriciteit

In het algemene beeld van een klimaatneutrale stroomvoorziening wordt vanaf 2030 meer dan 70 procent van de elektriciteit opgewekt uit variabele bronnen zoals zon- en windenergie. Dat zal resulteren in sterk fluctuerende stroomprijzen op de groothandelsmarkten. Vervolgens verhoogt dat de behoefte aan opslag van elektriciteit en aan afstemming van de vraag naar elektriciteit op het (in de tijd variërende) aanbod. Consumenten merken doorgaans weinig tot niets van fluctuerende stroomprijzen omdat in veel contracten een vaste stroomprijs wordt afgesproken voor een jaar of langer. Het is nog onduidelijk of, hoe en in welke mate consumentenprijzen voor elektriciteit in de toekomst variabel worden. Bij variabele stroomprijzen krijgen consumenten een financiële prikkel om hun verbruik af te stemmen op het fluctuerende aanbod. In welke mate consumenten hun verbruik daardoor zullen aanpassen, zal afhankelijk zijn van het prijsvoordeel dat daarmee behaald kan worden, van de technische mogelijkheden, het gebruikersgemak en de sociale gevolgen van gedragsverandering.

In de warmtetransitie is dit vooral relevant voor gebouwen die overschakelen op elektrische verwarming. In goed geïsoleerde gebouwen, die hun warmte lang vasthouden, heeft het moment van verwarmen minder invloed op het ervaren comfort dan in slecht geïsoleerde gebouwen. Daar kan het verwarmen met een elektrische warmtepomp dus makkelijker worden afgestemd op een (binnen enkele uren) fluctuerend aanbod van elektriciteit. Bij verwarmen met een hybride warmtepomp kan in perioden van hoge stroomprijzen worden omgeschakeld van de warmtepomp naar de gasketel.

3.3.2 Beschikbaarheid en prijzen van aardgas

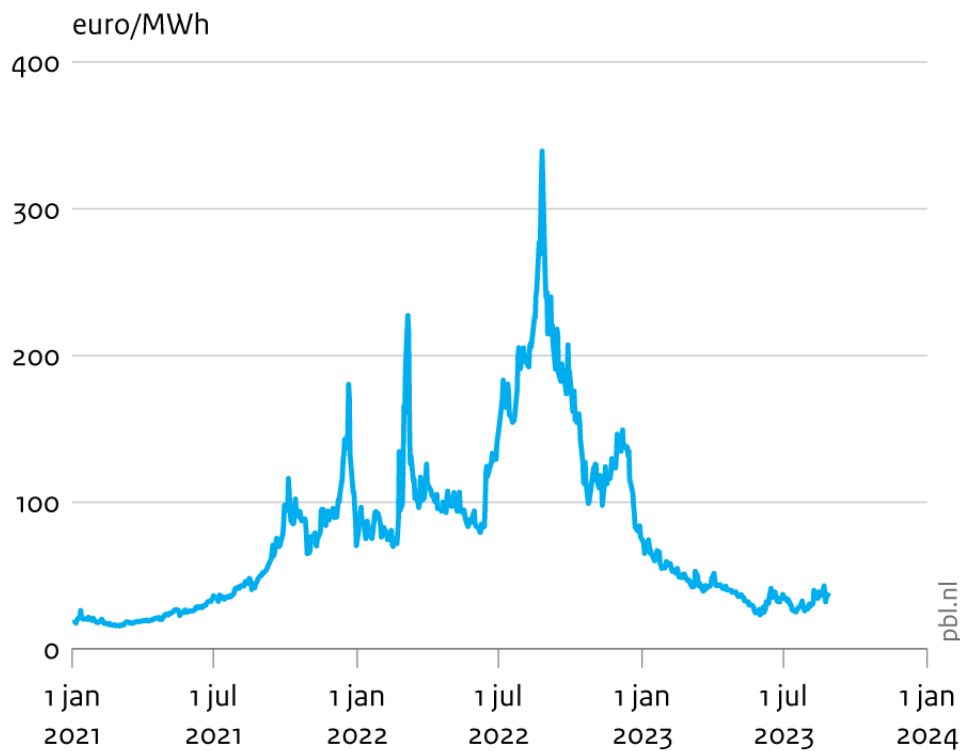
Tot voor kort maakte niemand zich zorgen over de beschikbaarheid van aardgas en de groothandelsprijzen vertoonde sinds 2008 een dalende trend. Bij berekeningen in de Startanalyse hanteerden we groothandelsprijzen van 20,5 cent per kubieke meter aardgas voor 2019 en 25 cent₂₀₁₈ voor 2030 (in euro's van 2018). Die prijs werd gebruikt als schatter van de nationale kosten van gebruik van aardgas. Hij diende ook als referentie bij de berekening van de extra nationale kosten van alle aardgasvrije verwarmingsopties.

Na het uitbreken van de oorlog met Oekraïne in 2022 stegen de internationale aardgasprijzen naar recordhoogten, zie Figuur 4. Daarna is die prijs weer flink gedaald, maar de onzekerheid over toekomstige gasprijzen is nu groter dan voor de oorlog. In plaats van aardgas uit Rusland zal Nederland de komende jaren vooral LNG gaan importeren, wat duurder is. Anno 2022 hanteert de KEV voor 2030 een gasprijs van 37 cent₂₀₂₁ per kubieke meter (in euro's van 2021), ofwel bijna 35 cent₂₀₁₈. Als de kosten van aardgas stijgen, dalen de extra kosten van aardgasvrije systemen maar blijven de absolute kostenverschillen tussen die systemen even groot. Onzekerheid over de toekomstige

ontwikkeling van aardgasprijzen op de wereldmarkt heeft dus geen (of relatief weinig)²² invloed op de kostenverschillen tussen de onderzochte aardgasvrije opties.

Figuur 4

Aardgasprijs op groothandelsmarkt TTF



Bron: ICE (2024). Dutch TTF natural gas futures.

De ontwikkelingen op de internationale aardgasmarkten zijn vooral relevant voor de warmtetransitie omdat die van invloed zijn op het tempo waarin gebouweigenaren energiebesparende maatregelen willen nemen en aardgas willen inwisselen voor een klimaatneutrale energiedrager. Die gasprijsexplosie in 2022 was voor veel woningeigenaren een krachtig signaal om het gasverbruik te reduceren. In één jaar tijd daalde het gasverbruik in woningen met 25 procent, waarvan 10 procentpunt werd veroorzaakt door het warmere weer in het stookseizoen. “Het andere deel, ongeveer 15 procentpunt, hangt vermoedelijk samen met minder stoken door de hoge prijzen” (CBS, 2023). Het is nog niet duidelijk welke maatregelen zijn genomen om die 15% reductie te bereiken en of die maatregelen structureel zijn. Mogelijk hebben bewoners (tijdelijk) ingeleverd op comfort en gaan ze weer meer stoken als de gasprijzen dalen. Een deel van de bewoners heeft ook fysieke maatregelen genomen, zoals kieren dichtmaken, radiatorfolie aanbrengen en isoleren van muren, ramen, vloeren en daken, wat ook energie bespaart als men weer naar gebruikelijke comfortniveaus terugkeert. Een hoge aardgasprijs kan dus het tempo van energiebesparing vergroten en zo de warmtetransitie

²² Hogere gasprijzen kunnen leiden tot hogere kosten voor staal, beton en andere materialen. Omdat de materiaal-intensiteit van de onderzochte systemen verschilt, zouden hogere gasprijzen indirect de kostenverschillen tussen systemen kunnen beïnvloeden. Dat effect is hier niet onderzocht. Het is ook nog onduidelijk of hogere gasprijzen structureel zijn of tijdelijk.

versnellen. In welke mate dat kan gaan optreden is moeilijk te voorspellen omdat er geen bruikbaar onderzoek beschikbaar is naar de *kwantitatieve* relatie tussen gasprijzen en energiebesparing.

Er is echter ook een nadeel van hoge gasprijzen. Ze leiden bij het armere deel van de bevolking tot betalingsproblemen (energie-armoede) en verkleinen bij iedereen het budget dat beschikbaar is voor maatregelen om het gasverbruik te reduceren. Hoewel hoge gasprijzen het *rendement* van gasbesparing dus verhogen, beperken ze tegelijkertijd de mogelijkheden om besparingsmaatregelen te *financieren*. Om dat nadeel te ondervangen, is het Warmtefonds ingesteld, dat goedkope leningen verstrekt aan huiseigenaren en VvE's die hun huis willen verduurzamen.

3.3.3 Beschikbaarheid en prijzen van klimaatneutrale waterstof

De mondiale productie van klimaatneutrale (blauwe en groene) waterstof is nu nog erg beperkt. Daarom is het nog niet mogelijk om schattingen van toekomstige prijzen van klimaatneutrale waterstof af te leiden ontwikkelingen in bestaande markten. Veel studies baseren hun schatting van waterstofprijzen daarom op schattingen van huidige productiekosten en verwachtingen over het tempo waarin die kosten op termijn gaan dalen door schaalvergroting en verdere innovatie. Productiekosten kunnen dienen als ondergrens voor marktprijzen. Door concurrentie onder afnemers kunnen marktprijzen aanmerkelijk hoger worden dan productiekosten, afhankelijk van de betalingsbereidheid van toekomstige afnemers. Die betalingsbereidheid is weer afhankelijk van hun kosten voor alternatieven voor waterstof. Als marktprijzen structureel hoger zijn dan productiekosten, krijgen (potentiële) producenten een sterke stimulans de productie uit te breiden, wat marktprijzen weer doet dalen en het aanbod vergroot.

Omdat het vrij moeilijk is te voorspellen wat de toekomstige marktprijzen voor waterstof zullen worden, hanteren we in deze studie de verwachte nationale productiekosten van klimaatneutrale waterstof in 2030. Over de beschikbare volumes doen we hier geen uitspraak maar we verkennen de gevolgen van een hypothetische situatie dat op termijn voldoende waterstof beschikbaar kan komen voor verwarming van gebouwen. De uitkomst van zo'n analyse kunnen aanleiding zijn de beschikbaarheid van waterstof voor de gebouwde omgeving al dan niet te stimuleren.

3.4 Krapte op de arbeidsmarkt

Sinds het einde van de coronacrisis trekt de economie weer aan en kampen vrijwel alle sectoren met een tekort aan personeel. Voor de warmtetransitie is het tekort aan arbeidskrachten in de bouwsector relevant. Het Economisch Instituut voor de Bouw (EIB) ziet eerste voorzichtige aanwijzingen dat de spanning op de bouwmarkt zijn hoogtepunt heeft bereikt. Dat komt deels door de zeer gematigde groeiverwachtingen voor de productie met gemiddeld 1% per jaar in de periode 2024-26. Omdat de bouwopleidingen al enkele jaren in de lift zitten, verwacht het EIB dat 90% van het vereiste arbeidsaanbod in de periode 2023-2026 uit de opleidingen kan komen. De rest zou kunnen worden opgevangen met buitenlandse arbeidskrachten (EIB, 2022).

De zeer gematigde groeiverwachting lijkt niet te passen bij de ambities voor versnelling in de woningbouw en voor versnelling bij de verduurzaming van gebouwen. Het EIB verwacht echter dat verduurzaming een steeds groter deel van de werkzaamheden in de bouwsector zal gaan uitmaken. Tussen 2021 en 2030 zal de verduurzamingsproductie met 45% groeien (van 9,7 naar 13,9 miljard euro), vrijwel geheel in de bestaande bouw. Het EIB voorziet een dalende arbeidsbehoefte bij het installeren van zonnepanelen in de utiliteitsector. Het denkt dat daarmee de verwachte toename bij de installatie van hybride warmtepompen in woningen kan worden opgevangen. Zo bezien lijkt de beoogde verduurzaming in de gebouwde omgeving dus te passen in de ontwikkelingen in de

arbeidsmarkt voor de bouw. Als de nieuwbouwproductie wat achterblijft bij de ramingen als gevolg van verder stijgende hypotheekrentes, dan is zelfs enige verlichting in de krapte niet uitgesloten. Het EIB ziet nog wel mogelijke krapte bij de benodigde installateurs van hybride warmtepompen. “In de infra-sector lijken de knelpunten een zeker structureel karakter te hebben. Er blijven bij het hier geschetste beeld dan ook inspanningen nodig om de aantrekkingskracht van de bouw op de arbeidsmarkt te behouden en te versterken”, zo concludeert het EIB.

4 Traject “Na-isoleren eerst”

4.1 Inleiding

In een klimaatneutrale toekomst kunnen alleen nog klimaatneutrale energiedragers worden gebruikt. Hun productiekosten zijn echter aanmerkelijk hoger dan van de huidige fossiele energiedragers en nationale productievolumes kunnen beperkt worden door ruimtegebrek. Klimaatneutraal verwarmen wordt daardoor duurder, maar energiebesparing kan helpen om die kostenstijging en het ruimtegebruik voor energieproductie te beperken. In dit hoofdstuk wordt daarom een traject naar een klimaatneutrale gebouwde omgeving uitgewerkt dat zoveel mogelijk gebruik maakt van energiebesparing bij het verwarmen van gebouwen. Preciezer geformuleerd: we gaan op zoek naar manieren om zoveel mogelijk te besparen op het verbruik van *op te wekken energiedragers* zoals elektriciteit, warm water of gas.

Besparen op energieverbruik in de gebouwde omgeving voor andere toepassingen dan verwarmen (zoals koeling en verlichting) laten we hier buiten beschouwing. Besparen op het verbruik van energiedragers voor verwarming kan op vier manieren:

- a. door gebouwen beter te isoleren;
- b. door de benodigde warmte in gebouwen efficiënter te produceren dan met de huidige HR-ketel op aardgas;
- c. door aardgas (deels) te vervangen door omgevingswarmte en restwarmte die niet apart hoeft te worden opgewekt maar ‘gratis’ en in grote hoeveelheden beschikbaar is;
- d. door selectiever te verwarmen, alleen waar en wanneer dat nodig is.

Deze opties worden hierna uitgebreid behandeld. We beschrijven de mogelijke effecten en kosten van vergaand na-isoleren van bestaande gebouwen en onderzoeken vervolgens met welke verwarmingstechnieken en bijbehorende klimaatneutrale energiedragers in de resterende (gereduceerde) warmtebehoefte van alle Nederlandse gebouwen kan worden voorzien en wat dat kost. We brengen de voor- en nadelen van elke optie in kaart en inventariseren mogelijkheden om belemmeringen te overwinnen en realisatie van opties te versnellen.

In deze analyse maken we onderscheid tussen woningen en utiliteitsgebouwen omdat de mogelijkheden voor energiebesparing daar verschillen en energiebesparing daar op verschillende manieren kan worden gestimuleerd. De analyse voor utiliteitsgebouwen is echter veel beperkter dan die voor woningen wegens gebrek aan bruikbare data en analyses.

Het hoofdstuk eindigt met een beschouwing over het tempo waarin het verbruik van aardgas in dit traject kan worden vervangen door andere energiedragers.

4.2 Waarom energie besparen?

4.2.1 Energiebesparing door de jaren heen

Het Nederlandse klimaat- en energiebeleid richt zich al heel lang op energiebesparing in woningen en gebouwen. De belangrijkste aanleiding daarvoor was de eerste en tweede oliecrisis in 1973 en 1978, toen OPEC-landen de export van olie naar Nederland tijdelijk staakten. We kregen autoloze zondagen en de gordijnen moesten dicht. De studiegroep StadsOntwerp en Milieu (SOM-1)

ontwikkelde de Trias Energetica (Korbee, Smolders, & Stofberg, 1979), drie vuistregels voor het ontwerpen van gebouwen die minder afhankelijk zijn van olie en aardgas:

1. Als eerste moest het energieverbruik worden beperkt door verspilling tegen te gaan.
2. De resterende energiebehoefte moest zoveel mogelijk uit duurzame bronnen komen.
3. Het dan nog resterende fossiele energieverbruik moest zo efficiënt mogelijk worden benut.

Tegengaan van energieverpilling stond voor ontwerpers dus op de eerste plaats, te bereiken door compacter bouwen en betere isolatie van gevels, daken en vloeren. Ontwerpeisen voor *nieuwe* gebouwen werden aangescherpt en in het Bouwbesluit verankerd. De Trias Energetica gold eerst alleen voor nieuwe gebouwen maar kreeg geleidelijk een bredere toepassing. Eigenaren van *bestaande* gebouwen werden met voorlichting en subsidies aangespoord tot na-isolatie en zuiniger stoken. Met energielabels werd het technische complexe begrip energetische efficiëntie van gebouwen (uitgedrukt in een energie-index) voor leken hanteerbaar gemaakt. Daardoor kon het ook een rol gaan spelen bij de waardebeoordeling van gebouwen, al gebeurde dat pas decennia later. Tot de dag van vandaag heeft de Trias Energetica vele navolgers. De overzichtelijke vuistregels geven houvast in de complexe wereld van energiebesparing. Tegenwoordig wordt de slogan “*De meest duurzame energie is de energie die je niet hoeft op te wekken*” veel gebruikt. Dat is eigenlijk een moderne variant op de eerste stap in de Trias Energetica.

Naast gebouwaanpassingen werden ook efficiëntere verwarmingssystemen ontwikkeld (stap 3). Met de komst van aardgas in Nederland vanaf de jaren 60 werden kolenkachels vervangen door gaskachels en daarna door gasgestookte centrale verwarmingsinstallaties. Met de introductie van centrale verwarming in woningen konden meer kamers worden verwarmd en nam het comfort toe. Daardoor werd de efficiencywinst van de overgang van kolen naar gas grotendeels teniet gedaan door meer ruimten te verwarmen. Ondertussen werden cv-ketels wel steeds efficiënter. In de jaren 80 verscheen de VR-ketel op de markt (verbeterd rendement, tot 89%) en enkele jaren later kwam de HR-ketel (hoog rendement) met rendementen van 98 tot 107%²³. Net als bij isolatievoorschriften werden efficiëntere ketels eerst in de nieuwbouw voorgeschreven. Nadat de installateurs ermee vertrouwd raakten, de kinderziektes overwonnen waren en de kosten ervan daalden, vonden die ketels ook hun weg naar de bestaande woningen, gesteund door subsidies, gunstige financieringsregelingen en een beter energielabel voor de woning.

Energiebesparing in gebouwen werd aanvankelijk dus gepropageerd uit geopolitieke motieven; we moesten minder afhankelijk worden van olielanden. Toen de olieprijs (en de daaraan gekoppelde gasprijzen) gingen stijgen, werd het ook een middel om de energierekening van huishoudens te beheersen. Vanaf begin deze eeuw wordt energiebesparing beleidsmatig ook gestimuleerd als een middel tot CO₂-reductie. Toen de Groningse gaswinning vanaf 2018 moest worden afgebouwd, moest energiebesparing in gebouwen een bijdrage leveren aan de vermindering van het gasverbruik en de afhankelijkheid van Russische gasleveranties. In 2022 maakte de vertienvoudiging van de gasprijs op de groothandelsmarkt duidelijk dat de dreiging van Russisch machtsmisbruik niet theoretisch was. Plotseling konden veel mensen hun energierekening niet meer betalen²⁴.

²³ Rendementen worden uitgedrukt als percentage van de energie-inhoud (de onderwaarde) van aardgas, exclusief de warmte die vrijkomt bij het condenseren van waterdamp in de verbrandingsgassen. Doordat de HR-ketel die condensatiewarmte benut is een rendement van meer dan 100% haalbaar.

²⁴ De website energievergelijk.nl berichtte in het FD van 9 augustus 2022: “... een gemiddeld gezin betaalt nu zo’n €5.100 op jaarbasis. Dat is €3.900 meer dan een jaar geleden”. Volgens kamerlid Omtzigt dreigen 1,2 miljoen huishoudens hun lasten niet meer te kunnen betalen.

In de loop der jaren is energiebesparing in gebouwen dus om verschillende redenen gestimuleerd. Achter de rationele argumenten groeide een grondhouding dat energie besparen altijd goed is, ongeacht het type maatregel. Er is daarom tegenwoordig breed politiek draagvlak voor een ambitieus besparingsbeleid:

- a. In het Energieakkoord (SER, 2013) was onder pijler 1 afgesproken 100 PJ finale energie te besparen tussen 2012 en 2020. Daartoe ging het kabinet o.a. €400 miljoen investeren in isolatie van huurwoningen en elke woning zou een voorlopig energielabel krijgen, als stimulans voor energiebesparing. Ook kwam er een Energiebespaarfonds van €600 miljoen voor goedkope leningen aan huiseigenaren.
- b. In 2017 is dat akkoord aangevuld met een convenant om in de gebouwde omgeving 10 PJ extra finale energie te besparen in 2020, voornamelijk door consumenten beter te informeren over hun energieverbruik (Anon., 2017).
- c. Het Klimaatakkoord (SER, 2019) bevat veel stimulansen voor energiebesparing in de gebouwde omgeving, zoals:
 - i. 1,5 miljoen woningen en utiliteitsgebouwen vóór 2030 (geschikt maken voor) aardgasvrij verwarmen;
 - ii. Vraagbundeling via de wijkaanpak om kostenreductie te bereiken;
 - iii. SDE++ subsidie voor na-isolatie van gebouwen;
 - iv. Ontwikkelen van een isolatiestandaard en streefwaarden voor spijtvrij isoleren die op termijn verplicht worden;
 - v. Betere voorlichting en ontsluiting (internet) van informatie voor burgers.
- d. In 2020 nam de Tweede Kamer vijf moties aan om isoleren te stimuleren:
 - vi. Moorlag: biedt laagdrempelige toegang tot expertise en advies;
 - vii. Segers/Klaver (bij de APB 2020): ontwerp een Nationaal Isolatieprogramma;
 - viii. Van Eijs/Dik-Faber (604): laat de isolatiestandaard ... aansluiten bij de best mogelijke toepassing van isolatie;
 - ix. Dik-Faber/Moorlag (647): "... de noodzaak tot een ambitieus isolatie-programma voor woningen mee te wegen" bij uitwerking van de EU Recovery and Resilience Facility.
- e. In 2021 publiceerde de minister van BZK haar Standaard en Streefwaarden voor spijtvrije isolatie van woningen. Het al dan niet verplicht stellen ervan liet ze over aan een nieuw kabinet (Ollongren, 2021).
- f. Eind 2021 kwam de Europese Commissie met een voorstel voor aanscherping van de EPBD waarin (o.a.) slechte energielabels stapsgewijs worden uitgefaseerd.
- g. In het Coalitieakkoord (december 2021) werd een Nationaal Isolatieprogramma aangekondigd en stimulansen om cv-ketels te vervangen door hybride warmtepompen.
- h. Het kabinet riep begin 2022 burgers op om korter te douchen en de thermostaat een graad lager te zetten, om een landelijk tekort aan aardgas te helpen voorkomen. Dat was opmerkelijk omdat de regering tot dan toe weigerde zich te bemoeien met het energie-gerelateerde comfort dat mensen nastreven. Tegelijk werd geld beschikbaar gesteld voor tochtstrippen en radiatorfolie om met FIX-teams de ergste nood in slecht geïsoleerde woningen snel te lenigen.
- i. In het programma Versnelling Verduurzaming Gebouwde Omgeving (juni 2022) verhoogt het kabinet de doelen voor energiebesparing: 2,5 miljoen woningen isoleren vóór 2030, met nadruk op uitfasen van energielabels (E, F, G):
 - i. 1,5 miljoen koopwoningen,
 - ii. 1,0 miljoen huurwoningen waarvan 675.000 sociale huur,
 - iii. 120.000 utiliteitsgebouwen, waarvan 60.000 met label G vóór 2027 naar label C en 60.000 met label F vóór 2030 naar label C (volgens de nieuwe classificatie waarin elke labelklasse 15% van de bouwvoorraad vertegenwoordigt).

4.2.2 Voordelen van energiebesparing

In de maatschappelijke discussie over energiebesparing tot nu toe hebben verschillende argumenten op wisselende momenten de boventoon gevoerd:

- a. Verkleinen van de afhankelijkheid van buitenlandse energieproducenten, aanvankelijk gericht op olieproducerende landen en recent op gasleveranties uit Rusland. Dat heeft niet alleen geopolitieke voordelen maar beperkt ook de blootstelling van consumenten aan prijsfluctuaties op internationale energiemarkten.
- b. Reductie van de uitstoot van broeikasgassen, met name te bereiken door het gebruik van fossiele energie te verminderen.
- c. Beperken van de energierekening van burgers en bedrijven, vooral actueel in perioden van hoge prijzen op internationale energiemarkten. Dat is extra relevant voor consumenten met een beperkt inkomen. Energie-armoede was lang geen politiek issue maar in 2022 moest het kabinet in allerijl compensatieregelingen optuigen om te voorkomen dat grote groepen huishoudens hun energierekening niet meer konden betalen.

Comfortverbetering is voor veel mensen ook een reden om energiebesparende maatregelen te nemen, maar hoeft daarom nog geen doelstelling te zijn van landelijke politiek. Na-isolatie levert bij een gelijkblijvend energieverbruik een hogere binnentemperatuur en dus meer comfort op. Comfortverbetering en energiebesparing zijn vaak uitwisselbaar. Verhogen van de binnentemperatuur na isolatie gaat bijna altijd ten koste van energiebesparing (het reboundeffect). Bij verminderen van tocht door kierdichting gaan comfortverbetering en energiebesparing wel hand in hand. Energiebesparing door gedragsverandering en zuiniger stoken of door investering in zuiniger stookinstallaties worden meestal niet ervaren als comfortverbetering, behalve bij vloerverwarming. Bij een warme vloer kan de luchttemperatuur zonder comfortverlies omlaag en dat spaart doorgaans energie.

In koude tochtige woningen kan na-isolatie bijdragen aan een betere gezondheid van bewoners. Isolatiemaatregelen die niet deskundig worden aangebracht kunnen echter vocht- en schimmelvorming in een gebouw veroorzaken en zo de gezondheid van bewoners weer schaden. Om dat te voorkomen, moet voldoende geventileerd worden. Daarmee gaat weer warmte verloren, tenzij die warmte met warmtewisselaars wordt teruggewonnen.

In het kader van de (nog te doorlopen) energietransitie biedt energiebesparing ook mogelijkheden voor de inrichting van een efficiënter energiesysteem. Goed geïsoleerde gebouwen koelen in de nacht minder snel af dan slecht geïsoleerde gebouwen waardoor de energiebehoefte daar een gelijkmatiger dag-nacht-profiel heeft. Dit effect is vooral relevant in de winter. Bij lagere pieken in de energievraag kan de energieproductie goedkoper worden ingericht, al is het te behalen kostenvoordeel wel afhankelijk van het type energiedrager dat wordt gebruikt. Deze kostenbesparing op systeemniveau kan niet eenvoudig worden doorgegeven aan gebouweigenaren die de daarvoor benodigde maatregelen moeten nemen (split incentive) en dat bemoeilijkt het realiseren ervan.

In de volgende paragrafen gaan we dieper in op de mogelijkheden, kosten en (andere) beperkingen van drie vormen van energiebesparing: selectiever verwarmen, na-isoleren van bestaande woningen en toepassen efficiëntere installaties. De mogelijkheden voor energiebesparing in de dienstensector worden daarna in een aparte paragraaf behandeld.

4.3 Hoeveel energiebesparing is mogelijk met selectiever verwarmen in woningen?

In Nederland heeft het stimuleren van energiebesparing heel lang een vrijwillig karakter gehad. De overheid richtte zijn voorlichting vooral op het stimuleren van zuinig stookgedrag. Met advertenties in dagbladen en TV-spotjes van Postbus 51 werden bewoners gestimuleerd om vaker de deuren te sluiten, verstandig te ventileren, 's-avonds eerder de gordijnen dicht te doen, alleen ruimtes te verwarmen als die gebruikt werden en korter te douchen. Die adviezen zijn eigenlijk een oproep om selectiever te verwarmen: alleen ruimtes verwarmen op momenten dat ze gebruikt worden. Het gaat daarbij in de kern om bewustwording en gedragsverandering. Soms kan de techniek daarbij een handje helpen. Met bewegingsmelders en slimme of zelflerende thermostaten kan de verwarming automatisch worden afgestemd op het dagelijkse patroon van ruimtegebruik.

Met en weten (en energie besparen)

Met de introductie van slimme meters ontstond de mogelijkheid om bewoners in real-time informatie te geven over hun energieverbruik, met behulp van energieverbruiksmanagers zoals apps of in-home displays. Met feedback over het eigen energieverbruik kunnen huishoudens hun verbruik verminderen. Dat is het meest effectief als de feedback gedetailleerd en langdurig is, real-time wordt gegeven en bewoners geen aparte handelingen hoeven te verrichten om toegang te krijgen tot de informatie. Aanvankelijk kregen bewoners de feedback via een tweemaandelijks verbruiks- en kostenoverzicht van de energieleverancier. Dat leverde 0,9 PJ energiebesparing op, veel minder dan waar de overheid op had gerekend bij de introductie van de slimme meter. Dat was aanleiding om in 2017 met energiebedrijven het 'Convenant 10 PJ energiebesparing gebouwde omgeving' af te sluiten dat de toepassing van energieverbruiksmanagers moest stimuleren. De verwachting was dat deze besparing bereikt zou worden met een verbetering van het verbruiks- en kostenoverzicht, dat inmiddels landelijk was ingevoerd. Uit onderzoek van TNO (Paradies, Dreijerink, & Menkveld, 2020) bleek echter dat die verbeteringen niet hebben geleid tot extra energiebesparing. Onderzoek van PBL (Vringer, Boomsma, & van Soest, 2021) naar het effect van andere verbruiksmanagers gaf aan dat het gebruik van in-home displays bij geïnteresseerde huishoudens een besparing kan opleveren van 2,2% elektriciteit en 6,9% aardgas. Bij de onderzochte apps en webapplicaties kon echter geen besparingseffect worden vastgesteld. Op basis van hun onderzoek en het aantal verkochte en geïnstalleerde energieverbruiksmanagers eind 2019, schatten de onderzoekers dat de invoering van de slimme meter, het versturen van het verbruiks- en kostenoverzicht en het toepassen van 0,4 miljoen verkochte in-home displays een besparing van ongeveer 4 PJ per jaar heeft opgeleverd. De onderzoekers waarschuwen tegen simpele extrapolatie van dit resultaat. Het is namelijk onbekend of dit effect ook op lange termijn blijft bestaan en lang niet alle bewoners zijn bereid om een verbruiksmanager aan te schaffen en langdurig te gebruiken. Daar staat tegenover dat verbruiksmanagers nog verder ontwikkeld worden waardoor de kosten kunnen dalen en het gebruiksgemak kan toenemen.

De thermostaat een graadje lager

De energiebehoefte voor verwarmen wordt onder andere bepaald door het temperatuurverschil tussen binnen en buiten een gebouw. Verlagen van de binnentemperatuur levert dus energiebesparing op. Het betekent doorgaans ook verlies aan comfort en politici waren tot voor kort terughoudend om dat te propageren. Veel computermodellen die gebruikt worden om het effect van isolatiemaatregelen te berekenen hanteren bijvoorbeeld standaard een binnentemperatuur van 21 graden. De optie om de binnentemperatuur te verlagen kwam zelden voor in adviezen. Pas in 2022

heeft de overheid deze optie voor het eerst opgenomen in zijn brede publieksvoorlichting over manieren om de effecten van de extreem hoge gasprijzen te verzachten. In de campagne “Zet jij ook de knop om” werd opgeroepen de thermostaat op 19 graden te zetten. De overheid geeft zelf het goede voorbeeld door de temperatuur in overheidsgebouwen te verlagen naar 19 graden. Deskundigen hanteren de vuistregel dat één graad temperatuurverlaging gemiddeld 7% besparing op het gasverbruik voor ruimteverwarming oplevert (Engie, 2022). Bij de hoge gasprijzen van 2022 zou twee graden lager in een gemiddeld huishouden 168 kuub gas en 378 euro per jaar besparen. Uit een enquête van energiebedrijf Zonneplan onder een panel van 2000 Nederlanders bleek dat een derde niet bereid was de thermostaat twee graden lager te zetten als het financiële voordeel minder was dan 500 euro per jaar (Anon., 2022). Dat is geen wetenschappelijk bewijs, maar wel een indicatie dat verlagen van de binnentemperatuur bij een fors deel van de bevolking op grote weerstanden stuit.

Des te opmerkelijker dat het gasverbruik in woningen (gecorrigeerd voor temperatuurschommelingen tussen jaren) in 2022 met 15% was gedaald ten opzichte van 2021 (CBS, 2023). Daarvan is naar schatting 2% het effect van isolatiemaatregelen en geïnstalleerde (hybride) warmtepompen. De overige 13% wordt toegeschreven aan zuiniger stookgedrag, waarvan 5% mogelijk structureel is (Ministerie van BZK, 2023). Toekomstig onderzoek kan daar meer duidelijkheid over geven.

Klimaatverandering levert ook energiebesparing op

Door klimaatverandering is de gemiddelde buitentemperatuur in het stookseizoen de laatste jaren verhoogd van 5,1 naar 6,6 graden. Dat zorgt ervoor dat in een gemiddeld stookseizoen in Nederland nu 10% minder energie nodig is voor verwarming dan vroeger (Janssen, 2023). Dat effect wordt de komende jaren (helaas) waarschijnlijk alleen maar groter. Voor een accurate schatting van het toekomstige energieverbruik moet die ontwikkeling worden meegenomen. De Startanalyse (en dus ook deze trajectverkenning) baseert zich op het G_H-scenario met jaargemiddeld 1,4 graden temperatuurstijging in Nederland tussen 2010 en 2050, dat het KNMI heeft vertaald naar temperaturen in verschillende regio's in Nederland (KNMI, 2014)²⁵. Door die klimaatverandering daalt de energiebehoefte voor ruimteverwarming in de bestaande bouw tussen 2019 (het startjaar van de trajecten) en 2050 met 11 procent (van den Wijngaart & van Polen, 2020).

4.4 Hoeveel energiebesparing is haalbaar met na-isolatie van woningen?

4.4.1 Bij hoeveel woningen is na-isolatie mogelijk?

Na-isolatie van woningen (en andere gebouwen) is in vele gradaties mogelijk. Er zijn allerlei concepten in omloop, variërend van beperkt tot zeer vergaand, zie onderstaande tabel. Vaak wordt daarin isoleren gecombineerd met efficiënte warmteopwekking, warmte terugwinning uit

²⁵ Binnen de onderzochte klimaatscenario's kan de opwarming in Nederland variëren tussen 1,0 en 2,3 graden. Met de keuze voor 1,4 graden hanteren we dus een gematigde schatting van het effect van klimaatverandering op de energiebehoefte voor ruimteverwarming. Omdat de huidige temperatuur sinds 1907 al 2,1 (+ 0,6) graden is gestegen (CLO, 2020), komen we met dit scenario in Nederland in 2050 op een gemiddelde temperatuurstijging van circa 3,5 graden. Dat is ver boven het klimaatdoel van Parijs van mondiaal gemiddeld maximaal 1,5 graden temperatuurstijging tot 2050.

ventilatielucht en afvalwater en opwekken van energie op of aan de woning, meestal middels zonnepanelen of zonnecollectoren.

Tabel 17
Vergelijking van vier concepten voor isolatie van gebouwen.

Concept	Kenmerken	Energieverbruik
NoM (nul op de meter)	Zeer goede isolatie. Eigen opgewekte energie (vaak uit PV-panelen) salderen tegen ingekochte energie.	Netto nul input (saldo per jaar)
Passiefhuis (Stichting PHH, 2023)	Zeer goede isolatie. Maximaal benutten van instraling zonne-energie en energie van bewoners; warmte terugwinnen uit ventilatielucht.	Max 15 kWh/m ² verbruik voor ruimteverwarming.
BENG (Bijna Energie Neutraal)	Vanaf 2021 gelden voor nieuwbouw 3 eisen op basis van Trias Energetica: BENG1 voor beperken energiebehoefte door isolatie, BENG2 voor primair fossiel verbruik, BENG3 voor opwek hernieuwbare energie.	Max 65 kWh/m ² verbruik voor verwarmen en koelen.
Standaard en Streefwaarden (NRI, 2021)	Isolatie afgestemd op een aanvoertemperatuur in warmte-afgiftesystemen van 50 °C en op maatregelen die binnen de bestaande gebouwconstructie genomen kunnen worden.	Netto warmtevraag 43 – 45 kWh/m ² , afhankelijk van woningtype, gebouwd na 1945 en compactheid < 1,00. Meer bij bouwjaar vóór 1945 en compactheid > 1,00.

Uit wat met isolatie mogelijk is (zie bovenstaande tabel) volgt nog niet vanzelf welke mate van na-isolatie nodig is. In beginsel bepalen gebouweigenaren dat zelf en maken ze daarbij een afweging van de inspanningen die hen dat kost en de voordelen die ze daarmee behalen. Zowel de inspanningen als de voordelen kunnen materieel, financieel en immaterieel zijn. In de advisering aan gebouweigenaren worden de financiële voor- en nadelen (kosten en baten) vaak centraal gesteld maar uit enquêtes blijkt dat immateriële overwegingen vaak ook belangrijk worden gevonden.

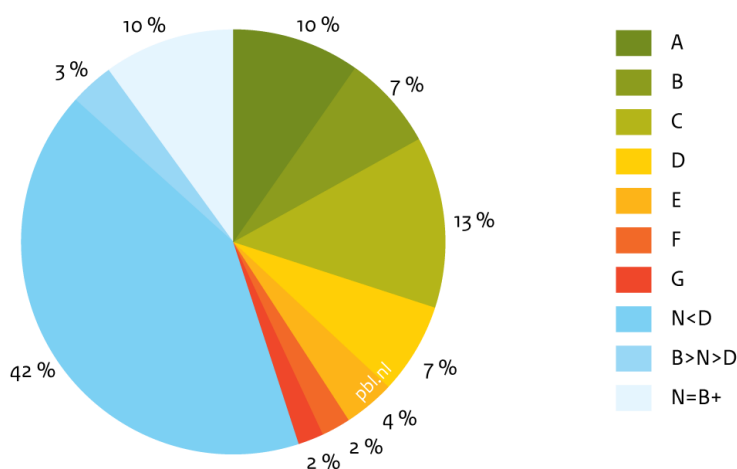
Om het tempo van na-isolatie van woningen te versnellen, is in het Klimaatakkoord afgesproken dat de overheid een standaard gaat ontwikkelen voor 'spijtvrije isolatie'. Bij de ontwikkeling van deze isolatiestandaard waren de mogelijkheden voor isolatie binnen de bestaande constructie en de geschiktheid voor verwarmen water van 50 graden de belangrijkste criteria. De kosten en baten van verschillende opties zijn wel in kaart gebracht (Menkveld & al, 2020) maar bij de uiteindelijke vaststelling van de standaard waren die niet doorslaggevend. Wel maakt de standaard onderscheid tussen woningen met en zonder spouwmuur omdat de kosten van na-isolatie van spouwloze (doorgaans vooroorlogse) woningen aanzienlijk hoger zijn. Toch kan de isolatiestandaard (Ollongren, 2021) beschouwd worden als het niveau van na-isolatie dat de overheid wenselijk of noodzakelijk vindt in de warmtetransitie. Het (nationaal-economische) onrendabele deel van isolatiekosten kan dan beschouwd worden als een uitgave voor de (ongeprijsde) CO₂-reductie die daarmee wordt bereikt²⁶. Daarnaast zijn er andere immateriële voordelen van een laag energieverbruik,

²⁶ Dat betekent overigens nog niet dat na-isoleren de meest efficiënte vorm van CO₂-reductie is.

zoals een grotere zekerheid dat we op termijn over voldoende schone energiedragers kunnen beschikken, of (sinds de gasoorlog met Rusland in 2022 erg belangrijk) een kleinere blootstelling aan fluctuerende energieprijzen of minder afhankelijkheid van geïmporteerde energiedragers.

Het is nog vrij lastig te bepalen welke woningen nu al aan de standaard voldoen. Dat komt doordat de standaard gebruik maakt van de nieuwe NTA8800 methode voor het vaststellen van energielabels terwijl de meeste beschikbare labels nog zijn vastgesteld met de oude methodiek. Uit een globale vergelijking van beide methoden blijkt dat de nieuwe standaard min of meer overeenkomt met schillabel B voor naoorlogse woningen en met schillabel D voor vooroorlogse woningen.

Figuur 5
Verdeling energielabels van woningen in 2019



Verdeling zoals gebruikt als startpunt voor de berekeningen in dit rapport

Bron: RVO (2024). EP-online; landelijke database van energielabels.

In bovenstaande figuur is te zien dat in 2019 iets meer dan de helft (55%) van alle woningen nog geen officieel afgemeld energielabel had²⁷. Die woningen zijn aangeduid met 'N' en onderverdeeld in 3 subgroepen. Op grond van het energieverbruik van die woningen zou 10% een energielabel B of beter hebben (licht blauwe taartpunt) en daarmee voldoen aan de isolatiestandaard. Samen met de woningen met energielabel A of B zouden in 2019 ongeveer 27% van alle woningen aan de isolatiestandaard voldoen en zouden dus bij 73% van alle woningen ofwel in 5,7 miljoen huishoudens nog na-isolatiemaatregelen genomen moeten worden. Sinds 2019 is dat in een aantal woningen al gedaan, mede naar aanleiding van het gevoerde stimuleringsbeleid en de hoge gasprijzen in 2022.

4.4.2 Energiebesparing door na-isoleren woningen

Er is vrij weinig goed onderbouwde informatie beschikbaar over de energiebesparing die *in de praktijk* met na-isolatie wordt bereikt. Adviseurs hanteren rekenmodellen die gebaseerd zijn op theoretische analyses en vereenvoudigde representaties van de energiehuishouding in woningen. Diverse

²⁷ Sinds 2015 hebben alle huizen in Nederland een energielabel. Huizen die op dat moment geen definitief energielabel hadden, kregen een voorlopig energielabel toegekend op basis van het woningtype en het bouwjaar.

studies²⁸ hebben, bij een beperkt aantal woningen, aangetoond dat een verbetering van het energielabel van een woning vaak minder energiebesparing oplevert dan op grond van modelberekeningen werd verwacht.

Sinds het CBS de beschikking kreeg over data van het gasverbruik van individuele woningen vanaf 2018, is het mogelijk om de relatie tussen gasverbruik en energielabels in de hele woningvoorraad te onderzoeken. In een landsdekkende PBL-studie (van den Wijngaart & van Polen, 2020) is het gasverbruik in 2018 vergeleken van 6,2 miljoen woningen met een plausibel aardgasverbruik, van een bepaald type en bouwperiode maar met verschillende energielabels. Dat geregistreerde gasverbruik is gecorrigeerd voor a) afwijkingen in de buitentemperatuur in 2018 t.o.v. het langjarig gemiddelde, en voor b) gasverbruik ten behoeve van koken en verwarmen van tapwater. Zo is een schatting verkregen van het gasverbruik voor ruimteverwarming. Die aanpak wordt de Gemeten-verbruik-methode genoemd. Genoemde studie vergelijkt de resultaten met verbruiksschattingen volgens de Berekend-verbruik-methode, die gebruik maakt van fysisch-thermische rekenmodellen. Tabel 17 toont de uitkomsten van beide methoden.

Tabel 18

Procentueel verschil in gasverbruik voor ruimteverwarming in woningen^{*)} met verschillende energielabels in 2018, bepaald met 2 methoden. Bron: tabel 5-4 uit (van den Wijngaart & van Polen, 2020).

Verskil t.o.v. label D	Gemeten verbruik methode	Berekend verbruik methode	Verskil t.o.v. label B	Gemeten verbruik methode	Berekend verbruik methode
			Van C naar B	12	23
			Van D naar B	19	52
Van E naar D	8	13	Van E naar B	25	61
Van F naar D	11	24	Van F naar B	27	67
Van G naar D	11	37	Van G naar B	25	74
Van N* naar D	16	n.b.	Van N* naar B	29	n.b.

^{*)} De tabel toont gemiddelde waarden voor alle woningtypen en bouwperiodes. In de achterliggende analyse is wel rekening gehouden met die verschillen tussen woningen. De gemeten methode houdt ook rekening met verschillen in oppervlakte.

^{*)} Energielabel N geldt voor woningen zonder afgemeld energielabel, 53% van alle woningen in 2019.

Het verschil in gasverbruik voor ruimteverwarming tussen woningen met verschillende energielabels (en overigens identieke kenmerken) kan gebruikt worden als schatting van de gasbesparing die in de praktijk bereikt kan worden als het energielabel met isolatiemaatregelen wordt verbeterd. Om zoveel mogelijk bij die toepassing aan te sluiten, houdt de gemeten methode rekening met het rendement van verwarmingsinstallaties in woningen en is gecontroleerd of er verschil in gasverbruik is tussen woningen met en zonder PV-panelen. In de praktijk kunnen verschillen in gasverbruik tussen overigens identieke woningen ook veroorzaakt worden door verschillen in omvang en samenstelling van huishoudens. Die gegevens zijn echter niet landsdekkend beschikbaar voor

²⁸ Zie bijvoorbeeld: (Majcen, Itard, & Visscher, 2013), (Majcen D. , 2016), (TNO, 2016), (van den Brom, Meijer, & Visscher, 2018).

individuele woningen. Dat heeft vermoedelijk weinig invloed op de gepresenteerde cijfers omdat gewerkt is met grote aantallen woningen per stratum, wat de invloed van verschillen in huishoudsamenstelling uitmiddelt. Daarnaast beïnvloeden tal van andere factoren het gasverbruik in woningen. Dat is af te leiden uit het feit dat de spreiding in het gasverbruik van woningen met een bepaald energielabel aanmerkelijk groter is dan de verschillen tussen het gemiddelde verbruik bij verschillende energielabels. Het ontbreekt echter aan data om de oorzaken van die verschillen te identificeren.

Uit de data in Tabel 17 kan de conclusie worden getrokken dat verbetering van het energielabel in de praktijk (volgens de gemeten methode van PBL-CBS) beduidend minder energiebesparing oplevert dan in theorie (volgens de berekende methode). Dit onderscheid is voor de warmtetransitie erg relevant omdat veel adviezen over isolatiemaatregelen nog gebaseerd zijn op resultaten van modelberekeningen en weinig rekening houden met praktijkervaringen. Bij verbeteringen tot label D zijn de verschillen tussen beide methoden iets kleiner dan bij verbeteringen tot label B. Het is nog niet gelukt om een cijfermatige onderbouwing te geven voor de gevonden verschillen omdat de daarvoor benodigde data ontbreken²⁹.

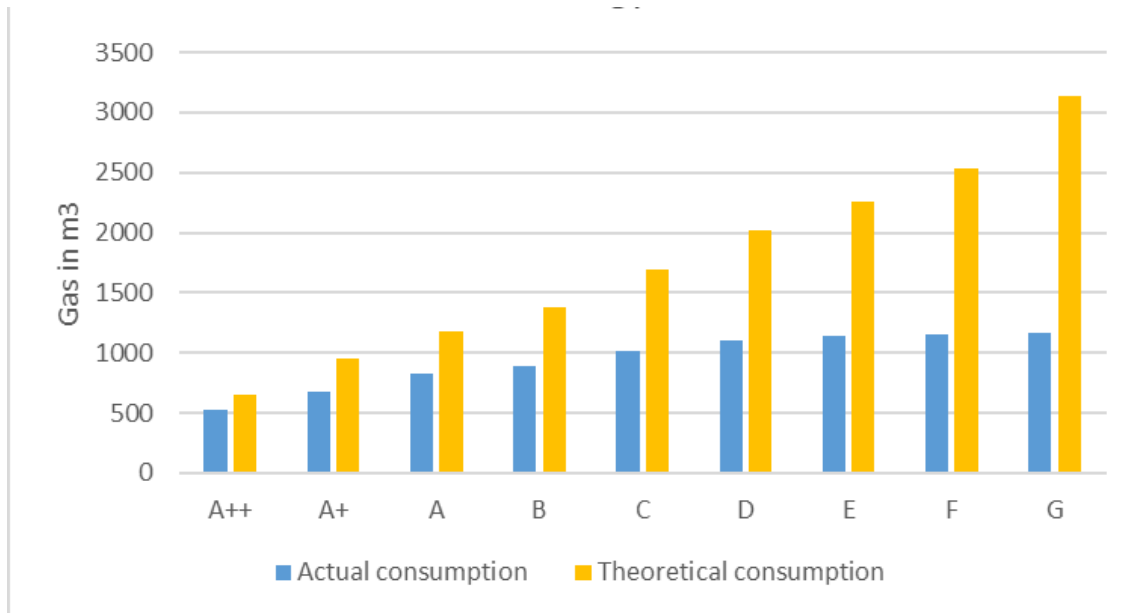
Het *verschil* in gemeten gasverbruik van soortgelijke woningen met verschillende energielabels is veel kleiner dan wat fysisch-thermische modellen berekenen. Figuur 6 geeft hiervan een illustratie voor de circa 2 miljoen huurwoningen van Nederlandse woningcorporaties. De meest genoemde oorzaak is het ‘reboundeffect’, dat optreedt als bewoners hun stookgedrag aanpassen nadat isolatiemaatregelen zijn genomen. Dat effect zou vooral optreden in woningen met slechte energielabels omdat men daar genoeg nam met minder comfort om de energiekosten te beperken. Nadat isolatiemaatregelen zijn genomen, kiezen bewoners dan eerder voor comfortverbetering dan voor verlaging van energie-uitgaven.

Andere mogelijke verklaringen gaan over het uitvoeren van isolatiemaatregelen, wat in de praktijk minder optimaal verloopt dan in modelberekeningen wordt verondersteld, en over veroudering van eerder aangebracht isolatiemateriaal. Bij woningen van eenzelfde type en energielabel is een hoger gasverbruik gemeten bij woningen die langer geleden gebouwd zijn, zie Figuur 7. Dat kan duiden op een invloed van bouwconstructies die vroeger werden toegepast en die leiden tot gebrekkige luchtdichtheid en koudebruggen. Het is onduidelijk hoe vaak dit voorkomt, in welke mate dat het energieverbruik beïnvloedt en wat het kost om dat te verhelpen.

²⁹ In een apart project gaan RVO, TNO en PBL in 2023 en 2024 onderzoeken hoe de verschillen in uitkomsten van verschillende modellen kan worden verklaard.

Figuur 6

Werkelijk (actual) en theoretisch jaarlijks gasverbruik van 2 miljoen huurwoningen in 2017-2019, ingedeeld naar energielabel. Bron: (van der Belt, 2021)



Om het effect van isoleren op lange termijn te schatten, hanteren we in dit hoofdstuk de gemeten methode (conform de Startanalyse 2020). Dat wil niet zeggen dat het niet mogelijk is om met na-isolatie meer energiebesparing te realiseren dan wat de gemeten methode aangeeft. Daarvoor zouden onder andere isolatiemaatregelen nauwkeuriger moeten worden uitgevoerd en constructiefouten moeten worden hersteld. Het is echter niet duidelijk welke stimulansen nodig zijn om dat te bereiken en/of constructiefouten tegen acceptabele kosten hersteld kunnen worden.

Figuur 7

Gemeten aardgasverbruik van appartementen met energielabel D (links) en energielabel B (rechts) in 2018, naar bouwperiode. Bron: (van den Wijngaart & van Polen, 2020)



Als alle woningen met na-isolatie tot 2050 naar schillabel D worden gebracht, dan is de energiebehoefte voor ruimteverwarming van de gehele woningvoorraad in 2050 ongeveer 18% lager dan in 2019. Na-isolatie tot schillabel B verlaagt het gasverbruik in 2050 met 29% (van den Wijngaart & van Polen, 2020, p. 44). Omdat de behoefte aan ruimteverwarming door klimaatverandering ook

zonder na-isolatie gaat afnemen, is het effect van isoleren kleiner dan deze percentages aangeven. Zonder na-isolatie in de huidige woningvoorraad daalt de energiebehoefte voor ruimteverwarming tot 2050 al met 11%³⁰. Daardoor is het effect van isoleren in 2050 voor de hele huidige woningvoorraad 7% bij schillabel D en 20% bij schillabel B. Dat is ook veel minder dan het effect van afzonderlijke schillabelverbeteringen, genoemd in Tabel 17. Dat komt doordat veel woningen nu al een beter label hebben dan schillabel D of B en dus geen maatregelen hoeven te nemen om het doel van minimaal schillabel D of B te bereiken. Omdat naast ruimteverwarming ook nog gas nodig is voor koken en warm tapwater, zijn de effecten op het totale gasverbruik procentueel gezien nog wat kleiner (maar in absolute zin natuurlijk gelijk). Voor de Startanalyse 2020 zijn soortgelijke berekeningen gemaakt van het effect van na-isolatie in 2050, zie Tabel 18.

Tabel 19

Effect van na-isolatie van bestaande woningen (met een HR-ketel) tot schillabel D en B bij 1,4 graden opwarming in 2050 ten opzichte van de situatie in 2019. Bron: Startanalyse 2020.

Categorie	Situatie in 2019	In 2050 zonder na-isolatie	In 2050 met na-isolatie tot schillabel D	In 2050 met na-isolatie tot schillabel B
Finale energievraag voor ruimteverwarming alle^{*)} woningen [in PJ/j]	247	219	203	175
Reductie t.o.v. 2019		11%	18%	29%
Besparing op ruimteverwarming door isoleren			7% 16 PJ	20% 44 PJ
Gasverbruik alle^{*)} woningen voor verwarmen + tapwater [in PJ/j]	320	293	277	249
Reductie t.o.v. 2019		8%	14%	22%
Besparing verwarmen + tapwater door isoleren			6% 16 PJ	15% 44 PJ
Gasverbruik per woning [in GJ/j]	41,3	37,8	35,7	32,1

^{*)} inclusief woningen die tijdelijk leeg staan en bedrijfswoningen (die het CBS en de KEV tot de dienstensector rekenen) maar exclusief woningen op een warmtenet. Deze indeling sluit beter aan bij het doel van de Startanalyse, die ook voor leegstaande woningen en bedrijfswoningen transitiekosten wilde schatten. Door het verschil in indeling is het gasverbruik van woningen in de Startanalyse circa 40 PJ hoger dan wat de KEV voor 2019 rapporteerde (280 PJ na temperatuurcorrectie).

De conclusie uit het bovengenoemd onderzoek is, dat isoleren van alle bestaande woningen tot schillabel B, als proxy voor de Standaard, ongeveer 20% kan besparen op de finale energiebehoefte voor ruimteverwarming in 2050 en 15% (ofwel 44 PJ per jaar) op het totale gasverbruik. Met betere uitvoering van isolatiemaatregelen zou de besparing groter kunnen worden, maar zeker niet de 27% die wordt berekend met fysisch-thermische modellen waarvan de invoerparameters onvoldoende overeenkomen met de werkelijkheid. Besparingen kunnen wel verder toenemen, bijvoorbeeld doordat bewoners hun stookgedrag aanpassen in reactie op hoge gasprijzen. Maar dat is dan het effect van gedragsverandering en niet van isolatiemaatregelen.

³⁰ We baseren ons hiervoor op het G_H-scenario met 1,4 graden temperatuurstijging in Nederland tussen 2010 en 2050, dat het KNMI heeft vertaald naar temperaturen in verschillende regio's in Nederland (KNMI, 2014).

4.4.3 Kosten van na-isoleren van woningen

Nationale kosten hoger dan baten

Het isoleren van de bestaande woningvoorraad tot de standaard is kostbaar. Die kosten verschillen per type woning want ze zijn hoger naarmate het huidige energielabel slechter is en de oppervlakte groter. Op een natuurlijk moment (als een gebouwdeel toch al aan vervanging toe is) zijn de extra kosten van na-isoleren lager dan op een 'zelfstandig' moment, wanneer voor na-isoleren speciale voorzieningen moeten worden getroffen. Tabel 19 geeft een indruk van de investeringen die nodig zijn om woningen middels na-isolatie op een natuurlijk moment naar schillabel B te brengen. Die kosten zijn met behulp van TNO berekend uit kostenkentalen voor 2019, van maatregelen op een natuurlijk moment, die Arcadis voor RVO verzamelde³¹. In de Startanalyse 2020 is gerekend met gemiddelden van isolatiekosten op een natuurlijk en zelfstandig moment, zie voetnoot 12 in (PBL, 2022a). Woningen die vóór 1930 zijn gebouwd hebben doorgaans geen spouwmuur en zijn dus lastiger en tegen veel hogere kosten op schillabel B te brengen. In de hier gehanteerde kostendata zijn de isolatiekosten van vooroorlogse woningen gelijk gesteld aan die van woningen uit latere bouwperiodes. Dat impliceert dat die vooroorlogse woningen tegen die kosten niet helemaal tot schillabel B geïsoleerd worden. Dat is geheel in overeenstemming met de voorgestelde Isolatiestandaard, die ook soepeler is voor vooroorlogse woningen zonder spouwmuur.

Tabel 20

Gemiddelde investering in 2019 (in euro₂₀₁₈ per woning exclusief belasting en subsidies) voor na-isolatie tot schillabel-B op een natuurlijk moment, per type woning, ingedeeld naar oorspronkelijk energielabel. Bron: berekend uit bijlage B5 in (van der Molen, et al., 2021).

Woningtype	Gemiddeld oppervlak (m ²)	Label G (€/woning)	Label F	Label E	Label D	Label C
Vrijstaand	165	37555	30668	27224	27510	14137
2 onder 1 kap	130	23474	23474	24019	17964	10302
Rijwoning hoek	115	17065	17065	17854	18159	8501
Rijwoning tussen	110	15308	15699	13598	13189	8019
Meergezinswoning	77	16962	13575	11319	10000	7194

In het Klimaatakkoord is verondersteld dat isolatiekosten tussen 2019 en 2030 zullen dalen als gevolg van schaalvergroting, standaardisering, vergroten van de planbaarheid (door een meer wijkgerichte aanpak) en (mede daardoor) verlaging van de acquisitiekosten. In de Startanalyse 2020 is daarom een kostendaling van 9 procent verondersteld tussen 2019 en 2030. Die kostendaling werd al snel in twijfel getrokken door het EIB, dat het logischer vond om rekening te houden met een historisch gemiddelde kostenstijging van een half procent per jaar. Sinds 2019 zijn alle bouwkosten gestegen door stagnering in de aanvoer van bouwmaterialen en werkzaamheden, eerst door de coronapandemie en vanaf 2022 door de oorlog in Oekraïne.

In de Startanalyse 2020 is berekend dat na-isoleren van alle woningen tot schillabel B in 2030 een investering vergt van bijna 109 miljard euro (inclusief 9% kostenreductie vanaf 2019, exclusief

³¹ De actuele kostenkentalen zijn te vinden op <https://digipesis.com/> en cijfers van voorgaande jaren zijn verkrijgbaar bij RVO.

belastingen en subsidies). Bij afschrijving over 30 jaar en 3% rente betekent dat een jaarlijkse nationale kostenpost van 5,6 miljard euro. Daar staan jaarlijks wel 44 PJ besparingen op finale energie tegenover, als met een HR-ketel zou worden verwarmd, zie Tabel 18. Bij de (in 2020) verwachte nationale kosten van aardgas in 2030 zou dat de samenleving 0,4 miljard euro aan gaskosten besparen (exclusief belastingen). Medio 2022 moest op de TTF termijnmarkt enige tijd 200 euro per MWh worden betaald voor levering van aardgas in 2023 (ofwel 1,95 €/m³)³². Zelfs bij die extreem hoge prijs worden de nationale kosten van na-isolatie tot schillabel B niet terugverdiend. De jaarlijkse besparingen van 2,9 miljard euro (zie Tabel 20) zijn dan nog steeds lager dan de jaarlijkse kosten van 5,6 miljard euro. Alle gebouwen vergaand na-isoleren is naar verwachting dus nationaal-economisch geen rendabele investering (zolang er voldoende gas beschikbaar is). Zelfs na 9% kostenreductie van isolatiemaatregelen en bij extreem hoge gasprijzen wordt het ook niet rendabel. Maar er zijn andere redenen om niet-rendabele isolatiemaatregelen te willen betalen, zoals genoemd in paragraaf 4.2.

Tabel 21

De waarde van 44 PJ gas besparen bij verschillende nationale kosten van aardgas.

Variant:	2019 aardgas	2030 aardgas in SA2020	aardgas-TTF levering 2023
Kosten gas groothandel [in €/m ³ ae]*	0,21	0,25	1,95
Idem inclusief leveringskosten [in €/m ³ ae]	0,32	0,37	2,10
Kosten gaslevering [in €/GJ]	10,2	11,7	65,4
Waarde van 44 PJ besparing [in mld. €/j]	0,4	0,5	2,9

* ae = aardgasequivalent. Nationale kosten van aardgas zijn gelijkgesteld aan de jaargemiddelde groothandelsprijzen; bij groengas gaat het om nationale productiecosten.

Private kosten van na-isolatie ook hoger dan baten van energie besparen

Hoewel op nationaal niveau de kosten van na-isoleren van alle woningen tot de standaard niet opwegen tegen de baten, doet de overheid er veel aan om na-isoleren voor individuele woningeigenaren wel financieel aantrekkelijk te maken. Daartoe zijn subsidies op isolatiemaatregelen beschikbaar gesteld (oplopend tot 30 procent) en is de energiebelasting op aardgas verhoogd. Bij gasprijzen die tot 2020 gebruikelijk waren, maakten die beleidsinstrumenten na-isolatie wel aantrekkelijker maar nog niet voor iedereen rendabel, ook niet in 2030, na 9% kostenreductie en extra verhoging van de energiebelasting op gas. Data in het Dashboard Eindgebruikerskosten (TNO, 2021b) laten voor 2030 zien dat bij elk woningtype de jaarlijkse kosten³³ van isolatiemaatregelen (gemiddeld) hoger zijn dan de jaarlijkse baten van aardgasbesparing. In die berekeningen is de gasbesparing geschat met de gemeten methode (zie vorige paragraaf) bij een gemiddeld gasverbruik per woningtype. Bij een hoger dan gemiddeld gasverbruik is het beeld gunstiger maar nog steeds niet kostenneutraal. In publieksvoorlichting over energiebesparing wordt nog vaak gebruik

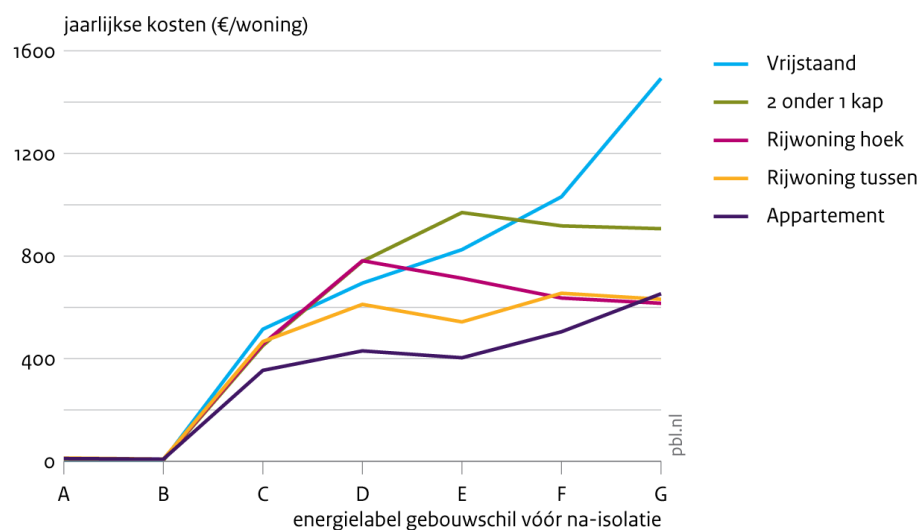
³² Voor een correcte vergelijking met de aardgaskosten uit de Startanalyse zou dit moeten worden omgerekend naar euro's van 2018, wat neerkomt op 1,66 €/m³. Maar die correctie doet niks af aan de conclusie de hoge gaskosten van 2022 er niet voor zorgen dat na-isolatie tot schillabel B nationaal-economisch rendabel wordt.

³³ De jaarlijkse kosten zijn berekend door de investeringen lineair af te schrijven over de technische levensduur van isolatiemaatregelen (30 jaar) bij een rente van 1,7% voor koopwoningen, 3,36% voor sociale verhuurders en 4,82% voor particuliere verhuurders.

gemaakt van de *berekende* methode, zoals op de website www.verbeterjehuis.nl en op de website van MilieuCentraal. Tot voor kort hanteerden die hogere besparingen en dat leidde soms wel tot financieel voordeel van isolatiemaatregelen. Dit verschil is inmiddels wel herkend. Momenteel gebruikt verbeterjehuis het bijgestelde Maatwerkadvies, waarin het gasverbruik in de uitgangssituatie kan worden afgestemd op het feitelijk verbruik en default instellingen al beter aansluiten bij de gemeten methode.

Figuur 8

Netto jaarlijkse private kosten (kosten min baten) van na-isolatie tot schillabel B in 2030 voor verschillende typen koopwoningen met een HR-ketel, met subsidies en 9% kostendaling



Bron: TNO

Vergelijking met enkele recente studies naar de impact van hoge gasprijzen

De netto kosten van na-isolatie zijn niet alleen afhankelijk van het woningtype en het energielabel maar natuurlijk ook van ontwikkelingen in de kosten van maatregelen en in de prijzen van aardgas. Beide zitten de laatste tijd sterk in de lift. In een recente studie berekende CE Delft het effect voor woningeigenaren op de terugverdientijd³⁴ van isolatiemaatregelen als de maatregelkosten met 10% stijgen en de gasprijs stijgt van € 0,79 (januari 2021) naar €2,60 per m³ (het gemiddelde tarief voor nieuwe contracten in april 2022) en gedurende de hele terugverdientijd op dat niveau blijft. De gehanteerde gasbesparing komt uit modelberekeningen (De Uniforme Maatlat) en is dus, zoals de auteurs zelf ook aangeven, aan de hoge kant. De onderzoekers concluderen dat isolatiemaatregelen “zich ongeveer drie keer sneller terugverdienen met de huidige energietarieven dan met de tarieven van begin 2021” (CE Delft, 2022, p. 11). Deze conclusie volgt rechtstreeks uit de gekozen verhogingen van maatregelkosten en gasprijzen³⁵. Het is interessanter te kijken naar de berekende terugverdientijden zelf. De studie houdt geen rekening met isolatiemaatregelen die in het verleden reeds zijn aangebracht. Ook biedt het geen inzicht in de besparing van een pakket aan maatregelen. Een maatregel die als 2^e wordt genomen bespaart namelijk minder gas dan wanneer hij als eerste

³⁴ De terugverdientijd is berekend als het totale investeringsbedrag gedeeld door de bespaarde gaskosten in het eerste jaar. Financieringskosten (rente, afsluitkosten lening) blijven dus buiten beschouwing.

³⁵ Als de maatregelkosten met 10% stijgen en de gasprijzen met 229% (van 0,79 naar 2,60 €/m³), dan verandert de terugverdientijd met een factor $(100+10)/(100+229)=1/3$.

was genomen. De besparing is immers afhankelijk van het gasverbruik vóór uitvoeren van een maatregel. Verder zijn de kosten van financiering niet meegenomen (rente, afsluitkosten lening). Zo komen de onderzoekers op terugverdiertijden van 1 tot 8 jaar in slecht geïsoleerde woningen en van 2 tot 22 jaar voor matig geïsoleerde woningen. De gekozen aanpak van de studie maakt de uitkomsten moeilijk vergelijkbaar met de kostenberekeningen van de Startanalyse. Beide studies hanteren verschillende methoden voor bepaling van het bespaarde gasverbruik (gemeten versus berekend) en een ander startpunt voor het aanbrengen van na-isolatie (de hele bestaande woningvoorraad versus enkele slecht tot matig geïsoleerde voorbeeldwoningen). Met een grove benadering kan de gemiddelde private terugverdiertijd van isoleren tot schillabel B volgens de Startanalyse geschat worden op 31 jaar³⁶. Dat is aanmerkelijk langer dan de terugverdiertijden van afzonderlijke maatregelen in woningen zonder na-isolatie die CE Delft berekende.

Ook TNO hanteert soms vrij optimistische schattingen van het effect van isolatiemaatregelen. In een whitepaper van oktober 2022 staat dat na-isoleren van woningen met een E, F of G-label naar een B-label in 5 tot 10 jaar kan worden terugverdiend (TNO, 2022). Daarbij werd gerekend met gasprijzen van 1,40 tot 2,80 euro/m³ (representatief voor 2022) en werd verondersteld dat die de komende jaren constant hoog blijven³⁷. Investerings werden geschat op gemiddeld 20.000 euro per woning en het gasverbruik zou jaarlijks met 1450 m³ afnemen. Dat laatste lijkt erg optimistisch gezien het gemiddelde gasverbruik van 1280, 1440 en 1580 m³ van respectievelijk E-, F- en G-woningen in 2018³⁸. In dezelfde TNO-paper staat dat 5,5 bcm gas bespaard kan worden “als we alle woningen in Nederland renoveren en isoleren tot energielabel B”. Dat komt overeen met 156 PJ gas terwijl die besparing in berekeningen voor de Startanalyse (gebaseerd op gemeten gasverbruiken van alle woningen) is geraamd op 71 PJ, minder dan de helft dus. Bij dergelijke lage gasbesparingen stijgt de terugverdiertijd naar 10-20 jaar en als de gasprijzen weer dalen naar ‘normale’ waarden dan loopt de terugverdiertijd nog verder op.

4.5 Woningen efficiënter verwarmen

4.5.1 Energiebesparing met efficiëntere verwarmingsinstallaties

In aanvulling op isoleren kan extra energie worden bespaard door efficiënter in de warmtevraag (na isolatie) te voorzien. Dat kan bijvoorbeeld door efficiëntere cv-ketels of efficiëntere radiatoren of vloerverwarming te installeren. Warmtepompen zijn efficiënter dan cv-ketels omdat warmtepompen gebruik maken van omgevingswarmte, die niet geproduceerd hoeft te worden.

³⁶ De investering van 109 miljard nationale kosten zou conform de veronderstellingen van CE Delft moeten worden verhoogd tot 111 miljard: $109 / 0,91$ (correctie voor verwachte kostendaling) * 1,1 (inflatie) * 1,21 (BTW) * 0,7 (30% subsidie) = 111 miljard. De 15% gasbesparing betekent ten opzichte van het verbruik in 2019 een besparing van 48 PJ (zie Tabel 18). Dat is bij een gasprijs van 2,60 €/m³ ongeveer 3,6 miljard euro waard. Dat brengt de TVT op $111 / 3,6 = 31$ jaar. TVT's worden doorgaans zonder kapitaalslasten berekend, daarom zijn ze een grove indicator.

³⁷ In januari 2023 waren de gasprijzen op de termijnmarkt alweer gezakt naar het niveau van de jaren vóór 2022, voorafgaand aan de beëindiging van de gasleveranties uit Rusland.

³⁸ De data komen uit een maatwerktable, geleverd door Annemiek Kremer van het CBS dd 13-12-2019.

Definitie van energie-efficiëntie

We hanteren hier wel een praktische definitie van efficiëntie die afwijkt van de natuurkundige definitie waarin *alle* energiebronnen meetellen. De praktische definitie vergelijkt de hoeveelheid op te wekken energie met de energie die nodig is voor verwarming (een vorm van finale energie). Echte restwarmte, die anders geloosd zou worden, is dus te beschouwen als energie die niet (uitsluitend) is opgewekt met het doel om gebouwen te verwarmen. Omgevingswarmte of omgevingsenergie valt ook buiten die praktische definitie omdat die niet hoeft te worden opgewekt. Bodem-energie is wel omgevingswarmte, maar er is wel elektriciteit (pompenergie) nodig om die te 'oogsten'. Die pompenergie moet dus wel meetellen bij het bepalen van de efficiëntie van de benutting van bijvoorbeeld geothermie.

Verder is het van belang om aan te geven of de efficiëntie wordt berekend van het verwarmingssysteem binnen een gebouw, binnen de gebouwde omgeving of binnen een land. Het kan voor een gebouweigenaar aantrekkelijk zijn om een systeem te kiezen met een hoge efficiëntie binnen het gebouw. Als daarvoor een energiedrager nodig is die buiten het gebouw transportverliezen veroorzaakt, dan zal zo'n keuze voor de gebouwde omgeving als geheel minder energiebesparing opleveren dan op gebouwniveau.

Aanzienlijke verschillen in efficiëntie van verwarmingssystemen

Voor een vergelijking van de efficiëntie van verwarmingssystemen in de gebouwde omgeving is de energie-input per jaar berekend die nodig zou zijn om bestaande gebouwen met verschillende systemen te verwarmen, nadat ze allemaal zijn geïsoleerd tot schillabel B en lage temperatuur afgiftesystemen hebben gekregen. Zo'n vergelijking kan bij verschillende isolatieniveaus worden gemaakt, maar in dit hoofdstuk onderzoeken we de effecten in een situatie waarin energiebesparing (onder andere door middel van na-isolatie) vergaand wordt toegepast. Tabel 21 toont de resultaten. Omdat alle gebouwen in alle systemen tot schillabel B zijn geïsoleerd, is de gemiddelde warmtevraag per woning (equivalent) in alle systemen gelijk; gemiddeld 31 GJ/weq³⁹. Het gemiddeld verbruik van elektriciteit voor andere toepassingen dan verwarmen (zoals voor verlichting, wasmachines, drogers en computers) is ook in alle systemen gelijk, gemiddeld iets minder dan 17 GJ/weq, maar dat is buiten het overzicht gehouden.

³⁹ Deze berekening houdt ook rekening met de klimaatverandering die tot 2050 wordt verwacht. De totale energie-input per woning op een MT-net (28 GJ/weq) is lager dan die bij de andere technieken. Dat komt doordat het gemiddelde hier is berekend over 'slechts' ruim 5 miljoen weq's, het maximum dat met de verwachte toekomstige hoeveelheid restwarmte kan worden aangesloten. Dat zijn voornamelijk appartementen; die hebben een lagere gemiddelde warmtevraag dan het gemiddelde van alle 10,2 miljoen weq's die in 2019 aanwezig waren.

Tabel 22

Gemiddelde jaarlijkse energie-input in verwarmingssystemen voor woningen en utiliteitgebouwen met schillabel B°, uitgesplitst naar type energiedrager. Bron SA-2020

Techniek (GJ/weq)	HR-ketel aardgas	Lucht- WP stroom	MT-net rest- warmte	LT-net le- vering 30° warmte + stroom	Hybride WP groengas	HR-ketel groen- gas
Gas	29		7		14	29
Elektriciteit*	2	10	1	9	6	2
MT-warmte			27			
LT-warmte				3		
Omgevingswarmte		21	-8	18	11	
Totale input	31	31	28	30	31	31
wv op te wekken	31	10	9-36 [†]	9	20	31

^{o)} Gemiddeld over alle in 2019 bestaande gebouwen exclusief gebouwen aangesloten op een warmtenet.

^{*}) Dit is exclusief bijna 17 GJ/weq elektriciteit voor apparaten en verlichting en exclusief de elektriciteit voor de pompen in het warmtenet. Warmtenetten zijn zelf geen onderdeel van de gebouwde omgeving. Door afronding lijkt het verschil in stroomverbruik tussen HR-ketels (1,7 GJ/weq) en MT-netten (1,3 GJ/weq) groter dan het is (25%).

[†]) De bandbreedte wordt bepaald door het wel/niet meetellen van MT-warmte (inclusief verliezen bij warmtetransport en distributie) als op te wekken energie.

In Tabel 21 is te zien dat verwarmingssystemen met een elektrische luchtwarmtepomp (lucht-WP) en LT-netten de kleinste hoeveelheid op te wekken energie nodig hebben en dus het meest efficiënt genoemd kunnen worden. Dat komt doordat die systemen een groot deel van de benodigde warmte uit de buitenlucht betrekken. Warmtenetten met LT-bronnen en warmteafgifte in de gebouwen op 30 graden Celsius lijken iets efficiënter dan elektrische luchtwarmtepompen, maar dat komt doordat die (in de analyse) alleen zijn toegepast in gebouwen waar die goedkoper waren dan luchtwarmtepompen, totaal ruim 170.000 weq's. Alle overige weq's krijgen in die variant een luchtwarmtepomp. Daardoor verschilt de energie-input weinig van die van overall luchtwarmtepompen. Warmtenetten met MT-bronnen lijken het minst efficiënt. Die systemen verliezen in het distributienet warmte aan de omgeving (gemiddeld 8 GJ per weq) en gebruiken in koude perioden gas voor hulpketels. Als echter de warmte die het warmtenet voedt niet opgewekt hoeft te worden maar volledig uit echte restwarmte bestaat (wat in de praktijk nu weinig voorkomt) dan kunnen warmtenetten zelfs iets efficiënter worden dan warmtepompen (9 GJ/weq t.o.v. 10).

Systemen met een hybride warmtepomp benutten minder omgevingsenergie dan systemen met elektrische warmtepompen en hebben daardoor per woning gemiddeld twee keer zoveel op te wekken energie nodig: 20 GJ i.p.v. 10 GJ. Dat is nog wel 36% efficiënter dan een HR-ketel, die per woning voor verwarming gemiddeld 29 GJ gas nodig heeft plus wat elektriciteit voor de circulatiepomp en voor ventilatie.

Omdat de energiedragers gas, elektriciteit, restwarmte en geothermie buiten de gebouwde omgeving worden geproduceerd, blijft de efficiëntie van de productie van die energiedragers in deze analyse buiten beschouwing.

Uit bovenstaande analyse blijkt dat het vervangen van HR-ketels door hybride en elektrische warmtepompen in gebouwen met een schillabel B gemiddeld 36 respectievelijk 69% besparing kan opleveren in de hoeveelheid op te wekken energiedragers voor verwarming. Bij warmtenetten met echte MT-réswarmte zou tot 72% op te wekken energie kunnen worden bespaard (van 31 naar 9

GJ/weq) maar dat getal is wel erg afhankelijk van wat onder op te wekken energie wordt verstaan⁴⁰. Dat wil bovendien niet zeggen dat zulke besparingen ook financieel rendabel zijn; dat is allemaal afhankelijk van de kosten van te nemen maatregelen en van gebruikte energiedragers.

4.5.2 Kosten besparen met efficiëntere verwarmingsinstallaties

Voor veel technici is elke bespaarde Joule energie evenveel waard maar in de dagelijkse praktijk wordt vooral rekening gehouden met de financiële waarde van energiebesparing. Toepassingen van energie die technisch efficiënter zijn, zijn niet automatisch ook economisch efficiënter. Dure maatregelen die weinig energie besparen, bijvoorbeeld, vergroten nog steeds de technische efficiëntie maar verlagen doorgaans de economische efficiëntie. Dat geldt bijvoorbeeld voor het aanbrengen van vergaande isolatiemaatregelen, zoals vervanging van HR++-glas door tripleglas of warmteterugwinning op douchewater. Bij aardgasvrije verwarmingssystemen kan iets soortgelijks aan de orde zijn, afhankelijk van kosten en baten, zoals blijkt uit onderstaande analyse.

Technisch efficiënter is niet automatisch ook economisch efficiënter

Veel discussies over de selectie van verwarmingstechnieken hanteren technische efficiëntie als uitgangspunt. Dar gaat echter voorbij aan wat toepassing van die technieken de samenleving en individuen gaat kosten. Om een indruk te krijgen van de economische efficiëntie van verschillende technische opties van aardgasvrij verwarmen, zijn kostenberekeningen van de Startanalyse 2020 in onderstaande Tabel 22 op een rij gezet. Daarvoor zijn dezelfde vijf verwarmingssystemen geselecteerd als in de vorige tabel. Die worden vergeleken met de kosten van het huidige dominante systeem met HR-ketels en aardgas.

Tabel 23

Nationale kosten (in euro₂₀₁₈ per woningequivalent per jaar) van vijf aardgasvrije verwarmingssystemen in 2030 bij isolatie tot schillabel B. Bron: berekend uit Startanalyse 2020

Systeem (€/weq)	HR-ketel Aardgas	Lucht-wa- ter-warmte- pomp Stroom	MT-net Rest- warmte	LT-net levering 30° Omgevings- warmte + stroom	Hybride warmte- pomp Groengas + stroom	HR-ketel Groengas
Energiekosten:	0,25 €/m ³	137 €/MWh	Variabel ^{a)}	Variabel ^{a)}	0,67 €/m ³	0,67 €/m ³
Warmte^{a)}	0	0	208	14	0	0
Gas	336	0	162	0	345	722
Stroom^{b)}	66	387	215	369	245	66
Subtotaal	402	387	585	383	590	788
Energienet	0	98	812	243	10	0
Na-isolatie	546	546	546	546	546	546
Installatie^{c)}	0	544	-19	458	210	0
Onderhoud	273	250	283	263	313	273
Totaal	1221	1824	2208	1893	1669	1606
Vershil	0	603	987	672	448	386

⁴⁰ Zo hebben we hier omgevingswarmte uit lucht en water niet beschouwd als op te wekken energie maar omgevingswarmte uit de bodem (geothermie) kan moeilijk als zodanig worden geclassificeerd.

- a) Energiekosten van warmte verschillen per locatie en brontype, zie paragraf 7.2 in (PBL, 2022a).
- b) Dit zijn alleen de stroomkosten voor het verwarmingssysteem in de gebouwde omgeving, dus exclusief de stroomkosten voor elektrische apparaten in gebouwen en exclusief de stroomkosten voor pompen in warmtenetten.
- c) Installatiekosten zijn de extra jaarlijkse kosten (rente en afschrijving) ten opzichte van een HR-ketel.

In de kostenberekening is verondersteld dat zoveel mogelijk⁴¹ gebouwen met dezelfde techniek worden verwarmd en dat de gehele bestaande gebouwvoorraad wordt na-geïsoleerd tot minimaal schillabel B. Vergaand energie besparen is immers het gekozen uitgangspunt van de analyse in dit hoofdstuk. De berekeningen hanteren ramingen van investeringskosten in verwarmingsinstallaties en energienetwerken in 2030 naast ramingen van productiekosten van energiedragers in 2030. Ook is rekening gehouden met kosten van beheer en onderhoud van netwerken en installaties in 2030. In alle gevallen gaat het om nationale kosten, dus kosten voor de samenleving, en niet om kosten die burgers en bedrijven zouden betalen, de private kosten⁴².

Uit bovenstaande tabel blijkt dat in 2030 elk aardgasvrije systeem hogere nationale kosten heeft dan het huidige systeem met HR-ketels en aardgas. Dat verandert pas als aardgas dan drie keer duurder wordt dan nu wordt voorzien. Ondanks het feit dat de aardgasvrije systemen technisch efficiënter zijn dan het huidige systeem (met uitzondering van de HR-ketel met groengas, zie vorige paragraaf), zijn ze (bij verwachte aardgaskosten) economisch dus minder efficiënt. Het verschil wordt vooral veroorzaakt door verschillen in de kosten van installaties en netwerken en veel minder door verschillen in de technische efficiëntie van de systemen. De verwarmingsinstallaties van de aardgasvrije systemen zijn aanmerkelijk duurder dan HR-ketels en investeringen in warmtenetten hebben ook grote invloed op de kostenverschillen tussen de systemen. Kosten van verzwaring van het elektriciteitsnet en weghalen van het gasnet (ook onderdeel van energienet-kosten in de tabel) zijn relatief beperkt.

De gemiddelde kosten van warmtenetten en netwerkaanpassingen per woning vertonen in de praktijk een grote spreiding. Dat wordt vooral veroorzaakt door spreiding in de onderlinge afstand van gebouwen en in de afstand tot locaties waar energiedragers worden geproduceerd, zoals elektriciteitscentrales en fabrieken die restwarmte produceren. Dat zorgt er voor dat niet één aardgasvrij verwarmingssysteem overal de goedkoopste (of minst dure) optie is, maar dat dat per locatie steeds een ander systeem kan zijn.

⁴¹ Het maximum aantal aansluitingen is afhankelijk van de beschikbaarheid van energiedragers. Het is denkbaar dat op termijn ruim voldoende groene stroom en schone gassen beschikbaar komen, zodat de hele bestaande gebouwvoorraad van ruim 10 miljoen weq's daarmee verwarmd zou kunnen worden. De beschikbaarheid van MT-restwarmte is afhankelijk van de hoeveelheid en locatie van bedrijven die restwarmte blijven produceren. Bij de gehanteerde veronderstellingen kunnen daarmee ruim 5 miljoen weq's (voornamelijk appartementen) worden verwarmd. De beschikbaarheid van LT-warmte op plaatsen met een compacte gebouwvoorraad is veel kleiner. Omdat LT-bronnen doorgaans een kleine capaciteit hebben, zijn de LT-warmtenetten waarschijnlijk ook beperkt van omvang. In de analyse is verondersteld dat LT-netten alleen rendabel kunnen worden aangelegd als ze lagere nationale kosten hebben dan elektrische warmtepompen. Onder de veronderstelling dat alle gebouwen eerst naar minimaal schillabel B worden geïsoleerd (het uitgangspunt van de analyse in dit hoofdstuk), geldt dit voor slechts ruim 170.000 weq's. Alle overige gebouwen krijgen in deze optie (LT-net) een elektrische warmtepomp. Daardoor verschilt de energiebehoefte van deze optie weinig van die in de all-electric-optie.

⁴² Een toelichting op het begrip 'nationale kosten' en onderbouwing van de gehanteerde kostencijfers voor 2030 staat in de bijlage en in (PBL, 2022a). De impact op private kosten komt hierna aan bod.

Als – na isolatie tot schillabel B – in elke buurt het verwarmingssysteem met de laagste nationale kosten zou worden toegepast, en als je veronderstelt dat tegen 2050 elke gewenste energiedrager ruim voor handen zal zijn (tegen de hierboven weergegeven productiekosten), dan zullen vrijwel alle gebouwen (96% of 9,8 miljoen weq) met groengas worden verwarmd, voornamelijk in combinatie met HR-ketels. Slechts 2% van de huidige bouwvoorraad zou dan met een elektrische warmtepomp worden verwarmd en de overige 2% via een MT-warmtenet. Na isoleren tot schillabel B (en dus ook tot de isolatiestandaard van het kabinet) is verwarmen met groengas dus vrijwel overal de goedkoopste optie voor het land, al kan het kostenvoordeel wel sterk verschillen tussen buurten. Groengas blijft nationaal gezien de goedkoopste optie als kosten van individuele maatregelen of energiedragers 20% hoger of lager worden (zie Bijlage). Bij 50% hogere investeringskosten én hoge energiekosten is verwarmen met groengas ook de goedkoopste optie, totdat de productiekosten van groengas hoger worden dan 1,37 €/m³, het dubbele van de verwachte kosten in 2030.

Het kabinet verwacht dat op termijn maar 2 bcm groengas (1,5 bcm voor gebouwen en 0,5 bcm voor hulpketels van warmtenetten) en helemaal geen waterstof beschikbaar komt voor verwarming van gebouwen. Dan kan slechts een kwart van de gebouwde omgeving met groengas worden verwarmd en moet de rest een andere optie kiezen. Bij de gehanteerde kosten in de Startanalyse wordt de verdeling met de laagste nationale kosten dan als volgt: 63% elektrische warmtepompen, 11% MT-net, 2% met LT-netten en 24% met groengas voor HR-ketels en hybride warmtepompen. Deze verdeling hanteren we daarom bij de verdere uitwerking van dit traject.

Private kosten en baten van efficiënter verwarmen

Voor een woningeigenaar zijn nationale kosten niet relevant; die krijgt te maken met private kosten waarin belastingen en subsidies zijn verwerkt. Voor woningen die al een schillabel B hebben, wordt de elektrische warmtepomp het meest rendabele verwarmingssysteem. Dat geldt voor alle woningtypen, zie Tabel 23, en bij de verwachte kostenontwikkelingen tot 2030 en de regelingen, subsidies en belastingen die in 2020 van kracht waren. In 2030 zou verwarmen met een elektrische warmtepomp voor bewoners dus goedkoper worden dan verwarmen met een HR-ketel of een hybride warmtepomp met groengas. Deze vergelijking van private kosten wijkt dus substantieel af van bovenstaande vergelijking van nationale kosten van verwarmingssystemen. Dat komt niet zozeer door een verwachte prijsdaling van warmtepompen maar vooral door verschuiving van energiebelasting van elektriciteit naar gas en door subsidies. Door subsidies op warmtepompen dalen de jaarlijkse kosten met ongeveer 100 euro per woning. Woningen die op een warmtenet worden aangesloten krijgen per woning meer subsidie⁴³ maar betalen ook een hoge aansluitbijdrage en moeten een warmteprijs betalen die (bij de huidige regelingen) dan nog steeds wordt afgeleid van de gasprijs. Dat maakt verwarmen met warmtenetten voor woningeigenaren een van de duurste opties. In Tabel 23 is ook te zien dat bij grotere woningen de warmtenetten iets duurder worden terwijl de warmtepompen steeds meer financieel voordeel gaan opleveren.

⁴³ Bij een aansluiting op een MT-net dalen de jaarlijkse woonlasten door subsidie met bijna 200 euro per woning; bij een LT-net is dat zelfs ongeveer 265 euro per woning. Desondanks blijven de netto kosten aanzienlijk hoger dan die van woningen met warmtepompen of HR-ketels.

Tabel 24

Private jaarlijkse netto kosten*) van vijf aardgasvrije verwarmingssystemen voor vijf typen koopwoningen met schillabel B (zonder na-isolatie °) in 2030, inclusief subsidie, in euro per woning per jaar. Bron: Dashboard Eindgebruikerskosten (TNO 2021).

Techniek:	HR-ketel aardgas	Lucht-wa- ter-warm- tepomp	MT-net restwarmte	LT-net levering 30°	Hybride w-pomp groengas	HR-ketel groengas
Woningtype						
Appartement	8	-228	327	374	15	8
Rij-tussen	8	-223	415	515	-49	8
Rij-hoek	7	-305	420	519	-97	7
2 onder 1 kap	4	-389	418	517	-149	4
Vrijstaand	3	-565	420	520	-241	3

*) De consumentenprijzen van aardgas en groengas zijn gelijk (1,10 €/m³); die van waterstof is onbekend en ontbreekt daarom in dit overzicht. De netto kosten zijn berekend als de extra installatiekosten (tov een HR-ketel) plus kosten van klimaatneutraal energieverbruik minus uitgespaarde kosten van aardgas.

°) De kosten van na-isolatie om schillabel B te bereiken zijn hier buiten beschouwing gelaten om een zuiver beeld te kunnen tonen van de private kosten van verschillende vormen van energievoorziening.

Het verwachte grote financiële voordeel van elektrisch verwarmen kan de interesse in warmtepompen sterk stimuleren. Het voordeel in tabel 15 geldt echter alleen voor woningen die al goed geïsoleerd zijn (tot minimaal schillabel B). Als eerst nog hoge isolatiekosten gemaakt moeten worden, kan dat een belemmering zijn om over te stappen op elektrisch verwarmen, zeker zolang woningen zonder na-isolatie met aardgas of – op termijn – met groengas of waterstof comfortabel en betaalbaar verwarmd kunnen worden. Ook het financieren van hoge investeringen kan belemmeringen ondervinden. In de meeste gevallen wordt de combinatie van schillabel D met aardgas of groengas rond 2030 voor woningeigenaren goedkoper dan na-isoleren tot schillabel B met een elektrische warmtepomp.

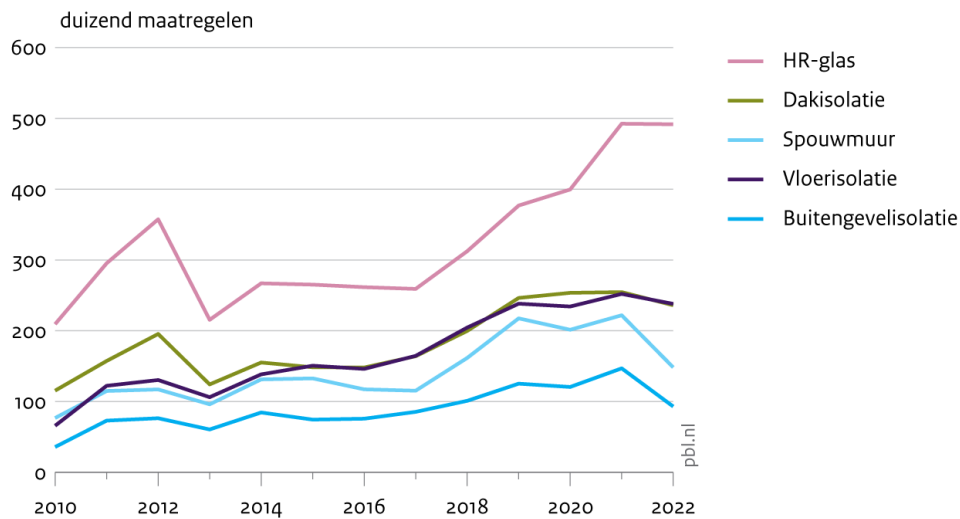
4.6 Energie besparen in woningen versnellen

Nu de technische mogelijkheden en kosten van energie besparen door middel van na-isolatie (in paragraaf 4.4) en efficiënter verwarmen (in paragraaf 4.5) zijn geschetst, rijst de vraag hoe die mogelijkheden benut kunnen worden. We hebben aangetoond dat vergaand na-isoleren een relatief dure manier is van klimaatneutraal verwarmen, maar ook aangegeven (in paragraaf 4.2.2) dat met die hogere kosten bepaalde maatschappelijke baten zijn te bereiken die moeilijk in geld gewaardeerd kunnen worden. In deze paragraaf verkennen we de financiële en niet-financiële barrières voor vergaande energiebesparing in woningen en hoe die zo snel mogelijk geslecht kunnen worden.

4.6.1 Isolatietempo woningen tot nu toe vrij laag

In paragraaf 4.1 is al beschreven hoe de rijksoverheid energiebesparing in woningen al heel lang heeft gestimuleerd. Ondanks die stimulansen bleef het tempo van energiebesparing tot 2017 vrij constant op een bescheiden niveau, zie Figuur 9. In 2018 begon een versnelling die eigenlijk alleen bij HR-isolatieglas heeft doorgezet. Bij andere typen na-isolatie bleef het niveau van 2019 min of meer stabiel, vermoedelijk door de coronapandemie. Wellicht brengt de gasprijsstijging van 2022 het tempo weer omhoog. Bij spouwmuurisolatie kan verdere vertraging optreden door de onderzoeksplicht voor vleermuizen.

Figuur 9
Aantal jaarlijks genomen isolatiemaatregelen in woningen



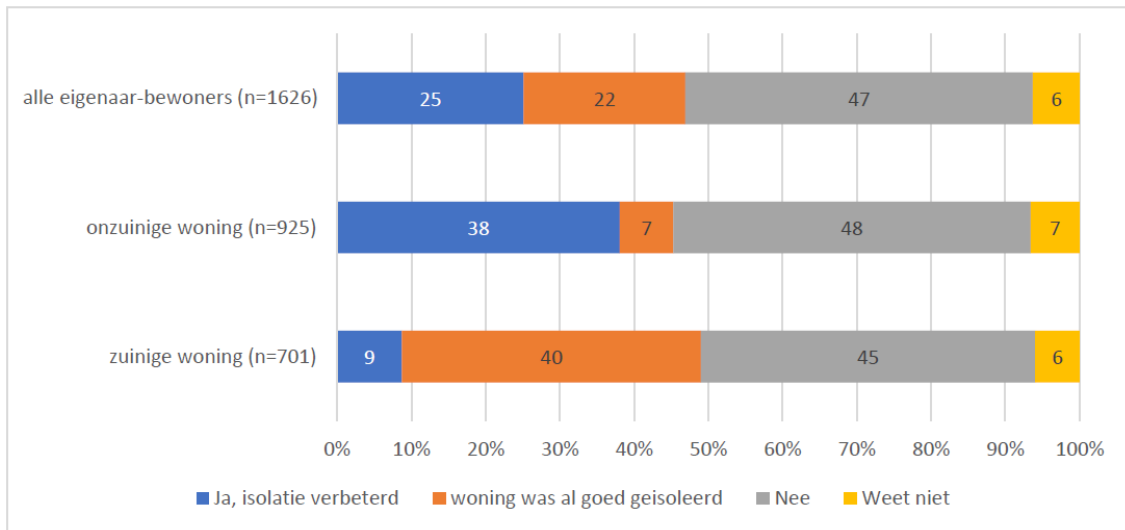
Bron: energiecijfers.databank.nl, Klimaat- en Enerverkenning 2022

Het aantal uitgevoerde maatregelen zegt nog weinig over de mate van isolatie van de hele woningvoorraad. Een empirische studie naar de energiebesparing in particuliere woningen laat zien dat in 78% van de gerenoveerde woningen 1 of 2 energiebesparende maatregelen zijn doorgevoerd. Dit wordt gezien als bewijs voor een gebrek aan diepgaande renovatie (Filippidou, Nieboer, & Visscher, 2019). Een uitgebreide enquête van het SCP onder 1626 eigenaar-bewoners in 2019 vond dat een kwart isolatiemaatregelen had genomen in hun huidige woning. Dit aandeel is groter bij onzuinige⁴⁴ woningtypen (38%) en bij woningen gebouwd vóór 1975 (45%). De meeste woningeigenaren hadden echter nog geen maatregelen genomen, zowel in zuinige als onzuinige woningen, zie Figuur 10. Dat wil niet zeggen dat in hun woning geen isolatiemaatregelen zijn genomen; mogelijk zijn die door vorige eigenaren aangebracht. Anderzijds ziet 16% van de eigenaren van zuinige woningen nog verbetermogelijkheden, wat opvallend hoog is gezien hun label A of B. Bij onzuinige woningen ziet slechts 32% verbetermogelijkheden, wat verrassend laag is aangezien driekwart ervan energielabel D-G heeft (SCP, 2021, p. 53).

⁴⁴ Het SCP noemt woningen onzuinig als ze grondgebonden én gebouwd zijn vóór 2000 én energielabel C t/m G hebben.

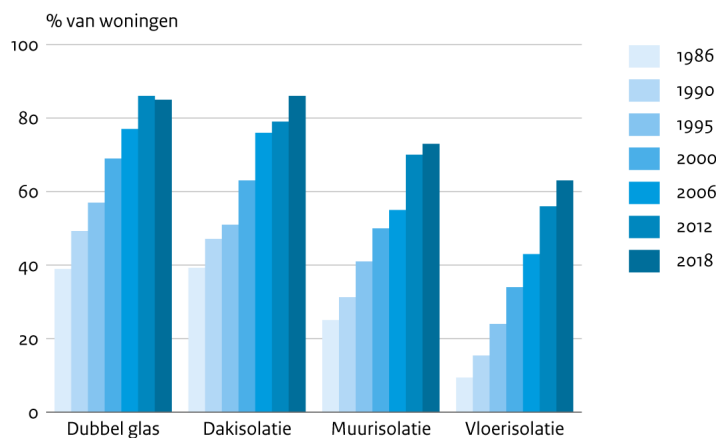
Figuur 10

Frequentie van isolatie-adoptie in zuinige en onzuinige woningen. Bron: figuur 2.1 in (SCP, 2021)



Mogelijk is de isolatiegraad van de woningvoorraad beter dan bovenstaande grafiek doet vermoeden. Tussen 1986 en 2018 is de isolatiegraad sterk gestegen, zie Figuur 11. Een belangrijk deel van deze groei is het gevolg van de bouw van goed geïsoleerde nieuwbouwwoningen en sloop van slecht geïsoleerde woningen. De cijfers zijn afkomstig uit een steekproef van circa 4500 huishoudens (koop en huur) die elke zes jaar wordt herhaald (met de energiemodule bij het jaarlijkse Woononderzoek). Koopwoningen zijn met een isolatiegraad van gemiddeld 80% iets beter geïsoleerd dan huurwoningen (73%). De isolatiegraad is hier gedefinieerd als het percentage van het oppervlak van de betreffende bouwdelen van een woning dat is geïsoleerd. Kleine woningen tellen hierin even zwaar mee als grote woningen. Bij deze isolatiegraad wordt geen onderscheid gemaakt naar dikte of kwaliteit van de isolatie, dus als de isolatiegraad 100% bedraagt kan er nog steeds verbetering mogelijk zijn door betere isolatie (PBL, 2020c). Het is opvallend dat muurisolatie minder vaak voorkomt dan dubbel glas en dakisolatie terwijl de energiebesparing daarvan het hoogst is, zeker in woningen met een relatief groot muuroppervlak.

Figuur 11
Isolatiegraad van woningvoorraad



Bron: WoON module energie

PBL/janzo
www.clo.nl/nlo38307

De isolatiegraad van woningen is tussen 1986 en 2018 meer dan verdubbeld. In 2018 was gemiddeld 86% van het dakoppervlak van een woning geïsoleerd, terwijl 85% van het glasoppervlak bestond uit dubbel glas. Van het muuroppervlak was 73% geïsoleerd en vloerisolatie was aangebracht bij gemiddeld 63% van het vloeroppervlak van een woning.

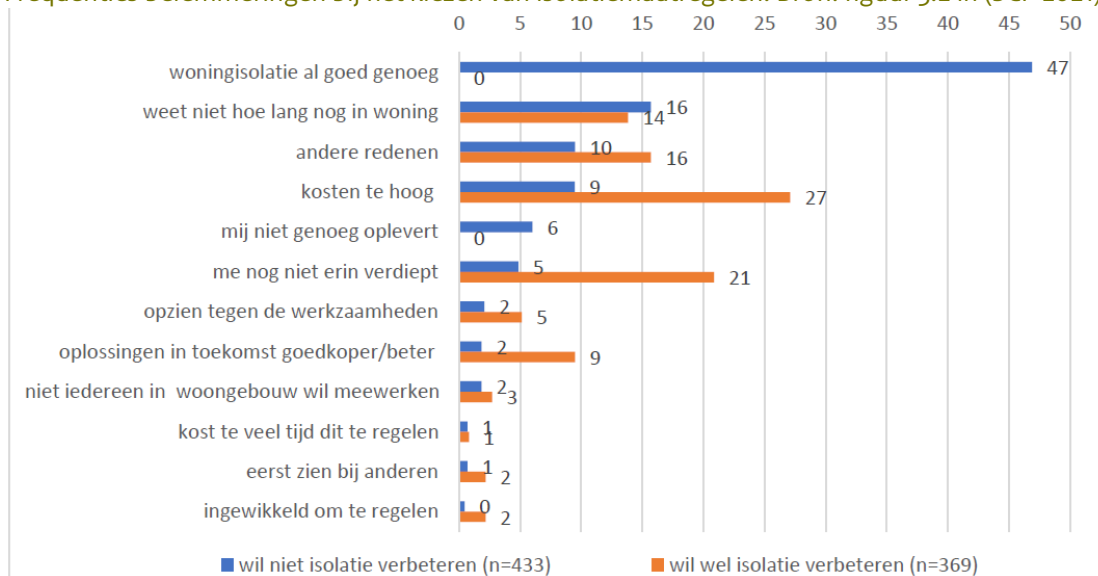
4.6.2 Veel praktische belemmeringen voor isoleren woningen

In 2019 heeft het SCP uitgebreid onderzoek gedaan naar de praktische belemmeringen van woningeigenaren om hun woning te verduurzamen (SCP, 2021). Op grond van scores van respondenten op gedragingen (isolatie verbeteren, zonnepanelen nemen, informatie zoeken), intenties (een aardgasvrij alternatief voor de CV-ketel overwegen, een bijdrage willen leveren) en de houding ten opzichte van klimaatverandering kon het SCP vijf latente groepen woningeigenaren onderscheiden: *voorlopers*, *bereidwillige volgers*, *middengroep*, *terughoudenden* en *achterblijvers*. De voorlopers en bereidwillige volgers (samen 39%) zijn het verst gevorderd in de beweging naar verduurzamen van de woning. Het andere uiterste van het spectrum wordt gevormd door de achterblijvers (8%), als een groep die nauwelijks meebeweegt. Het overgrote deel van de onderzoekspopulatie (54%) bevindt zich hier tussenin en bestaat uit de sterk op elkaar lijkende middengroep en een groep terughoudenden. Deze gevonden groepsverdeling duidt enerzijds op een beweging naar een bredere acceptatie en adoptie van woningverduurzamingsmaatregelen. Anderzijds lijkt sprake van inertie bij de grote meerderheid en een mogelijke weerstand in de kleine achterhoede, die niet te motiveren lijkt of niet de mogelijkheid heeft om woningverduurzaming zelf op te pakken.

Deze latente groepen hebben verschillende motieven voor hun opstelling ten aanzien van isoleren, zie Figuur 12. Van de mensen die de isolatie niet willen verbeteren denkt bijna de helft (47%) dat hun woningisolatie al goed genoeg is. Daarnaast denkt 17% (9+6+2) dat de kosten nu te hoog zijn, isoleren niet genoeg oplevert of dat het op termijn goedkoper wordt. Voor hen zijn financiële motieven doorslaggevend. 16% weet niet hoe lang ze nog in hun huis blijven wonen. Deze groep woningeigenaren zou baat kunnen hebben bij meer informatie over de voordelen van na-isolatie, bijvoorbeeld over comfortverbetering en de waardevermeerdering van goed geïsoleerde woningen. Hoge kosten worden nogal eens verward met moeilijk te financieren en in die gevallen kan voorlichting over goedkope financieringsmogelijkheden van belang zijn.

Figuur 12

Frequenties belemmeringen bij het kiezen van isolatiemaatregelen. Bron: figuur 3.2 in (SCP 2021)



Bij de groep woningeigenaren die wél de isolatie willen verbeteren, vormen hoge kosten de belangrijkste beperking (27%) en wacht 9% tot het goedkoper wordt. Die twee groepen zouden geholpen zijn met goedkope financieringsmogelijkheden en subsidies.

Opvallend genoeg heeft 21% van de bereidwilligen zich nog niet verdiept in de mogelijkheden. Ook daar zou betere voorlichting kunnen helpen maar het kan best lastig zijn de aandacht van deze mensen te krijgen. In deze groep zitten ook 9% opportunisten die wachten tot alles goedkoper wordt en 16% noemt andere belemmeringen. Wellicht heeft de gasprijsexplosie van 2022 deze groep toch in beweging gekregen.

In beide groepen voelt 14% of 16% zich belemmerd door onzekerheid over hoe lang men nog in de huidige woning blijft wonen. Als zij zeker zouden weten dat hun investering in na-isolatie resulteert in een minstens zo grote verhoging van de verkoopwaarde van hun huis, dan zou dat argument minder zwaar kunnen wegen of zelfs kunnen wegvallen.

Rentabiliteit van energiebesparing moeilijk te bepalen.

Uit bovenstaande studie blijkt dat 26% van alle ondervraagden⁴⁵ nu geen isolatiemaatregelen neemt omdat ze dat onvoldoende financieel aantrekkelijk vinden. Het is voor woningeigenaren wel erg moeilijk vast te stellen of zo'n investering rendabel zal zijn (of achteraf rendabel is geweest). Vooraf is onbekend hoe het energieverbruik en de energieprijzen zich de komende 30 jaar (de technische levensduur van de meeste isolatiemaatregelen) gaan ontwikkelen. Achteraf is dat wel bekend, maar dan is onbekend hoe hoog het energieverbruik zou zijn geweest zonder de investering. Vóór aanvang van de investering is wel een afweging te maken van de jaarlijkse kosten van aflossing van een lening om de investering mee te betalen en van de verlaging van de energierekening in het eerste jaar na uitvoering van de maatregelen. Zo'n benadering veronderstelt impliciet dat de energierekening de komende jaren constant blijft, terwijl bijna zeker is dat dat niet zal gebeuren. Mensen die een correcte rendementsberekening willen maken, missen daarvoor dus de benodigde informatie. Wie de investering uit spaargeld betaalt, kan de gemiste jaarrente beschouwen als financieringskosten, maar niet iedereen doet dat. Veel particulieren maken onvolledige rendementsberekeningen en kijken waarschijnlijk eerder naar veranderingen in kasstromen dan naar een volledig overzicht van alle kosten en baten. Zij nemen maatregelen die geadviseerd worden en die ze kunnen betalen, ofwel: waarvoor ze het geld kunnen missen of lenen zonder dat andere bestedingen in de knel komen. Wie het kan betalen wordt blij van een lagere energierekening, zeker in tijden dat energieprijzen sterk stijgen. Als energieprijzen vervolgens weer dalen, is men opnieuw blij met een lagere energierekening. Achteraf berekenen of de investering rendabel is geweest wordt waarschijnlijk zelden gedaan. Het is prettiger om te bedenken dat de maatregel comfortverbetering heeft opgeleverd en dat je een (kleine) bijdrage hebt geleverd aan de oplossing van het klimaatprobleem.

Omdat het voor particulieren lastig is om te bepalen wat energiebesparing hen netto gaat kosten, is het voor hen ook lastig om te beoordelen of de financiële steun die ze van de overheid ontvangen voldoende is om een eventuele stijging van woonlasten te compenseren. Dat biedt de overheid vrijheidsgraden bij het bepalen van de financiële steun die burgers nodig hebben om tot actie over te gaan. Doordat de overheid energiebesparing propageert en subsidieert en doordat adviseurs het effect van isolatiemaatregelen vaak overschatten, ontstaat bij burgers gemakkelijk het beeld dat na-isoleren rendabel is.

⁴⁵ Berekend uit $27+9=36\%$ van 369 plus $9+6+2=17\%$ van 433 gedeeld door $369+433$ is 26 procent

4.6.3 Beleidsopties voor meer energiebesparing in woningen

Willen, kunnen en doen

Voordat mensen in actie komen, moet een aantal voorwaarden zijn vervuld. In de wetenschappelijke literatuur spreekt men over *willen* (gemotiveerd zijn), *kunnen* (in staat zijn en de mogelijkheden hebben) en *doen*. Bij elk van die gedragsbepalende componenten kunnen belemmeringen optreden, die op hun beurt met interventies of maatregelen kunnen worden weggenomen.

Het SCP heeft in 2020 een literatuurstudie uitgevoerd om de effectiviteit in kaart te brengen van allerlei interventies om het willen, kunnen en moeten (doen) verduurzamen van koopwoningen te bevorderen (SCP, 2021a) (SCP, 2021b). In die studie had verduurzaming betrekking op na-isoleren van woningen en aanbrengen van PV-panelen, maar de resultaten lijken ook van toepassing op andere vormen van energiebesparing in woningen. Tabel 24 geeft een samenvatting van de effectiviteit van beleidsopties voor die toepassingen.

Veel beleidsopties mogelijk

Uit dat overzicht valt op te maken dat er in beginsel een groot aantal interventies mogelijk is om woningeigenaren tot verduurzaming aan te zetten. Verder valt het volgende op:

1. Van veel interventies is het effect klein of onbekend.
2. Energielabels zouden kunnen bijdragen aan verbetering van het willen (meer bewustwording over energieprestatie eigen woning, meer kennis over opties, extra motivatie) en kunnen aanzetten tot meer doen (als grondslag van verplichtingen). De bijdrage aan meer kennis en extra motivatie lijkt echter beperkt te zijn.
3. Lage inkomensgroepen (die financiële ondersteuning het hardst nodig hebben) lijken moeilijk te bereiken met financiële interventies, zoals: aankoopsubsidies, subsidie op toekomstige stroomproductie met zonnepanelen, goedkope leningen, energiebesparingskrediet van banken, label-gedifferentieerde belastingtarieven, regulerende energiebelasting.
4. Subsidies en algemene financiële ondersteuning worden effectief genoemd, zonder veel toelichting over de randvoorwaarden waaronder dat geldt en zonder de kanttekening dat effectiviteit en doelmatigheid (efficiëntie) van subsidies vaak tegengesteld gecorreleerd zijn (hogere subsidies zijn lang niet altijd evenredig effectiever maar wel minder efficiënt).

Naast koopwoningen moeten ook de huurwoningen verduurzaamd worden. Met betrekking tot *willen* verduurzamen is er vermoedelijk weinig verschil tussen verhuurders en eigenaar-bewoners, maar bij *kunnen* verduurzamen treden wel verschillen op. Verhuurders hebben waarschijnlijk een groter doe-vermogen dan particulieren maar moeten wel aan andere financiële criteria voldoen. Dat betekent dat andere interventies nodig zijn om belemmeringen bij verhuurders weg te nemen. Meestal zijn die van juridische of financiële aard, zoals een instemmingseis van minimaal 70% van alle huurders en minimumeisen aan financiële kentallen voor woningcorporaties (zoals solvabiliteit en risico-opslagen op kapitaalsrente).

Het brede palet aan belemmeringen betekent dat de overheid een breed pakket aan beleidsinstrumenten zou moeten inzetten om alle woningeigenaren tot na-isoleren aan te zetten. Desondanks zal een deel van hen (de 8% achterblijvers uit de SCP-studie) waarschijnlijk niet bereikt worden.

Tabel 25

Effect van interventies op willen, kunnen en moeten verduurzamen van koopwoningen. Bron: SCP 2021b

Handelingsperspectief	Effect op woningverduurzaming door eigenaar-bewoners
Willen verduurzamen	
Bewustwording over energieprestatie van woning	
Informatieve campagnes	Voornamelijk effectief op probleembesef en beperkt effectief op kennisniveau; onvoldoende om motivatie te vergroten of gedragsverandering te realiseren.
Energielabel	Effectief.
Energie-audit (maatwerkadvies)	Beperkt; veel <i>free-riders</i> dus hoge kosten.
Kennis over opties	
Algemene informatiecampagnes	Beperkt; wel relevant onderdeel van een beleidsmix.
Gerichte informatie	Effectief.
Energielabel	Beperkt (20-40% vond EPC nuttig).
Energieaudits (maatwerkadvies)	Effectief mits er een opvolgactie is.
Advisering via energieloket of andere infrastructuur rond kennisdeling	Effectief bij juiste timing (verhuizing, pensioen; bij routinematig woningonderhoud/modernisering).
Motiveren	
Impuls tot investering in woningverduurzaming	
Energielabel	Wisselend; minderheid kwam in actie, maar energielabel is zelden doorslaggevend; positief neveneffect: aanpassing energiegedrag bij een minderheid. Indirect (via hogere woningwaarde), maar lastig te onderscheiden van andere factoren.
Energielabel met gestandaardiseerde energie-audit	Onduidelijk; behoefte eigenaren aan meer gepersonaliseerd advies.
Energielabel met energieadvies op maat	Weinig; mogelijk hoger als duidelijk wordt hoeveel kan worden bespaard.
Integrale procesondersteuning	Effectief, randvoorwaarde aandacht voor professionalisering intermediairs.
Inzicht in energieprestatie woning	
Warmtebeelden (visualisering warmteverlies)	Effectiever dan energie-audit; ook op motivatie tot energiebesparingsgedrag.
Inzicht in eigen gedrag via sociale vergelijking	
Social learning van voorlopers	Effectief, zeker op geïnteresseerde volgers, onduidelijk hoe groot.
Vergelijking met wedstrijdement	Tijdelijk effectief.
Kunnen verduurzamen	
Betaalbaarheid van woningverduurzaming voor algemene populatie bevorderen	
Belastingen	Effect op energierekening; maar zeer nadelig voor lagere inkomensgroepen. Weinig effectief voor verduurzaming, zolang verschil tussen kosten en baten blijft bestaan; negatief effect op adoptie zonnepanelen.
Algemeen: financiële ondersteuning	Effectief, maar <i>free-riding</i> .
Algemeen: financiële prikkels met advisering	Effectief.
Aankoopsubsidie	Effectief; eenvoudig, relatief goedkoop; niet interessant voor lagere inkomensgroepen; <i>free-ridereffect</i> ; <i>rebound-effect</i> . Verschillende subsidies in combinatie minder effectief dan elke subsidie afzonderlijk.
Subsidie op toekomstige stroomproductie (eigen opwek)	Zeer effectief; goedkoper dan aankoopsubsidie, maar vergroot ongelijkheid tussen inkomensgroepen.
Lening/ hypotheek	Minder effectief dan subsidie; niet geschikt voor lagere-inkomensgroepen; lastig voor lager opgeleiden.
Energiebesparingskrediet (door banken)	Nauwelijks effectief; buiten bereik van lagere-inkomensgroepen; doelgroep voor banken niet interessant.
Regulerende energiebelasting	Effectief; maar vergroot ongelijkheid tussen inkomensgroepen.
Salderingsregeling	Zeer effectief, maar <i>free-ridereffect</i> ; onduidelijk wat het effect zal zijn van afbouwen regeling.
Gebouwgebonden financiering	Mogelijk effectief, want interessant gevonden door eigenaren; onduidelijkheid over fiscale aftrekbaarheid; indien niet aftrekbaar, dan waarschijnlijk weinig vraag.
Kwijtschelden overdrachtsbelasting	Effectief; risico van belastingontwijking.
Differentiatie belastingtarieven naar energielabel	Onduidelijk; ongunstige regeling voor lagere-inkomensgroepen in onzuinige woningen.
Investeringsgaranties	Effectief; geen informatie over randvoorwaarden.
Betaalbaarheid bevorderen voor groepen met lagere inkomens / energiearmoede	
Toelage voor (vernieuwende) energiemaatregelen	Zeer effectief (in VS, wordt in Europa getest).
Leasen zonnepanelen en gebouwgebonden financiering	Effectief bij lagere inkomensgroepen.
'Doe-vermogen' vergroten	
Uitstelgedrag reduceren	
Hulp bij follow up / uitvoering	Effectiever dan bewustzijn bevorderen.
Besluitvorming ondersteunen	
Lijst aanbevolen maatregelen (bij energielabel)	Niet effectief; tekortkomingen in lijst belemmeren besluitvorming.
Besluitvorming én uitvoering begeleiden	
Integrale procesondersteuning	Effectief, onder randvoorwaarde van aandacht voor onafhankelijkheid, betrouwbaarheid en professionalisering van intermediairs.
Moeten verduurzamen	
Regelgeving	
Verplichting	
Energielabel bij verkoop woning	Onbekend; definitief energielabel door ca. 50% aangevraagd; onduidelijk in hoeverre labelsprongen t.o.v. voorlopig energielabel.
Minimaal label C bij overdracht woning	Onbekend.
Gevelisolatie bij overdracht woning	Effectief (verbeterde isolatiegraad in 40% woningen).
Indirect verplichtend	
Stimuleren eigenaren via verplichtingen of energiebedrijven (EEOs)	Voorzichtig positief over effect op grond van eerste bevindingen; nog geen brede evaluatie beschikbaar.
Standaardaanpak (door consortia van intermediaire stakeholders)	Niet effectief In de koopsector; koopwoningen vragen om maatwerk.
Normering	
Thermische standaarden	Effectief in sommige Europese landen, randvoorwaarde normen niet te hoog gesteld.
Streefwaarden	Niet effectief bij strenge streefwaarden; gaan ten koste van draagvlak en ze zijn daarmee negatief voor effectiviteit.

4.6.4 Huidig en voorgenomen beleid voor energiebesparing in woningen

Effect huidig beleid op energiebesparing tot 2030 onzeker

In het Klimaatakkoord van 2019 zijn veel afspraken gemaakt om energiebesparing te versnellen. Die afspraken worden omgezet in beleid en het kabinet heeft eind 2021 en begin 2023 veel geld beschikbaar gesteld om energiebesparing te stimuleren. Volgens de KEV-2022 is het te verwachten effect van al die stimulansen tot 2030 beperkt, ondanks een verwachte toename van het aantal hybride warmtepompen van circa 50.000 in 2020 naar 340.000 in 2030. De hoge gasprijzen van 2022 hebben veel mensen doordrongen van het belang van energiebesparing en gestimuleerd om maatregelen te nemen. Sindsdien zijn warmtepompen populair. Installateurs verwachten in 2023 al 170.000 warmtepompen te installeren. Het is onduidelijk of dat effect structureel is en blijft als de gasprijzen weer gaan dalen. Het is ook onduidelijk hoeveel energie met die maatregelen daadwerkelijk bespaard gaat worden. De kans is groot dat het verbeteren van slecht geïsoleerde woningen op korte termijn verlichting gaat bieden op hoge energierekeningen, maar op lange termijn (als de gasprijzen weer zijn gedaald) vooral gaat resulteren in comfortverbetering voor bewoners en dus minder energiebesparing gaat opleveren.

4.6.5 Hoe is energiebesparing bij woningen nog te versnellen?

In voorgaande paragrafen is betoogd dat energie besparen veel voordelen heeft maar ook wordt gehinderd door allerlei obstakels die het huidige rijksbeleid maar ten dele wegneemt. De resterende hindernissen verschillen per methode van energiebesparing en de mogelijke oplossingen dus ook.

Selectiever verwarmen

Het selectiever verwarmen van woningen stuit op hardnekkig stookgedrag dat erg moeilijk is te veranderen. Beter feedback over het actuele energieverbruik kan wel tot besparingen leiden, maar het bereikte effect is tot nu toe bescheiden. Selectiever verwarmen kost aandacht en moeite en wordt al snel gezien als verlies van comfort. Zolang het niet de algemene norm is, is het moeilijk om daarvan af te wijken. Bij hele hoge energieprijzen zal de financiële noodzaak toenemen om beter op energieverbruik te letten, vooral bij huishoudens met lage inkomens. Maar drastisch verhogen van gasprijzen stuit op gevoelens van rechtvaardigheid omdat daarmee de mogelijkheid van comfortabel wonen wordt ontnomen. Het zou wellicht helpen als de overheid het selectief verwarmen krachtig zou promoten zodat het de nieuwe norm wordt. De recente aansporingen om de thermostaat op 19 graden te zetten zijn een eerste stap in die richting.

Meer en sneller na-isoleren

Het na-isoleren van woningen stuit op allerlei bezwaren (zie paragraaf 4.6.2) van praktische en financiële aard. De praktische bezwaren komen vermoedelijk het meest voor. Men wil zich er niet in verdiepen (nu even niet) of ziet op tegen de tijdelijke ongemakken rond de werkzaamheden of in aanloop daar naartoe (de zolder leeg halen). De overheid probeert dit 'niet willen' te doorbreken met informatie over het maatschappelijk belang en de financiële voordelen van energie besparen. Daarnaast wil de overheid financiële bezwaren wegnemen met subsidies en gunstige financieringsmogelijkheden. Met extra energiebelasting wordt aardgas duurder gemaakt, wat de financiële baten van isoleren vergroot. Maar dat is alleen voordelig voor mensen die willen en kunnen isoleren. Bij alle andere huishoudens leidt duurder aardgas alleen tot een hogere energierekening. Daarnaast is het moeilijk om aan betrouwbare informatie te komen over aannemers die het werk degelijk,

snel en prettig kunnen uitvoeren en over te verwachte kosten en besparingen. Ondanks alle financiële stimulansen zijn er goede redenen te twijfelen aan de financiële rentabiliteit van vergaande isolatiemaatregelen, zoals in voorgaande paragrafen is betoogd.

De kosten van na-isolatie zouden kunnen dalen door efficiëntere aanbesteding en administratie en door schaalvergroting en ruimtelijke klustering van opdrachten. Diverse pogingen om dat te bereiken (contingenten-aanpak, gebundelde aanbesteding) hebben nog niet tot merkbare kostendaling geleid. Door schaarste op de arbeidsmarkt en inflatie zijn de isolatiekosten de laatste tijd juist gestegen.

Het isoleren van spouwmuren wordt gehinderd door de onderzoeksplicht voor de aanwezigheid van vlermuizen, die recent meer aandacht van handhavers heeft gekregen (RvS, 2022). De onderzoekskosten variëren tussen 1000 tot 4000 euro per woning (Zoogdiervereniging, 2023). Dat kan vooral voor particuliere woningeigenaren een drempel zijn om spouwmuurisolatie toe te passen. Gemeenten zouden de onderzoekskosten voor hun rekening kunnen nemen en dat onderzoek kunnen coördineren zodat de kosten per woning dalen.

Met woningcorporaties is onlangs afgesproken dat alle 250.000 huurwoningen met een E-, F- en G-label in 2028 uit de sector zijn verdwenen, in ruil voor afschaffing van de verhuurdersheffing. Ook zullen alle afgeschreven cv-ketels in woningen met label D of beter zoveel mogelijk worden vervangen door een duurzamer alternatief. Eerdere afspraken over verduurzaming van corporatiewoningen (gemiddeld label C in 2020) waren niet succesvol. Mogelijk is het vervallen van de verhuurdersheffing nu een voldoende stimulant. Anders zijn strengere sancties nodig om te zorgen dat de nieuwe afspraken dit keer wél tijdig worden nagekomen.

Sneller energie besparen met efficiëntere verwarmingstoestellen

In voorgaande paragrafen is aangetoond dat elektrische en hybride warmtepompen en mogelijk ook warmtenetten efficiënter verwarmen dan hr-ketels. De overheid heeft ervoor gekozen om op korte termijn het gebruik van hybride warmtepompen krachtig te stimuleren. Dat lijkt een verstandige keuze, gezien de onzekerheden over de realisatiekansen van alle opties op lange termijn. Het blijkt niet goed mogelijk om daarover nu al meer zekerheid te krijgen. De verwachting van het Klimaatakkoord dat gemeenten in hun TVW's duidelijke plannen zouden presenteren over de preferente warmteoplossingen die ze vóór 2030 al zouden willen realiseren, is slechts in enkele gemeenten uitgekomen (PBL, 2023tvw). Daarom vragen steeds meer actoren de rijksoverheid om meer regie. Dat plaatst de overheid in een lastige positie omdat de gevolgen van definitieve keuzes nu nog niet kunnen worden overzien. De optie die waarschijnlijk het gemakkelijkst en tegen de laagste nationale kosten gerealiseerd kan worden (hybride warmtepompen met klimaatneutrale gassen), heeft tegelijkertijd de grootste onzekerheid over voldoende energiedragers. De optie waarbij lokaal afspraken over energielevering kunnen worden gemaakt (MT-warmtenetten) kost echter ook de meeste moeite en geld om te realiseren, zeker in combinatie met vergaande na-isolatie. Bij deze onzekerheden is het dus lastig kiezen voor de lokale overheid. Daarom is het niet verwonderlijk dat de definitieve keuze voor verwarmingstoestellen is uitgesteld en eerst wordt aangestuurd op na-isolatie. Met die keuze wordt in ieder geval bereikt dat woningeigenaren nu een handelingsperspectief hebben en dat bewoners op termijn hun huis comfortabel kunnen verwarmen, ongeacht het type verwarmingstoestel, ook al is dat niet de goedkoopste route.

Verleiden of verplichten?

In een evaluatie van het energiebesparingsbeleid in 2014 werd al geconcludeerd dat meer dwingend beleid nodig was om versnelling te realiseren (PBL, 2014). Een groot deel van de ondervraagde

woningeigenaren, huurders en gebouwbeheerders van utiliteitgebouwen vond dat de overheid een stap verder mocht gaan dan toen gebeurde, met extra regels om bestaande gebouwen energiezuiniger te maken. In een recentere beleidsdoorlichting werd echter geconcludeerd dat “er nauwelijks wettelijke normen geïntroduceerd (zijn) die het doelbereik dichterbij konden brengen (op de label C-verplichting van kantoren na)” (CE Delft, 2022d, p. 10). Sindsdien is normering van verwarmings-toestellen aangekondigd die de toepassing van hybride warmtepompen moet stimuleren. Over het algemeen is de Nederlandse overheid terughoudend om woningeigenaren verplichtingen op te leggen. Zo werden pogingen in een Utrechtse woonwijk, die op een warmtenet was aangesloten, om de levering van kookgas te beëindigen en daarmee 1,5 miljoen euro voor vernieuwing van het gasnet te besparen, lange tijd door bestaande regelingen geblokkeerd⁴⁶. Het heeft ook jaren geduurd voordat woningeigenaren verplicht werden om bij verkoop een officieel energielabel te overleggen. Politici vonden het onwenselijk dat burgers daarvoor 200 – 300 euro kosten moesten maken. Beide voorbeelden illustreren dat de Nederlandse overheid vooral wil sturen op ‘weten, willen en kunnen’ en slechts in uitzonderlijke gevallen, als dat allemaal na lang proberen niet helpt, wil overgaan tot dwingende instrumenten om burgers tot ‘doen’ aan te zetten. Dwang lijkt vooral problematisch als individuele vrijheden moeten worden beknot om maatschappelijke problemen op te lossen.

Drastisch ontzorgen

Energie besparen is wellicht te versnellen door het veel eenvoudiger te maken. Nu zijn woningeigenaren veel tijd kwijt met zoeken naar informatie over technische mogelijkheden en kosten en naar diverse kundige betrouwbare adviseurs en uitvoerders. Met veel verschillende partijen moet worden afgestemd: de energiecoach, aannemer, installateur, energieleverancier, financieel adviseur, hypotheekverstrekker, gemeente. Het zou veel makkelijker zijn als dat allemaal bij één instantie met één aanspreekpunt kon worden geregeld. Hiervoor zijn al veel ideeën geopperd en uitgewerkt, maar het blijft nog pionieren. In alle gevallen blijft het initiatief bij de woningeigenaar en biedt de overheid vooral ruimte aan marktpartijen om hier kansen te pakken.

Het is ook denkbaar – in theorie – dat de overheid het initiatief neemt tot bepaalde vormen van energiebesparing. Bijvoorbeeld door aan te kondigen dat alle spouwmuren gratis geïsoleerd kunnen worden, tenzij de woningeigenaar daar bezwaar tegen maakt. Door de uitvoering (inclusief onderzoek naar aanwezigheid van vleermuizen) te laten aanbesteden en buurtgewijs uit te voeren, kunnen vermoedelijk flinke kostendalingen worden bereikt.

⁴⁶ Begin 2020 nam de Tweede Kamer een motie aan die de gemeente Utrecht verbiedt bewoners te dwingen van aardgas af te stappen. Door gebruik te maken van Artikel 7ag, zevende lid, van het Besluit uitvoering Crisis- en herstelwet is de wijk Overvecht-Noord sinds 2023 het enige specifiek aangewezen kookgasvrije gebied waar woningen onder voorwaarden gedwongen van het gas kunnen worden afgehaald (Steevensz & Harten, 2023).

Conclusie

Als het drastisch ontzorgen geen grote vlucht gaat nemen, zijn waarschijnlijk meer dwingende beleidsinstrumenten nodig om energiebesparing te versnellen. Maar dwang botst op de Nederlandse traditie om gedragsverandering bij voorkeur te stimuleren met voorlichting, convenanten, subsidies en heffingen. Financieel aantrekkelijk maken van vergaande energiebesparing kan alleen met langdurig veel subsidie. Hoge heffingen op aardgas kunnen ook effectief zijn maar die zullen (zonder compensatie) leiden tot onacceptabel hoge energierekeningen. Actievere voorlichting, gericht op het creëren van een nieuw normaal van selectieve verwarming zou effectief kunnen zijn maar staat nog ver af van de overheersende opvattingen.

4.7 Energiebesparing in de dienstensector

4.7.1 Manieren van energie besparen in utiliteitsgebouwen

In dit hoofdstuk is de gebouwde omgeving (enigszins kunstmatig) gesplitst in woningen en de dienstensector, ofwel de utiliteitsgebouwen in de gebouwde omgeving. Die uitsplitsing is gemaakt omdat de mogelijkheden voor energiebesparing in beide typen gebouwen sterk van elkaar verschillen, evenals de overwegingen van gebouweigenaren om energie besparende maatregelen te nemen en de belemmeringen die ze daarbij ondervinden.

De dienstensector verbruikt voornamelijk aardgas voor verwarming van gebouwen en elektriciteit voor verlichting, koeling, ventilatie, apparaten en ICT (Menkveld M., 2020). Er wordt ook aardgas gebruikt voor warmwaterbereiding en koken. Daarnaast wordt in een deel van de utiliteitsgebouwen energie verbruikt voor het productieproces, zoals brood bakken, databeheer, sauna's en zwembad verwarmen, etc. Bij het inventariseren van opties voor energiebesparing is het van belang onderscheid te maken in energie voor ruimteverwarming (en koeling) en energie voor productieprocessen. Elk van die toepassingen verschilt namelijk in het type maatregelen voor energiebesparing, de kosten ervan en het besparingspotentieel.

Om de procesenergie klimaatneutraal te maken, moet energiebesparing worden gecombineerd met overschakeling op klimaatneutrale energiedragers zoals groene stroom of schone gassen. In veel gevallen ligt elektrificatie voor de hand. Per type productieproces zullen specifieke aanpassingen van productiemethoden ontwikkeld en toegepast moeten worden. De verbruikte elektriciteit moet klimaatneutraal worden gemaakt met maatregelen die de elektriciteitssector gaat nemen. Wegens gebrek aan bruikbare studies en voldoende gedetailleerde data zijn de toekomstige mogelijkheden voor aanpassingen van productieprocessen in utiliteitgebouwen in deze studie niet kwantitatief onderzocht.

Het energieverbruik voor ruimteverwarming kan klimaatneutraal worden gemaakt door gebouwen beter te isoleren en door over te schakelen op efficiëntere verwarmingsapparatuur met klimaatneutrale energiedragers zoals groene stroom, duurzame warmte of schone gassen. Ook het toepassen van een energiemanagement- of energiezorgsysteem, het correct inregelen en onderhouden van installaties en gedragsmaatregelen kunnen de warmtevraag verminderen. In dit hoofdstuk analyseren we vooral de potentie van na-isolatie van bestaande utiliteitsgebouwen.

4.7.2 Effecten van na-isolatie tot schillabel B

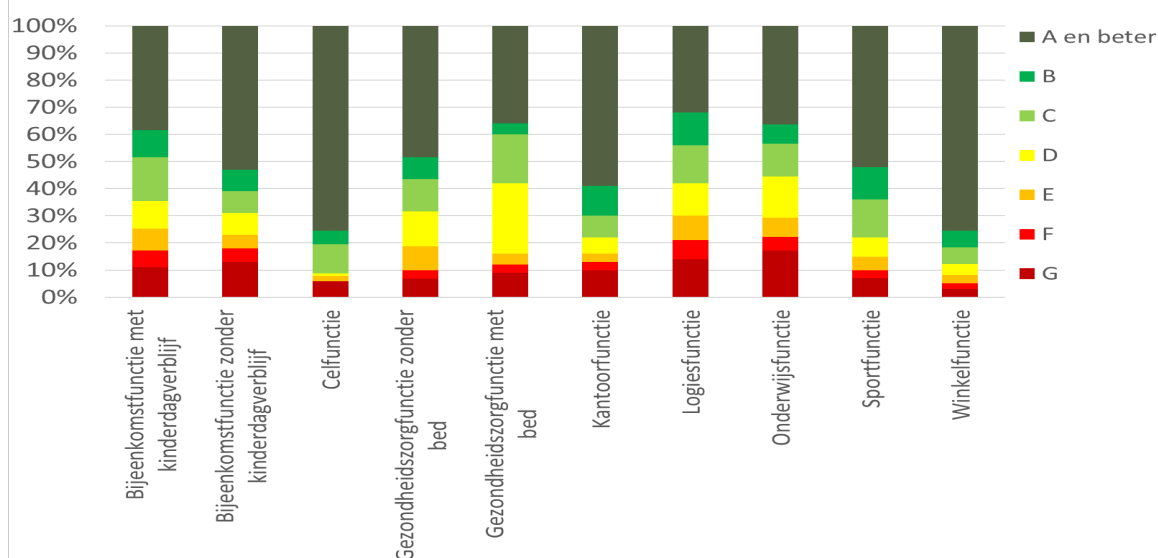
Potentie voor energiebesparing in utiliteitsgebouwen

Het energielabel van een gebouw geeft inzicht in de energieprestatie van het gebouw en de energiebesparende maatregelen die nog mogelijk zijn. Volgens de Startanalyse had in 2019 de helft van de utiliteitsbouw (inclusief industriefunctie) een label B of beter, afgeleid van het energieverbruik. Er is nog aanzienlijke onzekerheid over de daadwerkelijke labelverdeling van utiliteitsgebouwen. Het aantal registraties in de labeldatabase van RVO was eind 2020 met ruim 147 duizend nog zeer beperkt (RVO, 2021). Een energielabel wordt afgegeven voor elk afzonderlijk verblijfsobject (Sipma, 2022k)⁴⁷. Volgens het CBS waren er op 1 januari 2021 in Nederland 1,3 miljoen verblijfsobjecten met bedrijfsactiviteiten, waarvan 0,3 miljoen woningen (Kremer, 2022).

Op 1 januari 2021 is de nieuwe NTA8800 methode ingevoerd waarmee het energielabel van een gebouw bepaald kan worden. TNO heeft een geschatte labelverdeling volgens NTA8800 bepaald van de gehele voorraad utiliteitsgebouwen (zie Figuur 13 en Tabel 25). Hiervoor zijn gegevens over gelabelde gebouwen uit de labeldatabase opgeschaald naar de totale gebouwenvoorraad door een weging naar gebruiksfunctie en bouwjaarklasse toe te passen (Menkveld & Sipma, 2022b). De labelverdeling verschilt sterk tussen de gebruiksfuncties. Het geschatte aandeel van het gebruiksooppervlak met een F of G label varieert bijvoorbeeld van 5% voor gebouwen met een winkelfunctie tot 22% voor gebouwen met een onderwijsfunctie.

Figuur 13

Geschatte labelverdeling volgens NTA8800 per gebruiksfunctie als aandeel van de totale gebruiksooppervlakte van utiliteitsgebouwen⁴⁸. Bron: (Menkveld & Sipma, 2022b).



⁴⁷ Sipma, J., [Het werkelijk energiegebruik van kantoren in het jaar 2019, opgedeeld naar EPA labelklassen, als input voor de ontwikkeling van een EnergieKompas door Innax, TVVL en DGBC](#), TNO, 2022.

⁴⁸ Dit betreft de totale gebouwenvoorraad exclusief gebruiksooppervlak met een industriefunctie (waarvoor geen energielabels bestaan) en exclusief gebruiksooppervlak met een woonfunctie. De gebruikte labeldatabase was actueel op 1 januari 2021.

Tabel 26

Geschatte labelverdeling volgens NTA8800 per gebruiksfunctie als aandeel van de totale gebruiksoppervlakte van utiliteitsgebouwen⁴⁹. Bron: (Menkveld & Sipma, 2022b).

Gebruiksfunctie	G	F	E	D	C	B	A	A+	A++	A+++
Bijeenkomstfunctie met kinderdagverblijf	11%	6%	8 %	10%	16%	10%	17%	12%	7%	2%
Bijeenkomstfunctie zonder kinderdagverblijf	13%	5%	5%	8%	8%	8%	10%	19%	18%	6%
Celfunctie	6%	0%	2%	1%	11%	5%	34 %	33%	10%	0%
Gezondheidszorgfunctie zonder bed	7%	3%	9 %	13%	12%	8%	18%	17%	10%	4%
Gezondheidszorgfunctie met bed	9%	3%	4 %	26 %	18%	4%	8%	19%	6%	3%
Kantoorfunctie	10%	3%	3%	6%	8%	11%	14%	25 %	16%	4%
Logiesfunctie	14%	7%	9 %	12%	14%	12%	14%	12%	5%	1%
Onderwijsfunctie	17%	5%	7%	15%	12%	7%	8%	14%	11%	3%
Sportfunctie	7%	3%	5%	7%	14%	12%	10%	29 %	12%	1%
Winkelfunctie	3%	2%	3%	4%	6%	6%	11%	23 %	28 %	12%

Het kan zijn dat de opschaling van TNO naar de totale gebouwenvoorraad tot een vertekening heeft geleid omdat de gelabelde gebouwen niet representatief zijn voor de hele gebouwenvoorraad. Voor de meeste utiliteitsgebouwen is een energielabel verplicht bij de verkoop, verhuur en oplevering van het gebouw. Als er na de toekenning van het energielabel besparingsmaatregelen genomen worden, wordt het energielabel niet altijd aangepast.

TNO vermoedt dat energiebesparende maatregelen die zijn getroffen zonder dat er een nieuw label is aangevraagd een belangrijk effect hebben op het energieverbruik. TNO heeft de ontwikkeling van het energiegebruik van kantoren in de dienstensector onderzocht (Sipma, 2022k) en een analyse gemaakt van het gas- en elektriciteitsverbruik in de periode 2010-2019 van de kantorenpopulatie in het jaar 2019. Door een identieke populatie door de tijd heen te analyseren, speelt een veranderende samenstelling van de kantorenpopulatie geen rol. De resultaten laten zien dat het gemeten energiegebruik in de onderzochte kantoren is afgenomen terwijl het energielabel ongewijzigd bleef. Het gasverbruik van deze populatie is over de periode 2010-2019 met 17% gedaald (ofwel circa 2% per jaar) en het elektriciteitsverbruik daalde met 29% (ofwel circa 3% per jaar).

Wat is het aardgasverbruik per labelklasse?

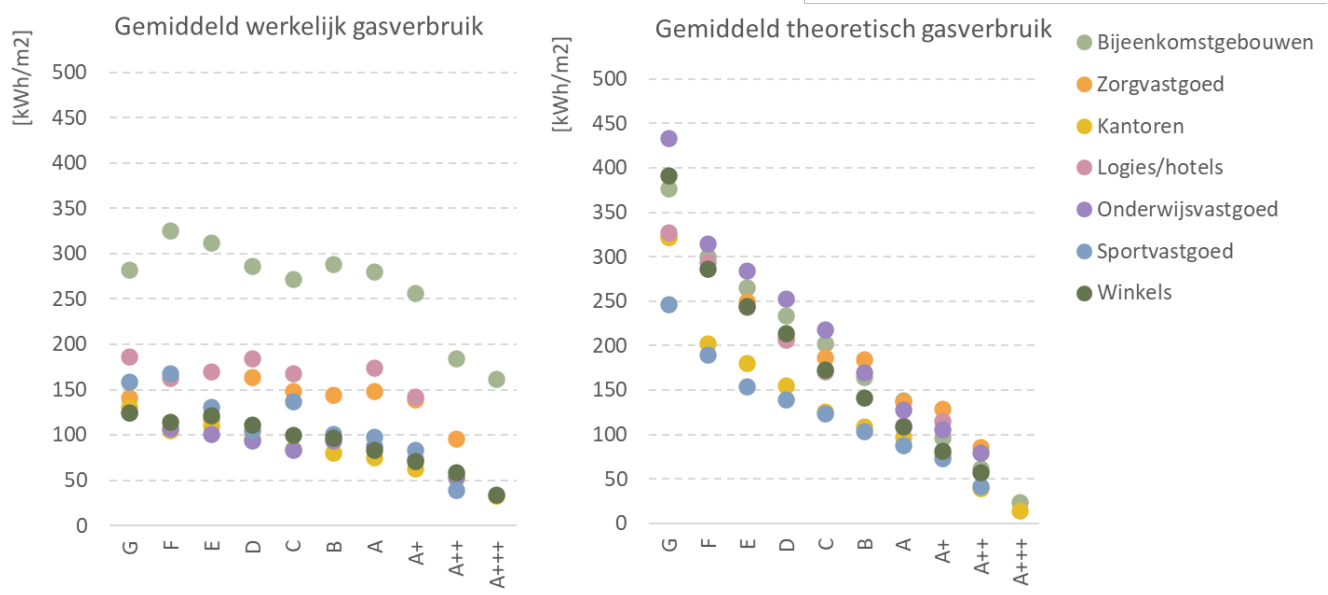
TNO heeft voor de dienstensector het gemiddeld werkelijk aardgasverbruik naar NTA-labelklasse per gebruiksfunctie bepaald. De NTA-gelabelde gebouwenvoorraad is een deelvverzameling van de

⁴⁹ Dit betreft de totale gebouwenvoorraad exclusief gebruiksoppervlak met een industriefunctie (waarvoor geen energielabels bestaan) en exclusief gebruiksoppervlak met een woonfunctie. De gebruikte labeldatabase was actueel tot en met 1 januari 2021.

RVO labeldatabase. Bij de analyse is gebruik gemaakt van het gas- en elektriciteitsverbruik dat het CBS van de netwerkbedrijven ontvangt. Deze informatie is gecombineerd met andere databases, zoals de Basisregistratie Adressen en Gebouwen (BAG). Volgens de resultaten van TNO neemt het gasverbruik meestal af met een beter label, terwijl het elektriciteitsverbruik juist toeneemt. Het gemiddeld werkelijk gasverbruik kan worden vergeleken met het gemiddeld theoretisch gasverbruik volgens de NTA8800-methode (zie Figuur 14). De vergelijking laat zien dat het gemiddeld theoretisch gasverbruik per labelklasse sterk afwijkt van het gemiddeld werkelijk gasverbruik per labelklasse. Dit fenomeen wordt de energieprestatiekloof genoemd.

Figuur 14

Gemiddeld werkelijk en theoretisch gasverbruik in de dienstensector (volgens NTA8800) per labelklasse. Bron: (Sipma, 2021) (Menkveld & Sipma, 2022).



Tabel 27

Gemiddeld werkelijk gasverbruik in de dienstensector per labelklasse (volgens NTA8800), in kWh per vierkante meter bedrijfsoppervlak. Bron: (Sipma, 2021) (Menkveld & Sipma, 2022).

	G	F	E	D	C	B	A	A+	A++	A+++
Bijeenkomstgebouwen	282	326	312	287	272	289	280	257	185	162
Zorgvastgoed	141	-	118	164	149	144	149	139	96	-
Kantoren	131	105	110	96	85	81	75	63	53	33
Logies/hotels	187	163	170	185	168	-	174	142	-	-
Onderwijsvastgoed	125	107	101	94	84	94	88	73	54	-
Sportvastgoed	159	168	131	105	137	101	98	84	39	-
Winkels	125	114	122	111	100	97	84	71	59	34

Tabel 28

Gemiddeld theoretisch gasverbruik in de dienstensector (volgens NTA8800) per labelklasse, in kWh per vierkante meter bedrijfsoppervlak. Bron: (Sipma, 2021) (Menkveld & Sipma, 2022).

	G	F	E	D	C	B	A	A+	A++	A+++
Bijeenkomstgebouwen	377	300	266	234	202	165	138	96	62	24
Zorgvastgoed	322	-	250	209	187	185	137	129	86	-
Kantoren	322	202	180	155	126	109	97	78	40	15
Logies/hotels	328	294	244	207	171	-	110	115	-	-
Onderwijsvastgoed	434	315	284	253	218	170	128	106	80	-
Sportvastgoed	247	190	154	139	124	104	88	73	42	-
Winkels	392	287	245	214	173	142	109	82	58	-

Verklaringen voor de kloof tussen theoretisch en werkelijk gasverbruik

Uit verschillende onderzoeken is al gebleken dat het berekende theoretisch energieverbruik volgens NTA8800 sterk afwijkt van het werkelijk energieverbruik (van den Brom, Berben, Valk, & Nuiten, 2022). De NTA8800 is een methode die primair bedoeld is voor handhaving en daarom is geaccepteerd dat dit ten koste gaat van aansluiting bij het werkelijk gebruik. Er is bijvoorbeeld uitgegaan van goede uitvoeringskwaliteit en inregeling die wel haalbaar is, maar niet representatief is voor de gemiddelde uitvoerings- en onderhoudspraktijk. Vaak zijn uitgangspunten conservatief gekozen, zodat de rekenwaarde ongunstig is voor de energieprestatie. Ook gebruikersgedrag speelt een rol bij de verklaring voor energieprestatiekloof, bijvoorbeeld het effect dat energiezuinige gebouwen vaak langer en tot hogere temperaturen worden verwarmd (het rebound effect). Omdat er behoefte is aan een rekenmethode die het energiegebruik van individuele gebouwen en energiebesparende maatregelen meer realistisch voorspelt, is de maatwerkadviesmethode ontwikkeld (van den Brom, Berben, Valk, & Nuiten, 2022). Deze methode is gebaseerd op de NTA8800, maar gebruikt een aantal andere aannames en biedt de mogelijkheid voor meer gedetailleerde invoergegevens.

Welke besparing is mogelijk in bedrijfshallen?

Bedrijfshallen hebben in de BAG de industriefunctie en hebben geen energielabel. In bedrijfshallen die op werktemperatuur worden verwarmd kan gasbesparing worden bereikt door na-isolatie, door het tegengaan van warmteverlies bij deuropeningen en door het beter inregelen van de verwarmingsinstallatie. TNO vindt daar een besparingspotentieel op aardgas van slechts 1,8 petajoule (Niessink & Menkveld, 2022). Deze gasbesparing is beperkt omdat bij het vorstvrije deel van de bouwvoorraad de maatregelen voor aardgasbesparing niet van toepassing zijn. TNO geeft aan dat de berekende energiebesparing een onderschatting is, omdat er in werkelijkheid meer energieverbruik en vierkante meters bedrijfshallen zijn dan waarmee is rekening gehouden.

Hoeveel energie kan worden bespaard door isolatie naar schillabel B?

Om een warmtetechnologie te kunnen toepassen kan een bepaald niveau van isolatie vereist zijn. In de berekeningen voor in de Startanalyse is echter verondersteld dat alle utiliteitsgebouwen tot schillabel B worden geïsoleerd, ook als voor het bereiken van voldoende comfort een lagere isolatiegraad in technisch opzicht toereikend zou zijn. Het schillabel is een indicatie van de kwaliteit van de gebouwschil, oftewel de mate van isolatie van het gebouw. Schillabel B moet zo worden

geïnterpreteerd dat de utiliteitsgebouwen een RC-waarde van 3,5 en HR++ glas met een U-waarde van 1,1 hebben.

In het gebruikte Vesta MAIS-model is voor alle utiliteitsgebouwen⁵⁰ een schatting gemaakt van het schillabel in de uitgangssituatie (de huidige isolatiegraad) op basis van het type en de bouwjaar-klasse van het utiliteitsgebouw. Het functioneel ontwerp van VESTA MAIS bevat kentallen voor de functionele warmtevraag van bestaande utiliteitsgebouwen naar gebruiksfunctie, bouwjaar en schillabel (van der Molen, et al., 2021). Op basis van deze gegevens kan een schatting worden gemaakt van de verandering van de functionele vraag naar ruimteverwarming als de gebouwenvoorraad van de dienstensector wordt na-geïsoleerd naar schillabel B, zie Tabel 28. Hier is uitgegaan van de gebouwenvoorraad van de dienstensector in 2019 en geen rekening gehouden met sloop, transformatie van gebouwen en klimaatverandering. Zo berekend, daalt de functionele warmtevraag van 138 PJ naar 79 PJ. Die daling met 59 PJ is waarschijnlijk een overschatting van de te verwachten besparingen. Recentere data in Tabel 26 tonen namelijk een hoger werkelijk gasverbruik voor labelklasse B en kleinere verschillen met lagere labelklassen dan wat in Tabel 28 is gebruikt. Uit combinatie van CBS-data van 122 PJ totale gasverbruik in de dienstensector in 2019 (zie Figuur 16) en een ruwe schatting van 20-25 PJ gasverbruik voor productieprocessen resulteert een gasverbruik voor verwarming van circa 100 PJ; aanmerkelijk minder dan de 138 PJ in Tabel 28. In de Startanalyse is de besparing van de functionele warmtevraag geraamd op 39 PJ. Het verschil met die 59 PJ kan verklaard worden doordat utiliteitsgebouwen met woningen in die studie niet tot de dienstensector zijn gerekend maar als woning zijn behandeld.

Tabel 29

Geschatte functionele vraag naar ruimteverwarming van de dienstensector per gebruiksfunctie in de uitgangssituatie en na verbetering tot schillabel B, in PJ per jaar en in kWh per m² per jaar. Bron: (van der Molen, et al., 2021).

Gebruiksfunctie	Oppervlak in 2019 (mln m ² go)	Warmte- vraag uit- gangssituatie (PJ)	Warmtevraag uitgangssitua- tie (kWh/m ²)	Warmte- vraag bij schillabel B (PJ)	Warmte- vraag bij schillabel B (kWh/m ²)
Bijeenkomst	30	20	187	11	106
Cel	1	1	168	0	103
Gezondheidszorg	31	18	166	11	104
Industrie	155	28	50	18	31
Kantoor	66	33	137	17	70
Logies	18	8	116	5	72
Onderwijs	34	9	78	5	41
Sport	18	7	107	5	77
Winkel	54	15	77	7	36
Totaal	406	138	94	79	54

⁵⁰ Verblijfsobjecten met alleen een industrie functie zijn niet gemodelleerd in de Startanalyse.

4.7.3 Kosten van na-isolatie tot schillabel B

Benodigde investeringen voor isolatie utiliteitsgebouwen tot schillabel B

Begin 2020 heeft Brink groep in samenwerking met TNO een update gemaakt van de investeringskosten van schilspongen van utiliteitsgebouwen conform de laatste inzichten uit de Arcadis database. De kosten per vierkante meter zijn bepaald voor een set van referentiegebouwen (voor onderwijs, kantoor, zorg, winkel, sport, logies, bijeenkomst en celfunctie). De referentiegebouwen zijn gebaseerd op *middelgrote* referentiegebouwen die Arcadis gebruikt om kostenkengetallen te bepalen (van Gemert & Peppelman 2020). Het bruto vloeroppervlak van de middelgrote referentiegebouwen varieert van 900 vierkante meter (winkel) tot 19.800 vierkante meter (celfunctie). Het referentiegebouw met een kantoorfunctie heeft een bruto vloeroppervlak van 6.000 vierkante meter.

Voor het deel van de gebouwen dat al minimaal schillabel B heeft zijn geen investeringen nodig. Voor de andere gebouwen variëren de benodigde investeringen op een natuurlijk moment van 99 tot 181 euro per vierkante meter bruto gebruiksoppervlak (BGO). Op een zelfstandig moment variëren de benodigde investeringen van 160 tot 281 euro per vierkante meter BGO (zie Tabel 29). De bandbreedte wordt veroorzaakt doordat de maatregelkosten afhankelijk zijn van het type gebruiksfunctie, het bouwjaar en (dus) het type maatregelen dat nog genomen kan worden om het isolatieniveau te verbeteren. Hier is geen rekening gehouden met subsidies, kostendalingen door o.a. leereffecten of kostenstijgingen door schaarste op de markten voor arbeid en grondstoffen. De bedragen zijn exclusief btw, omdat verondersteld is dat de bedrijven en instellingen vrijgesteld zijn van btw of de btw mogen aftrekken van verschuldigde belastingen.

Tabel 30

Benodigde investeringen in isolatiemaatregelen in utiliteitsgebouwen tot schillabel B, in euro per vierkante meter BGO, exclusief BTW, prijspeil 2020. Bron: (van der Molen, et al., 2021).

Type utiliteitsgebouw	Natuurlijk moment	Zelfstandig moment
Bijeenkomst	142-155	212-221
Cel	118-127	198-207
Gezondheidszorg	119-131	201-210
Kantoor	114-125	177-186
Logies	114-124	162-170
Onderwijs	99-112	160-167
Sport	163-181	265-281
Winkel	141-156	217-226
Alle gebouwtypes	99-181	160-281

Benodigde investeringen voor verbetering tot energielabel A+++?

DGMR heeft onderzoek gedaan naar de meerinvesteringen die nodig zijn om de energieprestatie van de bestaande Nederlandse utiliteitsgebouwen te verbeteren tot de grenswaarde van energielabel A+++ (dGmR, 2022). De minimaal gemiddelde meerinvesteringen per m² gebruiksoppervlak van de verschillende gebruiksfuncties liggen tussen circa € 150/m² en circa € 250/m² excl. BTW. Bij de overige logiesfunctie (vakantiewoningen) is er sprake van hogere gemiddelde meerinvesteringen van circa € 330/m². Dat zijn hogere bedragen dan genoemd in bovenstaande tabel, maar dat is logisch omdat het over verdergaande na-isolatie gaat. DGMR gaat uit van meerinvesteringen op een natuurlijk moment omdat verondersteld is dat zich in de periode tot 2050 vrijwel altijd een

natuurlijk moment zal voordoen. Bij energetisch ‘goede’ gebouwen zijn de kosten lager en wordt minder op energiekosten bespaard dan de energetisch ‘slechte’ gebouwen en daarmee verschillen de terugverdiertijden sterk.

Volgens DGMR is de benodigde investering voor de totale Nederlandse utiliteitgebouwenvoorraad (exclusief gebouwen met industriefunctie) tot 2050 circa 35 miljard euro, excl. BTW, prijspeil 2020. Hierbij is rekening gehouden met sloop (die alleen plaatsvindt bij het deel van de gebouwenvoorraad met een slechte of matige kwaliteit). De kosten voor regulier onderhoud, financiering en vervangingsinvesteringen zijn niet meegenomen. Er is verondersteld dat de gelabelde voorraad representatief is voor de niet-gelabelde voorraad. Op grond van andere regelgeving zijn er ook energetische verbeteringen nodig aan de voorraad utiliteitsgebouwen.

Hoe kosteneffectief zijn maatregelen voor bestaande utiliteitsgebouwen?

Brink Management/Advies heeft onderzocht welke maatregelen om de CO₂-uitstoot van de bestaande utiliteitsgebouwen te reduceren kosteneffectief zijn en wat het reductiepotentieel van deze maatregelen tot 2030 is. Brink beschouwt maatregelen als kosteneffectief als deze zich binnen de economische levensduur terugverdienen (Van Rijn, et al., 2020). Het startpunt van de berekeningen zijn referentiegebouwen waarvan de bouwkundige kenmerken en installaties bekend zijn, en waarin de belangrijkste bouwkundige maatregelen van de Erkende Maatregelenlijsten (EML) al zijn uitgevoerd. Dat betekent bijvoorbeeld dat er al spouwmuurisolatie is aangebracht. Er wordt standaard uitgegaan van de aanwezigheid van koeling en dubbel glas. In de kostenramingen is geen rekening gehouden met eventuele subsidies en fiscale regelingen. De berekeningen gaan uit van de energieprijzen van 1 januari 2020.

Figuur 15

Overzicht terugverdiertijden t.o.v. redelijke termijn (in jaren) van energie besparende maatregelen in de utiliteitsbouw. Bron: (Van Rijn, et al., 2020).

	Dakisolatie (Rc=6)	Gevelisolatie (Rc=4)	Vloerisolatie (Rc=3)	HR++ beglazing in nieuwe kozijnen	Balansventilatie met HR-WTW	Balansventilatie met reductie ventilatiebelasting door CO ₂ regeling	Hybride warmtepomp lucht/water t.c.m. piek-Cv-ketels	Zonnepanelen	Daglichtafhankelijke regeling t.c.m. aanwezigheidsdetectie	PV panelen
Bijeenkomstfunctie voor kinderopvang	20/30	115/30	30/30	64/30	50/15	51/15	4/15	n.v.t	29/15	14/20
Andere bijeenkomstfunctie	35/30	116/30	75/30	57/30	55/15	56/15	5/15	n.v.t	28/15	15/20
Cellfunctie	42/30	255/30	121/30	228/30	97/15	28/15	3/15	12/15	81/15	20/20
Gezondheidszorgfunctie met bedgebied	59/30	256/30	480/30	166/30	120/15	21/15	3/15	50/15	61/15	20/20
Andere gezondheidszorgfunctie	11/30	110/30	15/30	82/30	45/15	59/15	4/15	n.v.t	51/15	12/20
Kantoorfunctie	8/30	107/30	11/30	101/30	90/15	85/15	9/15	n.v.t	47/15	11/20
Logiesfunctie in een logiesgebouw	30/30	253/30	57/30	314/30	72/15	53/15	4/15	6/15	161/15	20/20
Andere logiesfunctie	37/30	255/30	88/30	223/30	82/15	31/15	3/15	9/15	24/15	20/20
Onderwijsfunctie (klein)	18/30	135/30	27/30	72/30	402/15	300/15	7/15	n.v.t	30/15	14/20
Onderwijsfunctie (Groot)	45/30	248/30	138/30	63/30	168/15	30/15	2/15	50/15	89/15	20/20
Sportfunctie	42/30	351/30	417/30	247/30	251/15	216/15	7/15	33/15	20/15	17/20
Winkelfunctie (klein)	n.v.t	23/30	3/30	130/30	n.v.t*	n.v.t*	5/15	n.v.t	n.v.t	n.v.t
Winkelfunctie (groot)	84/30	663/30	n.v.t*	139/30	360/15	250/15	15/15	n.v.t	n.v.t	20/20

* Maatregelen hebben geen jaarlijkse besparing (€) waardoor een terugverdiertijd niet te bepalen is.

Figuur 15 laat zien welke maatregelen voor de referentiegebouwen zijn geïdentificeerd als kosteneffectief (groen), welke maatregelen potentieel kosteneffectief zijn (oranje) en welke maatregelen

niet kosteneffectief zijn (grijs). Verduurzamen door middel van dakisolatie, vloerisolatie en een zonneboiler zijn (indien toepasbaar) in ongeveer de helft van de referentiegebouwen kosteneffectief. Toepassing van warmtepompen en PV-panelen wordt (indien toepasbaar) altijd als kosteneffectief beschouwd. De overige vijf maatregelen (gevelisolatie, HR++glas in nieuwe kozijnen, twee typen balansventilatie en daglicht- en bewegingsmelders) blijken vrijwel nooit kosteneffectief voor de gekozen referentiegebouwen. Dit komt door de verhouding tussen de hoge investeringskosten en relatief lage kostenbesparingen.

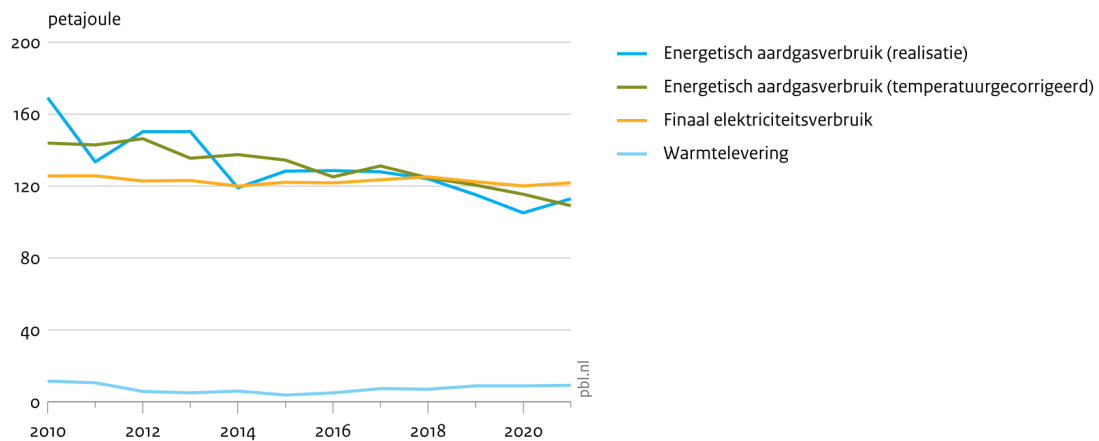
4.7.4 Energiebesparing tot nu toe in utiliteitsgebouwen

De dienstensector bespaarde hoofdzakelijk op aardgas

Het temperatuur-gecorrigeerde energetisch aardgasverbruik in de dienstensector daalde tussen 2010 en 2021 van 144 petajoule naar 109 petajoule (zie Figuur 16). In dezelfde periode is het finaal verbruik van elektriciteit (inclusief elektriciteit uit eigen opwekking) maar licht gedaald van 126 petajoule naar 122 petajoule. De netto levering van warmte aan de dienstensector was 9 petajoule in 2021.

Figuur 16

Finaal energieverbruik door en warmtelevering aan de dienstensector



Bron: CBS, bewerking PBL

Ongeveer een kwart van het energieverbruik van de dienstensector vindt plaats op bedrijventerreinen. Op basis van CBS data concludeert TNO dat in 2019 circa 28 petajoule aardgas en 34 petajoule elektriciteit is geleverd aan bedrijven en instellingen op bedrijventerreinen die behoren tot de dienstensector (Nordkamp, Bakker, Schutte, Strijker, & Bosma, 2021). Procesgebonden energieverbruik vindt vooral plaats op bedrijventerreinen. In woonwijken vindt procesgebonden gasverbruik vooral plaats in aardgasgestookte apparatuur in bakkerijen, supermarkten, (bedrijfs-)restaurants en cafetaria's. Ook crematoria en sauna's gebruiken voor hun bedrijfsprocessen aardgas (KWA bedrijfsadviseurs, 2021).

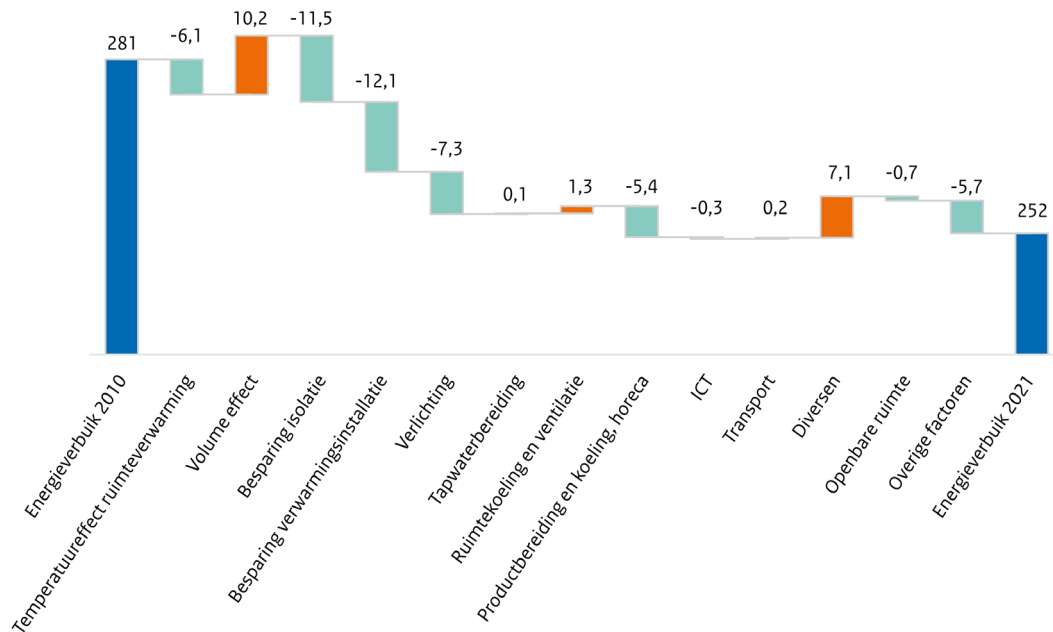
Hoeveel energiebesparing is tot nu toe bereikt?

TNO heeft de oorzaken van de veranderingen van het finaal energieverbruik in de dienstensector in de periode 2010-2021 onderzocht (zie Figuur 17). De factoren die tot de meeste besparing hebben geleid zijn verbeterde isolatie en efficiëntere verwarmingsinstallaties. De geschatte besparing door isolatie is 11,5 petajoule. De geschatte besparing door efficiëntere verwarmingsinstallaties is 12,1 petajoule. De toenemende gebouwvoorraad heeft in deze periode tot een extra energieverbruik van circa 10,2 petajoule geleid.

Figuur 17

Oorzaken van verandering in finaal energieverbruik in de dienstensector, in petajoule, 2010-2021.

Bron: (RVO, 2022m).



Panteia doet jaarlijks onderzoek naar de genomen energiebesparende maatregelen in de utiliteitsbouw op het gebied van isolatie en verwarming (Panteia, 2022). Het onderzoek van Panteia is afgebakend tot bedrijfshallen en gebouwen waarin onderwijsinstellingen, kantoren, winkels en zorginstellingen zitten. De resultaten laten zien welke isolatiemaatregelen in 2022 al genomen zijn:

- Bij 64% van de gebouwen was het gehele dak geïsoleerd en 21% had geen dakisolatie. Bij de overige 15% gebouwen was maar een deel van het dak geïsoleerd.
- Bij 50% van de gebouwen was de gehele gevel geïsoleerd en 32% had geen gevelisolatie.
- Bij 35% van de gebouwen was de vloer geheel geïsoleerd en 56% had geen vloerisolatie.
- Bij 18% was enkel glas toegepast, 63% dubbel glas en 19% extra isolerend dubbel glas.

Het onderzoek geeft aan dat in het jaar 2021 bij 14% van de utiliteitsgebouwen één of meer energiebesparende maatregelen zijn getroffen. De kwaliteit van de isolatie is beter naarmate de gebouwen recenter gebouwd zijn. Panteia concludeert dat de zorginstellingen de meeste maatregelen hebben uitgevoerd op het gebied van dak-, gevel-, vloer- en glasisolatie, gevolgd door de onderwijsinstellingen en de kantoren. Met name in winkelpanden en bedrijfshallen zijn relatief minder vaak energiebesparende maatregelen genomen. In 2021 werd 8% van de utiliteitsgebouwen niet verwarmd. Dit komt vooral doordat 39% van de bedrijfshallen niet verwarmd werd.

4.7.5 Voorwaarden voor versnellen energiebesparing in utiliteitsgebouwen

Op hoofdlijnen geldt dat een verduurzamingsmaatregel pas wordt uitgevoerd als de gebouweigenaar dat aantrekkelijk vindt en wanneer alle fysieke, juridische, financiële en praktische belemmeringen zijn weggenomen. De aantrekkelijkheid hangt niet alleen af van de financiële kosten en baten, maar ook van andere voor- en nadelen.

We geven hier een overzicht van voorwaarden waaraan voldaan moet zijn voordat isolatiemaatregelen worden uitgevoerd. Daarna bespreken we hoe beleidsinstrumenten eraan kunnen bijdragen dat aan de voorwaarden wordt voldaan.

We hanteren een gestileerd model voor besluitvorming van gebouweigenaren over emissiereductiemaatregelen (Hoogervorst, Menkveld, & Tigchelaar, 2019). Volgens dit beslismodel moet aan de volgende voorwaarden zijn voldaan voordat technische maatregelen uitgevoerd worden:

1. Er is aanleiding om een besluit te overwegen
2. Emissiereductie heeft aandacht van de gebouweigenaar
3. Informatie over opties is bekend
4. De immateriële gevolgen van de overwogen maatregelen zijn acceptabel
5. Maatregelen hebben een acceptabel financieel rendement
6. Maatregelen zijn financieel uitvoerbaar
7. Uitvoering is juridisch mogelijk (vergunningverlening)
8. Bouwbedrijven of installateurs kunnen de maatregelen uitvoeren
9. De gebouweigenaar besluit uiteindelijk positief

Deze voorwaarden zijn te beschouwen als een uitwerking van de algemene voorwaarden “willen, kunnen en doen” die in voorgaande paragraaf over woningen zijn gebruikt. Ze worden hieronder toelicht.

1. Er is aanleiding om een besluit te overwegen

Ten eerste moet de gebouweigenaar een aanleiding hebben om een besluit te overwegen (willen). Natuurlijke momenten zoals de verkoop en verbouwing van een gebouw en de vervanging van een installatie kunnen de aanleiding zijn. Ook maatschappelijke ontwikkelingen kunnen de gebouweigenaar daartoe aanzetten. De verduurzaming van de gebouwde omgeving heeft bijvoorbeeld een impuls gekregen door de gascrisis en de extreem hoge energieprijzen in 2022. Ook verplichtingen kunnen gebouweigenaren aanzetten tot overweging van maatregelen.

2. Emissiereductie heeft aandacht van de gebouweigenaar

Om tot besluitvorming te komen is het nodig dat emissiereductie de aandacht heeft van de gebouweigenaar (willen). Voor bedrijven en instellingen in de dienstensector heeft verduurzaming vaak secundaire prioriteit omdat de energie- en huisvestingskosten maar een beperkt deel uitmaken van de kosten van de organisatie (TKI Urban energy, 2020).

3. Informatie over opties is bekend

Om besluiten te kunnen nemen hebben bedrijven en instellingen behoefte aan informatie en advies over de maatregelen die het beste genomen kunnen worden (kunnen). De gebouwen in de dienstensector verschillen onder andere in gebruiksfunctie, omvang, locatie, ouderdom en omstandigheden. De heterogeniteit van de gebouwenvoorraad betekent dat er maatwerk nodig is. Daarom ontwikkelt elke bedrijfstak of sub-sector eigen routekaarten voor verduurzaming.

4. De immateriële gevolgen van de overwogen maatregelen zijn acceptabel

Isolatiemaatregelen hebben naast financiële gevolgen ook immateriële gevolgen. Deze gevolgen, zoals de overlast door bouwwerkzaamheden of tijdelijke verhuizingen, moet acceptabel zijn voor de gebouweigenaar (willen). Maatregelen kunnen ook immateriële voordelen hebben zoals een comfortabeler binnenklimaat of een duurzamer bedrijfsimago. Ontzorging van gebouweigenaren kan belemmeringen voor gebouwisolatie verminderen.

5. Maatregelen hebben een acceptabel financieel rendement

Om tot een positief besluit te komen is het belangrijk dat de maatregelen een acceptabel financieel rendement hebben. Bedrijven en instellingen hebben vaak andere investeringsprioriteiten en willen

hun financieringsruimte niet graag laten beperken door energiebesparende investeringen (willen, kunnen).

6. Maatregelen zijn financierbaar

Als maatregelen een acceptabel financieel rendement hebben, betekent nog niet dat ze ook financierbaar zijn. Om de investering te kunnen doen, moet een gebouweigenaar eigen vermogen hebben of geld kunnen lenen (kunnen).

7. Uitvoering is juridisch mogelijk (vergunningverlening)

Voor uitvoering van de maatregelen zijn vaak vergunningen nodig (kunnen). Bij isolatiewerkzaamheden moet vanwege de Wet natuurbescherming rekening worden gehouden met de aanwezigheid van beschermde soorten die in woningen en gebouwen nestelen en verblijven. Ook de stikstofproblematiek kan het verkrijgen van vergunningen moeilijk maken.

8. Bouwbedrijven of installateurs kunnen de maatregelen uitvoeren

Bouwbedrijven en installateurs moeten in staat zijn om de maatregelen uit te voeren (kunnen, doen). De KEV 2022 concludeert dat versnelling van verduurzaming van de gebouwde omgeving wordt belemmerd door een factoren zoals de arbeidsmarktkrapte, tekorten aan materialen en netcongestie (PBL, 2022kev).

9. De gebouweigenaar besluit uiteindelijk positief

De maatregel wordt pas uitgevoerd als de gebouweigenaar uiteindelijk een positief besluit neemt (doen). De besluitvorming over verduurzaming van gebouwen is vaak ingewikkeld omdat er meerdere stakeholders bij betrokken zijn. In de dienstensector is vaak sprake van split-incentive tussen huurder en eigenaar. De eigenaar van een gebouw investeert in het verduurzamen van het gebouw, terwijl de huurder het voordeel heeft van een lagere energierekening (TKI Urban energy, 2020) (CE Delft, 2022d).

4.7.6 Huidig en voorgenomen beleid voor energiebesparing in utiliteitsgebouwen

In de vorige paragraaf is een overzicht gegeven van voorwaarden waaraan moet zijn voldaan voordat technische maatregelen voor isolatie uitgevoerd worden. We bespreken hier hoe beleidsinstrumenten eraan kunnen bijdragen dat aan de voorwaarden wordt voldaan.

Tabel 31

Overzicht van hoe beleidsinstrumenten bijdragen aan voorwaarden voor uitvoering isolatiemaatregelen in de dienstensector.

Voorwaarde	Beleidsinstrumenten en status [V: vastgesteld beleid, VV: voorgenomen beleid, G: geagendeerd beleid]
Er is aanleiding om een besluit te overwegen	Handhaving energiebesparingsplicht Wet milieubeheer, informatieplicht en VUE-regeling [V] Verplichting energielabel C kantoren vanaf 2023 [V] Verbreding energiebesparingsplicht, actualisatie erkende maatregelenlijsten en overgang naar Omgevingswet [VV] Uitbreiding energiebesparingsplicht naar vergunningplichtige en ETS-bedrijven [VV] Gebiedsgerichte aanpak warmtetransitie [V, VV, G] Renovatieverplichting gebouwen publieke instellingen artikel 6 EED [G] Eindnorm 2050 utiliteitsbouw [G] Prestatie-eisen nieuwbouw en bestaande bouw industrie functie [G] Normering gericht op uitfasering slechte labels utiliteitsbouw [G]

Voorwaarde	Beleidsinstrumenten en status [V: vastgesteld beleid, VV: voorgenomen beleid, G: geagendeerd beleid] Herziening EPBD [G]
Emissiereductie heeft aandacht van gebouwige-naar	p.m.
Informatie over opties is bekend	Routekaarten maatschappelijk vastgoed [V] Subsidieregeling verduurzaming MKB (SVM) [V]
De immateriële gevolgen maatregelen acceptabel	Ontzorging verduurzaming maatschappelijk vastgoed [V]
Maatregelen hebben een acceptabel financieel rendement	Energiebelasting [V, VV] Opslag Duurzame Energie (ODE) [V, VV] Energie-investeringsaftrek (EIA) [V] MIA- en Vamil-regeling [V] Stimulering bouw en onderhoud sportaccommodaties (BOSA-regeling) [V] Extra budget verduurzaming Rijksvastgoed [V] EU Emissiehandelssysteem (EU ETS) [V] Emissiehandel voor gebouwen en wegtransport (ETS-BRT) [G] Investeringsubsidie duurzaam maatschappelijk vastgoed (DUMAVA) [VV] Extra budget uit coalitieakkoord vanaf 2024 voor verduurzaming maatschappelijk vastgoed [G]
Maatregelen zijn financieerbaar	Scholen energiebespaarlening [V] Revolverend of waarborgfonds voor maatschappelijk vastgoed [G]
Uitvoering is juridisch mogelijk (vergunningen)	p.m.
Bouwbedrijven of installateurs kunnen de maatregelen uitvoeren	Versterken kennis- en innovatie-ecosysteem (o.a. TKI Bouw, MOOI-regeling, DEI+, Schoon en emissieloos bouwen) [V] Organiseren continue bouwstroom [G]
De gebouwigenaar besluit uiteindelijk positief	p.m.

Welke beleidsinstrumenten dragen bij aan besluitvorming tot na-isolatie?

Om de beleidsdoelen voor de gebouwde omgeving te halen is een grote versnelling nodig van het verduurzamingstempo, ook in de dienstensector. Het *Beleidsprogramma versnelling verduurzaming gebouwde omgeving* (Ministerie van BZK, 2022) presenteert daarvoor een mix van normering, beprijzing, financiering, subsidiëring en ondersteuning. Het programma geeft prioriteit aan energiebesparing.

Voor de Klimaat- en Energieverkenning 2022 is een overzicht gemaakt van vastgestelde, voorgenomen en geagendeerde beleidsinstrumenten voor de dienstensector (PBL, TNO, RIVM, 2022fs-kev). De onderstaande tabel laat zien hoe deze beleidsinstrumenten de besluitvorming over isolatiemaatregelen kunnen beïnvloeden. Meer informatie over de bestaande beleidsinstrumenten is te vinden in een evaluatie die CE Delft heeft uitgevoerd van het beleid voor de energietransitie voor de gebouwde omgeving (CE Delft, 2022d).

Voorgenomen beleid doet gasverbruik dienstensector dalen

In de KEV-raming 2022 daalt het gasverbruik in de dienstensector van 109 PJ in 2021 naar 71 PJ in 2030, ondanks een verwachte groei van het gebruiksoppervlak met 6%. De grootste bijdrage (18 PJ) wordt verwacht van betere handhaving van de energiebesparingsplicht uit de Wet milieubeheer. Een extra besparing wordt verwacht van maatregelen in kantoren die vanaf 2023 minimaal label C moeten hebben. De nieuwe investeringsubsidie voor duurzaam maatschappelijk vastgoed kan een besparing van 1 PJ opleveren. Verder constateert de KEV dat diverse beleidsmaatregelen een klein besparingseffect hebben.

Voorjaarspakket 2023

Het kabinet heeft begin 2023 enkele aanvullende maatregelen genomen die de energiebesparing in de dienstensector een impuls kunnen geven. Zo werd de energiebesparingsplicht uit de Wet milieubeheer aangescherpt door de terugverdientijd te verlengen van 5 naar 7 jaar. Verder is aangekondigd dat EFG-labels vanaf 2029 niet meer zijn toegestaan. Ook de ontwikkeling van een emissiehandelssysteem voor de gebouwde omgeving kan een stimulans worden voor energiebesparing, mits de CO₂-prijs hoog genoeg wordt.

4.7.7 Energie besparen in utiliteitsgebouwen versnellen

Voorgaand overzicht laat zien dat diverse instrumenten worden ingezet. De KEV-2022 concludeert dat uitvoering van het vastgestelde [V] en voorgenomen [VV] beleid niet voldoende is om de emissiedoelen voor 2030 te bereiken. Het kabinet werkt nog aan invoering van het geagendeerde [G] beleid. Ook dat is (naar verwachting) onvoldoende om de hele dienstensector klimaatneutraal te maken in 2050. De volgende drie beleidsopties zouden extra na-isolatie kunnen stimuleren:

- Aanvullende verplichtingen en handhaving
- Duidelijkheid bieden over het verduurzamingstraject van de gebouwde omgeving
- Aanpassing van de beprijzing van energie

Aanvullende verplichtingen en handhaving

Verplichtingen kunnen stimuleren dat op natuurlijke of zelfstandige momenten isolatiemaatregelen worden genomen. Er zijn al verschillende verplichtingen van kracht, zoals:

- Bedrijven en instellingen met een energieverbruik van meer dan 50.000 kWh elektriciteit of van 25.000 m³ aardgas(equivalent) moeten voldoen aan de energiebesparingsplicht.
- Vanaf 2023 geldt de label C verplichting voor kantoren. Zeker 21.000 kantoorpanden (58%) voldeed op 1 januari echter niet aan de norm (CBRE, 2022).
- Vangneteisen voor verbouw geven op bouwdeelniveau duidelijkheid over de minimaal te behalen energieprestatie.

De Europese Commissie heeft in het voorstel voor de herziening van de Energy Performance of Buildings Directive (EPBD) aangegeven de utiliteitsgebouwen met de slechtste energielabels (EFG) te willen uitfasen. Het kabinet lijkt zich hierbij aan te sluiten. Na publicatie van de EPBD zal het kabinet onderzoeken hoe dit per gebouwtype geïmplementeerd zal worden.

De voorgestelde herziening van de Energy Efficiency Directive (EED) bevat een renovatieverplichting voor gebouwen van publieke instellingen. Die houdt in dat lidstaten moeten zorgen dat minimaal 3% per jaar van het totale vloeroppervlak van verwarmde en/of gekoelde gebouwen in eigendom van publieke instellingen groter dan 250 m² gerenoveerd wordt naar de nieuwbouw-eis conform de EPBD (Menkveld & Sipma, 2022b).

Invoering en handhaving van aanvullende verplichtingen kan zorgen dat extra isolatiemaatregelen genomen worden. Er is dan wel voldoende handhavingscapaciteit en een duidelijke handhavingsstrategie nodig. Het is nog niet duidelijk hoe het aangekondigde verbod op EFG-labels zal worden gehandhaafd.

Duidelijkheid bieden over het verduurzamingstraject van de gebouwde omgeving

Bedrijven en instellingen hebben behoefte aan duidelijkheid over hun verduurzamingsopties en de manier en het tempo waarop wijken en bedrijventerreinen aardgasvrij gemaakt zullen worden. Duidelijkheid kan investeringen versnellen en bevorderen dat de optimale maatregelen genomen worden.

Er zijn verschillende strategieën voor de warmtetransitie van de gebouwde omgeving, waaronder warmtenetten, elektrificatie en schone gassen. Het optimale niveau van isolatie hangt samen met de keuzes die op het niveau van wijken of bedrijventerreinen gemaakt worden.

De gebiedsgerichte aanpak kan deze duidelijkheid gaan bieden. De aanpak kan worden versneld door de uitvoeringscapaciteit van gemeenten te vergroten en de invoering van de Wet collectieve warmtevoorziening (Wcw) en de invoering van de Wet gemeentelijke instrumenten warmtetransitie (Wgiw). Als het lang duurt voordat duidelijk is waar collectieve oplossingen (zoals warmtenetten) komen, wordt het lastiger om ze te realiseren omdat gebouwen dan al individueel kunnen zijn verduurzaamd met isolatie en (gedeeltelijke) elektrificatie.

Als wordt ingezet op isolatie van de slechtst geïsoleerde gebouwen, zal de CO₂-reductie relatief groot zijn en zijn minder middelen en arbeidskrachten nodig. Als op zoveel mogelijk natuurlijke momenten gekozen wordt voor investeringen in isolatie, zijn uiteindelijk ook minder middelen en arbeidskrachten nodig. De beschikbaarheid van arbeidskrachten, subsidies en financiering bepalen uiteindelijk het verduurzamingstempo dat bereikt wordt. De kosten om in twee stappen te isoleren kunnen hoger zijn dan van isoleren naar hoog niveau in één keer.

Het vaststellen en verankeren van eindnormen voor de bestaande bouw kan duidelijkheid en zekerheid geven voor gebouweigenaars. Voor de bestaande utiliteitsbouw wordt een wettelijke eindnorm ontwikkeld voor de energieprestatie van gebouwen in 2050. DGMR en Arcadis hebben voor de eindnorm onderzoek gedaan met als doel inzicht te geven in de kosten-optimale energieprestatie (DGMR Bouw, 2020). In 2023 volgt een uitgebreider onderzoek naar de betaalbaarheid van de verduurzamingsopgave voor verschillende doelgroepen in de bestaande utiliteitsbouw, als basis voor voorstellen voor gerichte financiële ondersteuning tot 2030.

Aanpassing van de beprijzing van energie

Het nemen van isolatiemaatregelen wordt belemmerd doordat investeringen vaak nog geen acceptabel financieel rendement hebben. Verhoging van de prijzen van fossiele energie kan ervoor zorgen dat meer verduurzamingsmaatregelen financieel aantrekkelijk worden. Het is daarbij wel belangrijk dat eindgebruikers niet worden geconfronteerd met onbetaalbare of in hoge mate onvoorspelbare energiekosten. Grootverbruikers in de dienstensector (en daar buiten) profiteren nu nog van lagere tarieven voor de energiebelasting dan huishoudens en andere kleinverbruikers in de dienstensector. Het kabinet heeft aangekondigd deze degressiviteit in energiebelastingen te willen herzien.

De energieprijzen worden deels bepaald door ontwikkelingen op de energiemarkten, maar er zijn ook andere componenten, zoals de energiebelasting, netwerk- en transportkosten en BTW. Als het *Emission Trading System for Buildings and Road Transport* (ETS-BRT) en een bijmengverplichting voor groengas worden ingevoerd, gaan deze instrumenten ook invloed hebben op de energiekosten in de gebouwde omgeving.

4.8 Mogelijk tempo van vergaande na-isolatie

In voorgaande paragrafen hebben we het eindbeeld geschetst van een klimaatneutrale gebouwde omgeving waarbij na-isolatie tot de isolatiestandaard voorop is gesteld. Vervolgens is verkend welke verwarmingstechnieken daar bij passen, binnen de randvoorwaarden van minimalisering van nationale kosten en maximaal 70 PJ duurzame gassen in 2050. In deze paragraaf schetsen we in welk tempo de benodigde maatregelen zouden kunnen worden uitgevoerd om het eindbeeld in 2050 te bereiken. Dat tempo is afhankelijk van het gemak waarmee de eerder gesignaleerde obstakels overwonnen kunnen worden. De afgelopen decennia lag het tempo van na-isolatie op een relatief laag niveau, ondanks rijksbeleid dat na-isolatie stimuleerde. Het is mogelijk dat het tempo

versnelt door de recent gegroeide erkenning van de klimaatproblematiek en door de financiële stimulansen en prestatieafspraken die met het National Isolatieprogramma zijn aangebracht. Het is onduidelijk of dat beleid langjarig kan worden volgehouden en of het voldoende is om het eindbeeld van dit traject te realiseren. Bij het bepalen van het maatregelentempo is echter verondersteld dat het mogelijk is om het huidige beleid tussentijds zodanig aan te passen dat het eindbeeld in 2050 gerealiseerd kan worden.

Op grond van het geschetste maatregelentempo is de behoefte aan energiedragers voor de gebouwde omgeving berekend. Naast de energiebehoefte voor verwarmen van bestaande gebouwen schatten we ook de energiebehoefte voor verwarmen van nieuwbouw en de behoefte aan elektriciteit voor apparaten en andere toepassingen in de gebouwde omgeving. Deze ramingen zijn nodig voor een analyse van de inpasbaarheid van dit traject in het nationale energiesysteem. De ontwikkeling van het opwekken van elektriciteit met PV-panelen op gebouwen wordt elders geschat (TNO, 2024e) en laten we hier (dus) buiten beschouwing.

4.8.1 Tempo van energie besparen in woningen

Transitietempo bij bestaande woningen tot 2050

Alle bestaande woningen worden in dit traject na-geïsoleerd tot schillabel B (gebruikt als benadering van de isolatiestandaard). Om in 2050 alle woningen minimaal op de isolatiestandaard te hebben geïsoleerd, zou in 2030 circa 1,5 miljoen van de bestaande woningen met slechtere labels na-geïsoleerd moeten zijn, oplopend naar ruim 4,3 miljoen in 2040. In dat tempo worden voldoende woningen geschikt gemaakt om (met de ruim 2 miljoen woningen die in 2019 al aan de standaard voldeden) te kunnen overstappen op een van de aardgasvrije verwarmingstechnieken in dit traject.

De toepassing van hybride warmtepompen (met aardgas of een mix van aardgas en groengas) zal de komende jaren als tussenoplossing kunnen groeien. Volgens de brancheorganisatie kunnen tot 2030 maximaal 1,5 miljoen hybride warmtepompen worden geïnstalleerd. In dit traject, dat vergaande na-isolatie nastreeft en op termijn een beperkte hoeveelheid duurzame gassen veronderstelt, is het logisch dat een deel van die capaciteit wordt gebruikt voor installatie van volledig elektrische warmtepompen. We rekenen daarom met 1 miljoen hybride warmtepompen in 2030. Daarna verschuift de aandacht nog verder naar elektrische warmtepompen. In 2040 zijn dan 1,2 miljoen hybride warmtepompen geïnstalleerd en in 2050 wordt de potentie binnen dit traject bereikt. Bij 1,5 bcm groengas voor gebouwen zouden hybride warmtepompen maximaal 2,6 miljoen weq kunnen verwarmen. In woningen met schillabel B en een relatief laag gasverbruik is een hybride ketel echter veel duurder dan een HR-ketel. Daarom zal een deel van die woningen met groengas een HR-ketel gebruiken. Die verbruiken daar per stuk wel meer gas dan een hybride, zodat niet 2,6 maar 'slechts' 2,4 miljoen weq's worden verwarmd met 1,5 bcm groengas.

De uitbreiding van warmtenetten voor bestaande woningen verloopt in dit traject ongeveer lineair naar het eindbeeld van 1,15 miljoen aansluitingen op een MT-net. Dat betekent tot 2030 een beperkte groei van de huidige 444.500 aansluitingen naar 634.800. Dat kan, in combinatie met vergaand isoleren, in 2040 oplopen naar 834.800 en in 2050 naar 1,15 miljoen aansluitingen. Mocht de besluitvorming over de nieuwe warmtewet voor vertraging zorgen, dan kan dat in latere jaren nog wel worden ingehaald. De groei van LT-netten komt pas na 2030 op gang en kan groeien tot 0,2 miljoen weq in 2050.

Om in 2050 alle gebouwen klimaatneutraal te kunnen verwarmen, moeten dan 6,4 miljoen bestaande woningen volledig elektrisch worden verwarmd. Dat is inclusief bestaande woningen die worden gesloopt en vervangen door nieuwbouw, zie verderop. Om dat grote aantal in 2050

gerealiseerd te hebben, moet de opschaling snel worden ingezet. Tot 2030 worden consumenten vertrouwd gemaakt met deze techniek en kunnen 0,5 miljoen woningen van een elektrische warmtepomp voorzien. Daarna stijgt het aantal snel naar 3 miljoen in 2040 en 6,4 miljoen in 2050.

Energiebesparende maatregelen bij nieuwbouw en transformaties

Het volume nieuwbouw en transformaties van woningen is hier afgeleid van de netto volumeontwikkeling van de totale woningvoorraad. Transformaties van bijvoorbeeld kantoren naar woningen zijn behandeld als nieuwbouw. Het energieverbruik van nieuwe woningen is gebaseerd op de BENG-eisen uit het bouwbesluit voor Bijna Energie Neutrale Gebouwen.

Conform het huidige beleid krijgen nieuwe woningen geen gasaansluiting meer en kunnen dus geen gebruik maken van schone gassen, als die op termijn beschikbaar zouden komen. Daarom is verondersteld dat 25% van alle nieuwbouwwoningen wordt aangesloten op een warmtenet en dat de rest wordt verwarmd met elektrische warmtepompen.

Energiebesparing door sloop van woningen

Wegens gebrek aan ruimtelijk uitgewerkte scenario's voor het slopen van woningen tot 2050, is in de Startanalyse verondersteld dat alle bestaande woningen verduurzaamd worden. In werkelijkheid zullen sommige slechte woningen worden gesloopt en in de meeste gevallen worden vervangen door nieuwbouw. Het energieverbruik van die nieuwbouwwoningen zal lager zijn dan van de verduurzaamde sloopwoningen en de kosten van sloop-nieuwbouw zijn vermoedelijk lager dan die van verduurzaming. Dat betekent dat de Startanalyse op dit onderdeel de kosten overschat en de energiebesparing onderschat. Omdat het vermoedelijk om kleine afwijkingen gaat, is besloten daarvoor niet te corrigeren in deze trajectverkenningen.

4.8.2 Tempo van energie besparen in utiliteitsgebouwen

Transitietempo bij bestaande utiliteitsgebouwen tot 2050

De gebouwvoorraad in de dienstensector vertoont meer dynamiek dan de woningvoorraad en kent grotere verschillen in energieverbruik per gebouwtype. Daarom is de verwachte sloop van utiliteitsgebouwen (per gebruiksfunctie) verwerkt in de raming van de toekomstige energiebehoefte van de dienstensector. Ook hier worden alle bestaande (resterende) gebouwen na-geïsoleerd tot schillabel B. Anders dan bij woningen is verondersteld dat het isolatietempo de komende decennia lineair verloopt omdat de besluitvorming hierover bij utiliteitsgebouwen vermoedelijk op een meer zakelijke manier plaatsvindt dan bij woningen.

Maatregelen in de nieuwbouw en bij transformaties

In de dienstensector is de volumeontwikkeling van nieuwbouw en transformaties tussen 2020 en 2050 per gebruiksfunctie bepaald, zie hoofdstuk 3. Vanaf 1 januari 2022 moeten de vergunningaanvragen voor zowel nieuwe utiliteitsbouw als transformaties voldoen aan de eisen voor Bijna Energie Neutrale Gebouwen (BENG). Deze BENG eisen zijn uitgewerkt in een maximale energiebehoefte, een maximale primair fossiel energieverbruik en een minimale aandeel hernieuwbare energie. Het kabinet is van plan de minimumvereisten voor de energieprestatie van gebouwen aan te scherpen. Nieuwbouw zal naar verwachting volledig energieneutraal gaan worden maar dat is nog niet verwerkt in de berekende energiebehoefte.

Tabel 32

Uitvoeringstempo van traject 1 in de bestaande bouw, in miljoen woningequivalenten met een bepaald type verwarmingsinstallatie per zichtjaar.

Type installatie	2020	2030	2040	2050
Elektrische warmtepomp		0,5	3,0	6,4
Aansluiting MT-net	0,4	0,6	0,8	1,2
Aansluiting LT-net			0,1	0,2
Hybride warmtepomp ^{a)}		1,0	1,2	2,4
Totaal	0,4	2,1	5,1	10,2

a) Een deel van de 2,4 weq's in 2050 heeft in dit traject nog een HR-ketel omdat dat bij schillabel B goedkoper is dan een hybride warmtepomp. Omdat een HR-ketel meer gas verbruikt, kan met 1,5 bcm groengas minder dan 2,6 weq worden aangesloten.

4.8.3 Energieverbruik bij vergaande na-isolatie

Op grond van bovenstaande overwegingen is de energiebehoefte van de gebouwde omgeving berekend voor de zichtjaren 2030, 2040 en 2050. Onderstaande tabel laat zien dat de totale energie-input licht daalt van 673 PJ naar 644 PJ in 2050. Dat komt doordat het effect van energiebesparing door na-isolatie van bestaande gebouwen grotendeels gecompenseerd wordt door extra energieverbruik in de nieuwbouw (36 + 71 PJ in 2050).

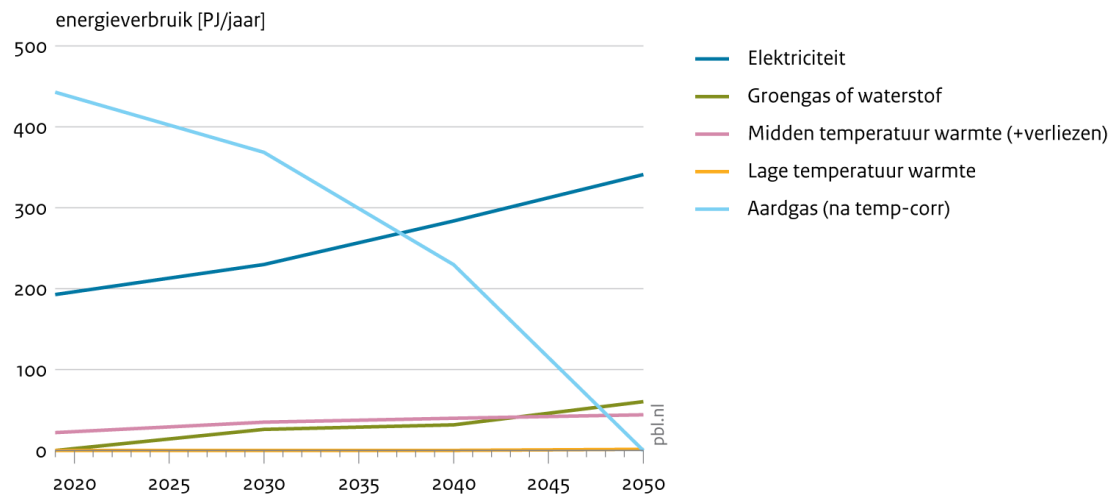
Tabel 33

Ontwikkeling van het energieverbruik in de gebouwde omgeving (in PJ per jaar) tussen 2019 en 2050 in traject 1 "Na-isoleren eerst".

	2019	2030	2040	2050
Bestaande bouw 2019	662	611	498	340
Nieuwbouw woningen	0	19	31	36
Nieuwbouw utiliteitsgebouwen	0	30	55	71
subtotaal (finaal verbruik)	662	660	585	447
Omgevingswarmte (saldo)	11	35	107	197
Totaal input energie	673	695	692	644
waarvan:				
Elektriciteit	193	230	284	341
Aardgas (na temp-correctie)	443	369	230	0
Groengas of waterstof	0	26	32	60
MT-warmte (+verliezen)	22	35	40	44
LT-warmte	0	0	0	1

In 2019 was 169 PJ elektriciteit bestemd voor het gebruik van elektrische apparaten. Dat verbruik is in alle zichtjaren constant verondersteld. De toename van het elektriciteitsverbruik van 193 PJ naar 342 PJ in 2050 is hoofdzakelijk het gevolg van het groeiende aantal elektrische en hybride warmtepompen. Dat leidt ook tot een sterke stijging in het gebruik van omgevingswarmte.

Figuur 18
Verbruik van energiedragers in traject 1



Bron: PBL

5 Traject “Potenties van warmtenetten benutten”

5.1 Inleiding

Dit hoofdstuk verkent de mogelijkheden om de gebouwvoorraad in 2050 zoveel mogelijk te verwarmen met warmtenetten die gevoed worden door uitsluitend klimaatneutrale energiebronnen. We beschrijven voor- en nadelen, kosten en randvoorwaarden met het doel dit traject te kunnen vergelijken met de andere.

Het technisch potentieel van warmtenetten is afhankelijk van de beschikbare warmtebronnen, de verwachte efficiëntie van warmtenetten en de warmtebehoefte van de hele gebouwvoorraad. We brengen de nationale kosten in beeld van verschillende integrale verwarmingssystemen met warmtenetten die verschillen in warmtebronnen (restwarmte, geothermie, aquathermie) en isolatieniveaus van woningen (minimaal schillabel D en B). Daarbij zal blijken dat die kosten per woning- (equivalent) ruimtelijk sterk kunnen verschillen en dat die in delen van het land aanmerkelijk hoger zijn dan de nationale kosten van klimaatneutrale alternatieven. Op grond van de vergelijking van nationale kosten per woning wordt de nationaal-economische potentie van warmtenetten bepaald. Daarbij is verondersteld dat de gebouwde omgeving maximaal 70 PJ groengas beschikbaar zal hebben voor hulpketels bij warmtenetten en voor verwarming van gebouwen. Vervolgens worden kansen en belemmeringen van het realiseren van deze potentie besproken en beschouwen we de mogelijkheden om met aanvullend rijksbeleid de groei van warmtenetten te versnellen.

Het hoofdstuk eindigt met een schets over het tempo waarin het huidige verbruik van aardgas voor cv-ketels in dit traject vervangen zou kunnen worden door gebruik van warmtenetten en andere energiedragers.

5.2 Waarom warmtenetten?

In een klimaatneutraal energiesysteem kunnen warmtenetten een belangrijke rol spelen. Momenteel worden Nederlandse warmtenetten gevoed uit centrale bronnen waar afval, aardgas (in hulpketels, gasturbines en WKK's), kolen en biomassa wordt verbrand. Maar aardgas en kolen passen niet in een klimaatneutraal energiesysteem en biomassa voor warmtenetten wordt gezien als een 'overgangstoepassing' (SER, 2020) die op termijn vervangen zou moeten worden door andere energiedragers. Daarom laten we in deze studie de inzet van aardgas, kolen en biomassa in nieuwe warmtenetten buiten beschouwing bij de verkenning van de potentiële toepassing van warmtenetten op lange termijn. Op korte termijn kan inzet van biomassa wel nuttig zijn om de ontwikkeling van warmtenetten te versnellen, o.a. omdat biomassaketels sneller gebouwd en in bedrijf genomen kunnen worden dan bijvoorbeeld geothermiedoubletten.

5.2.1 Hergebruik van restwarmte

Restwarmte wordt nu vaak geloosd in oppervlaktewater of in de lucht omdat het laagwaardige warmte is die voor de warmteproducent geen nuttige toepassingen meer heeft. De economische waarde van restwarmte is daarom erg laag en kan zelfs negatief worden als voor lozing ervan kosten gemaakt moeten worden. Restwarmte is vaak wel geschikt voor verwarming van gebouwen,

maar dan moeten warmtenetten worden aangelegd om het – in de vorm van warm water – naar de afnemers te transporteren. Zonder deze ‘warmterecycling’ zouden meer andere energiebronnen gebruikt moeten worden voor verwarming van gebouwen, in de vorm van (groene) elektriciteit of (klimaatneutraal) gas. Dat zijn hoogwaardige energiedragers met een hoge energie-inhoud die geschikt zijn voor veel meer toepassingen dan (alleen) verwarmen van gebouwen. Dat is een belangrijke reden voor voorstanders van warmtenetten om hergebruik van restwarmte te propageren⁵¹.

Er blijft nu nog heel veel restwarmte onbenut, dus het hergebruik zou nog sterk kunnen worden uitgebreid. Het is echter onzeker hoeveel restwarmte op termijn beschikbaar is. Dat komt omdat alle bedrijven hun energiehuishouding klimaatneutraal moeten maken. Daarbij is *intern* hergebruik van restwarmte vaak een relatief goedkope optie. Daarom zullen zowel het toekomstig overschot aan restwarmte dat aan warmtenetten geleverd kan worden als de temperatuur daarvan op termijn waarschijnlijk afnemen. Een inventarisatie in 2020 van bestaande warmtebronnen voor levering aan HT- en MT-warmtenetten⁵² voor gebouwen leverde een langdurige beschikbaarheid op van ruim 13.600 MW thermisch vermogen, zie Tabel 33. Dat is aanzienlijk minder dan het huidige beschikbare vermogen en exclusief de levering van warmte aan de glastuinbouw uit verwachte nieuwe geothermiebronnen. De locatie van die bronnen is weergegeven in Figuur 19. Uit berekeningen voor de Startanalyse 2020 blijkt dat met die bronnen ongeveer de helft van de gebouwde omgeving verwarmd zou kunnen worden.

Tabel 34

Langdurig beschikbare bestaande warmtebronnen voor MT-warmtenetten (PBL, 2022a).

Type warmtebron	Aantal bronnen	Vermogen (MWth)
STEG	37	6089
Gasmotor	4	18
Gasturbine	8	839
Industrie	519	3956
Raffinaderij	9	845
AVI	20	1024
BMC	19	275
Geothermie	17	332
Hulpketel	4	182
BioWKK	5	52
Nucleair	0	0
Totaal	642	13612

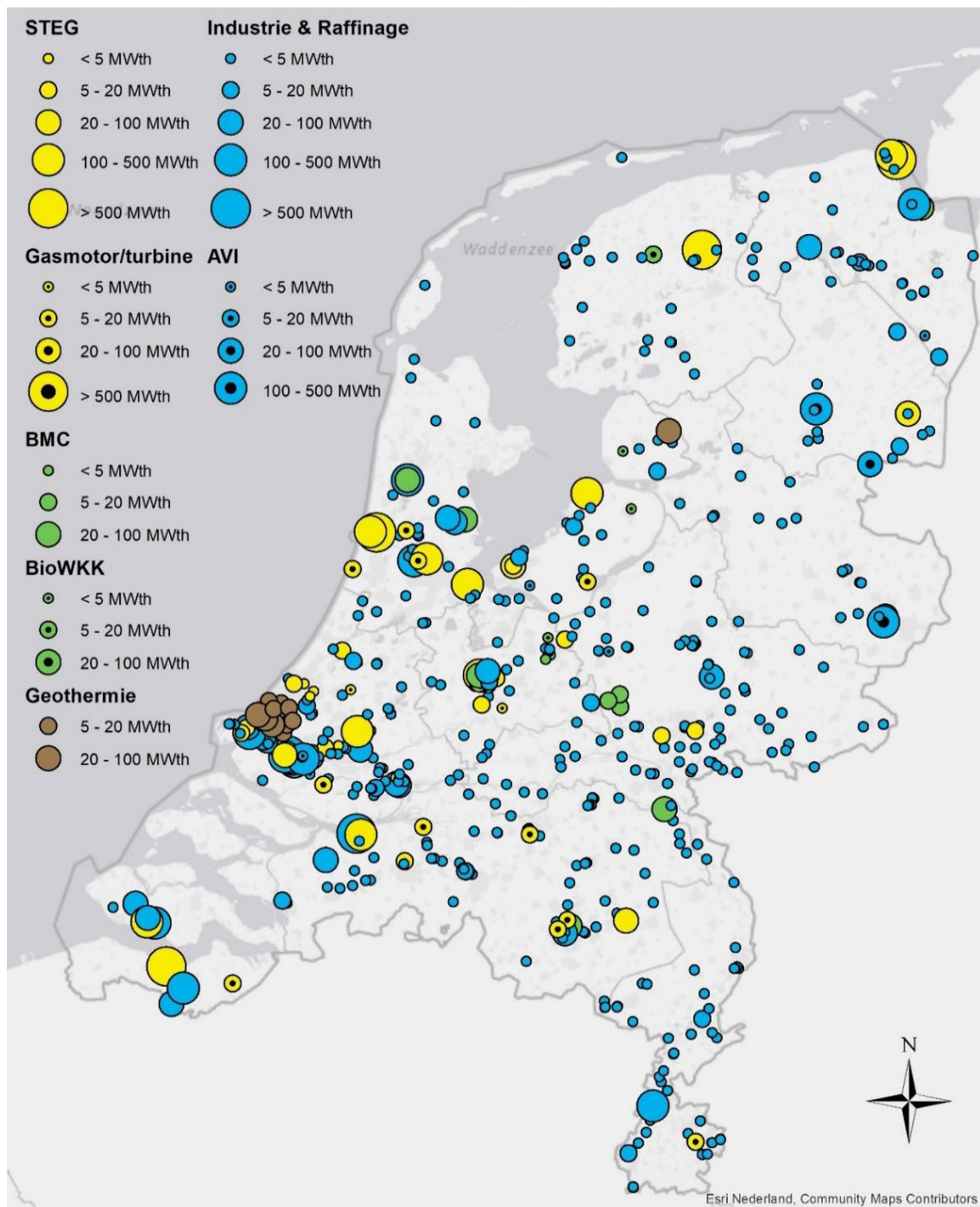
⁵¹ Zie bijvoorbeeld de Keuzeladder warmtebronnen in het Afwegingskader Warmtekeuzes voor de gebouwde omgeving in de provincie Zuid-Holland (PZH, 2021).

⁵² De voorvoegsels HT en MT in dit rapport (en in de Startanalyse) duiden op de temperatuur van het water dat aan warmtenetten wordt aangeboden. HT staat voor ‘hoge temperatuur’ en betekent 80 – 100 graden Celsius. MT staat voor ‘midentemperatuur’ en betekent 55 – 80 graden Celsius. Andere studies gebruiken die aanduiding voor de aflevertemperatuur van water uit warmtenetten, die doorgaans lager is dan de temperatuur van de bronnen.

Figuur 19

Locatie en vermogen van potentiële MT-warmtebronnen in Nederland. Bron: (PBL, 2022a)

temperatuur > 70 °C, verdeling naar locatie, type en capaciteit (Bron: Vesta MAIS PBL)



Veel restwarmte is nu nog afkomstig van fossiele bronnen en afval. Tegenstanders van warmtenetten met restwarmte vrezen dat ze daarmee voor lange tijd afhankelijk blijven van energiebronnen die niet passen in een duurzame toekomst (lock-in). Er is en wordt echter beleid ontwikkeld die warmtenetten verplicht om stapsgewijs over te schakelen op volledig hernieuwbare energiebronnen, om een lock-in te voorkomen.

5.2.2 Minder energie-opwek en import nodig

Hergebruik van restwarmte maakt het nationale energiesysteem efficiënter: dezelfde finale energiebehoefte kan worden gedekt met minder primaire energieproductie (opwek) of import. Warmtenetten zijn nodig om dat hergebruik mogelijk te maken.

Het opwekken van hernieuwbare energie (met windturbines en PV-panelen op daken en in velden) neemt meer ruimte in beslag dan we tot nu toe gewend waren met de productie van fossiele energiedragers (in raffinaderijen en uit gasvelden). In ons dichtbevolkte land vergroot dat de voortdurende strijd om de ruimte (de Klerk & van der Wouden, 2021) (Keulartz, 2023), zowel op zee als op land. Door hergebruik van restwarmte hoeft minder hernieuwbare energie te worden opgewekt en zal het toekomstig ruimtebeslag daarvoor dus minder groeien. Daarvoor is wel meer (ondergrondse) ruimte nodig voor warmtetransportleidingen en geothermieputten.

Om het nationale ruimtebeslag voor energieproductie te beperken, zou een deel van de energiebehoefte uit import gedekt kunnen worden. In het verre en recente verleden heeft Nederland ervaren dat afhankelijkheid van energie-import de bevolking kwetsbaar maakt voor scherpe prijsstijgingen en verstoring van de voorzieningszekerheid. Door meer restwarmte te hergebruiken, kan ook de afhankelijkheid van energie-import worden verlaagd.

Volgens een recente studie van de gezamenlijke netbeheerders is het technisch mogelijk dat Nederland in 2050 bijna zelfvoorzienend is in energie maar dat vergt veel ruimte en hoge investeringen in infrastructuur. Bij 90-95% zelfvoorziening is 2540 – 3165 km² extra ruimte op land nodig (vooral voor zonneweides en windturbines) terwijl scenario's met 28-54% import toekunnen met 1665 km² (berekend uit data in hoofdstuk 11 in (NBNL, 2023)). De energielevering via warmtenetten is in die scenario's overigens beperkt: gemiddeld jaarlijks 45 TWh (ofwel 8-9% van de finale energievraag) bij 5-10% import en 20 – 31 TWh (circa 5%) bij resp. 28 en 54% import. Minder import gaat (in die scenario's) dus gepaard met meer warmtenetten al is dat verband niet eenduidig. Minder import betekent ook een groter ruimtebeslag, maar zonder de bijdrage van warmtenetten zou dat nog groter worden.

5.2.3 Benutting van omgevingswarmte

Warmtenetten zijn ook geschikt om naast restwarmte verschillende vormen van omgevingswarmte (uit lucht, water of bodem) te benutten voor verwarming van gebouwen.

Aquathermie is de winning van warmte uit oppervlaktewater, riolen en zuiveringsinstallaties. Die warmte heeft lage temperaturen (5 – 15 graden) en is per bron of winningslocatie vaak in kleine hoeveelheden beschikbaar, meestal 50 – 150 GJ/jaar (NAT, 2022). Dat maakt dat de toepassing van aquathermie vooral beperkt is tot relatief kleine LT-warmtenetten. Via opwaardering tot hogere temperaturen, met een warmtepomp, kan aquathermie ook worden toegepast in MT- en HT-warmtenetten. Dat verhoogt wel het stroomverbruik en de kosten daarvan maar dan is er minder isolatie nodig in de gebouwen en zijn isolatiekosten minder hoog.

Geothermie kan op verschillende diepten uit de ondergrond worden betrokken⁵³, mits daar grondwater aanwezig is dat de warmte kan transporteren. In grote delen van Nederland is dat mogelijk, maar de diepe ondergrond is nog niet overal onderzocht op geschiktheid. Per kilometer diepte

⁵³ Vanaf 500 meter onder het maaiveld spreekt men van geothermie of aardwarmte; daarboven van bodemenergie. De bodem tot 500 meter diepte wordt gebruikt voor warmte-koude-opslag en voor winning van bodemenergie met bodem-warmtepompen.

stijgt de temperatuur van het grondwater gemiddeld met 30 graden. Oppompen ervan wordt bemoeilijkt door onzuiverheden, die corrosie en verstopping van leidingen kan veroorzaken. In 2020 waren 20 installaties in gebruik die 5,6 PJ warmte leverden, allemaal in tuinbouwgebied. In Den Haag, Haarlem, Utrecht en Zwolle zijn plannen ontwikkeld voor toepassing in woonwijken. Begin 2022 stonden meer dan 70 nieuwe projecten in de startblokken. Het Masterplan Aardwarmte (Platform Geothermie, DAGO, Stichting Warmtenetten, EBN, 2018) beoogt een productiegroei naar 200 PJ in 2050.

Aquathermie en geothermie hebben het voordeel dat ze binnen de landsgrenzen, in ruime mate, langdurig aanwezig zullen zijn. Die energie hoeft niet geproduceerd te worden, alleen maar ‘geogst’. Dat ‘oogsten’ is overigens niet gratis, maar het betekent wel dat de toekomstige beschikbaarheid en kosten goed voorspelbaar zijn en stabiel. Met aanvullend exploratieonderzoek in de ondergrond (SCAN) wordt de potentie van geothermie momenteel in kaart gebracht (SCAN, 2022). Omdat de kosten van het oogsten grotendeels afhankelijk zijn van investeringen in de pompinstallaties, zijn de warmtekosten bij aanvang van de exploitatie bekend. De technologie voor het oogsten van aqua- en geothermie is echter nog relatief nieuw en daardoor nu nog vrij duur. Tot 2030 wordt een kostendaling verwacht van 10-13 procent, zie bijlage.

5.2.4 Balanceren van het nationale energiesysteem

Technologische innovaties maken het mogelijk om warmtenetten te gebruiken voor meer dan alleen warmtevoorziening, bijvoorbeeld voor energieopslag en balanceren van het energiesysteem. Zo kunnen elektrische boilers ingezet worden om tijdelijke overschotten aan elektriciteit te absorberen en daarmee de fluctuerende warmtevraag van een warmtenet te bufferen. Warmtenetten kunnen ook worden ingezet om lokale omgevingswarmte (uit lucht, water of bodem) te benutten voor verwarming van gebouwen en productieprocessen. Andere mogelijkheden zijn de reductie van energieverlies en de opzet van een systeem van *prosumers*, dat wilt zeggen een systeem waar een gebouw zowel een consument als een producent van warmte kan zijn (Lund, 2021). In Nederland is nog weinig ervaring opgedaan met deze vormen van sectorkoppeling. In dit hoofdstuk verkennen we daarom alleen de kansen voor toekomstige groei in de benutting van restwarmte en omgevingswarmte. Daarbij zijn elektrische boilers, die een overaanbod van stroom benutten, te beschouwen als een speciale vorm van restwarmte.

5.3 Nationale kosten van warmtenetten

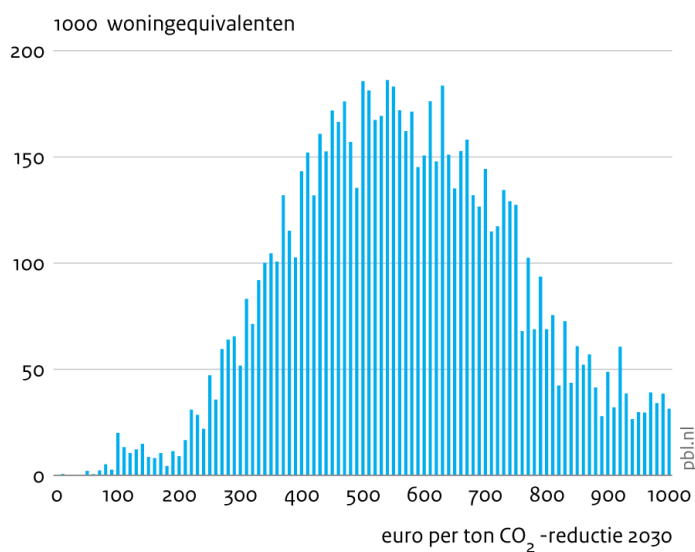
Voor alle gebouwen in Nederland zijn de kosten⁵⁴ van aansluiting op een warmtenet met HT- en MT-bronnen verkend in het kader van de Startanalyse voor aardgasvrije buurten (PBL, 2020w). De kosten van het aansluiten van gebouwen op een warmtenet worden door veel factoren bepaald. De kosten van de warmtetransport- en distributieleidingen zijn veruit de grootste kostenpost, 45-60 procent van de totale jaarlijkse kosten, gemiddeld over ruim 5 miljoen aansluiting. De kosten van de warmtetransportleidingen zijn lager voor aansluitingen die dicht bij de warmtebron liggen. Verwarmen met HT- en MT-restwarmte (inclusief warmte uit AVI's, WKK's en biomassacentrales) wordt naar verwachting per aansluiting jaarlijks gemiddeld 20-40 euro duurder dan geothermie,

⁵⁴ Het gaat hier om nationale kosten ofwel kosten voor de samenleving als geheel, exclusief heffingen, belastingen en subsidies. Een nadere toelichting op het toegepaste kostenbegrip staat in de bijlage.

afhankelijk van de isolatiegraad van gebouwen. Ten opzichte van de jaarlijkse leidingkosten van 600-800 euro per gemiddelde aansluiting zijn dat kleine bedragen. Ook de isolatiekosten van gebouwen zijn relevant. Na-isoleren tot schillabel D is veel goedkoper dan na-isoleren tot schillabel B, zoals toegelicht in hoofdstuk 4. Dat kostenverschil van gemiddeld 300 euro per jaar weegt vaak ruimschoots op tegen de extra kosten van een hoger energieverbruik van gemiddeld 30 euro.

Figuur 20 laat voor verschillende kostenniveaus (in stappen van 10 euro) zien hoeveel gebouwen (uitgedrukt in woningequivalenten) op een warmtenet kunnen worden aangesloten als je in elke buurt de goedkoopste warmtebron toepast (restwarmte of geothermie).

Figuur 20
Distributie van de jaarlijkse nationale kosten van verwarmen door warmtenetten met HT- of MT-warmtebronnen



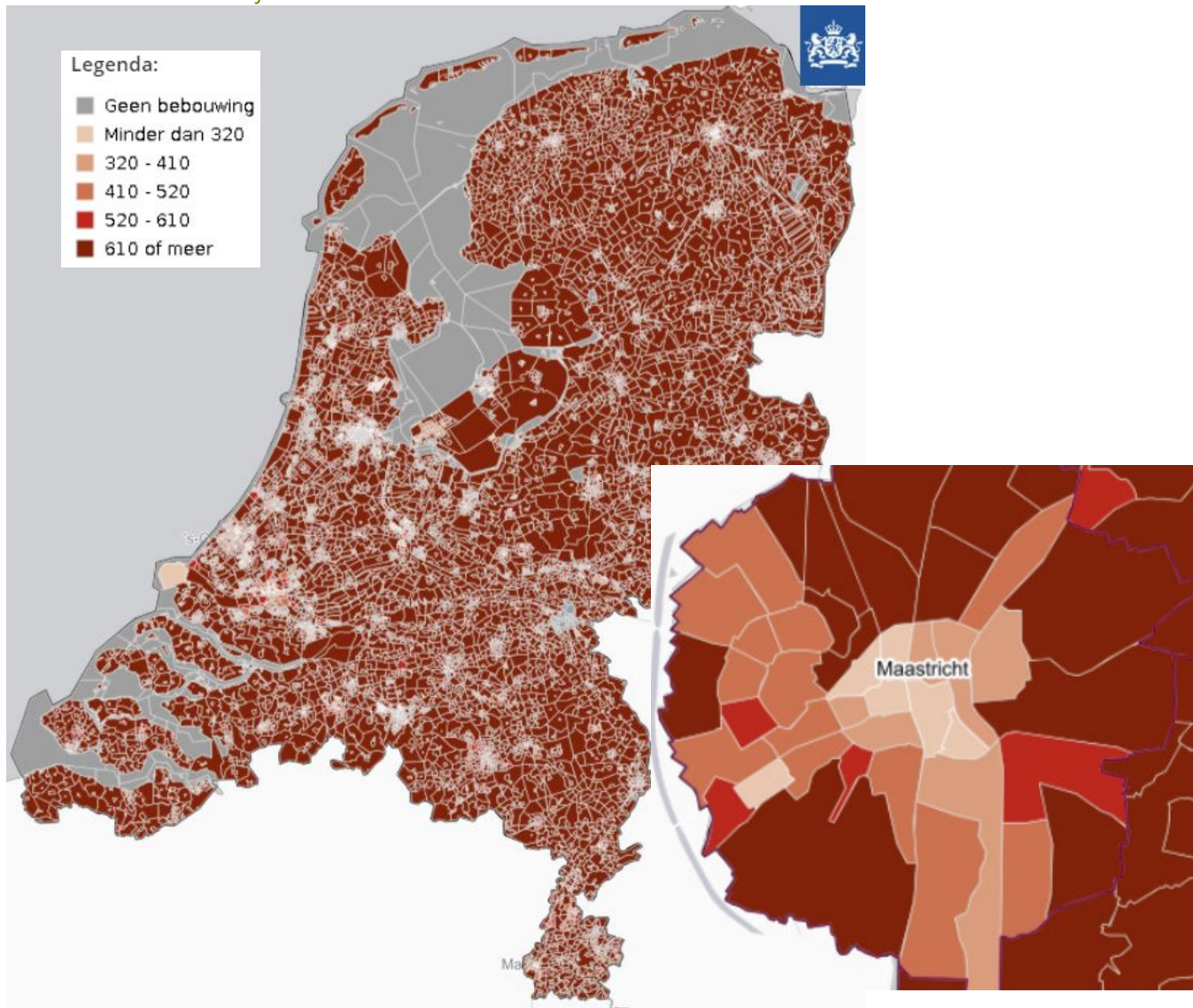
Bron: PBL

Uit bovenstaande grafiek volgt dat ruim 135.000 aansluitingen gerealiseerd kunnen worden voor minder dan 200 euro per ton CO₂-reductie. De duurste 200.000 aansluitingen kosten echter minimaal 950 euro per ton CO₂-reductie. Er zijn andere technische opties voor aardgasvrij verwarmen die aanmerkelijk goedkoper zijn dan die duurste aansluitingen op een warmtenet.

Figuur 21 laat zien hoe de kosten ruimtelijk verdeeld zijn in Nederland als elke buurt de goedkoopste warmtenetaansluiting aanlegt. Daaruit blijkt dat de aansluitingen met de laagste kosten voornamelijk in stedelijke gebieden voorkomen, wat beter te zien is op het ingezoomde kaartje van Maastricht, als voorbeeld. Dat komt omdat gebouwen in steden dicht op elkaar staan zodat met relatief korte buizen (dus tegen lage transportkosten) veel warmte getransporteerd kan worden. Dat verklaart ook waarom de huidige warmtenetten in stedelijk gebied liggen.

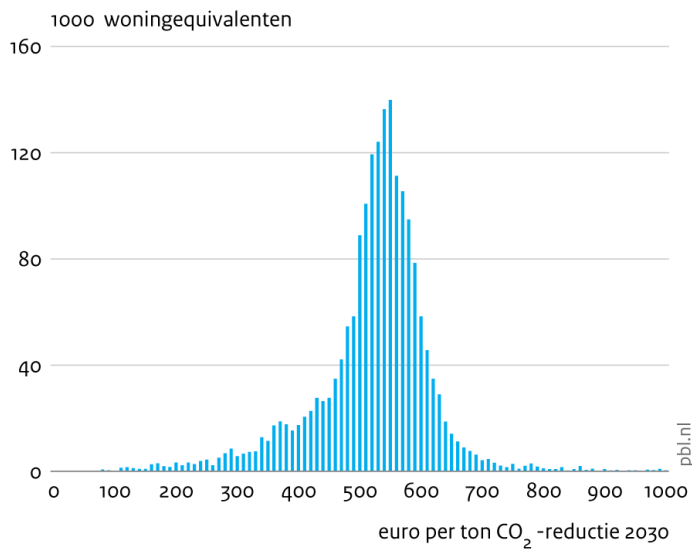
Figuur 21

Ruimtelijke verdeling van nationale kosten van MT- en HT-warmtenetten, in euro per ton CO₂-reductie. Bron: Startanalyse 2020



Voor warmtenetten met LT-bronnen (lage temperatuur) heeft PBL soortgelijke verkenningen gemaakt voor de Startanalyse. Onderstaande Figuur 22 laat zien dat de kosten van een aansluiting op een LT-warmtenet gemiddeld ongeveer gelijk zijn aan die van een MT-warmtenet (namelijk 500-600 €/ton) maar dat de spreiding in kosten veel kleiner is. In de range van lage en hoge kosten zijn voor een bepaald bedrag meer MT-aansluitingen te realiseren dan LT-aansluitingen. Wel moet worden bedacht dat de kostenkennallen van MT-netten zijn ontleend aan de praktijk terwijl voor LT-netten nog weinig praktijkcijfers bekend zijn.

Figuur 22
Distributie van de jaarlijkse nationale kosten van verwarmen
door warmtenetten met LT-warmtebronnen



Bron: PBL

5.4 Hoeveel nieuwe warmtenetten zijn kosten-efficiënt?

In 2020 waren in Nederland 434.800 woningen aangesloten op een warmtenet en die benutten jaarlijks ongeveer 11 PJ warmte⁵⁵ met een ‘hoge’ temperatuur van 70-100 graden. Daarnaast werd 9 PJ warmte geleverd aan bijna 10.000 gebouwen in de dienstensector. Het aantal aansluitingen kan nog flink omhoog. De KEV2022 raamt tot 2030 een toename met 110.000 nieuwe aansluitingen; 80.000 als gevolg van de SAH-regeling en 30.000 door Nieuwe Warmte Nu⁵⁶. Het kabinet wil 500.000 nieuwe aansluitingen op een warmtenet realiseren tot 2030 (Ministerie van BZK, 2022) en werkt aan aanvullende stimulansen. Met de warmtebronnen die op termijn (naar verwachting) beschikbaar zijn, zouden in theorie alle gebouwen met een warmtenet verwarmd kunnen worden. Dat wordt wel extreem duur. Dat komt vooral omdat warmte daarvoor over steeds grotere afstanden getransporteerd moet worden, wat hoge kosten met zich meebrengt. Als de aanleg van warmtenetten wordt beperkt tot gebieden met meer dan 50% kans op geothermie in de ondergrond, dan zouden ruim 8 miljoen weq’s aangesloten kunnen worden.

⁵⁵ De KEV2021 schat de energielevering uit warmtenetten op 11 PJ aan woningen en 9 PJ aan utiliteitsgebouwen. Het Nationale Warmtenet Trendrapport 2021 (DNE Research, 2020) komt tot hogere cijfers en vermeldt (op p.15) 29,7 PJ geleverde warmte in 2020, verdeeld over (zie figuur 7 op p.17) 2 PJ voor de tuinbouw, 4,8 PJ voor bestaande woningen en 6,5 PJ voor nieuwe woningen en 10,8 PJ voor de utiliteit; samen 25,1 PJ, minder dus dan het opgegeven totaal. Het is onduidelijk waar deze verschillen door worden veroorzaakt.

⁵⁶ Persoonlijke mededeling Casper Tigchelaar dd 14 juli 2023 nav vragen over toelichting op de KEV.

Met andere technieken kan de gebouwde omgeving op veel plaatsen tegen lagere nationale kosten klimaatneutraal worden gemaakt. Maar naast kostenminimalisatie kunnen ook andere overwegingen een keuze uit mogelijke technieken beïnvloeden, zoals:

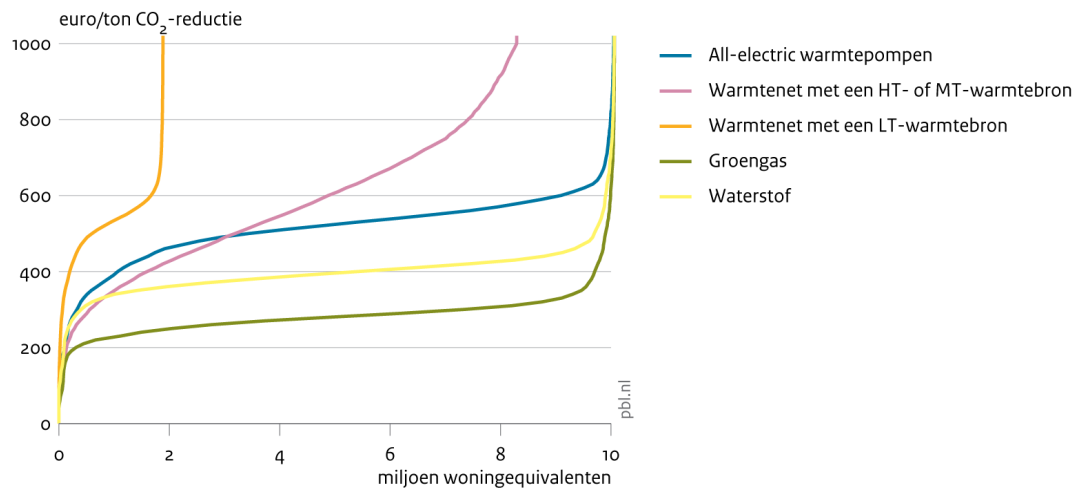
- De zekerheid waarmee technieken en energiedragers of energiebronnen voor 2050 of eerder beschikbaar komen en kunnen worden toegepast;
- De mate waarin een benodigde energiedrager nationaal beschikbaar is of kan komen, ofwel de afhankelijkheid van importen van energiedragers en de wenselijkheid daarvan; en
- De impact van technieken op het ruimtegebruik in Nederland.

Op elk van deze criteria scoren warmtenetten relatief gunstig ten opzichte van verwarmen met elektriciteit of met schone gassen. Dat zou vertaald kunnen worden in een maatschappelijke bereidheid om warmtenetten ook toe te passen als die (tot op zekere hoogte) duurder zijn dan de alternatieven.

Met behulp van de Startanalyse kunnen de nationale kosten van warmtenetten vergeleken worden met die van andere aardgasvrije technieken. Uit die analyse blijkt dat er geen buurten zijn waar verwarmen met warmtenetten op termijn lagere nationale kosten⁵⁷ heeft dan verwarmen met groengas, zie Figuur 23. Daar geeft de roze lijn het kostenverloop van aansluitingen op een MT-warmtenet en de oranje lijn die voor een LT-warmtenet. Beide lijnen liggen overal boven de groene lijn, die het kostenverloop van verwarmen met groengas beschrijft. Dat betekent dat verwarmen met groengas in alle gevallen de goedkoopste optie is. Aanleggen van warmtenetten kan toch economisch aantrekkelijk zijn voor de samenleving als er geen of weinig groengas beschikbaar komt voor de gebouwde omgeving omdat het elders wordt ingezet. Een soortgelijke redenering geldt voor de toepassing van waterstof (gele lijn) dat bij ruim 9 miljoen woningequivalenten (weq) lagere nationale kosten heeft dan warmtenet-verwarmen. Alleen bij de resterende circa 1 miljoen weq's ligt de gele lijn in de figuur namelijk boven de roze en is waterstof duurder. Zo is ook te zien dat all-electric verwarmen in 2030 bij circa 6,6 miljoen weq's goedkoper is (10,2 – 3,6).

⁵⁷ Nationale kosten hebben betrekking op productiekosten (voor de Nederlandse samenleving als geheel). Die vormen structureel een ondergrens voor marktprijzen en staan los van wat mensen ervoor zouden willen betalen. Schaarste aan groengas bijvoorbeeld zou kunnen leiden tot marktprijzen die aanmerkelijk hoger zijn dan de nationale productiekosten die hier zijn gehanteerd.

Figuur 23
Nationale kosten aardgasvrije strategieën



Bron: PBL

Voor een selectie van de goedkoopste opties is niet de absolute hoogte van kosten van belang maar de onderlinge verschillen tussen opties. De Startanalyse kwantificeert die verschillen met behulp van kostenschattingen voor 2030, in de veronderstelling dat de verschillen in 2030 een bruikbare indicatie zijn voor kostenverschillen in de komende decennia. Het valt te verwachten dat de productiekosten van bestaande technieken (zoals MT-warmtenetten en isolatie) op termijn minder zullen dalen dan productiekosten van relatief nieuwe technieken, zoals die voor productie van groengas en klimaatneutrale waterstof (met CCS of uit elektrolyse). Dat betekent dat het getoonde kostennadeel van warmtenetten op termijn eerder groter wordt dan kleiner en dat de toepassingsruimte voor warmtenetten eerder afhankelijk zal worden van de toekomstige beschikbare hoeveelheid schone gassen.

Partijen die in 2020 het Klimaatakkoord opstelden dachten toen dat de gebouwde omgeving op termijn en bij voorkeur vanaf 2030 over 70 PJ groengas zou kunnen beschikken, ofwel 2 miljard kubieke meter (bcm). In de hier getoonde berekeningen is dat vertaald in 1,5 bcm voor directe verwarming van gebouwen en 0,5 bcm voor de hulpketels van warmtenetten. Waterstof was toen nog verre toekomstmuziek en zou zeker niet vóór 2030 beschikbaar zijn voor de gebouwde omgeving. Die onzekerheid bestaat nog steeds, maar het is wel interessant te verkennen wat de mogelijke impact van waterstof zou kunnen zijn op de kansen voor warmtenetten. Tabel 34 laat daarom zien hoeveel bestaande gebouwen tot 2050 op warmtenetten aangesloten kunnen worden tegen de laagste nationale kosten bij verschillende veronderstellingen over de toekomstige beschikbaarheid van groengas en waterstof. Zonder inzet van schone gassen in de gebouwde omgeving leidt minimalisering van nationale kosten tot uitbreiding van warmtenetten tot maximaal 3,8 miljoen weq's. Bij toepassing van 2 bcm groengas daalt dat aantal naar 3,3 miljoen weq's en bij onbeperkte beschikbaarheid van groengas en waterstof blijven alleen de huidige warmtenetten (met 0,4 mln aansluitingen) nog over, plus een deel van de te verwachten nieuwbouw.

Tabel 35

Het aantal warmtenetaansluitingen in 2050 van bestaande gebouwen (in miljoen weq's) en nationale jaarlijkse kosten (in miljard euro per jaar) bij verschillende beschikbare hoeveelheden groengas (Gg) en waterstof (H₂), beide in miljard kubieke meter (bcm) per jaar.

Aardgasvrije strategieën	Gg onbeperkt H ₂ onbeperkt	1,5+0,5 bcm Gg H ₂ onbeperkt	1,5+0,5 bcm Gg 0 bcm H ₂	0 bcm Gg 0 bcm H ₂
Groengas (mln. weq)	9.7	2.6	2.6	0
Waterstof (mln. weq)	0.0	5.7	0.0	0
All-electric (mln. weq)	0.1	0.4	4.2	6.4
MT-netten (mln. weq)	0.3	1.4	3.0	3.4
LT-netten (mln. weq)	0.02	0.1	0.3	0.4
Nationale kosten (miljard €/jaar)	6,4		9,0	11,4

De politieke vraag is nu hoeveel de samenleving meer wil betalen voor de zekerheid dat alle gebouwen in 2050 aardgasvrij zijn, gegeven de onzekerheid over de toekomstige beschikbaarheid en nationale productiekosten van schone gassen. Een keuze voor zekerheid betekent helemaal afzien van gebruik van schone gassen in de gebouwde omgeving en 3,8 miljoen weq's op warmtenetten aansluiten. Dat betekent ook dat de nationale kosten van CO₂-reductie dan oplopen tot jaarlijks 11,4 miljard euro, zie laatste regel in Tabel 34. Dat is jaarlijks 5 miljard euro (78%) meer dan bij onbeperkte beschikbaarheid van schone gassen.

5.5 Meer warmte-aansluitingen realiseren

5.5.1 Randvoorwaarden voor extra warmte-aansluitingen

Het aanleggen van een warmtenet vereist veel overleg tussen een groot aantal partijen: warmtebedrijven, warmtebroneigenaren, gebouweigenaren, bewoners en gemeenten. In nieuwbouwwijken is het meestal eenvoudiger om overeenstemming te bereiken omdat de aanlegkosten daar lager zijn en omdat de bewoners nog onbekend zijn en dus niet aan het overleg deelnemen. Bij warmtenetten voor de bestaande bouw krijgen bewoners een belangrijke stem in de besluitvorming. Woningcorporaties die een aansluiting overwegen, hebben instemming nodig van minstens 70% van hun huurders. Het zal moeilijk zijn om bewoners enthousiast te maken voor een warmtenet als verwarming dan (veel) duurder wordt dan verwarmen met een andere klimaatneutrale techniek. Warmtebedrijven moeten er op kunnen vertrouwen dat zij hun investering in een warmtenet binnen redelijke termijnen kunnen terugverdienen. Zij moeten dus een sluitende en legitieme business-case kunnen maken. Daarnaast kunnen allerlei andere eisen aan warmtenetten worden gesteld om hun aantrekkelijkheid te vergroten. Van energiesystemen wordt verwacht dat ze veilig en betrouwbaar zijn (zelden storing vertonen) en altijd voldoende energie leveren. Dat betekent extra verplichtingen voor warmtebroneigenaren. Voor hen kan levering van restwarmte op gespannen voet gaan staan met het managen van hun primaire productieproces. Warmtenetten moeten ook ruimtelijk en landschappelijk inpasbaar zijn en zo snel mogelijk geen broeikasgassen emitteren. Deze en meer functionele eisen kunnen worden vertaald in ontwerp- en operationele keuzes, die invloed hebben op de kosten van die systemen.

Bij de berekening van nationale kosten van warmtenetten in de vorige paragraaf, is verondersteld dat aan die eisen wordt voldaan. Maar daarmee is nog niet geregeld dat warmtenetten voor afnemers financieel aantrekkelijk en voor warmtebedrijven rendabel zijn. In paragraaf 5.5.2 gaan we na

in welke mate de private kosten van warmtenetten aantrekkelijk zijn voor gebouweigenaren en warmtegebruikers. Paragraaf 5.5.3 gaat over hoe warmtebedrijven een positieve business-case kunnen krijgen onder de huidige regelingen. Als dat niet het geval is, kan de overheid daar verandering in brengen door regelingen te veranderen. In paragraaf 5.5.4 zetten we daarvoor een aantal opties op een rij.

5.5.2 Kosten en kostenverdeling

Tot hier stond dit betoog over de kostenefficiëntie van warmtenetten in het teken van minimalisering van de nationale kosten, van de transitiekosten voor de samenleving als geheel. Maar de wenselijkheid van warmtenetten zal natuurlijk ook worden bepaald door de private kosten die gebouweigenaren en bewoners gaan betalen.

Private kosten kunnen worden afgeleid van nationale kosten door daar belastingen bij op te tellen en subsidies van af te trekken. Verder moet de rentevoet worden aangepast aan niveaus die private partijen betalen bij de financiering van hun investeringen. Deze private kosten vormen de ondergrens van marktprijzen die in de praktijk zullen optreden. Bij een beperkt aanbod willen sommige consumenten wel iets meer betalen dan de productiekosten om zo het schaarse goed te bemachtigen. In dit rapport hanteren we private kosten om de aantrekkelijkheid van opties te vergelijken, voornamelijk omdat die nauwkeuriger geschat kunnen worden dan marktprijzen.

Tabel 36

Vergelijking van gemiddelde nationale en private kosten^{*)} van warmtestrategieën in 2030 voor koopwoningen, in euro per woningequivalent per jaar. Bron private kosten: (TNO, 2021d), tabel 3-2.

Warmtestrategie	Nationale kosten, schillabel D (€/weq,j)	Nationale kosten, schillabel B (€/weq,j)	Private kosten, schillabel D (€/weq,j)	Private kosten, schillabel B (€/weq,j)	Maximale toepassing (mln. weq)
all-electric	n.b.	1121	n.b.	93	10,2
HT-MT-warmtenet	1143	1365	569	866	5,2
LT-warmtenet	1132	1170	569	866	1,2
groengas + HR-ketel	642	878	38	354	10,2
waterstof + HR-ketel	889	1115	n.b.	n.b.	10,2

^{*)} De tabel geeft jaarlijkse kosten in 2030 (extra t.o.v. kosten van verwarmen met aardgas in 2019) voor koopwoningen, gewogen over alle onderzochte woningcategorieën. Private kosten zijn berekend voor aflossing van een hypothecaire lening voor 30 jaar met 3% rente. Voor huurwoningen geldt een soortgelijk kostenpatroon.

Uit berekeningen van private kosten van warmteopties (TNO, 2021b) blijkt, dat verwarmen met een warmtenet (stadsverwarming) voor bewoners gemiddeld duurder is dan verwarmen met andere opties. Dat is ook het geval bij nationale kosten, zie Tabel 35, maar de verschillen met de all-electric opties zijn groter. Private kosten van warmtenetten zijn gemiddeld lager dan nationale kosten omdat a) de warmteprijs die consumenten betalen gemaximeerd is volgens het NMDA-principe⁵⁸ en b) omdat gebouweigenaren subsidie krijgen op de eenmalige aansluitkosten.

⁵⁸ Het NMDA-principe (Niet Meer Dan Anders) koppelt de warmteprijs aan de prijs van aardgas en is ingesteld om consumenten te beschermen tegen de marktmacht van warmtebedrijven. De NMDA-prijs in 2030 is naar verwachting lager dan de gemiddelde nationale leveringskosten van warmte in 2030 die onderdeel zijn van de nationale kosten in Tabel 35.

Ondanks deze subsidies voor warmtenetten zijn de andere opties voor bewoners veel goedkoper. Dat komt niet alleen omdat de productiekosten van die opties lager zijn maar ook doordat elektrische en hybride warmtepompen (via de ISDE-regeling) en groengas (met SDE+) flink gesubsidieerd worden. Dat maakt het moeilijk om bewoners enthousiast te maken voor aansluiting op een warmtenet.

Grote spreiding in private kosten bij koopwoningen

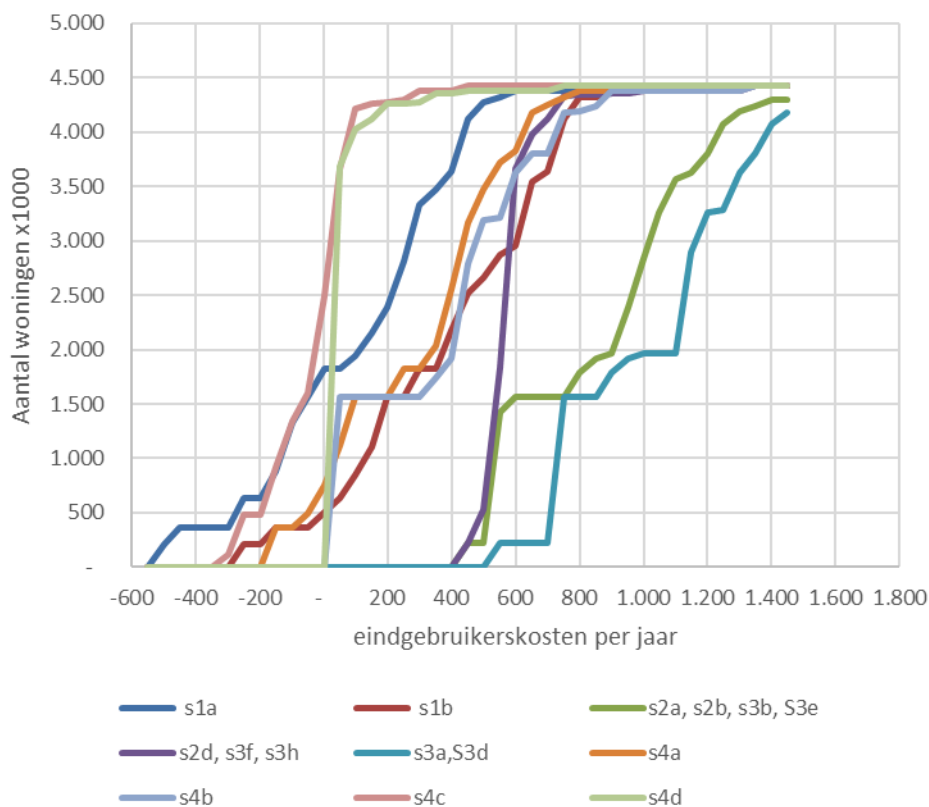
Net als bij nationale kosten vertonen de private kosten van stadsverwarming een grote spreiding. Dat biedt mogelijkheden om op zoek te gaan naar de woningen met relatief lage private kosten van stadsverwarming. Een meergezinswoning verwarmen met stadsverwarming kost in 2030 gemiddeld 520-830 euro per jaar (extra ten opzichte van verwarmen met een cv-ketel op aardgas) terwijl bij een gemiddelde vrijstaande woning 700 tot 1300 euro extra betaald moet worden, berekend met het Dashboard Eindgebruikerskosten (TNO, 2021d). Woningen met een slecht energielabel aansluiten en opplussen naar schillabel D kost meer dan woningen die al een schillabel D of beter hebben omdat daar ook nog isolatiemaatregelen betaald moeten worden. Een relatief hoog of laag gasverbruik heeft weinig invloed op de extra kosten van stadsverwarming omdat de variabele warmtetarieven worden afgestemd op de gastarieven volgens het NMDA-principe⁵⁹.

Figuur 24 geeft een indruk van de spreiding in kosten per woning die voortkomt uit verschillen in woningtype, bouwperiode, oppervlakte en energieverbruik. Elke lijn in die grafiek hoort bij een aardgasvrije warmtestrategie; de drie rechter lijnen horen bij verschillende soorten warmtenetten, aangeduid met s2a, s2b etc., tot en met s3f. Strategieën rechts in de figuur hebben hogere private kosten (eindgebruikerskosten) dan strategieën links in de figuur. De goedkoopste aansluitingen op een warmtenet (inclusief na-isoleren tot schillabel D) kosten jaarlijks minimaal 400 euro meer dan de huidige verwarming met aardgas (zonder na-isolatie), zie de paarse en donkergroene lijnen. Aansluiten van 1,5 miljoen woningen op een warmtenet kost de eindgebruiker jaarlijks minimaal 500 tot 600 euro. In combinatie met isoleren tot schillabel D zou dat aantal voor 600 euro per jaar kunnen groeien tot 3,5 miljoen aansluitingen (paarse lijn, s2d) maar met na-isoleren tot schillabel B stijgen de kosten bij die aantallen tot boven de 1100 euro per jaar (donkergroene lijn, s2a).

⁵⁹ Bij de aangekondigde herziening van de warmtewet wordt het NMDA-principe (na een overgangperiode) geleidelijk vervangen door een tariefstelsel gebaseerd op werkelijke kosten. Dat zal vermoedelijk leiden tot hogere kosten dan nu, niet alleen omdat produceren van hernieuwbare warmte duurder is dan fossiele restwarmte maar ook omdat toekomstige aansluitingen minder gunstig zijn gelegen ten opzichte van warmtebronnen en dus hogere leveringskosten zullen veroorzaken.

Figuur 24

Verdeling van eindgebruikerskosten in 2030 voor eigenaar-bewoners met hypotheek, exclusief subsidie (x-as in euro per woning per jaar) om bijna 4,5 miljoen bestaande koopwoningen (y-as) aardgasvrij te maken met verschillende aardgasvrije verwarmingssystemen (zie legenda)⁶⁰. S1 betreft warmtepompen; S2 warmtenet met MT-HT-bronnen; S3 warmtenet met LT-bronnen; S4 groengas. Bron: (TNO, 2021b), figuur 4-4.



Dit is vermoedelijk een onderschatting van de private kosten. Vrijwel altijd betalen gebouweigenaren een aansluitbijdrage (BAK) om de kosten van het distributienet te helpen financieren. Bij de berekening van private kosten heeft TNO een standaard BAK gebruikt van 3728 euro per aansluiting (ex BTW); de maximum aansluitbijdrage die de ACM anno 2020 toestond. Warmtebedrijven geven aan dat in de huidige projecten eigenlijk 8-9000 euro per aansluiting nodig is voor een sluitende businesscase. Dat zou betekenen dat de werkelijke private kosten hoger zijn dan de TNO-cijfers aangeven. Dat geldt nog meer als je bedenkt dat toekomstige warmteprojecten waarschijnlijk duurder worden dan de huidige omdat minder gunstig gelegen gebouwen doorgaans later worden aangesloten.

Private kosten en kostenverdeling bij huurhuizen

De private kosten van stadsverwarming zijn bij een huurhuis in beginsel gelijk aan die bij een koopwoning, maar bij huurhuizen moeten die kosten worden verdeeld tussen huurder en verhuurder. Die verdeling is afhankelijk van afspraken die daarover gemaakt zijn (en worden). Huurcommissies hanteren algemeen geldende regels over het doorberekenen van investeringskosten in de huren.

⁶⁰ In de bijlage wordt de betekening van de codes van de onderzochte verwarmingssystemen toegelicht.

Bij huurverhoging volgens de huurcommissiemethode mag een groot deel van de kosten van verduurzamingsmaatregelen worden doorberekend in de huren. Voor huurders wordt die hogere huur volgens de TNO-studie (TNO, 2021b, p. 3) slechts gedeeltelijk gecompenseerd door lagere energiekosten als gevolg van isolatiemaatregelen. Huurders krijgen zo dus te maken met jaarlijkse kosten. In het Sociaal Huurakkoord van 2018 en van 2020 is afgesproken dat de huurverhoging ten gevolge van verduurzamingsmaatregelen is gemaximeerd, zodat hij meestal kleiner is dan de besparing op de energierekening. Huurders van corporaties die het Sociaal Huurakkoord hebben ondertekend gaan er dus netto op vooruit als hun woning wordt verduurzaamd. De kosten voor verhuurders zijn bijna altijd hoger dan de extra baten door huurverhoging, volgens beide methoden om huurverhoging door te berekenen aan huurders. Bij het Sociaal Huurakkoord is het nadeel voor de verhuurders groter.

Kunnen private kosten van stadsverwarming omlaag?

Uit voorgaande verhandeling blijkt dat de verwachte private kosten van stadsverwarming beduidend hoger zijn dan die van alternatieven. Om stadsverwarming financieel aantrekkelijk te maken voor gebouweigenaren en warmteafnemers, zullen de verwachte private kosten dus moeten dalen ten opzichte van die van alternatieven. Kostendaling voor de afnemers van stadsverwarming kan langs meerdere wegen worden bereikt: a) door ontwikkeling van goedkopere productiemethoden, b) door ontwerpen van meer kosten-efficiënt infrastructures, c) door het aantal afnemers per warmtenet te vergroten, d) door de kapitaalkosten te verlagen, e) door een (groter) deel van de private kosten door andere partijen te laten betalen en f) door eventuele overwinsten van warmtebedrijven af te romen.

Bij de huidige prijsmethodiek (waarbij de warmteprijs is gekoppeld aan de aardgasprijs) behaalden warmtebedrijven gemiddelde rendementen die schommelden tussen 7,7 en 2,1 procent, zie Tabel 36. De cijfers zijn een gewogen gemiddelde waarin de grote warmtenetten zwaarder wegen. Omdat die rendementen een momentopname zijn, kan de ACM geen conclusies trekken over de redelijkheid ervan. Om dat te kunnen doen “is aanvullende informatie nodig over (historische) kosten, opbrengsten en activawaarde uit het verleden die bij de meeste warmteleveranciers niet eenvoudig voorhanden is” (ACM, 2021, p. 6). Toch geven deze cijfers geen aanleiding te veronderstellen dat warmtebedrijven grote winsten maken⁶¹ en hun tarieven zullen verlagen als overwinsten worden afgeroomd of als ze op termijn, conform de voorgestelde nieuwe warmtewet (Wcw) moeten overstappen op een kostprijs-plus-methodiek.

Tabel 37

Rendement op geïnvesteerd kapitaal van warmteleveranciers. Bron: (ACM, 2021)

Jaar	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Rendement	7,7%	2,1%	2,2%	4,8%	5,5%	6,4%	5,5%	4,2%

Een ontkoppeling van warmteprijs en gasprijs geeft consumenten wel bescherming tegen plotse gasprijsstijgingen, zoals die in 2022, toen warmtebedrijven hun maximumtarieven met 67% mochten verhogen. Die bescherming is echter beperkt wanneer de inkoopkosten van warmte voor warmtebedrijven gekoppeld is aan de gasprijs. Verder kan het gebruik van hernieuwbare warmte

⁶¹ Warmtebedrijven geven aan met interne rentevoeten van minimaal 6,8% te rekenen, met een bandbreedte van 5 – 8% (CE Delft, 2022w, p. 32).

duurder worden als de SDE++ subsidie aan de gasprijs gekoppeld is. Daarnaast kunnen de beoogde verhogingen van de energiebelasting (en ODE) op aardgas er toe leiden dat de warmteprijs verder gaat stijgen terwijl de kosten voor het warmtebedrijf daar niet door worden beïnvloed. Maar sinds oktober 2021 heeft de ACM het recht in te grijpen als warmtebedrijven onredelijke rendementen maken en dat zou onredelijke stijgingen van warmtepreizen moeten voorkomen.

5.5.3 De businesscase van warmtebedrijven

Warmtenetten worden pas aangelegd als warmtebedrijven daar ‘brood in zien’; als ze met enige zekerheid de hoge investeringen kunnen terugverdienen. Om de verwachte inkomsten te kunnen schatten, is op zijn minst duidelijkheid nodig over het te verwachten aantal aansluitingen, de te leveren hoeveelheid warmte en de piekvraag.

In het Klimaatakkoord is afgesproken dat via de wijkaanpak duidelijkheid verkregen kan worden over het aantal aansluitingen. In de wijkaanpak kiezen gemeenten met hun inwoners de gewenste aardgasvrije strategie. Als een warmtenet in veel gevallen zowel maatschappelijk als privaat-economisch de duurste optie is, dan valt niet te verwachten dat veel buurten op een warmtenet willen worden aangesloten. Bij de huidige inzichten en regelingen is dat nog het geval, maar nieuw en aangekondigd rijksbeleid zou daar wel verandering in kunnen brengen.

Nieuwe warmtewet kán het investeringsrisico reduceren

Sinds enkele jaren werkt de overheid aan een nieuwe Warmtewet, ofwel Wet collectieve warmtevoorziening (Wcw). Daarin wordt onder andere geregeld dat de warmteprijs niet langer wordt afgeleid van de aardgasprijs (NMDA-methodiek) maar van de werkelijke productiekosten van warmte plus een redelijk rendement voor warmteleveranciers. Die wijziging vergroot de zekerheid dat warmtebedrijven hun kosten kunnen terugverdienen en zou investeren aantrekkelijker moeten maken. Dalende gasprijzen en dus dalende inkomsten vormen dan niet langer een risico dat moet worden afgedekt. Dat betekent dat een businesscase bij een lagere interne rentevoet sluitend wordt. Bovendien ontstaat hierdoor financiële ruimte om warmtenetten aan te gaan leggen die duurder zijn dan bestaande netten. De inkomsten worden immers niet langer gemaximeerd door de NMDA-methodiek.

Lager volloprisico bij beëindiging aardgaslevering

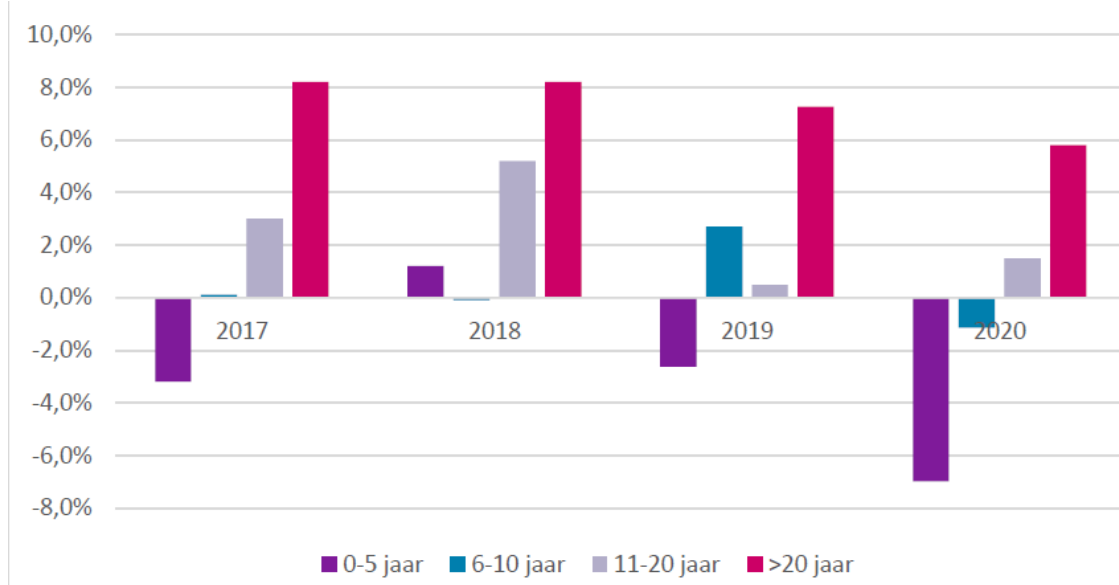
Zolang bewoners aardgas kunnen gebruiken, kunnen ze een aanbod voor aansluiting op een warmtenet afwijzen zonder in de kou te belanden. Warmtebedrijven lopen hiermee een risico op onvoldoende aansluitingen (het volloprisico) en zullen dat financieel willen afdekken. Dat risico wordt aanmerkelijk lager als gemeenten de bevoegdheid krijgen om de levering van aardgas in een gebied te beëindigen. Een wetsvoorstel dat gemeenten die bevoegdheid geeft (Wgiw) is inmiddels bij de Tweede Kamer ingediend. De levering van aardgas kan alleen worden gestopt als een klimaatneutraal alternatief wordt geboden, maar dat hoeft geen warmtenet te zijn. Warmtenetten kunnen door de Wgiw wel goedkoper worden wegens een lager volloprisico maar zullen nog steeds moeten concurreren met klimaatneutrale alternatieven.

Nieuwe warmtenetten mogelijk duurder dan bestaande

Het is aannemelijk dat bestaande warmtenetten zijn aangelegd op plekken waar de kosten relatief laag zijn. Het is ook aannemelijk dat nieuwe warmtenetten op minder gunstige locaties worden aangelegd en daardoor per aansluiting hogere kosten hebben. Dat wordt enigszins ondersteund door de bevinding van de ACM dat de rendementen van oude warmtenetten hoger zijn dan die van jonge, zie Figuur 25, maar dat kan ook komen doordat bij jonge netten nog niet alle beoogde gebruikers zijn aangesloten.

Figuur 25

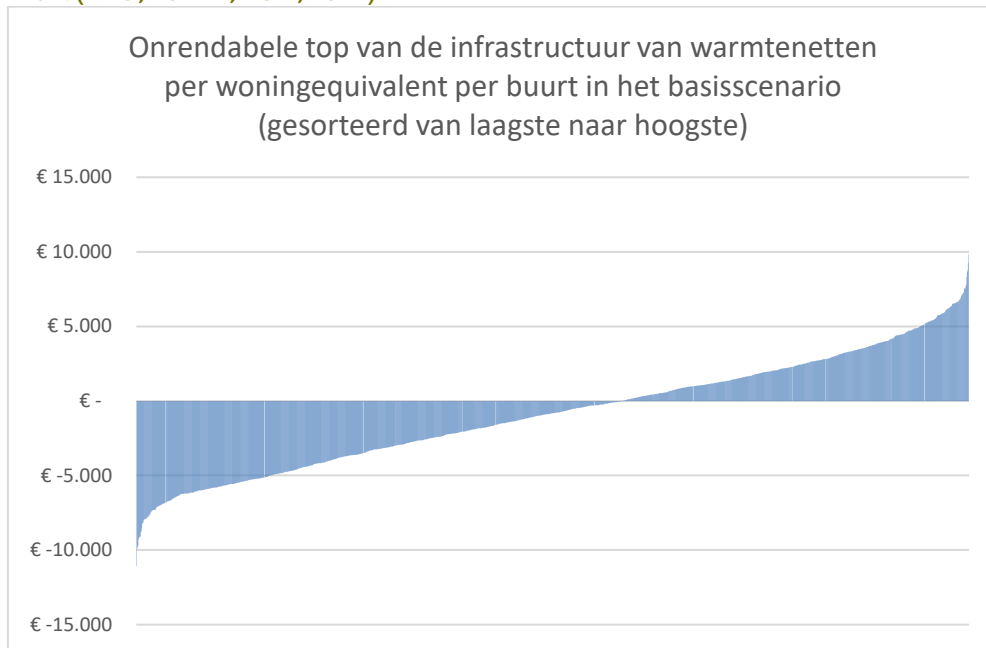
Rendement op geïnvesteerd kapitaal van warmteleveranciers, uitgesplitst naar leeftijd primair warmtenet. Bron: (ACM, 2021)



TNO heeft schattingen gemaakt van de onrendabele top van de infrastructuur van nieuwe warmtenetten met MT-bronnen in 1725 buurten waar een MT-warmtenet volgens de Startanalyse de laagste nationale kosten heeft. In die berekening zijn de kosten van ontwikkeling van warmtebronnen, in pandige kosten vanaf de afleverset en kosten van een participatieproces niet opgenomen. Figuur 26 laat zien dat de onrendabele top in 1000 van de 1725 buurten negatief is (en de businesscase dus positief is) bij de default-waarden van parameters in de Startanalyse en in het Template businesscase warmtenetten (ECW, 2022). Als echter 20% van de woningen in die buurten niet wil worden aangesloten, dan daalt het aantal buurten met een positieve businesscase met 62%. Als de investeringskosten 20% hoger zijn dan de default-waarden, de warmteprijs 20% lager of het minimale rendement 2% hoger, dan daalt in elk van die gevallen het aantal rendabele buurten met 40%. “Een combinatiescenario met hogere investeringskosten, lagere warmteprijs en hoger rendement zorgt ervoor dat geen enkele buurt meer een positieve businesscase laat zien” (TNO, 2022w, p. 4). Omdat de werkelijke kosten waarschijnlijk hoger zijn dan in die studie werd verondersteld, is het dus waarschijnlijk dat nieuwe warmtenetten niet rendabel worden, tenzij ze fors gesubsidieerd worden, hun kosten weten te drukken of een hoge aansluitbijdrage kunnen regelen. Daar komt nog bij dat warmtebronnen de komende jaren verduurzaamd moeten worden, wat de inkooprij van warmte waarschijnlijk zal verhogen.

Figuur 26

Gemiddelde onrendabele top van de infrastructuur van warmtenetten per buurt, in euro per woningequivalent. Op de x-as zijn 13.600 buurten gesorteerd van lage naar hoge onrendabele top^{a)}.
Bron: (TNO, 2022w; ECW, 2022)



a) Infrastructuur met een negatieve onrendabele top is rendabel.

Investeringssubsidie warmtenetten

Vanaf juni 2023 kunnen investeerders in een warmtenet voor bestaande gebouwen een investeringssubsidie (WIS) aanvragen. De subsidie dekt de hele onrendabele top, met een maximum van 45% van de subsidiabele kosten en maximaal 6.000 euro per kleinverbruikersaansluiting (RVO, 2023). Voor 2023 is 200 miljoen euro uit het Klimaatfonds toegekend; voor latere jaren is in het Ontwerp MJP Klimaatfonds nog eens 1,4 miljard euro gereserveerd (Ministerie van EZK, 2023). Begin augustus was het budget voor 2023 overtekend. Deelnemende projecten moeten binnen 7 jaar worden gerealiseerd en dan minimaal 60% van alle beoogde kleinverbruikers hebben aangesloten.

Publiek eigendom warmtenetten maakt financiering goedkoper ...

In 2022 is besloten ook een wijziging in de Wcw op te nemen die regelt dat het eigendom van nieuwe distributienetten in handen komt van gemeenten en dat die van bestaande netten na een overgangperiode ook in publieke handen komt. Met die aanpassing krijgen gemeenten meer invloed op het beheer van warmtenetten maar dragen ze ook het risico van de exploitatie. Het zou ook kunnen leiden tot meer transparantie en groter draagvlak onder bewoners. Omdat gemeenten goedkoper geld kunnen lenen dan commerciële partijen, kunnen de kapitaalslasten van warmtenetten substantieel dalen. Publieke partijen nemen ook vaak genoeg met een lager rendement op investeringen. Dat maakt warmtenetten goedkoper voor de afnemers en dus aantrekkelijker.

... maar maakt investeerders kopschuw

Bestaande warmtebedrijven maakten bezwaar tegen deze socialisering van warmtenetten. Ze zijn bang dat ze te zijner tijd onvoldoende financieel gecompenseerd worden voor de waarde van hun huidige distributienetten. Ze stellen ook dat investeren in publieke warmtenetten voor hen niet interessant is. Voor een snelle uitbreiding van warmtenetten is het niet bevorderlijk als bestaande, ervaren partijen zich daar uit terugtrekken. PWC concludeerde derhalve: “De voorgeno-

verplichting van publiek eigendom van de infrastructuur zal de komende jaren het uitroltempo van warmtenetten sterk vertragen, vooral als gevolg van het negatieve effect op private investeringen en het tijdrovende transitieproces naar een publiek gedreven ontwikkelmodel. Het realiseren van een verdubbeling van het ontwikkeltempo – benodigd om het doel van 500.000 aansluitingen in 2030 te realiseren – wordt daarmee waarschijnlijk onhaalbaar” (PWC, 2022). Minister Jetten van EZK denkt vertraging te kunnen beperken door gedurende een ingroeiperiode van zeven jaar private partijen ontheffing te bieden en door veel publiek kapitaal beschikbaar te stellen via de BNG en InvestNL.

Dat gemeenten een grotere rol krijgen bij het beheer van warmtenetten kan het draagvlak onder bewoners ten goede komen. Zij worden klant bij ‘hun eigen warmtenet’ en kunnen lokale bestuurders aanspreken als er problemen zijn in plaats van een onbekende directie van een groot bedrijf ver weg. Denemarken heeft goede ervaringen met warmtenetten onder lokaal bestuur. In Nederland kennen we dat in Purmerend en Nijmegen. Zo’n aanpak betekent wel dat meer gemeenten warmtenet-expertise moeten gaan opbouwen en daar is ook tijd voor nodig. Bovendien biedt een publiek meerderheidsbelang nog geen garantie op korte lijntjes naar het management; dat kan ook in handen worden gegeven van een warmtebedrijf op afstand. “Dit transitieproces is naar verwachting complex en tijdrovend, maar met organisatorische en financiële ondersteuning van het Rijk op termijn wel haalbaar” (PWC, 2022).

Hoge vaste tarieven verlagen investeringsrisico

Warmtebedrijven zijn tot op zekere hoogte vrij in het bepalen van hun tariefstructuur. Gerekend over de levensduur van een warmtenet vormen de investeringen het grootste deel van de totale kosten. Een deel van die kosten worden doorberekend in de vorm van een eenmalige aansluitbijdrage (BAK), een ander deel in vaste leveringstarieven (vastrecht en meettarief) en de rest in de warmteprijs. Bedrijven kunnen hun investeringsrisico reduceren door afspraken te maken over een hoge BAK en door bij klanten een hoog vastrecht in rekening te brengen. Maar een hoog vastrecht is geen reclame voor nieuwe klanten in bestaande woningen die nu nog met aardgas verwarmen en aanmerkelijk minder vastrecht betalen⁶². Verlagen van het vastrecht moet worden gecompenseerd met verhogen van de warmteprijs om naast de exploitatiekosten ook een deel van de investeringen terug te verdienen. Die verhoging wordt echter gemaximeerd door de ACM die jaarlijks maximale warmtetarieven vaststelt op basis van de aardgasprijs (volgens het Niet-Meer-Dan-Anders principe NMDA). Als NMDA op termijn wordt vervangen door een kostprijs-plus-methode dan lijkt er ruimte te komen om een groter deel van de kosten via de warmteprijs te verrekenen. Een hogere warmteprijs vergroot echter de financiële prikkel voor afnemers om hun verbruik te reduceren middels energiebesparende maatregelen. Dat wordt een financieel risico voor warmtebedrijven zodra ze meer dan hun variabele exploitatiekosten willen doorberekenen in de warmteprijs.

Energiebesparing bemoeilijkt de businesscase

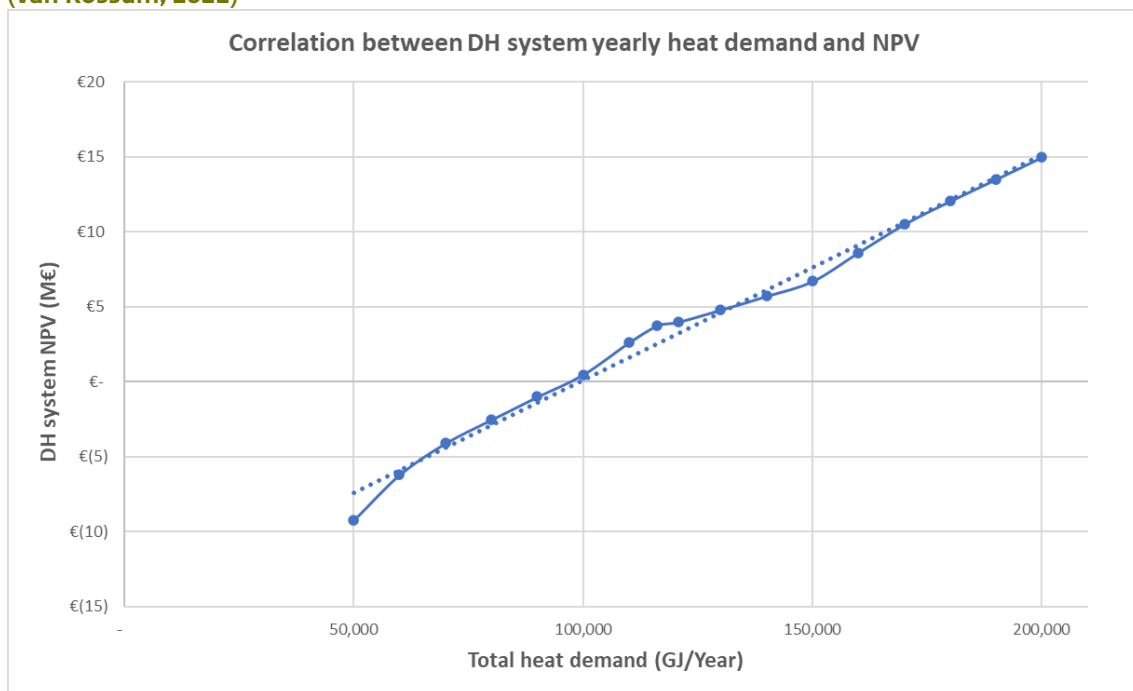
Het rendement van een warmteproject wordt door tal van factoren beïnvloed, maar de warmteafzet (volume) en de marge op de verkochte warmte (het verschil tussen de verkoop- en inkoop-prijs) zijn de belangrijkste factoren. Dat blijkt in ieder geval uit een Monte-Carlo-simulatie op de kentallen in het Template businesscase warmtenetten (Tbw) van ECW voor enkele buurten in Delft,

⁶² Begin 2022 rekenden Budget Energie en Eneco voor gas 6 € vastrecht per maand, Liander 17€. Dat komt neer op 72 – 204 €/jaar voor gaslevering. Het maximumtarief voor vastrecht en meettarief van warmteleveranciers was in 2023 al opgelopen tot 721,21 €/jaar.

waar MT-warmtenetten volgens de Startanalyse 2020 de laagste nationale kosten hebben (van Rossum, 2022, p. 68). Warmtebedrijven kunnen de marge min of meer zelf bepalen, binnen de ruimte die de ACM ze daarvoor biedt. Het afzetvolume wordt echter bepaald door de afnemers. Vóór aanleg van een warmtenet kan de verwachte deelname worden geschat of met intentieverklaringen worden bekrachtigd, maar er blijft een zogenaamd vollooprisico. Nadat gebouwen zijn aangesloten, kunnen klanten hun stookgedrag aanpassen, energiebesparende investeringen doen of besluiten om toch geen warmte meer af te nemen en over te stappen op bijvoorbeeld elektrisch verwarmen. Warmtebedrijven kunnen een dalende afzet compenseren door minder warmte in te kopen, maar de vaste lasten (waaronder de investeringen in het leidingwerk) worden daarmee niet terugbetaald. Dat blijkt ook uit simulaties met het Tbw waarin het aantal aansluitingen constant is gehouden maar de warmtevraag per aansluiting daalde. Figuur 27 laat zien dat het gesimuleerde project jaarlijks minimaal 100.000 GJ warmte moet afzetten (ofwel gemiddeld 23,8 GJ per woning) om bij 100% deelname, zonder aansluitbijdrage en een interne rentevoet van 6,8% alle kosten te kunnen terugverdienen (NPV=0). Als alle gebouwen in dit project worden geïsoleerd tot schillabel B, dan daalt de warmtevraag met 15% en verliest het bedrijf al 1,8 miljoen euro. Dergelijke risico's kunnen hier met een fikse aansluitbijdrage of met een prijsverhoging nog wel worden opgevangen, maar de meeste buurten hebben veel minder gunstige omstandigheden en daar zal dat vermoedelijk niet lukken. Bovendien kunnen prijsverhogingen er toe leiden dat klanten overstappen op een elektrische warmtepomp waardoor de verliezen voor het warmtebedrijf verder oplopen.

Figuur 27

Relatie tussen het afzetvolume warmte (in GJ per jaar, zie x-as) en de netto contante waarde (in miljoen euro, zie y-as) van een hypothetisch warmteproject met 4200 aansluitingen in Delft. Bron: (van Rossum, 2022)



Dit is geen pleidooi om bewoners niet te laten besparen op hun warmteverbruik zodat warmtebedrijven geld kunnen blijven verdienen. Het laat wel zien dat warmtebedrijven in financiële problemen kunnen komen als ze steeds minder van hun vaste kosten kunnen terugverdienen met de verkoop van warmte. Deze bevinding heeft implicaties voor het huidige beleid. Dat stimuleert nu generieke na-isolatie tot de isolatiestandaard (ongeveer schillabel B) en installatie van hybride warmtepompen. Dat is een grote stimulans om gebouwen voor te bereiden op verwarmen met een

elektrische warmtepomp en verlaagt daar de aantrekkelijkheid van overstappen op een MT-warmtenet. Op die manier ondergraaft het huidige beleid – wellicht onbedoeld – de kansen voor uitbreiding van MT-warmtenetten.

Kosten van warmtenetten kunnen nog flink omlaag

Bij de aanleg van warmtenetten in bestaand bebouwd gebied zijn veel partijen betrokken. Die zien allemaal hun eigen risico's en tellen die bij elkaar op. Door te optimaliseren kunnen de aansluitkosten bij corporatiewoningen flink omlaag⁶³, ontdekten betrokken partijen na een analyse van warmteprojecten (Atriensis Projecten; Ennatuurlijk; Vattenfall; Fakton; en VBMT advocaten, 2022). In hun studie noemen ze de volgende maatregelen voor kostenreductie die binnen de huidige wet- en regelgeving al mogelijk zijn:

- a. **Verbetering** samenwerking
 - i. Standaard transparant businessmodel
 - ii. Template met gedeelde kaders en uitgangspunten (bevordert samenwerking)
 - iii. Standaard contracten en voorwaarden (bekort onderhandelingen)
- b. **Beperken** volloopriscico en leegloop
 - i. Restwaarde van het transport- en distributienet creëren en garanderen
 - ii. Volloopriscico verlagen door deelname particuliere woningeigenaren (corporaties veronderstellen nu standaard dat particulieren NIET deelnemen)
 - iii. Financiering aansluitkosten deels via warmtebedrijf (afnemers betalen maandelijks een hoger warmtetarief ipv eenmalig een hoge aansluitbijdrage)
 - iv. Vooruitlopend op netaansluiting de gasketels in exploitatie nemen (ontzorgt corporaties en geeft warmtebedrijven meer zekerheid op aansluitingen)
 - v. Concentreren aansluitmomenten woningcomplexen (een kortere aansluitperiode vermindert de aansluitkosten)
 - vi. Omschakeling duiden als dringend onderhoud (hierdoor vervalt de eis van minimaal 70% vrijwillige toestemming van huurders)
- c. **Verlagen** kosten in de woning
 - i. Woningen slimmer aansluiten (bijvoorbeeld: leiding over de zolder ipv door de tuin)
 - ii. Koppel de aanleg aan onderhoud openbaar gebied (methode ontwikkelen om kostenvoordeel van de gemeente te vertalen in een lagere aansluitbijdrage)
 - iii. Verlaging in pandige kosten (werkzaamheden van corporatie, netbeheerder en warmtebedrijf beter afstemmen en laten uitvoeren door één bedrijf op één dag)
- d. **Optimalisatie** financieringscondities
 - i. Verbeteren betalingscondities (eerder aansluitkosten betalen verlaagt werkkapitaal en kosten warmtebedrijven)
 - ii. Aardgasvrij verdisconteren in beleidswaarde woningvoorraad (verhoogt de Loan-to-Value-waarde, verruimt zo de leencapaciteit van corporaties wat lenen goedkoper kan maken).

Naast deze maatregelen worden ook allerlei technische innovaties aan warmtenetten ontwikkeld die de kosten van aanleg en/of exploitatie kunnen drukken. Zo ontwikkelt een bedrijf software om de bedrijfsvoering van warmtenetten te optimaliseren. Het claimt hiermee de warmteverliezen met

⁶³ In een interview met Energieia dd 24 juni 2022 schat Dyon Noy, directeur van Atriensis Projecten en een van de opstellers van het rapport, dat aansluitkosten hierdoor tot wel 30% naar beneden kunnen.

20% te kunnen verminderen, de CO₂-uitstoot met 10% en de stookkosten met 5 – 10% te kunnen verlagen (Savelkoul, 2022).

In het collectief WarmingUP werken 38 deelnemers en 15 partners in de hele warmteketen sinds januari 2020 samen aan toepasbare kennis voor duurzame, collectieve warmtesystemen in de gebouwde omgeving. De ontwikkeling van LT-warmtenetten is volgens de deelnemers de meest veelbelovende technische innovatie die binnen 5 jaar een belangrijke rol gaat spelen. Ook vormen van warmteopslag, worden belangrijk genoemd. Daarnaast voorziet men innovaties in slimme temperatuurregeling en warmtemeters en in kosten- en risicoverlaging van (diepe) geothermie (DNE Research, 2020).

5.5.4 Bestuur en beleid voor meer warmtenetten

In voorgaande paragrafen is betoogd dat de overheid veel mogelijkheden heeft om warmtenetten aantrekkelijk te maken voor bewoners en rendabel voor warmtebedrijven. Warmtebedrijven kunnen daar zelf aan bijdragen door te innoveren en hun werkzaamheden beter af te stemmen met alle betrokken partijen. Dat lukt beter naarmate hen meer duidelijkheid geboden kan worden over de gebouwen die (op termijn) op een warmtenet worden aangesloten.

Dat planningsproces is in handen van gemeenten gegeven, die in hun Transitievisies warmte moeten aangeven waar warmtenetten ontwikkeld gaan worden. Bij die keuzes krijgen bewoners een grote rol die in de Omgevingswet geformaliseerd wordt. Door het proces van besluitvorming en vergunningverlening drastisch te verkorten, zonder daarbij de inspraak te beperken, kan de uitrol van nieuwe warmtenetten worden versneld. Het is op voorhand niet te voorspellen of het inzetten van dwingender instrumentarium (zoals het beëindigen van de gaslevering of verlagen van het aandeel huurders dat moet instemmen) tot versnelling zal leiden of juist meer verzet zal uitlokken en tot vertraging gaat leiden.

Bewoners hebben allerlei uiteenlopende wensen ten aanzien van toekomstige verwarmingsmethoden, maar hun keuze zal voor een belangrijk deel worden bepaald door de te verwachten (private) kosten van warmtenetten en hun alternatieven. Op dat punt zijn warmtenetten nu in het nadeel. Bij de huidige subsidieregelingen voor warmtepompen en voor de BAK zijn de eindgebruikerskosten van warmtenetten aanmerkelijk hoger (zoals eerder toegelicht bij Figuur 24). De overheid zou dat kunnen corrigeren door geen subsidies op warmtepompen te geven in gebieden die als toekomstig warmtenetgebied zijn aangewezen. Maar dat kan gemeenten er juist van weerhouden zulke gebieden aan te wijzen. Het kostenverschil is ook te verkleinen door de aanleg van warmtenetten fors te subsidiëren (meer dan met de recent ingestelde WIS) en subsidies op elektrische warmtepompen te verlagen.

Door het voornemen om warmtenetten voortaan in publiek eigendom te ontwikkelen krijgt de lokale bevolking meer invloed op de exploitatie, wat het draagvlak voor warmtenetten vermoedelijk ten goede komt. Daar staat weer tegenover dat het lastig kan zijn (zeker op korte termijn, als de huidige professionele warmtebedrijven zich teugtrekken) om voldoende gekwalificeerd personeel te vinden, zowel bij gemeenten als bij lokale warmtebedrijven, die een warmtenet efficiënt kunnen laten draaien en zo de exploitatiekosten laag houden.

Al met al zou de rijksoverheid een stevige impuls kunnen geven aan de uitrol van meer warmtenetten door een groot deel van de aanlegkosten te subsidiëren en door te zorgen dat snel duidelijk wordt waar warmtenetten worden aangelegd.

5.6 Mogelijk tempo uitbreiding warmtenetten

5.6.1 3,3 miljoen weq bestaande gebouwen aansluiten

In paragraaf 5.4 is beredeneerd dat in de bestaande gebouwvoorraad de potentie⁶⁴ van MT-warmtenetten bij minimalisatie van de nationale kosten circa 3 miljoen aansluitingen van bestaande weq's bedraagt. Omdat in 2020 al 0,4 mln weq's waren aangesloten, zouden tussen 2020 en uiterlijk 2050 circa 2,6 mln bestaande weq's op een MT-net aangesloten moeten worden. Daarvoor moeten de volgende technische voorzieningen worden gerealiseerd:

- a. aanleggen van transport- en distributieleidingen vanuit MT-bronnen naar 2145 buurten;
- b. aansluiten van 2,1 mln woningen⁶⁵ en 0,5 mln weq gebouwen van de dienstensector op de distributienetten. Tot 2030 zegt de branche circa 500.000 weq's te kunnen aansluiten, mits de besluitvorming en vergunningprocedures dat niet vertragen (Ecorys 2021). Het kabinet heeft die doelstelling in 2022 overgenomen. Het is niet duidelijk of hierin ook de aansluitingen van nieuwbouw zijn opgenomen. Het tempo van 0,5 miljoen aansluitingen in 10 jaar moet bijna verdubbelen om in 2050 klaar te zijn met aansluiten van 3 miljoen weq bestaande gebouwen.
- c. vervangen van 2,1 mln cv-ketels of hybride warmtepompen door warmteafgiftesystemen in woningen;
- d. desgewenst na-isoleren van bestaande woningen, afhankelijk van de huidige isolatiegraad én van de te verwachte warmteprijs die bewoners gaan betalen;
- e. aansluiten van bedrijven die restwarmte leveren;
- f. aanleggen van geothermiedoubletten en aansluiten op een warmtenet.

Voor het realiseren van LT-warmtenetten voor ca. 300.000 bestaande weq's zijn, naar rato, soortelijke activiteiten nodig in 1522 buurten. De aan te leggen warmtetransportleidingen zijn daar korter maar er zijn meer warmtebronnen nodig (in elke buurt minstens één) en meer woningen zullen na-isolatie nodig hebben om met lage temperaturen te kunnen verwarmen. Gebouweigenaren kunnen kiezen of ze hun radiatoren geschikt maken voor die lage temperaturen of de temperaturen in pandig verhogen met een warmtepomp en bestaande radiatoren gebruiken.

Bedrijfshallen met koeling lenen zich goed voor aansluiting op een warmtenet, bij voorkeur in combinatie met warmte-koude-opslag. Deze bedrijfshallen kunnen met hun koeling een warmtebuffer vullen waarmee omliggende gebouwen in de winter worden verwarmd. Het is dan logisch dat die bedrijfshallen voor hun verwarming ook gebruik maken van dat systeem, ook al is de warmtevraag van die gebouwen relatief beperkt. We veronderstellen dat bedrijfshallen die de komende 30 jaar worden gesloopt (naar schatting ongeveer 17 procent, zie Tabel 14) tot die tijd met aardgas verwarmd blijven en niet op een warmtenet worden aangesloten.

⁶⁴ Bij 2 bcm groengas voor de gebouwde omgeving en zonder waterstof (zie derde kolom in Tabel 34 en Figuur 23).

⁶⁵ Uitgaande van het landelijk gemiddeld aandeel van 20% bedrijfsgebouwen in alle woningequivalenten.

5.6.2 1,5 miljoen weq nieuwe gebouwen aansluiten tot 2050

Tussen 2020 en 2050 worden naar schatting 1,4 miljoen nieuwe woningen gebouwd en gaat de dienstensector nog 1,2 miljoen weq's nieuwe gebouwen plaatsen, zie hoofdstuk 3. Recente uitbreidingen van warmtenetten hebben vooral in nieuwbouwwijken plaatsgevonden, maar het is onduidelijk of dat de komende jaren zo zal blijven. Het is wel gemakkelijker om warmtenetten in nieuwbouwwijken aan te leggen dan in bestaande wijken. De aanlegkosten van warmteleidingen zijn daar lager, er kan bespaard worden op de kosten van een gasleiding, er zijn geen bewoners die vooraf toestemming moeten geven, de aanlegkosten kunnen eenvoudiger verrekend worden met de bouwkosten en op een structureel krappe woningmarkt worden de woningen toch wel verkocht. We veronderstellen dat het aandeel warmtenetten in de nieuwbouw gelijk wordt aan het hierboven gekozen aandeel in de bestaande woningen exclusief de woningen op groengas, namelijk 63%. Groengas was daar immers gelimiteerd op 1,5 bcm en gereserveerd voor *bestaande* gebouwen waar alternatieve opties uitzonderlijk duur zijn. Dan zouden tot 2050 nog bijna 0,9 miljoen nieuwbouwwoningen op warmtenetten worden aangesloten en de rest elektrisch wordt verwarmd.

Tabel 38

Veronderstelde groei tussen 2019 en 2050 van het aantal gebouwen met een warmtenetaansluiting, in miljoen weq's.

Type warmtenet en gebouw	In 2019	2020-2030	2030-2040	2040-2050	In 2050
MT-warmtenet					
Bestaande bouw	0,4	0,5	0,9	1,1	3,0
Nieuwe woningen		0,3	0,2	0,1	0,6
Nieuwe utiliteitsgebouwen		0,2	0,2	0,2	0,6
LT-warmtenet					
Bestaande bouw	p.m.	0,0	0,1	0,2	0,3
Nieuwe woningen		0,2	0,1	0,0	0,3
Totaal toegevoegd		1,2	1,5	1,6	
Totale omvang warmtenetten*)	0,4	1,6	3,1	4,7	4,8
waarvan bestaande bouw	0,4	0,9	1,9	3,3	3,3

*) Cijfers tonen het aantal aansluitingen aan het eind van genoemde tijdvakken. Het verschil in 2050 is veroorzaakt door afronding.

Nieuwbouw in de **dienstensector** moet voldoen aan strenge isolatienormen en heeft daardoor een lage warmtevraag per vierkante meter. Dat maakt die gebouwen ook geschikt voor verwarmen met warmtepompen. Nieuwbouw in bestaand bebouwd gebied krijgt geen gasaansluiting meer, maar zal (in dit traject) wel op een warmtenet worden aangesloten als dat lokaal aanwezig is. In het buitengebied is aanleggen van een lokaal warmtenet alleen interessant op een nieuw te ontwikkelen bedrijfsterrein en bedrijven elkaars warmte kunnen benutten. In dit traject, waarin de aanleg van warmtenetten maximaal wordt gestimuleerd, is verondersteld dat vanaf 2030 bij de helft van alle nieuwbouw in de dienstensector een warmtenet wordt aangelegd. Tot 2050 zijn dat circa 0,6 miljoen weq nieuwe utiliteitsgebouwen; de rest wordt dan all-electric verwarmd (en gekoeld).

Tempo maken

Momenteel ligt de ontwikkeling van nieuwe warmtenetten grotendeels stil door de voortdurende onduidelijkheid over de nieuwe warmtewet. Door die vertraging zou het al mooi zijn als de doelstelling van 500.000 nieuwe aansluitingen in 2030 gehaald wordt. Dat is minder dan de 1,2 miljoen nieuwe aansluitingen tot 2030 die in dit traject is opgenomen, zie Tabel 37.

Naar verwachting zijn alle wettelijke regelingen en steunkaders binnen enkele jaren op orde. Als het lukt de ervaring van bestaande warmtebedrijven te blijven benutten en de benodigde expertise bij gemeenten en nieuwe warmtebedrijven op te bouwen, dan kan het aansluittempo over enkele jaren weer stijgen en de huidige vertraging na 2030 wel worden ingelopen.

5.6.3 Energiedragers en infrastructuur voor warmtenetten

Als tot 2050 in totaal 3,3 mln bestaande weq's op warmtenetten worden aangesloten en 2,6 mln op groengas (maximaal haalbaar met 1,5 bcm) dan resteren 4,2 mln bestaande weq's voor een all-electric oplossing (zie Tabel 34). De nieuwbouw wordt deels op warmtenetten aangesloten en verder ook all-electric verwarmd.

De integrale energiebehoefte voor de gehele gebouwde omgeving bij die configuratie is samengevat in Tabel 38. Het gaat daar over alle energie die aan de gebouwde omgeving geleverd moet worden voor ruimteverwarming, koken, warm water, koelen, ventileren en gebruiken van elektrische apparaten. Dat is dus exclusief het verbruik van energiedragers die warmtebedrijven gebruiken om de geleverde warmte te produceren, zoals elektriciteit en biomassa.

Tabel 39

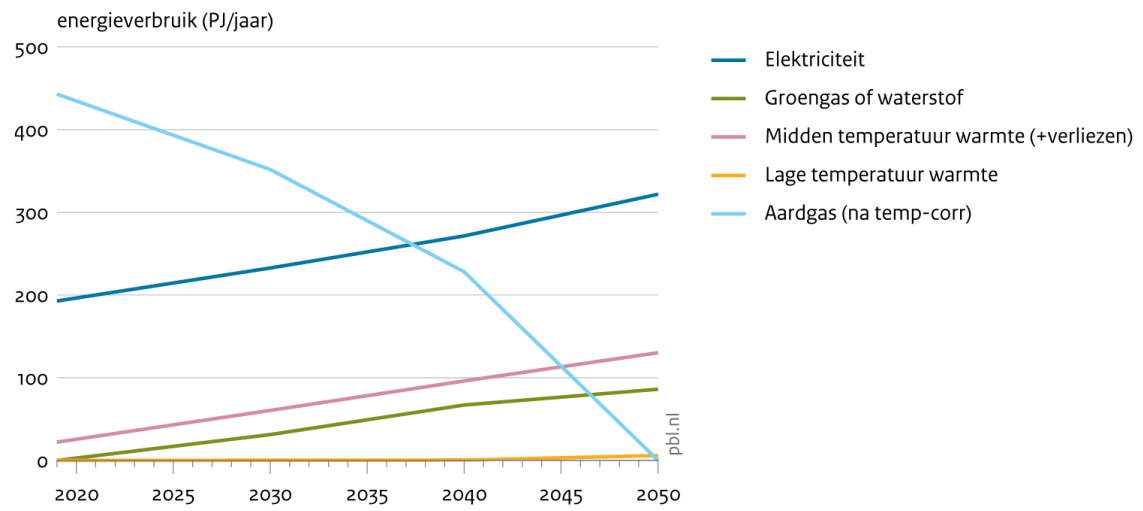
Ontwikkeling van de energiebehoefte in de gebouwde omgeving (in PJ per jaar) tussen 2019 en 2050 in traject 2 "Potentie warmtenetten".

Gebouwtypen en energiedragers	2019	2030	2040	2050
Bestaande bouw in 2019^{*)}	662	621	560	407
Nieuwe woningen	0	24	39	45
Nieuwe utiliteitsgebouwen	0	32	64	92
Subtotaal^{*)}	662	676	663	544
Omgevingswarmte (saldo)	11	32	56	117
Totaal input energie^{*)}	673	708	720	661
<i>waarvan:</i>	0	0	0	0
Elektriciteit	193	233	271	322
Aardgas (na temperatuurcorrectie)	443	352	229	0
Groengas of waterstof^{o)}	0	31	67	86
MT-warmte (+ distributieverliezen)	22	60	96	130
LT-warmte (+ distributieverliezen)	0	0	0	6

^{o)} Het verbruik van groengas overstijgt het eerder genoemde maximum van 70 PJ voor de bestaande bouw omdat hier ook het geraamde verbruik in de nieuwbouw is meegerekend.

^{*)} Dit is exclusief zonnewarmte en het verbruik van biomassa die in gebouwen wordt verstoekt, samen 4 PJ in 2019. De toekomstig verbruik van deze energiedragers is hier buiten beschouwing gelaten.

Figuur 28
Gebruik energiedragers traject 2



Bron: PBL

6 Traject “Schone gassen”

6.1 Inleiding

Dit hoofdstuk verkent de mogelijkheden om de gebouwvoorraad in 2050 zoveel mogelijk te verwarmen met groengas of waterstof, samen aangeduid als schone gassen. We beschrijven voor- en nadelen, kosten en randvoorwaarden met het doel dit traject te kunnen vergelijken met de andere trajecten in dit rapport.

Het potentieel van verwarmen met schone gassen is onder andere afhankelijk van de toekomstige prijzen en van de volumes die beschikbaar komen voor de gebouwde omgeving. Beide zijn op dit moment onzeker. Er zijn wel indicaties voor de toekomstige productiekosten van groengas en klimaatneutrale waterstof, welke een ondergrens vormen voor de te verwachten marktprijzen. In welke mate de gebouwde omgeving zal kunnen concurreren met andere sectoren om de verwachte toekomstige nationale volumes, wordt onderzocht in een andere studie naar systeemintegratie als onderdeel van het TVKN-project (PBL, 2024). Het is ook denkbaar dat de overheid de verdeling van schone gassen over sectoren gaat sturen. In dit traject verkennen we de mogelijke rol van schone gassen in een klimaatneutrale gebouwde omgeving onder de theoretische veronderstelling dat er rond 2050 voldoende schone gassen beschikbaar komen.

We brengen de nationale productiekosten in beeld van diverse integrale verwarmingssystemen met schone gassen die verschillen in type gas (groengas of waterstof), type verwarmingsinstallatie (hr-ketels of hybride warmtepompen) en isolatieniveaus van woningen (minimaal schillabel D of B). Op grond van een vergelijking met de nationale kosten van alternatieve, gasloze opties wordt de nationaal-economische potentie van schone gassen bepaald. Vervolgens worden kansen en belemmeringen van het realiseren van deze potentie besproken en beschouwen we de mogelijkheden om met aanvullend rijksbeleid de beschikbaarheid en toepassing van schone gassen voor verwarmen van gebouwen te versnellen.

Het hoofdstuk eindigt met een beschouwing over het tempo waarin het huidige verbruik van aardgas voor cv-ketels in dit traject kan worden vervangen door gebruik van schone gassen en andere energiedragers en wat dat betekent voor het tempo waarin de CO₂-uitstoot kan worden verlaagd.

6.2 Waarom verwarmen met schone gassen?

6.2.1 Reductie uitstoot broeikasgassen

Met ‘schone gassen’ bedoelen we in dit rapport gassen die bij de productie én bij verbranding (over de gehele keten) geen uitstoot van broeikasgassen veroorzaken. Hoewel een aantal gassen aan die definitie voldoet, beperken we ons hier tot groengas en klimaatneutrale waterstof.

Groengas is biogas dat wordt opgewaardeerd naar een hoger methaanpercentage, gelijk aan dat van aardgas, waarmee het geschikt is voor invoeding in het aardgasnet. Biogas wordt gemaakt van allerlei soorten biomassa, bij voorkeur uit reststromen zoals dierlijke mest, afval uit de voedings- en genotmiddelenindustrie, plantenresten die worden verzameld bij terreinbeheer in plantsoenen en natuurgebieden, et cetera. De CO₂ uit biomassa wordt meegerekend in de emissieboekhouding van landen, niet bij verbranding maar bij de oogst, waar het wordt geboekt als LULUCF-emissies bij het land van oorsprong. CO₂ vastlegging door aanplant en gewasgroei worden gerekend als negatieve emissies.

Waterstof is pas ‘schoon’ of klimaatneutraal als bij de productie geen broeikasgassen vrijkomen. Blauwe waterstof, dat gemaakt wordt door aardgas te splitsen in waterstof en CO₂ met behulp van stoom, is niet helemaal klimaatneutraal omdat niet alle vrijkomende CO₂ kan worden afgevangen en opgeslagen. Groene waterstof is alleen klimaatneutraal als uitsluitend duurzame stroom wordt gebruikt bij de elektrolyse van water, waarbij waterstof en zuurstof ontstaan. Op lange termijn streeft men naar toepassing van uitsluitend groene waterstof en wordt blauwe waterstof gezien als een tussenstap. De productie van blauwe waterstof is namelijk sneller uit te breiden en zou het gebruik van waterstof sneller kunnen laten groeien, vooruitlopend op toekomstige kostendaling en opschaling van de productie van groene waterstof met bijbehorende uitbreiding van groene stroomproductie. Voor meer details, zie het TVKN-achtergrondrapport over waterstof (PBL, 2024g).

6.2.2 Aardgasnetten hergebruiken

Nederland is een gasland. Vergeleken met andere landen (en EU-lidstaten) heeft Nederland een zeer uitgebreid transport- en distributienet voor aardgas, met goede voorzieningen voor import, export en seizoensopslag. Daarom draait hier een uitzonderlijk groot aandeel van de warmtevoorziening op aardgas. Onze gasinfrastructuur is een comparatief voordeel voor oplossingen voor het klimaatprobleem die op gas gebaseerd zijn. De investeringen in de bijbehorende infrastructuur hebben we namelijk al gedaan en de kosten daarvan zijn (grotendeels) al betaald. Onze gasinfrastructuur is al geschikt voor groengas en kan tegen relatief geringe kosten geschikt worden gemaakt voor waterstof (SodM, 2022).

Het kunnen hergebruiken van bestaande gasnetten is een van de belangrijkste redenen waarom de schone gas opties in Nederland zo aantrekkelijk zijn. Internationale studies vinden waterstof toepassen voor verwarming van gebouwen vaak te duur. Dat komt onder andere omdat veel studies de kosten van het aanleggen van gasdistributienetten meetellen (Teunis, 2023). In Nederland moeten we juist kosten maken voor het *weghalen*⁶⁶ van gasleidingen als een gasloze warmtevoorziening wordt aangebracht. Dat maakt de gasloze opties in Nederland extra duur ten opzichte van gasopties, terwijl dat in andere landen precies andersom lijkt te zijn.

6.2.3 Gebouwaanpassingen blijven beperkt

Groengas kan worden gebruikt in bestaande HR-ketels met bestaande radiatoren en in bestaande kooktoestellen. HR-ketels kunnen tegen geringe kosten geschikt gemaakt worden voor waterstof⁶⁷. Dit betekent dat woningeigenaren weinig hoeven te investeren in het aanpassen van verwarmingsinstallaties en warmteafgiftesystemen binnenshuis. Koken op waterstof wordt afgeraden; elektrisch koken is een goedkoper en veiliger alternatief.

⁶⁶ Er is geen technische noodzaak voor het weghalen van niet gebruikte gasleidingen maar dat is (nu) juridisch wel verplicht. Dat sluit aan bij de gedachte dat je het milieu niet gebruikt als ‘stortplaats’ voor afgedankte spullen. Om dezelfde reden moeten olie- en gasplatforms en windturbines volledig worden afgebroken als het gebruik is beëindigd.

⁶⁷ Ketelfabrikant Vaillant heeft al de ecoTEC plus ketel die geschikt is voor 20% bijmenging waterstof in aardgas en heeft de intentie om vanaf 2025 cv-ketels te produceren die geschikt zijn voor 100% waterstof (van Kempen, 2022).

Gebouwen hoeven ook niet extra te worden geïsoleerd om comfortabel verwarmd te worden. De productiekosten van groengas en waterstof zijn wel hoger dan die van aardgas, ook op termijn, zie de Bijlage. Dat betekent dat verwarmen met groengas duurder zal zijn dan met aardgas. De huidige subsidies op de productie van schone gassen zullen waarschijnlijk op termijn worden afgebouwd en dus zullen de kostenverschillen op termijn zichtbaar worden in de gasprijs die consumenten gaan betalen. In slecht geïsoleerde gebouwen kan het daardoor (financieel) aantrekkelijk worden om na-isolatie toe te passen. Een isolatieniveau van schillabel D lijkt daarbij optimaal; bij verdergaand isoleren zijn de kosten van isolatie vaak hoger dan de besparingen op vermeden energie-uitgaven. Dat geldt zowel bij nationale kosten (zie paragraaf 6.2.5) als bij eindgebruikerskosten (reeds behandeld in paragraaf 4.5.2). Vergeleken met klimaatneutrale alternatieven zijn de (verwachte) stijgingen van de productiekosten van groengas beperkt. Bijkomend voordeel is dat bewoners niet hoeven te wennen aan een andere manier van koken en stoken, dat na-isolatie voor de meeste woningen niet nodig is en dat overlast voor de bewoners dus beperkt blijft.

In gebouwen met een hoog gasverbruik kan het financieel aantrekkelijk worden de HR-ketel te vervangen door een hybride warmtepomp. Door in het voor- en najaar met een elektrische warmtepomp te verwarmen en in de winter met een HR-ketel, kan tot 60% op het jaarlijkse gasverbruik worden bespaard. Een hybride warmtepomp heeft nu nog wel extra ruimte nodig in een gebouw maar met de ontwikkeling van compactere systemen zullen ze in steeds meer gebouwen kunnen worden toegepast.

In de woningvoorraad van 2019 had naar schatting bijna 50% een schillabel slechter dan label D. Om alle gebouwen op schillabel D te krijgen moet nog in 3,9 miljoen woningen isolatiemaatregelen genomen worden. Voor andere warmteopties (behalve MT-warmtenetten) moeten veel meer woningen naar een hoger schillabel worden gebracht. Door met schone gassen te gaan verwarmen kan dus na-isolatie in veel woningen worden voorkomen. Bij de huidige schaarste op de arbeidsmarkt is het een groot voordeel als minder woningen na-isolatie nodig hebben, zeker gezien het doel om al in 2050 alle benodigde maatregelen te hebben genomen om geheel klimaatneutraal te verwarmen. Als 'slechts' 3,9 miljoen woningen na-isolatie nodig hebben tot label D in plaats van 5,7 miljoen tot label B, dan scheelt dat minimaal⁶⁸ een derde deel van de benodigde arbeidsuren.

6.2.4 Lagere stroombehoefte op koude dagen

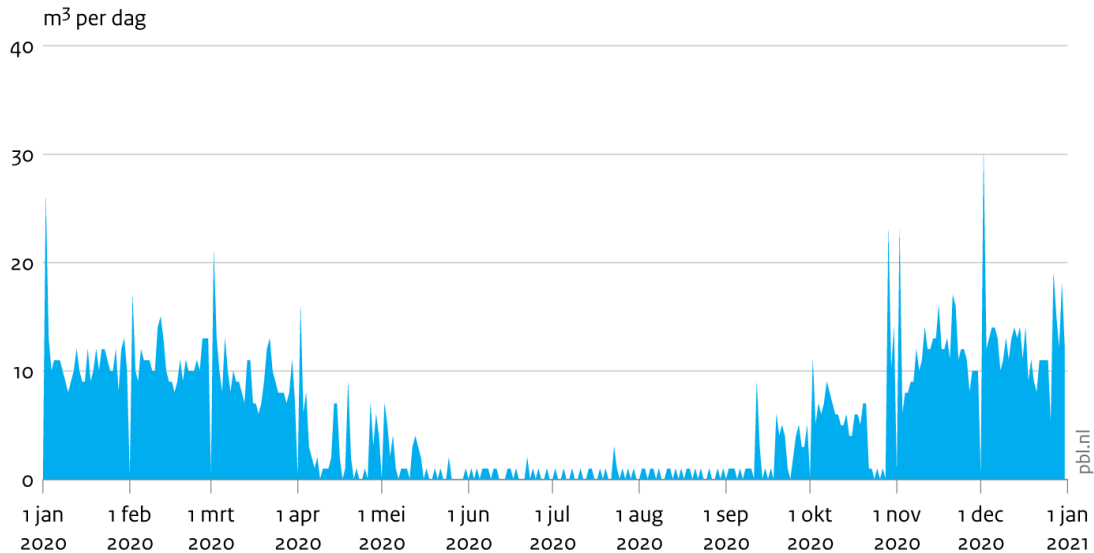
De energievraag voor ruimteverwarming fluctueert gedurende het jaar sterk, zie Figuur 29. In de winter verbruikt een huis 10 tot 15 m³ aardgas per dag, wat op koude winterdagen kan oplopen tot wel 30 m³ aardgas per dag (ofwel 264 kWh/dag). Ons gasnet is in staat dergelijke piekvragen te leveren; ons stroomnet kan dat bij lange na niet. Dat is ingericht op een gemiddeld vermogen van 1,5 kW ofwel een gemiddeld verbruik van 36 kWh per dag⁶⁹, niet alleen voor de verwarming maar voor alle apparaten in huis. Om met elektrische warmtepompen te kunnen voorzien in de piekvraag zou het stroomnet dus flink verzaamd moeten worden, zelfs nadat de piekvraag met

⁶⁸ Na-isoleren tot schillabel B kost per woning vermoedelijk meer tijd dan na-isoleren tot schillabel D. De besparing op vaklui is dan groter dan de verhouding tussen aantallen te isoleren woningen.

⁶⁹ Bij 230 Volt en 3x25 Ampère heb je een vermogen van 17 kW beschikbaar. Bij de aanleg van het laagspanningsnet is echter verondersteld dat een huishouden *gemiddeld* niet meer dan 1,5 kW verbruikt (Schöne, 2022) ofwel 36 kWh per 24 uur. Als een elektrische lucht-warmtepomp op koude dagen een efficiency (COP) van ongeveer 2 heeft, dan verbruikt hij in die situatie dus ongeveer 130 kWh stroom.

isolatiemaatregelen is gereduceerd. Bovendien is opwekcapaciteit nodig om op piekmomenten de benodigde elektriciteit te produceren. Een hybride warmtepomp produceert de warmtepiekvraag met gas⁷⁰ en belast het stroomnet dan dus minder, zie Figuur 30. Daardoor is zowel minder piek-stroom als minder netverzwaring nodig.

Figuur 29
Profiel van het dagelijks aardgasverbruik in een willekeurige rijtjeswoning in 2020

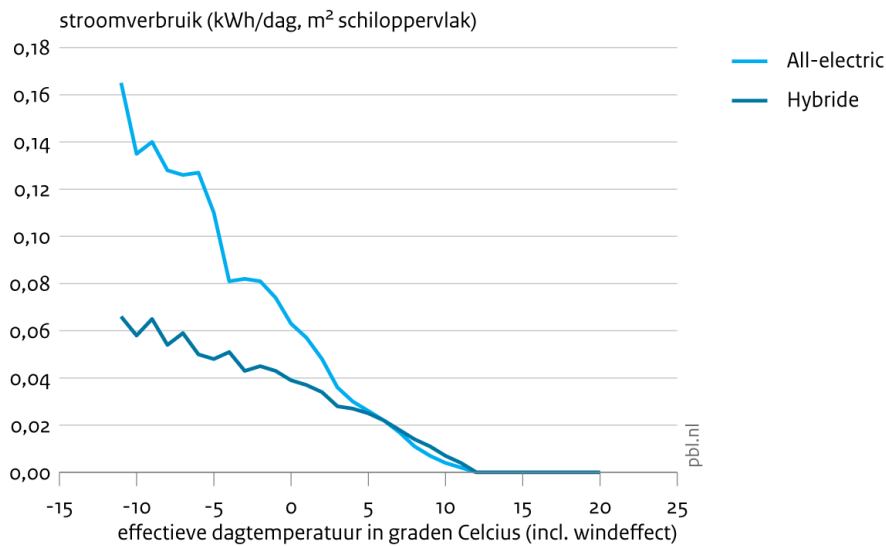


Bron: illustratief voorbeeld

Dat eerste voordeel (minder piekstrom) wordt wel betwist door te redeneren dat het gas voor de hybride warmtepomp efficiënter kan worden benut voor stroomproductie om daarmee elektrische warmtepompen te laten draaien. Het ketel-deel van een hybride warmtepomp heeft immers een rendement van 104-110% terwijl de combinatie van stroomproductie in een gascentrale (rendement 50%) met een elektrische warmtepomp (jaargemiddelde COP 3,5) een rendement van $0,5 \times 350\% = 175\%$ kan halen. Die redenering houdt nog geen rekening met het feit dat een warmtepomp op koude dagen veel minder efficiënt werkt, met een COP van 2 en minder (Klimaatexpert, 2023). Daarmee daalt het gecombineerde rendement van een warmtepomp in de winter naar $2 \times 50\% = 100\%$ en minder, maximaal gelijk aan dat van het ketelgedeelte van de hybride warmtepomp dat in de winter actief is. Omdat de warmtepomp in een hybride configuratie een kleiner vermogen heeft dan in een all-electric configuratie, zal het wel lastig worden om een gebouw op koude dagen goed te verwarmen. Een hybride warmtepomp biedt dus mogelijkheden om in de winter met een zelfde gas-efficiëntie gebouwen te verwarmen als een all-electric warmtepomp, met het voordeel dat er dan geen centrales nodig zijn om die stroompiekvraag in de winter te produceren. Omdat die centrales maar weinig uren per jaar draaien, produceren ze heel dure stroom.

⁷⁰ De technologie van warmtepompen is nog in ontwikkeling. Zo wordt momenteel de “Superhybrid” warmtepomp ontwikkeld die volledig werkt op gas, 30-50% efficiënter is dan een HR-ketel en over enkele jaren voor 5.500 euro (zonder subsidie) geleverd zou kunnen worden (Hylkema, 2023).

Figuur 30
Stroomverbruik 450 warmtepompen 2020-2021



Bron: Hommelberg, Janssen & Friedel, 2022

Uit praktijkmetingen⁷¹ blijkt dat hybride warmtepompen in de winter aanmerkelijk minder stroom verbruiken dan elektrische warmtepompen, zie Figuur 30. Daaruit volgt dat de netbelasting van hybride warmtepompen op koude dagen flink lager is. *“De momenten waarop de grootste pieken worden veroorzaakt door hybride en all-electric warmtepompen liggen (echter, NH) op verschillende tijdstippen op de dag en op verschillende momenten in het jaar. In die zin zijn vanuit het elektriciteitsnetperspectief hybride en all-electric warmtepompen een mooie combinatie. Tegenwoordig moduleren all-electric warmtepompen hun vermogen, waardoor er weinig scherpe pieken op het net te zien zijn. Hybride warmtepompen daarentegen veroorzaken wel scherpe pieken omdat de meeste hybride warmtepompen op dit moment op buitentemperatuur gestuurd worden. Dit zorgt ervoor dat de hybride warmtepompen vaak op dezelfde momenten aanspringen; ze worden door de buitentemperatuur in een zelfde patroon gedwongen. Zonnestroomproductie vindt veelal plaats op momenten dat er weinig tot geen warmtevraag in de woning is. Zeker bij hybride warmtepompen lijkt de overlap zeer beperkt, elektrische opslag kan hier een uitkomst bieden”* (Hommelberg, Janssen, & Friedel, 2022, p. 22). Een andere optie zou kunnen zijn dat ook hybride warmtepompen hun vermogen gaan moduleren om scherpe pieken in netbelasting te voorkomen.

Woningen met PV-panelen én een hybride warmtepomp hebben gemiddeld een leveringspiek van 4 kW, met uitschieters naar 8,5 kW bij 5% van de onderzochte woningen. Bij woningen met PV-panelen en een elektrische warmtepomp was de pieklevering hoger: respectievelijk 5 kW en 9 kW. Een inductiekookplaat vergt een aansluiting met een vermogen van 5 – 10 kW. In de praktijk wordt het grote vermogen maar zeer kort gevraagd. In statistiek van de slimme meter met kwartierwaarden zijn die pieken al veel lager (1 tot 2 kW)⁷². De onderzoekers concluderen dat *“het toepassen van hybride warmtepompen leidt tot een lagere belasting van het elektriciteitsnetwerk dan het toepassen van all-*

⁷¹ Het gaat hier om de eerste praktijkmetingen bij 450 woningen in de winter van 2020-21. Volgens de auteurs zijn die metingen niet representatief voor alle woningen. In 2023 worden die metingen herhaald bij 5000 woningen.

⁷² Persoonlijke mededeling van Lex Bosselaar (RVO), juni 2023.

electric warmtepompen. Echter ook de grootschalige adoptie van hybride warmtepompen (zoals in een wijkaanpak), of de grootschalige installatie van PV-panelen, leidt in veel gevallen tot een noodzakelijke netverzwaring". Besparing op kosten van netverzwaring lijkt daarom geen argument voor verwarmen met schone gassen en hybride warmtepompen.

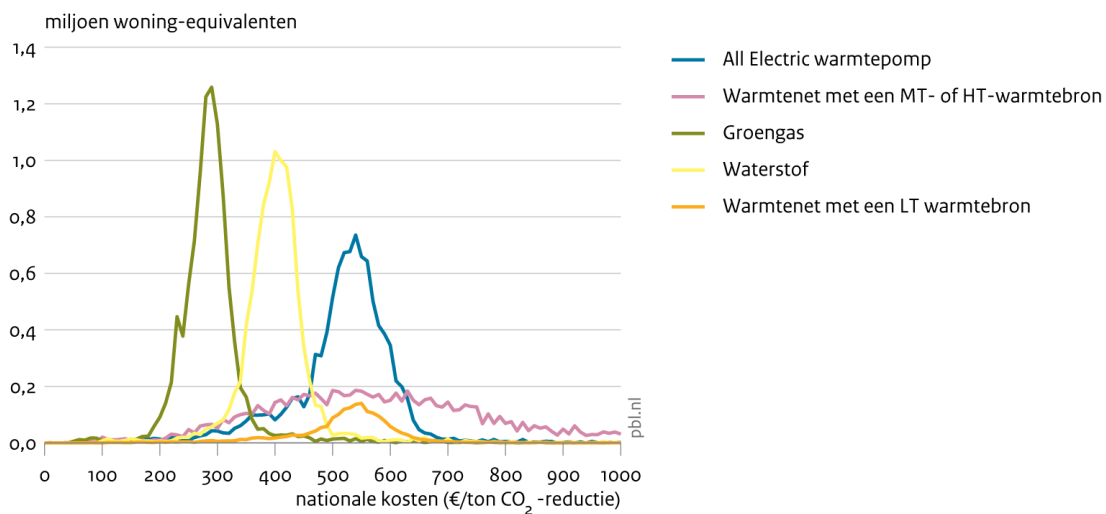
Dan blijft nog wel het argument van kracht dat bespaard kan worden op *kosten* van flexibele stroomproductie voor de piekvraag op koude dagen. Door na-isolatie kan die piekvraag wel verlaagd worden maar isoleren kost ook geld. Door in de winter met schone gassen te (blijven) verwarmen kan de gebouwde omgeving dus klimaatneutraal worden zonder hoge kosten te hoeven maken voor vergaande na-isolatie, flexibele stroomproductie (en eventueel⁷³ verzwaring van elektriciteitsnetten). In hoofdstuk 7 worden de implicaties van volledig elektrisch verwarmen geschetst. Daarna kan in hoofdstuk 8 bekeken worden wat de bijdrage van verwarmen met schone gassen kan zijn aan de stabilisering van het stroomnet en aan beperking van de noodzaak tot netverzwaring en tot investering in flexibele stroomproductie voor het opvangen van pieken in de warmtevraag.

6.2.5 Lage nationale kosten

Uit berekeningen voor de Startanalyse 2020 (zie bijlage) blijkt dat de gemiddelde jaarlijkse nationale kosten per buurt van verwarmen met groengas tussen 200 en 400 euro per ton vermeden CO₂ liggen, zie de groene lijn in Figuur 31. De kosten van verwarmen met waterstof liggen tussen 300 en 500 euro per ton CO₂-reductie (gele lijn). Van beide strategieën zijn de kosten lager dan die van de andere onderzochte alternatieven. Daar liggen de kosten, met een grote of kleinere spreiding, rond de 560 euro per ton CO₂-reductie. Om de nationale kosten van de warmtetransitie te minimaliseren, lijkt verwarmen met schone gassen in de meeste buurten dus de preferente optie. In de praktijk zullen natuurlijk ook andere overwegingen een rol spelen bij de selectie van opties.

⁷³ Op plaatsen waar netverzwaring voor PV of elektrische voertuigen niet nodig of niet toereikend is.

Figuur 31
Nationale kosten aardgasvrije strategieën volgens SA-2020



Bron: PBL, Startanalyse 2020

Met inzicht in de kostenopbouw van verwarmingssystemen is eenvoudig te begrijpen waarom verwarmen met schone gassen zoveel goedkoper is dan verwarmen met andere energiedragers.

Tabel 39 laat zien dat vooral de kapitaalslasten van de strategieën met groengas en waterstof lager zijn dan van andere warmtestrategieën. Dat verschil varieert van 8,5 tot 14,6 miljard euro per jaar indien de gehele gebouwde omgeving met één bepaalde warmte-optie wordt verwarmd. Er zijn namelijk veel minder investeringen nodig in distributienetten voor elektriciteit, gas en warmte, in aanpassingen van de gebouwschil (met na-isolatie) en in andere verwarmingsinstallaties in gebouwen. Daar staat tegenover dat de inkoop van energie duurder is⁷⁴. Verder is het jaarlijkse onderhoud van installaties in gebouwen duurder dan bij warmtenetten en is onderhoud van netwerken duurder dan bij all-electric. Desondanks blijven de totale jaarlijkse kosten van verwarmen met waterstof of groengas respectievelijk 2,4 en 4,9 miljard euro lager dan die van all-electric verwarmen.

De combinatie van grote kostenvoordelen, weinig ‘gedoe’ voor gebouweigenaren, het ontlasten van de elektriciteitsproductie en een beperkt beslag op schaarse arbeidskrachten maken het toepassen van schone gassen erg aantrekkelijk. Een belangrijke voorwaarde voor realisatie is echter dat er (uiterlijk per 2050) voldoende schone gassen beschikbaar komen voor de gebouwde omgeving. Daarnaast is het zaak ruimte te maken voor andere technieken in buurten waar die goedkoper zijn. Bij elke aardgasvrije techniek zijn er nu eenmaal grote geografische verschillen in de verwarmingskosten per woning.

⁷⁴ De bijlage bevat een toelichting op de gehanteerde kosten van aardgas, groengas en waterstof. De besparing op inkoop van aardgas heeft betrekking op de situatie zonder na-isolatie. Bij de inkoop van duurzaam gas is het effect van energiebesparing door na-isolatie wel meegenomen.

Tabel 40

Opbouw van de jaarlijkse nationale kosten (in miljard € per jaar) van vijf strategieën voor aardgasvrij verwarmen van de volledige huidige gebouwde omgeving met één strategie. Bron: berekend uit resultaten van de Startanalyse 2020

Aardgasvrije strategie: (mld.€/j)	Groengas HR-ketel schillabel D en beter	Waterstof HR-ketel schillabel D en beter	All-electric Lucht-water- warmte- pomp schilla- bel B en beter	MT-netten geothermie Afleverset schillabel D en beter	LT-net+WKO Buurt-WP+ I/w-WP's schillabel B en beter
E-net verzwaren	0,0	0,0	0,4	0,0	0,0
G-net verwijderen^{x)}	0,0	0,2	0,6	0,6	0,6
W-net aanleg + gebruik	0,0	0,0	0,0	10,6	11,4
Gebouw-isolatie	2,6	2,6	5,6	2,6	5,5
Gebouw-installaties	0,0	0,8	5,5	-0,3	-0,3
Subtotaal jaarlijkse kapi- taalslasten	2,6	3,6	12,1	13,6	17,2
Minder aardgas^{*)}	-4,2	-4,2	-4,2	-4,2	-4,2
Extra warmte	0,1	0,1	0,1	0,9	0,1
Extra duurzaam gas^{o)}	8,0	9,4	0,1	2,0	0,1
Extra elektriciteit	0,0	0,0	3,6	-0,1	3,9
Extra O&M gebouwen	0,0	0,1	0,2	-0,8	-0,8
Extra O&M E,G,W-net	0,0	0,1	-0,4	2,8	3,5
Subtotaal extra jaarlijkse variabele kosten	3,9	5,5	-0,7	0,6	2,5
Totaal jaarlijkse extra kosten (tov referentie)	6,5	9,0	11,4	14,1	19,7

^{x)} Bij de strategie Waterstof gasnet niet verwijderen maar geschikt maken voor distributie van waterstof.

^{*)} Uitgaven aan aardgas (in de situatie zonder na-isolatie) vervallen in alle aardgasvrije systemen en zijn dus een besparing op de variabele kosten.

^{o)} In de strategieën All-electric en LT-netten wordt nog een klein beetje duurzaam gas gebruikt (ter waarde van minder dan 0,1 miljard euro) voor de hulpketels van bestaande MT-netten.

6.3 Hoeveel schoon gas is haalbaar?

Toekomstige productievolumes nog onbekend

De haalbaarheid van het traject Schone gassen wordt voornamelijk bepaald door de toekomstige beschikbaarheid van schone gassen voor verwarming van gebouwen. Een inventarisatie van productiepotentiëlen ten behoeve van de Startanalyse (PBL, 2020w) leerde dat een nationale productie van 10 bcm groengas op termijn tot de mogelijkheden behoorde en dat in Nederland ook grote hoeveelheden blauwe en groene waterstof geproduceerd zouden kunnen worden, zie de korte toelichting in de bijlage. Sindsdien zijn de inzichten bijgesteld. De productie van groengas en groene waterstof zal de komende jaren flink worden gestimuleerd, zowel nationaal als internationaal, zie de TVKN-rapportages over biomassa en waterstof voor een uitgebreid overzicht hiervan (PBL,

2024bio) en (PBL, 2024g). Het is echter nog onduidelijk of de productiegroei groot genoeg zal zijn om te kunnen voorzien in de behoefte van alle partijen.

Verdeling groengas en waterstof over sectoren nog onbekend

Bij ontoereikende productie (plus import) is nog onduidelijk hoe de verdeling over vragende partijen zal plaatsvinden. Die verdeling zal mede afhankelijk worden van de marktprijs van schone gassen. Hoge marktprijzen zijn een stimulans voor de ontwikkeling en toepassing van goedkopere alternatieve klimaatneutrale technieken en energiedragers. Die alternatieven zijn vaak sectorspecifiek en daardoor beïnvloeden ze de verdeling van schone gassen over sectoren. De mogelijke impact van dergelijke ontwikkelingen kan eigenlijk alleen onderzocht worden met geavanceerde computermodellen die de dynamiek van energiesystemen simuleren.

Een inventarisatie van 32 internationale modellenstudies (Rosenow, 2022) vindt geen argumenten voor grootschalige toepassing van waterstof voor verwarming van gebouwen. Dat zou concurreren met toepassing in andere sectoren die minder alternatieven voor verduurzaming hebben en verduurzaming in de gebouwde omgeving vertragen. Het zou ook leiden tot hogere kosten van het energiesysteem en tot hogere kosten voor consumenten. Alleen in bepaalde gevallen kan verwarmen met waterstof een optie zijn: bij hybride warmtepompen, bij warmtenetten op restwarmte van elektrolyzers en dicht bij industrieën die waterstof (gaan) gebruiken.

De conclusies over hogere kosten staan haaks op de uitkomsten van de Nederlandse Startanalyse. Om dat verschil te begrijpen, zijn de bovengenoemde modelstudies nader geanalyseerd (Tennis, 2023). Twaalf van die 32 studies waren relevant voor Nederland. Vergeleken met de Startanalyse hanteren veel studies hogere kosten voor gasdistributie en lagere kosten voor warmtenetten. Vaak is het onduidelijk of rekening is gehouden met na-isolatie. Meestal wordt gerekend met HR-ketels in plaats van hybride warmtepompen, wat leidt tot een hoger waterstofverbruik per woning en dus tot hogere kosten dan in de Startanalyse. Dat betekent dat de conclusies van genoemde internationale studies niet direct van toepassing zijn voor Nederland. Dat past wel weer bij het advies van Rosenow dat beleidmakers het bestaande onderzoek goed moeten doordenken voordat ze veel publiek geld besteden aan verwarmen met waterstof.

De systeemanalyse van het TVKN-project (PBL, 2024) kan daar aan bijdragen. Het analyseert onder specifiek Nederlandse omstandigheden de mogelijkheden en gevolgen van het inzetten van waterstof (of groengas) voor de verwarming van gebouwen. Als input voor die analyses hanteren we voor het traject met schone gassen de werkhypothese dat er op termijn, tegen 2050, voldoende schone gassen beschikbaar komen voor de gebouwde omgeving. Met dat uitgangspunt is het mogelijk de voor- en nadelen van een Schone gassen-traject te kwantificeren. Die informatie is relevant bij de afwegingen over het vormgeven van de verdeling van groengas en waterstof over sectoren.

Hoe verdelen we schaarse energiedragers?

Het is niet ondenkbaar dat op termijn minder schone gassen beschikbaar komen dan vanuit kostenminimalisatie in de gebouwde omgeving wenselijk zou zijn. Dan is een mechanisme nodig om de beperkte volumes zo goed mogelijk te verdelen over de buurten die het liefst zouden overschakelen op schone gassen. Bij veel goederen wordt schaarste verdeeld via een marktmechanisme, maar bij energiedragers die van een netwerk afhankelijk zijn (zoals gas) is het erg lastig om een efficiënte markt te ontwerpen. Daar bepaalt de ligging en omvang van het netwerk namelijk welke aanbieders en afnemers op de energiemarkt actief kunnen worden. De partijen die beslissen over de netwerken hebben dus grote invloed op de verdeling van energiedragers over potentiële afnemers.

Het is – zeker in theorie – mogelijk om een verdelingsmechanisme voor schone gassen te ontwerpen dat rekening houdt met regionaal verschillende waarden van die gassen voor het besparen op kosten van een duurder alternatief. In de bijlage wordt dat verder uitgewerkt voor groengas en waterstof. Die methode biedt ook een aanzet tot een verkenning van de mate waarin het maatschappelijk optimale volume verandert als de gaskosten veranderen.

6.4 Hoeveel schoon gas is nodig in 2050?

6.4.1 Groengas of waterstof?

Voor de inrichting van de gasinfrastructuur is een keuze tussen groengas of waterstof belangrijk (zie paragraaf 6.5.1) maar voor schatting van de benodigde hoeveelheid gas in de gebouwde omgeving is die keuze niet heel relevant. Als de hele bouwvoorraad met alleen hybride warmtepompen verwarmd zou worden⁷⁵ dan is bij waterstof 3 PJ minder gas nodig dan bij groengas. Bij verwarmen met alleen HR-ketels is jaarlijks ongeveer 12 PJ minder waterstof nodig dan groengas. Dat verschil komt doordat ruimteverwarming met HR-ketels op waterstof efficiënter is dan op groengas: 110% versus 104%. Voor verwarmen van tapwater is een gelijke efficiëntie gehanteerd (PBL, 2022a). Bij vrije apparaat-keuze is er nog een ander effect. Naarmate de warmtebehoefte in een gebouw hoger is, wordt het steeds voordeliger de HR-ketel te vervangen door een hybride warmtepomp. Het omslagpunt is afhankelijk van het kostenverschil tussen gas en elektriciteit. Als waterstof duurder blijft dan groengas, dan zal het bij waterstof dus vaker voorkomen dat een hybride warmtepomp goedkoper is dan een HR-ketel. Daarom zal een waterstof-strategie (bij minimalisering van nationale kosten en vrije apparaat-keuze) in dat geval meer hybride warmtepompen (en minder HR-ketels) hebben dan een groengas-strategie en daardoor minder gas nodig hebben om alle gebouwen te verwarmen.

Koken op elektriciteit

Voor het koken is onderscheid tussen groengas en waterstof relevant. Koken op groengas is identiek aan koken op aardgas en past dus probleemloos in een traject Schone gassen. Koken op waterstof wordt echter ontraden omdat een waterstofvlam minder zichtbaar is dan een groengas- of aardgasvlam, wat koken op waterstof minder veilig maakt. Voor koken in bestaande woningen wordt al steeds minder aardgas gebruikt en steeds meer elektriciteit. Dat komt vooral door een toename in het aantal elektrische ovens en fornuizen. In 2021 was 85% van alle nieuwe inbouw-kookplaten elektrisch met inductie en voor losstaande kookplaten geldt waarschijnlijk een soortgelijk aandeel (SNM, 2022). Schattingen⁷⁶ van het kookgasverbruik tonen een daling van 8,6 PJ in 1995 naar 5,6 PJ in 2020. Extrapolatie van die trend komt op 4,4 PJ in 2050, waarbij aardgas dan vervangen zou moeten zijn door groengas of door elektriciteit. Als de elektrificatie van het koken verder doorzet (omdat steeds meer mensen het moderner, hygiënischer, veiliger of goedkoper vinden) dan kan het gebruik van kookgas in 2050 ook in bestaande woningen verleden tijd zijn. Gezien de onvoorspelbaarheid van deze ontwikkeling en gezien de relatief kleine hoeveelheid energie die ermee gemoeid is, laten we het gebruik van kookenergie in woningen buiten beschouwing.

⁷⁵ Woningen worden dan geïsoleerd tot schillabel D en gebouwen van de dienstensector tot schillabel B.

⁷⁶ Data verkregen van Robin Niessink (TNO), gemaakt voor de jaarlijkse KEV van PBL.

6.4.2 Gasbehoefte in bestaande bouwvoorraad daalt

In de gebouwde omgeving kan de uitstoot van broeikasgassen (in theorie) eenvoudig worden beëindigd door het aardgas geheel te vervangen door een ander, klimaatneutraal gas, zoals groengas of groene waterstof. In 2050 verbruiken de (in 2019) bestaande gebouwen (zonder na-isolatie of andere vormen van energiebesparing) naar schatting 375 PJ gas, zie Tabel 41. Vervanging van aardgas door groengas beëindigt de uitstoot van broeikasgassen volledig en kost de samenleving dan jaarlijks 5 miljard euro meer dan verwarmen met aardgas⁷⁷. Die kosten zouden kunnen dalen als maatregelen voor energiebesparing goedkoper zijn dan de kosten van de daarmee uitgespaarde hoeveelheid groengas. Maar dat is niet zo; door na-isolatie gaan de totale kosten juist omhoog.

Door na-isolatie van *woningen* tot schillabel D daalt het gasverbruik in 2050 met 16 PJ, zie Tabel 18. Daarmee dalen de kosten van groengas met 0,4 miljard euro maar stijgen de isolatiekosten jaarlijks met 1,4 miljard euro⁷⁸. De totale transitiekosten van een traject met groengas stijgen daardoor met 1 miljard euro per jaar. Na-isoleren van alleen woningen tot schillabel B kan 44 PJ gas besparen. Die isolatiemaatregelen kosten jaarlijks 4,3 miljard euro en besparen 1,1 miljard euro aan groengaskosten. De totale transitiekosten stijgen daardoor met 3,2 miljard euro per jaar. Na-isolatie van bestaande gebouwen in de *dienstensector* tot schillabel B doet de jaarlijkse gasvraag dalen met 33 PJ in 2050. De isolatiemaatregelen kosten jaarlijks ongeveer 1,25 miljoen euro aan rente en afschrijving. De gecombineerde effecten van na-isolatie in woningen plus dienstensector staan vermeld in Tabel 40. Uit deze eenvoudige berekeningen blijkt, dat isoleren leidt tot hogere nationale transitiekosten dan niet na-isoleren en dat vergaand isoleren van woningen tot schillabel B (wat ongeveer overeenkomt met de isolatiestandaard) tot hogere nationale kosten leidt dan beperkt na-isoleren tot schillabel D.

Tabel 41

Effect van verschillende niveaus van na-isolatie op verbruik van groengas en waterstof in bestaande woningen en gebouwen in de dienstensector in 2050.

	Alleen Woningen minimaal schillabel D	Alleen Woningen minimaal schillabel B	Diensten minimaal B, woningen D	Diensten en woningen minimaal B
Gasbesparing door na-isolatie [PJ/j]	16	44	49	77
Waarde groengasbesparing [mrd €/j]	0,4	1,1	1,2	1,9
Waarde waterstofbesparing [mrd €/j]	0,5	1,4	1,6	2,5
Kosten na-isolatie [mrd €/j]	1,4	4,3	2,6	5,6
Meerkosten bij groengas [mrd €/j]	1,0	3,2	1,4	3,6
Meerkosten bij waterstof [mrd €/j]	0,9	2,9	1,0	3,1

⁷⁷ De nationale kosten van groengas in 2030 zijn 42 cent/m³ hoger dan van aardgas, zie Tabel 64. Dat komt overeen met 13,3 miljoen €/PJ. Vervangen van 375 PJ aardgas door groengas kost dus jaarlijks 5 miljard euro. Soortgelijke berekeningen kunnen gemaakt worden voor groene waterstof, maar dat leidt (bij de kostencijfers van de Startanalyse) niet tot wezenlijk andere conclusies.

⁷⁸ De nationale kosten van na-isolatie tot schillabel D en B zijn berekend in de Startanalyse aardgasvrije buurten 2020 (PBL, 2020g).

De hoeveelheid gas die bespaard kan worden is niet alleen afhankelijk van na-isolatie maar ook van het type verwarmingsinstallatie. Een deel van de huidige gebouwvoorraad is nu al goed geïsoleerd (schillabel B en beter) en zou dus ook volledig elektrisch verwarmd kunnen worden. Uit de Start-analyse (zie ook Tabel 34) blijkt dat elektrisch verwarmen bij ongeveer 135.000 woningequivalenten lagere nationale kosten heeft dan verwarmen met groengas of waterstof. Verwarmen met een warmtenet is of blijft bij 340.000 woningequivalenten nationaal economisch het goedkoopst. Daarvan zijn 17.000 weq's nieuwe aansluitingen op een LT-warmtenet; de rest zijn gebouwen die nu al op een MT-warmtenet zijn aangesloten. Het is over het algemeen niet rendabel om bestaande warmtenetten te vervangen door aansluitingen op groengas. Daarom is in dit traject Schone gassen verondersteld dat bestaande warmtenetten zo lang mogelijk in stand blijven. Pas als bestaande netten aan vervanging of grondige renovatie toe zijn, zal de afweging met een schone-gassen-alternatief aan de orde zijn. Uit een vergelijking van nationale kosten blijkt dat dan circa 20% van alle huidige warmtetaansluitingen hogere nationale verwarmingskosten hebben dan groengasaansluitingen. Op grond van deze veronderstellingen over de inrichting van een traject Schone gassen zou uiteindelijk 95% van de huidige gebouwvoorraad met schone gassen worden verwarmd, ofwel 9,7 miljoen woningequivalenten.

Bij gasgestookte woningen met een relatief lage warmtevraag zijn de nationale kosten van verwarmen met een HR-ketel lager dan met een hybride warmtepomp. Daar wegen de meerkosten van een hybride warmtepomp niet op tegen de lagere energiekosten. Dat geldt voor 75% van de huidige gebouwvoorraad nadat alle woningen na-isolatie tot minimaal schillabel D hebben gekregen.

In de bestaande dienstensector is eerder (zie hoofdstuk 4) verondersteld dat energiebesparing er toe zal leiden dat alle gebouwen die niet gesloopt worden in 2050 allemaal schillabel B hebben. We veronderstellen hier dat de energiebesparing die dat oplevert lineair oploopt richting 2050, met een variabele mix van HR-ketels en hybride warmtepompen. Omdat schone gassen duurder zijn dan aardgas en de komende jaren steeds meer aardgas gaan vervangen, worden steeds meer besparingsmaatregelen rendabel en wettelijk afdwingbaar.

Met bovengenoemde maatregelen⁷⁹ heeft de bestaande gebouwde omgeving in 2050 jaarlijks 260 PJ duurzame gassen nodig, waarvan circa 4 PJ nodig is voor hulpketels in bestaande warmtenetten. Zoals eerder aangegeven laten we de 0 tot 4,4 PJ kookgas hier buiten beschouwing vanwege de geringe omvang (2% van het totaal) en de grote onzekerheid in de schatting.

6.4.3 Minder gas nodig bij meer hybride warmtepompen

Gezien de grote onzekerheid over de toekomstige beschikbaarheid van voldoende schone gassen, kan de slagingskans van een schone-gassen-traject worden vergroot door alle HR-ketels te vervangen door hybride warmtepompen, ook als verwarmen met een HR-ketel goedkoper zou zijn. Hierdoor daalt de behoefte aan schone gassen met 110 PJ van 260 naar 150 PJ maar stijgt de stroombehoefte voor ruimteverwarming en warm tapwater van 22 naar 56 PJ. Dat is dus een besparing van 42% op de benodigde hoeveelheid schone gassen terwijl de totale jaarlijkse nationale

⁷⁹ Voor de duidelijkheid: 135.000 weq naar label B met een elektrische warmtepomp, 340.000 weq blijft op een MT-warmtenet, 170.000 weq naar label B en een LT-warmtenet, alle resterende woningen naar label D (voor zover nodig) waarvan circa 25% naar een hybride warmtepomp, alle resterende gebouwen in de dienstensector naar schillabel B.

transitiekosten slechts met 4% stijgen, van gemiddeld 630 naar 653 euro per woning per jaar, vergelijk kolom T3* met kolom T3 in Tabel 41. Minder groengas verbruiken spaart jaarlijks 3,1 miljard euro maar daar staan extra jaarlijkse kosten tegenover voor meer elektriciteit (1,5 mld.), hogere kapitaalslasten voor de installaties (1,5 mld.) en duurder onderhoud (0,3 mld.). Netto is het volledig overstappen op hybride warmtepompen dus jaarlijks 0,2 miljard euro duurder maar gezien de onzekerheden in de ramingen lijkt dat verschil te verwaarlozen. De genoemde hogere kapitaalslasten voor hybride warmtepompen corresponderen met 18 miljard euro extra investeringen tot 2050, maar daarmee kan de jaarlijkse behoefte aan groengas wel met 110 PJ (42%) worden gereduceerd.

De gasbehoefte zou nog verder gereduceerd kunnen worden door alle gebouwen vergaand te isoleren (tot schillabel B). Daardoor daalt de behoefte aan energie voor ruimteverwarming met 29 PJ per jaar (11%). Dat leidt vooral tot besparing op elektriciteit voor de warmtepomp maar de behoefte aan gas daalt slechts met ruim 4%, van 150 naar 142 PJ per jaar. Gas wordt immers alleen op de koudste dagen van het jaar gebruikt. Om die reductie te realiseren gaan de jaarlijkse nationale kosten verder stijgen, van gemiddeld 653 naar 916 euro per woning per jaar. Dat komt grotendeels door de extra kosten van na-isolatie (gemiddeld 290 euro per jaar) die slechts in beperkte mate gecompenseerd worden door lagere kosten voor gas, elektriciteit en warmte (samen gemiddeld 27 euro per jaar lager), zie Tabel 41.

Tabel 42

Nationale transitiekosten voor bestaande gebouwen⁸⁰ van drie varianten met schone gassen, in euro per woningequivalent per jaar, gemiddeld. Bron: berekend uit resultaten Startanalyse 2020

Trajectvariant	To	T3*	T3	T3b
Type gas	aardgas	groengas	groengas	groengas
Type installatie	HR-ketel	HR & hyWP	Hybride WP	Hybride WP
Schillabel woningen	A-N	Minimaal D	Minimaal D	Minimaal B
Schillabel diensten	A-N	Minimaal B	Minimaal B	Minimaal B
Warmtevraag in 2050 [PJ/j]	311	259	259	229
Gasverbruik in 2050 [PJ/j]	375	260	150	142
Kostensoort	(€/weq)			
Energienetten ^a	0	12	19	19
Na-isolatie	0	256	256	546
Installaties ^b	0	53	203	203
Warmte ^c	6	18	18	17
Gas	415	630	323	310
Stroom	705	775	919	907
Onderhoud	273	283	312	312
Totaal nationale kosten	1399	2028	2052	2315
Nationale transitiekosten		630	653	916

^{a)} Dit zijn kosten van verzorging van stroomnetten in buurten met veel elektrische warmtepompen, alleen voor deze tabel uitgemiddeld over alle 10,2 mln. weq's.

^{b)} Installatiekosten zijn de extra jaarlijkse kosten (rente en afschrijving) ten opzichte van een HR-ketel.

^{c)} De kosten van warmtelevering aan circa 444.500 weq's met een bestaande aansluiting op een warmtenet in 2019 zijn uitgemiddeld over alle 10,2 mln. weq's.

⁸⁰ Deze cijfers wijken af van de cijfers in Tabel 18 die alleen over de woningen gaat. Tabel 43 geeft een hoger gasverbruik omdat daar het verbruik van nieuwbouw tussen 2019 en 2050 is toegevoegd.

De kans bestaat dat de gebouwde omgeving minder groengas beschikbaar krijgt dan de hierboven genoemde 260 PJ (in trajectvariant T3*). In dat geval speelt vervangen van HR-ketels door hybride warmtepompen groengas vrij, dat gebruikt kan worden in gebouwen die anders op duurdere gasloze alternatieven zouden moeten overstappen, zoals een warmtenet of all-electric. De daarmee uitgespaarde kosten zijn waarschijnlijk hoger dan de extra kosten van hybride warmtepompen. Maar de besparingen treden niet op in de gebouwen waar de kosten gemaakt worden. Het is ook moeilijk voorstelbaar dat er een praktisch uitvoerbare regeling komt waarmee de ene groep de andere groep financieel gaat compenseren. Dat maakt dat er een vorm van regulering of stimulering nodig is om gebouweigenaren te bewegen een hybride warmtepomp aan te schaffen waar een HR-ketel een goedkoper alternatief zou zijn. Zo'n kostenverschuiving binnen de gebouwde omgeving kan zich ook voordoen tussen sectoren. In alle gevallen is het een politieke afweging om bepaalde groepen burgers een goedkope optie te ontzeggen om daarmee anderen te kunnen behoeden voor hoge kosten, nog los van de vraag hoe die geïnstrumenteerd zal worden.

Het huidige beleid stuurt al aan op vervanging van HR-ketels door hybride warmtepompen, vooral omdat daarmee op korte termijn, zolang nog aardgas gebruikt wordt, al flinke CO₂-reducties haalbaar zijn. De cijfers in bovenstaande tabel laten zien dat tegen relatief geringe nationale kosten forse besparingen op het toekomstig gasverbruik mogelijk zijn. Dat maakt zo'n kostenverschuiving waarschijnlijk minder omstreden. Daarom hanteren we, vooruitlopend op de resultaten van een studie naar intersectorale allocatie van groengas en waterstof, voor verdere invulling van traject 3 (Schone gassen) de variant zonder HR-ketels (T3).

6.4.4 Gasbehoefte in de nieuwbouw kan groeien

Om de totale gasbehoefte in 2050 te bepalen, moet ook het verbruik in de nieuwbouw worden geschat. Als vol wordt ingezet op schone gassen, dan zal in de nieuwbouw geen uitbreiding zijn van warmtenetten omdat die doorgaans duurder zijn dan verwarmen met hybride warmtepompen.

Van alle nieuwe woningen is daarom verondersteld dat 50% een all-electric-aansluiting krijgt en 50% (toch weer) een gasaansluiting. Dat zou een breuk zijn met het huidige beleid dat aansluiten van nieuwbouw op aardgasleidingen verbiedt, als middel om CO₂-emissies te reduceren. Maar in een schone-gassen-strategie is het niet onlogisch dat te herzien, niet alleen omdat schone gassen geen CO₂-emitteren (in tegenstelling tot aardgas), maar ook omdat daarmee piekvraag van all-electric warmtepompen (het alternatief) kan worden afgevlakt. Dat verlaagt de behoefte aan dure piekproductie van elektriciteit en kan piekbelastingen van het elektriciteitsnet voorkomen en zo – waar relevant – de behoefte aan netverzwaring reduceren.

Verder moet worden bedacht dat een deel van de nieuwbouw zal plaatsvinden op zogenaamde inbrei-locaties waar een gasnet reeds aanwezig is. Dat verkleint het kostenverschil tussen nieuwbouwwoningen met en zonder gasaansluiting.

Netverzwaring hoeft op termijn geen belemmering te zijn voor toepassing van all-electric warmtepompen omdat verzwaring ook nodig is om toepassing van PV-panelen en opladen van elektrische voertuigen mogelijk te maken, maar kan op korte termijn wel een belemmering zijn voor de realisatie van nieuwbouw met warmtepompen. Voor nieuwbouw op inbrei-locaties met een gasaansluiting geldt die belemmering niet. Het betekent wel dat de CO₂-reductie daar pas echt op gang komt als aardgas wordt vervangen door groengas of waterstof. De energiebehoefte van nieuwe woningen groeit zo tot 2050 naar jaarlijks 11 PJ groengas en 29 PJ elektriciteit.

Bij de dienstensector (ubouw) is rekening gehouden met volumeontwikkelingen (uitbreiding en krimp) zoals beschreven in hoofdstuk 3. Bij nieuwbouw kunnen grootverbruikers ook nu nog een

gasaansluiting krijgen. Aanvankelijk zullen die nog aardgas verbruiken en dat geleidelijk vervangen door schone gassen of elektriciteit. Het gasverbruik per vierkante meter in nieuwe utiliteitsgebouwen zal tussen 2020 en 2025 drastisch afnemen en daarna min of meer constant blijven, als gevolg van EPC-eisen voor nieuwbouw. Bij bedrijfstypen met een horeca-functie is die afname ongeveer 50%; bij verpleeg- en ziekenhuizen 10-25%; bij andere typen utiliteit varieert dat tussen 50 en 75 procent⁸¹. Met deze veronderstellingen groeit de energiebehoefte van nieuwe utiliteitsgebouwen naar 23 PJ groengas en 64 PJ elektriciteit in 2050.

Voor woningen en utiliteitsgebouwen samen zorgen nieuwbouw en krimp tot 2050 voor een toename van de gasbehoefte met 34 PJ (11+23) en van het stroomverbruik met 93 PJ (29+64) per jaar.

6.5 Benodigde maatregelen in dit traject

6.5.1 Aanpassen gas-infrastructuur

Het traject schone gassen maakt gebruik van de huidige gasinfrastructuur: deze zal behouden moeten blijven en onderhouden moeten worden. De kosten daarvan zijn beduidend lager dan die van extra warmtenetten en stroomnetten (zie Tabel 39), wat mede verklaart waarom dit traject veel lagere nationale kosten heeft dan de andere trajecten.

Behoud van het huidige aardgasnetwerk gaat niet vanzelf. Netbeheerders kampen nu al met vergrijzing onder de gasinstallateurs en de opleidingscapaciteit voor nieuwe gasinstallateurs wordt al afgebouwd, vooruitlopend op een aardgasvrije toekomst. Om te voorkomen dat veel praktijkervaring verloren gaat zou die afbouw gestopt moeten worden.

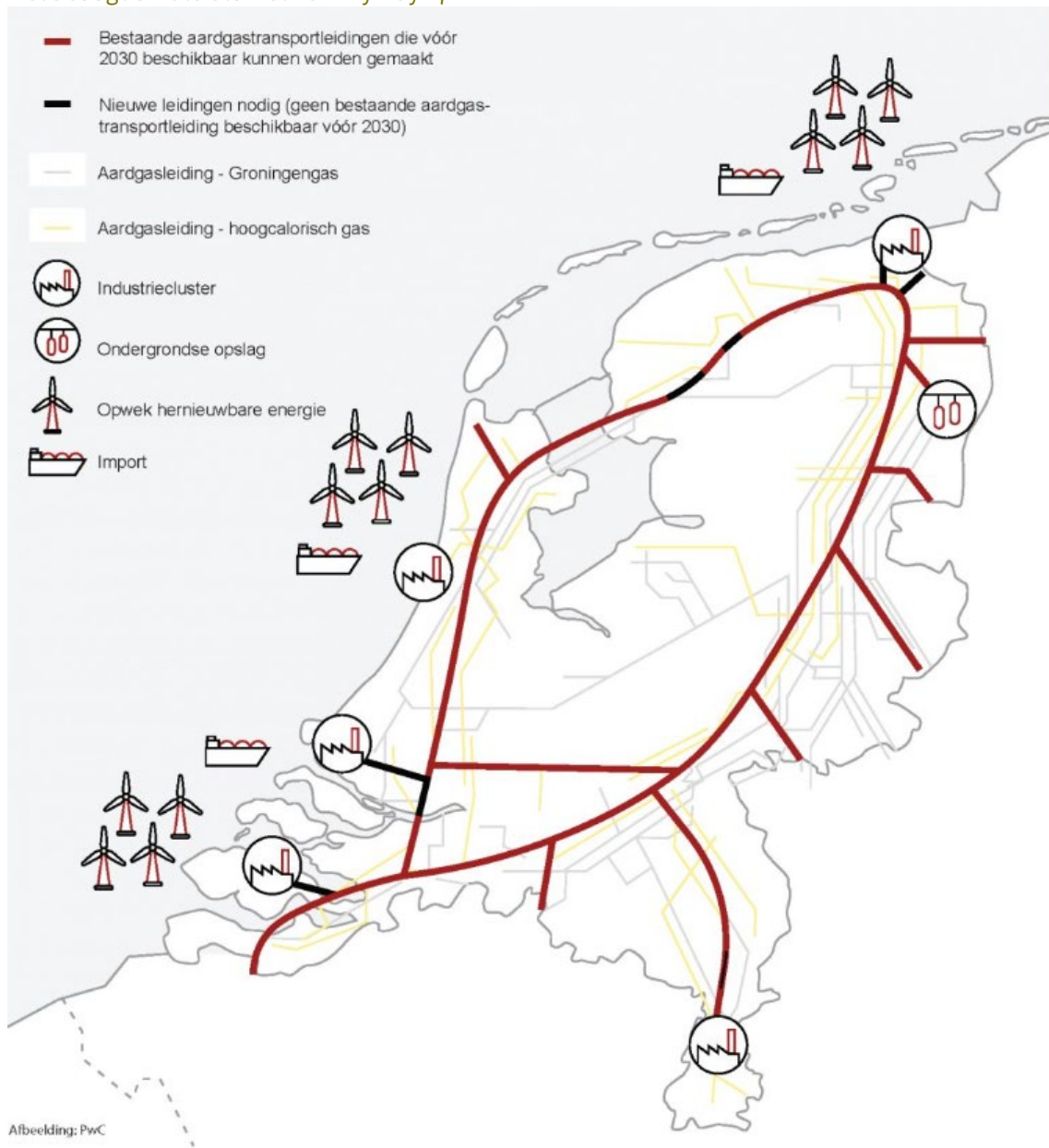
Waterstof kan niet (of slechts in beperkte mate) worden bijgemengd met aardgas of groengas. Dit betekent dat de gasinfrastructuur gefaseerd zal moeten overschakelen van aardgas en/of groengas op waterstof. In het kader van het 'HyWay 27' project, zal een deel van de gasinfrastructuur worden (her)gebruikt als waterstoftransportnet om de vijf grote Nederlandse industrieclusters met elkaar en met de productie- en opslagfaciliteiten van waterstof aan de kust en in het noorden van Nederland te verbinden. Bovendien is het de bedoeling dat HyWay 27 wordt aangesloten op een groter Europees waterstofnetwerk, de 'European Hydrogen Backbone' (EHB), die de import van waterstof uit en doorvoer naar het buitenland zou vergemakkelijken. Studies geven aan dat dit netwerk nog vóór 2030 zou kunnen worden gerealiseerd (zie waterstofrapportage voor meer details). Dit transportnetwerk (op hoge druk) zou ook als startpunt kunnen dienen voor het aansluiten van de gebouwde omgeving op waterstofvoorzieningen. Daarvoor moeten de distributienetten (op lage druk) per straat of buurt worden omgezet van aardgas naar waterstof. Dat zal gefaseerd moeten gebeuren en veel afstemming vergen tussen bewoners, uitvoerders en het gasbedrijf.

Er is nu discussie over de zuiverheidseisen voor waterstof in de backbone. KIWA en DNV adviseren te beginnen met een minimale zuiverheidseis van 98%. Die zuiverheid wordt bereikt met de huidige thermochemische productiemethoden (blauwe waterstof) en wordt veelal in internationale specificaties voor transportnetwerken gehanteerd. Dat is voldoende voor gebruik in turbines en branders, dus ook voor toepassing in de gebouwde omgeving. Met elektrolyse kan 99,9%

⁸¹ Deze ontwikkelingen zijn ontleend aan het cijfermateriaal dat PBL gebruikt voor de KEV.

zuiverheid worden bereikt maar het is nog niet bekend wat de invloed van verontreinigingen in de huidige aardgasleidingen is op de uitgaande waterstofzuiverheid (DNV en KIWA, 2022). Voor de toepassingen die de komende jaren gebruik willen maken van de backbone (zoals raffinage, staal, elektriciteit en warmte) lijkt 98% zuiverheid voldoende maar voor toepassingen in brandstofcellen (o.a. in voertuigen) en in onderdelen van de staalproductie is een hogere zuiverheid nodig. Een aantal bedrijven bepleiten vanaf het begin te werken met 99,9% zuiverheid (“liever in één keer goed”) en vrezen vertraging door investeringen in zuiveringsinstallaties en verwerking van reststromen vervuilde waterstof (Anon., Internetconsultatie Kwaliteitscriteria waterstof, 2023). Het is onduidelijk of reiniging van aardgasleidingen dit probleem kan oplossen en op korte termijn kan worden uitgevoerd.

Figuur 32
 Het beoogde waterstofnetwerk HyWay 27



Bron: (Anon., HyWay27: realisatie van het landelijk waterstofnetwerk, 2021)

6.5.2 Gebouwen aanpassen voor gebruik schone gassen

In paragraaf 6.1 is al uiteengezet dat schone gassen juist zo aantrekkelijk zijn omdat vrijwel geen aanpassingen in gebouwen nodig zijn om ze *in technische zin* geschikt te maken voor het gebruik van groengas of waterstof. Zonder aanvullende isolatie kunnen alle gebouwen comfortabel verwarmd worden met de huidige cv-ketels en groengas. Bij toepassing van waterstof zijn aanpassingen nodig van de verwarmingsinstallatie en de kooktoestellen.

Verwarmingsinstallatie geschikt maken voor waterstof

Bij toepassing van waterstof zullen de in pandige gasleidingen gecontroleerd moeten worden op lekkages, zal waarschijnlijk een andere gasmeter nodig zijn en moet de brander in de verwarmingsketel worden vervangen. Mensen kunnen zich op de komst van waterstof voorbereiden door bij de eerstvolgende vervanging van de verwarmingsketel er een aan te schaffen met een brander die geschikt is voor zowel aardgas, groengas als waterstof. Die multi-gasbranders zijn al in de handel. Bij modernisering van de keukens zal het gasfornuis vervangen moeten worden door een elektrische oven en een inductiekookplaat. In enkele pilotprojecten⁸² wordt momenteel ervaring opgedaan met de toepassing van waterstof in woningen. In afwachting van nieuwe wettelijke kaders heeft een interdepartementale werkgroep richtsnoeren opgesteld voor een veilige toepassing van waterstof in gebouwen (RVO, 2022).

Matig na-isoleren om energiekosten te besparen

In de beschrijving van Traject 1 in hoofdstuk 4 is al uitgelegd dat matig isoleren van woningen tot schillabel D zowel nationaal-economisch als privaat-economisch efficiënter is dan na-isoleren tot schillabel B. Dat geldt zowel voor groengas als voor waterstof, die in 2030 bij de gehanteerde aannames respectievelijk 2,5 tot 4 keer duurder zijn dan aardgas (in termen van nationale kosten).

Verder isoleren dan schillabel D is niet alleen duurder, maar vergt ook veel meer vaklieden omdat dan veel meer woningen na-geïsoleerd moeten worden en per woning meer maatregelen nodig zijn. Op korte termijn bepaalt de beschikbaarheid van vaklieden het tempo van na-isolatie. Op lange termijn, na 2030, is dat vermoedelijk ook zo. Gezien allerlei moeilijkheden om extra technisch personeel aan te trekken, hebben we verondersteld dat het tempo van na-isolatie gelijk is aan het tempo waarin hybride warmtepompen kunnen worden geïnstalleerd. Dat impliceert een min of meer lineair verloop van het aantal woningen dat tussen 2030 en 2050 naar schillabel D gebracht moet worden.

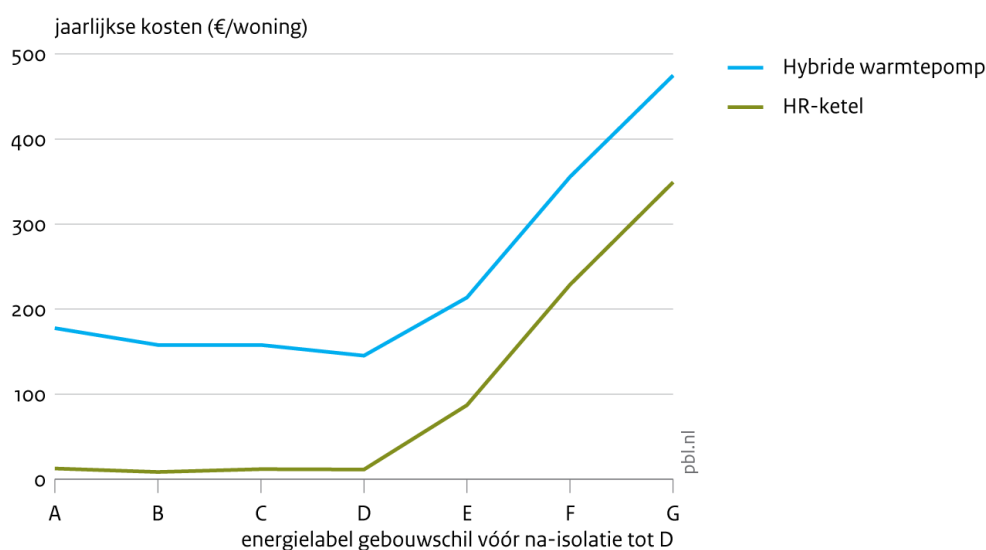
6.5.3 Uitrol hybride warmtepompen versnellen

Als alle woningen naar schillabel D worden gebracht, daalt de warmtevraag en wordt het nationaal-economisch gezien in meer woningen financieel minder aantrekkelijk om een hybride warmtepomp te installeren in plaats van een HR-ketel. Door de belastingen en heffingen op aardgas is een hybride warmtepomp in 2030 echter *privaat-economisch* rendabel in vrijwel alle typen woningen; ook zonder subsidie.

⁸² Alliander verwarmt sinds november 2022 in Lochem 10 huizen met waterstof. Naast Lochem staan er nog drie proefprojecten op stapel: in Stad aan 't Haringvliet (Stedin – 600 woningen), Hoogeveen (Rendo, maximaal 200 woningen) en Wagenborgen (Enexis, 50 tot 60 woningen). Toezichthouder SODM garandeert de veiligheid bij de distributie van waterstof bij deze projecten (Anon., 2022).

De huidige generatie hybride warmtepompen (met een binnenunit en een buitenunit) zijn nog niet geschikt voor toepassing in alle woningtypen. In kleine woningen kan het lastig zijn om naast de cv-ketel ruimte te vinden voor de binnenunit. Met name in galerijflats is vaak geen geschikte plaats voor de buitenunit te vinden. Plaatsing op de balkons zou veel geluidhinder veroorzaken bij omwonenden. De komende jaren zullen nieuwe uitvoeringen van hybride warmtepompen worden ontwikkeld om ondervonden obstakels te omzeilen, onder andere gestimuleerd via het NWP⁸³. Voor appartementencomplexen kunnen collectieve hybride warmtepompen worden ontwikkeld. In de berekeningen voor dit traject is daarom verondersteld dat het tussen nu en 2050 technisch mogelijk wordt om alle woningtypen op een vorm van hybride warmtepompen aan te sluiten.

Figuur 33
Extra verwarmingskosten^{a)} in 2020 voor een rijtussenwoning met na-isolatie tot minimaal schillabel D



Bron: PBL

- a) Het gaat hier om extra jaarlijkse kosten ten opzichte van de huidige situatie, met een HR-ketel zonder na-isolatie. De subsidies voor isolatie en hybride warmtepomp zijn hierin verrekend, evenals de jaarlijkse kapitaalslasten van ketel en warmtepomp.

Hybride verwarmen in 2020 nog duurder dan met HR-ketel

Of woningeigenaren bereid zijn of worden om in plaats van een HR-ketel een hybride warmtepomp te laten installeren, zal voor een belangrijk deel afhangen van de financiële implicaties van die keuze. In vrijwel alle woningen was verwarmen met een HR-ketel in 2020 nog goedkoper dan met een hybride warmtepomp, ook nadat woningen van een slecht energielabel middels na-isolatie tot schillabel D zouden zijn gebracht, zie bijvoorbeeld Figuur 33 met kosten voor een gemiddelde rijwoning met schillabel A tot en met G. Daar is verwarmen met een hybride warmtepomp (blauwe lijn) 125 tot 160 euro per jaar duurder (bij een woning met respectievelijk label G en A). Bij andere woningtypen varieerde het kostenverschil tussen 30 euro per jaar bij een gemiddelde vrijstaande woning tot ruim 150 euro bij een gemiddeld appartement met label B en beter. Dat de kosten vanaf schillabel D oplopen (in de figuur) komt doordat de kosten van na-isolatie slechts gedeeltelijk

⁸³ zie <https://nationaalwaterstofprogramma.nl/default.aspx>

worden gecompenseerd door lagere energiekosten. Bij woningen met schillabel A tot en met D is geen na-isolatie verondersteld.

Nieuw beleid maakt hybride verwarmen van woningen goedkoper

Woningeigenaren zullen waarschijnlijk alleen overstappen op een hybride warmtepomp als dat financieel aantrekkelijk wordt of als HR-ketels niet meer geplaatst mogen worden. De EU werkt aan een verbod op het installeren van ketels voor fossiele brandstoffen vanaf 2029. De Nederlandse overheid ontwikkelt normering die ertoe moet leiden dat vanaf 2026 alleen nog maar hybride warmtepompen geïnstalleerd mogen worden. Men hoopt dat dat leidt tot opschaling van de productie en tot kostendaling, zodat het kostenverschil met een HR-ketel acceptabel wordt. Om die opschaling te stimuleren, werd 20% subsidie verstrekt op een hybride warmtepomp, wat in 2022 zelfs is verhoogd tot 30%. Tegelijk wordt de energiebelasting op aardgas de komende jaren verhoogd en die op elektriciteit verlaagd.

Tabel 43

Kostenvoordeel van verwarmen met een hybride warmtepomp in plaats van een HR-ketel in 2030, voor koopwoningen op aardgas met na-isolatie tot minimaal schillabel D, in euro per woning per jaar, inclusief 20% subsidie. Bron: berekend op basis van (TNO, 2021b)⁸⁴

Woningtype:	appartement	rijwoning tussen	rijwoning hoek	2 onder 1 kap	vrijstaand
Schillabel A	-25	17	67	106	224
Schillabel B	-7	57	103	153	244
Schillabel C	25	77	123	197	369
Schillabel D	52	113	166	212	411
Schillabel* E	72	135	175	187	405
Schillabel* F	76	137	181	200	393
Schillabel* G	76	141	183	210	395

*) Dit is het huidige schillabel, voorafgaand aan na-isolatie tot schillabel D.

Met de regelingen die in 2021 van kracht waren, en de gasprijzen en investeringskosten die toen voor 2030 werden verwacht, wordt verwarmen met een hybride warmtepomp in 2030 waarschijnlijk vrijwel overal goedkoper dan verwarmen met een HR-ketel. Dat bleek uit berekeningen in 2021, waarin werd verwacht⁸⁵ dat tussen 2020 en 2030 de kosten van een hybride warmtepomp (exclusief BTW en subsidie) met zo'n 23% gaan dalen en de gasprijs 41% omhoog gaat door extra belastingen en hogere groothandelsprijzen (TNO, 2021). Nadat alle woningen met een slecht energielabel zijn na-geïsoleerd tot schillabel D, varieert het voordeel van een hybride warmtepomp dan tussen 52 en ruim 400 euro per jaar. Het voordeel is kleiner bij een lager gasverbruik, dus in kleinere woningen en in woningen met een energielabel beter dan D (zie Tabel 42). In goed geïsoleerde kleine woningen (zoals appartementen met schillabel A en B) is verwarmen met een hybride

⁸⁴ Deze berekening zijn geheel afgestemd op de veronderstellingen over maatregelkosten en energiekosten in de Startanalyse 2020. Het verschil tussen nationale kosten en private kosten (of eindgebruikerskosten) wordt daardoor geheel veroorzaakt door subsidies en belastingen anno 2021. De prijs van groengas is hier gelijk gesteld aan de prijs van aardgas omdat het verschil in productiekosten met SDE++-subsidie wordt gecompenseerd bij de producenten.

⁸⁵ Bij hogere gasprijzen, zoals in 2022, is het financieel voordeel van hybride warmtepompen groter.

warmtepomp duurder dan met een HR-ketel. Zonder subsidie op isolatie en warmtepompen is het voordeel 55-70 euro kleiner maar nog steeds aanwezig, behalve bij appartementen met label A-D en rijtussenwoningen met label A en B.

De subsidie op hybride warmtepompen is in 2022 verhoogd van 20% naar 30% en de consumentenprijzen voor aardgas zijn dat jaar meer dan verdubbeld⁸⁶. Omdat men voor de komende jaren ook hogere gasprijzen verwacht, zijn hybride warmtepompen sindsdien voor veel huiseigenaren financieel nog aantrekkelijker geworden dan in de tabel is aangegeven. De installatiebranche kon in 2022 de toegenomen belangstelling nauwelijks bijbenen. De levertijden liepen al op tot een half jaar en meer⁸⁷. Medio 2023 lijken de levertijden weer normaal. Het uitroltempo wordt nu bepaald door de schaarste aan apparaten en vaklui die warmtepompen kunnen installeren.

In utiliteitsbouw is voordeel hybride verwarmen groter dan in woningen

Utiliteitsgebouwen verbruiken doorgaans meer energie voor verwarmen dan woningen. Op grond van het patroon in Tabel 42 (meer voordeel bij grotere gebouwen met minder isolatie) mag daarom verwacht worden dat het kostenvoordeel van een hybride warmtepomp in utiliteitsgebouwen groter is dan in woningen. Dat voordeel wordt nog verder vergroot doordat in utiliteitsgebouwen het prijsverschil tussen aardgas en stroom groter is dan in woningen. Daar wordt namelijk vaak het stroomtarief voor grootverbruikers betaald, dat aanmerkelijk lager is dan het tarief voor kleinverbruikers dat voor woningen geldt. Een soortgelijke conclusie trok Ecorys in een studie naar de waarde van hybride warmtepompen voor de warmtetransitie in de gebouwde omgeving (Ecorys, 2021h). Er zijn berichten dat de aansluiting van warmtepompen in utiliteitsgebouwen moet worden uitgesteld wegens gebrek aan netcapaciteit⁸⁸.

Installatiecapaciteit hybride warmtepompen moet groeien

De installatiebranche denkt tot 2030 maximaal 1,5 miljoen warmtepompen te kunnen installeren (Ecorys, 2021). Momenteel worden jaarlijks ongeveer 400.000 cv-ketels geïnstalleerd. De monteurs daarvan kunnen worden bijgeschoold om ook warmtepompen te installeren. Door het ontwerp van hybride warmtepompen te verbeteren kan de installatieduur halveren en daarmee vergelijkbaar worden met die van een cv-ketel. Daarnaast moet de productiecapaciteit van hybride warmtepompen worden opgeschaald.

6.5.4 Beleid voor meer groengas en waterstof

Uit voorgaande analyse blijkt dat de slagingskans van een schone-gassen-traject hoofdzakelijk afhankelijk is van de tijdige beschikbaarheid van voldoende groengas en/of waterstof. Dat is de grote onzekere factor die maar tot op zekere hoogte met rijksbeleid en goed bestuur kan worden beïnvloed. Terwijl het huidige verwarmingssysteem tot ontwikkeling kon komen op basis van ruime nationale voorraden aardgas, moet de binnenlandse productiecapaciteit van groengas en waterstof nog tot ontwikkeling komen en is het ongewis of daarmee de behoefte van alle sectoren gedekt kan worden. Of een binnenlands tekort met importen kan worden opgevangen is ook onzeker.

⁸⁶ Energievergelijk.nl berichtte in het FD van 9 augustus 2022: “... een gemiddeld gezin betaalt nu zo’n €5100 op jaarbasis. Dat is €3.900 meer dan een jaar geleden”.

⁸⁷ Bericht van installatiebedrijf Feenstra in o.a. AD en Trouw van 2 augustus 2022.

⁸⁸ Persoonlijke mededeling Benno Schepers (CE Delft) in juni 2023. Zie ook (NBNL, 2023w)

Internationale handel in groengas is voorlopig niet waarschijnlijk. De mondiale potenties van waterstof zijn enorm, maar het is nog onzeker of de buitenlandse productie snel genoeg gaat groeien en betaalbaar worden. De binnenlandse voordelen van verwarmen met schone gassen zijn echter groot: de benodigde aanpassingen in de gebouwvoorraad zijn relatief beperkt, bewoners hoeven geen nieuwe verwarmingstechnieken onder de knie te krijgen en er zijn relatief weinig schaarse vaklieden nodig om de benodigde maatregelen aan te brengen. Al deze voordelen vergroten de kans dat de gebouwde omgeving vóór 2050 daadwerkelijk aardgasvrij kan worden gemaakt. Om die kansen te benutten, is beleid nodig om de productie en import van schone gassen te stimuleren en de beschikbaarheid ervan voor de gebouwde omgeving te garanderen.

Groei productie groengas versnellen

Zoals eerder aangegeven bedraagt de nationale productiedoelstelling voor groengas 70 PJ in 2030. Dat is ruim voldoende om de 1 miljoen hybride warmtepompen, die het kabinet tot 2030 wil laten installeren, volledig aardgasvrij te maken. Daarvoor is namelijk ongeveer 16 PJ gas nodig. De allocatie aan sectoren is echter voorlopig niet zo relevant omdat groengas de komende jaren wordt bijgemengd in het landelijke aardgasnet. De bijmengverplichting start in 2025 met minimaal 150 miljoen kubieke meter en moet in 2030 zijn toegenomen tot minimaal 1,6 miljard kuub (bcm) ofwel 56 PJ (Jetten, 2022). Die bijmengplicht lijkt een effectief instrument om de binnenlandse productie van groengas te stimuleren. De autonome groei naar 1 bcm in 2030 kan daardoor toenemen met 0,4 tot 0,8 bcm (CE Delft, 2022gg, p. 13). Realisatie van een productie-installatie voor groengas kost momenteel 3 tot 7 jaar. Het kabinet onderzoekt mogelijkheden voor versnelling, zoals hergebruiken van oude mijnwerklocaties en zuiveringsinstallaties, vroegtijdig aanwijzen van nieuwe productielocaties en het aardgasnet geschikt maken voor invoeding van groengas in lokale lagedruknetten. Mogelijk gaat de aangekondigde emissiehandel voor (verkeer en) de gebouwde omgeving gasbedrijven stimuleren om aardgas te vervangen door klimaatneutrale gassen. Het effect zal mede afhankelijk zijn van de wijze waarop andere subsidies (zoals de SDE++ op groengasproductie) en heffingen (zoals de ODE en EB op aardgas) worden aangepast. Dat is nu allemaal nog niet bekend.

Verdere productiegroei in Nederland wordt beperkt door de beschikbare hoeveelheid biomassa. Met efficiëntere vergassingstechnieken zou uit die biomassa nog wel meer groengas geproduceerd kunnen worden maar dat vergt verdere ontwikkeling van die technieken.

Groei productie waterstof versnellen

Om de nationale productie van waterstof te versnellen, kan de overheid gunstige condities scheppen om te investeren in productiefaciliteiten. Dat betekent: productiesubsidies beschikbaar stellen, productielocaties aanwijzen en inrichten, een waterstofmarkt ontwikkelen en een waterstofnetwerk ontwikkelen. Op al deze punten is de Nederlandse overheid actief. Sinds de internationale aardgasprices zijn gestegen, is de aandacht nu vooral gericht op de productie van groene waterstof. Die concurreert met andere bedrijven om de beschikbare hoeveelheid groene stroom, waarvan de productie ook gestimuleerd wordt. Voor een evenwichtige verduurzaming van het elektriciteitssysteem is het wenselijk het groeitempo van groene waterstofproductie af te stemmen op de groei van groene stroomproductie (en de stroombehoefte van andere sectoren). Dat zet mogelijk een rem op het te behalen groeitempo van groene waterstof.

Uitbreiding van de productie van blauwe waterstof heeft geen last van dergelijke afhankelijkheden van elektriciteitsmarkten. Daar wordt het tempo wellicht bepaald door de snelheid waarmee voldoende CCS-capaciteit kan worden gerealiseerd en door (verwachtingen over) de lange termijn

prijzontwikkelingen van aardgas. Rijksbeleid dat de productie van blauwe waterstof en CCS stimuleert kan de groei van binnenlandse waterstofproductie aanmerkelijk versnellen.

Allocatie van groengas en waterstof over sectoren

Als de verwachte toekomstige beschikbaarheid van schone gassen ontoereikend is dan moet de schaarste worden verdeeld. Die verdeling kan op verschillende manieren worden georganiseerd. Vanuit het streven naar klimaatneutraliteit ligt het voor de hand te zoeken naar een verdeling waarbij elke eenheid groengas of waterstof zo efficiënt mogelijk wordt ingezet om CO₂-uitstoot te reduceren. Dan is efficiëntie dus het belangrijkste criterium, en dan kan die verdeling het beste via markten plaatsvinden. Daarbij hebben overheden de taak om markten te reguleren zodat uitwassen worden voorkomen, zoals extreme winsten door machtsmisbruik (monopolies), niet leveren van betaalde goederen, uitsluiten van bepaalde groepen consumenten, etc. Overheden zouden de allocatie ook zelf ter hand kunnen nemen, maar ze missen de informatie om te kunnen bepalen welke verdeling de meest efficiënte is. Die informatie is in handen van potentiële producenten en afnemers en verandert bovendien voortdurend. Wat een economisch efficiënte allocatie van goederen is, is niet alleen afhankelijk van ontwikkelingen in productie, vraag en kosten, maar ook van volume- en kostenontwikkelingen in alternatieve goederen (substituten) die in een zelfde behoefte kunnen voorzien. Die prijsvorming van schone gassen is dus mede afhankelijk van de prijzen van alternatieve, gasloze methoden voor verwarming, transport en productie van goederen en diensten.

De gasmarkt is fysiek begrensd door de reikwijdte van het gasnetwerk. Omdat Nederlandse gasnetten in publieke handen zijn, kan de overheid de allocatie van groengas of waterstof beïnvloeden door bepaalde groepen producenten en consumenten wel of geen toegang te geven tot de netwerken van deze gassen. Daarmee hebben overheden een instrument in handen voor de allocatie van schone gassen over sectoren. Dat biedt echter nog geen handvatten voor het bepalen van wat een efficiënte allocatie voor de Nederlandse samenleving is. Daarvoor zal gekeken moeten worden naar de economische waarde van groengas en waterstof in de bestrijding van broeikasgasemissies in verschillende sectoren.

De grote uitdaging voor de overheid zal zijn: tijdig de daarvoor benodigde betrouwbare informatie op tafel te krijgen. Maar dat is een typisch kip-ei-probleem. Om de gewenste toekomstige gasnetten af te stemmen op de waarde van klimaatneutrale gassen, is een gasmarkt nodig waarop die waarde wordt bepaald. Maar die markt kan pas functioneren nádat de gasnetten zijn aangelegd. Deze vicieuze cirkel kan doorbroken worden door te werken met schattingen van de toekomstige waarde van klimaatneutrale gassen in verschillende toepassingen en locaties. Dergelijke schattingen kunnen worden verkregen uit simulaties met computermodellen. Het is echter heel moeilijk om betrouwbare waarde-schattingen te maken, zeker voor de lange termijn. Dat komt omdat de uitkomsten sterk afhankelijk zijn van het type rekenmodel dat wordt gebruikt en van de gehanteerde veronderstellingen over toekomstige ontwikkelingen in bovengenoemde factoren, die tegenwoordig snel veranderen.

Het risico op 'foute' beslissingen (die achteraf veel te duur blijken te zijn) kan worden beperkt door het bestaande gasnet stapsgewijs aan te passen aan de klimaatneutrale toekomst, zodat geleerd kan worden van de ervaringen met voorgaande stappen. Dat aanpassen kan zowel betrekking hebben op het geschikt maken voor groengas of waterstof als op het weghalen van het gasnet. Zolang de kosten van die aanpassingen hoog zijn en de onzekerheid over de toekomstige waarde van klimaatneutrale gassen groot is, kan het behouden en/of conserveren van het aardgasnet een aantrekkelijke optie zijn.

Groengas of waterstof alleen naar monumentale panden?

Om vaart te maken in de warmtetransitie zoeken actoren naar houvast over de toekomstige beschikbaarheid van klimaatneutrale energiedragers. Hierover zijn echter nog weinig zekerheden. De overheid stimuleert de productie van groengas en de bijmenging in het aardgasnet maar kan geen zekerheid geven over toekomstige productievolumes. Het Rijk stimuleert ook de productie van waterstof en bereidt toepassingen in gebouwen voor maar stelt tegelijk dat toepassing vóór 2030 alleen in enkele pilotprojecten mogelijk zal zijn. Veel modelstudies concluderen dat toepassing van groengas en/of waterstof in gebouwen niet waarschijnlijk is, mogelijk met uitzondering in monumentale panden en oude gebouwen omdat die geen andere mogelijkheden hebben om klimaatneutraal verwarmd te worden. Dat betekent dat alternatieven erg duur zouden worden als je die wil uitvoeren met behoud van het historische karakter van die gebouwen. Elektrisch verwarmen is alleen comfortabel met vergaande na-isolatie en dat is binnen de bestaande constructie van oude gebouwen niet uitvoerbaar of erg duur. Zonder veel na-isolatie kan verwarmen met een MT-warmtenet een optie zijn, maar in oude binnensteden is de aanleg van zo'n warmtenet erg duur. Zo beredeneerd is verwarmen met groengas of waterstof waarschijnlijk een goedkopere optie. Bij die kostenafweging wordt vaak geen rekening gehouden met gasnetwerkkosten die per aansluiting in een klein, lokaal net hoger zullen zijn dan in een landelijk gasnet.

Visie nodig op de toekomst van groengasnetten

Omdat alle kleinverbruikers nu toegang hebben tot het laagcalorisch gasnet en omdat groengas op dat gasnet wordt ingevoed, hebben alle kleinverbruikers momenteel in gelijke mate toegang tot groengas. Het aandeel aardgas moet in 2050 zijn teruggebracht tot 0%. Bij een beperkt aanbod van groengas moet het gasnetwerk worden ingeperkt en afnemers worden afgesloten, maar wel zodanig dat een rendabele exploitatie nog mogelijk blijft.

In de kostenberekeningen voor dit rapport is verondersteld dat de omvang van het gasnet en de onderhoudskosten meebewegen met het aantal aansluitingen. Bij grote regionale spreiding van afnemers wordt het lastiger een regionaal gasnetwerk in stand te houden omdat de netwerkkosten per aansluiting dan aanmerkelijk hoger zullen zijn dan nu⁸⁹.

In agrarische gebieden zouden kleine groengasnetjes kunnen ontstaan, gevoed met groengas uit mestvergisting of andere lokaal beschikbare reststromen biomassa. Ook zou een deel van het gasnet kunnen worden omgebouwd tot een waterstofnet. Bij beperkte beschikbaarheid van groengas én waterstof zal een deel van het gasnet moeten worden afgesloten en verwijderd. Overheden en bestuurders zullen een mechanisme moeten ontwikkelen waarmee bepaald wordt welke afnemers ook op lange termijn toegelaten worden tot een groengasnetwerk en waar dat netwerk in stand gehouden wordt.

Uitrol waterstof in gebouwde omgeving vereist planning

Anders dan bij groengas is geleidelijk overschakelen door steeds meer waterstof bij te mengen in aardgas niet mogelijk⁹⁰. Om technische redenen moet elke aansluiting in één keer worden omgezet op waterstof. Een goed beheer van distributienetten vereist daarom, dat de omschakeling van alle

⁸⁹ Het effect van hogere netwerkkosten per aansluiting bij kleinere gasnetten is in dit rapport buiten beschouwing gelaten. Die extra kosten zijn moeilijk te schatten zolang niet duidelijk is waar en hoe die kleinere gasnetten worden vormgegeven.

⁹⁰ Een klein beetje bijmengen schijnt technisch wel te kunnen maar is juridisch nog niet mogelijk. Beperkt bijmengen biedt echter geen route naar 100% waterstof op termijn.

aansluitingen in een verzorgingsgebied (of desnoods een deel daarvan) in één operatie plaatsvindt. Dat vergt een goede voorbereiding, o.a. door de huidige distributienetten nauwkeurig in kaart te brengen en te verkennen welke opdeling van verzorgingsgebieden zich leent voor een soepel transitieproces. Daarna is een goede planning nodig, zowel van het aanpassen en omzetten van het gasnetwerk als van de benodigde aanpassingen in de gebouwen die aangesloten zijn. Ook de beschikbaarheid van waterstof voor de gebouwde omgeving moet goed worden afgestemd op het tempo waarin gebouwen worden aangesloten. Om dat tempo niet te frustreren, zouden de nationale productie en import van waterstof maximaal moeten worden gestimuleerd. De mogelijkheden daarvoor wordt beschouwd in de TVKN-rapportage over waterstof (PBL, 2024g).

6.6 Denkbaar transitietempo naar verwarmen met schone gassen

Het tempo waarin aardgas wordt vervangen door schone gassen wordt vooral bepaald door het tempo waarin de beschikbaarheid van schone gassen toeneemt. Hier is verondersteld dat in 2030 (conform rijksbeleid) maximaal 2 bcm ofwel 70 PJ groengas beschikbaar is voor de gebouwde omgeving. Uit de berekeningen volgt dat in 2030 daarvan slechts 30 PJ nodig zou zijn om alle gebouwen die hybride warmtepompen hebben geheel klimaatneutraal te maken. In 2040 is daarvoor 94 PJ schone gassen nodig. Een deel daarvan zou uit waterstof kunnen bestaan (mits dan beschikbaar) dat via aparte gasnetten naar gebouwen wordt gebracht. In 2050 moet de levering van schone gassen zover zijn opgeschaald dat 9,7 miljoen woningequivalenten ermee verwarmd kunnen worden. Voor de resterende 0,5 miljoen woningequivalenten is verwarmen met warmtenetten of elektrische warmtepompen op lange termijn een goedkopere oplossing.

De reductie van het totale gasverbruik wordt bepaald door het tempo en de mate waarin na-isolatie plaatsvindt en het tempo waarin hybride warmtepompen worden geïnstalleerd. Conform de verwachtingen van de installatiebranche veronderstellen we maximaal 1,5 miljoen hybride warmtepompen in 2030 (Ecorys, 2021). Dat is geëxtrapoleerd naar 4,8 miljoen weq's met een hybride warmtepomp in 2040 en 9,7 miljoen weq's in 2050. In de berekeningen is verondersteld dat de bijbehorende na-isolatie in hetzelfde tempo gaat verlopen. Dat tempo is lager dan de doelstellingen van het Nationaal Isolatieprogramma (NIP), dat streeft naar verduurzamen van 2,5 miljoen woningen tot 2030. Als het NIP dat doel bereikt, dan wordt het gasverbruik in 2030 iets lager dan hier verondersteld maar op het gasverbruik in 2040 en 2050 heeft dat waarschijnlijk geen invloed.

Tabel 43 geeft een samenvatting van de ontwikkeling van de energievraag van de gebouwde omgeving in het traject “schone gassen” tussen 2019 en 2050, uitgesplitst naar type gebouwen en type energiedrager. Daar is te zien dat het totale jaarlijkse gasverbruik gaat dalen van 443 PJ aardgas in 2019 naar 189 PJ schoon gas in 2050. Daarvan is 150 PJ nodig in de bestaande bouw conform de Startanalyse 2020 (zie ook Tabel 41, kolom T3), 34 PJ in nieuwbouw vanaf 2019 en 5 PJ voor ubouw die niet in de Startanalyse was opgenomen.

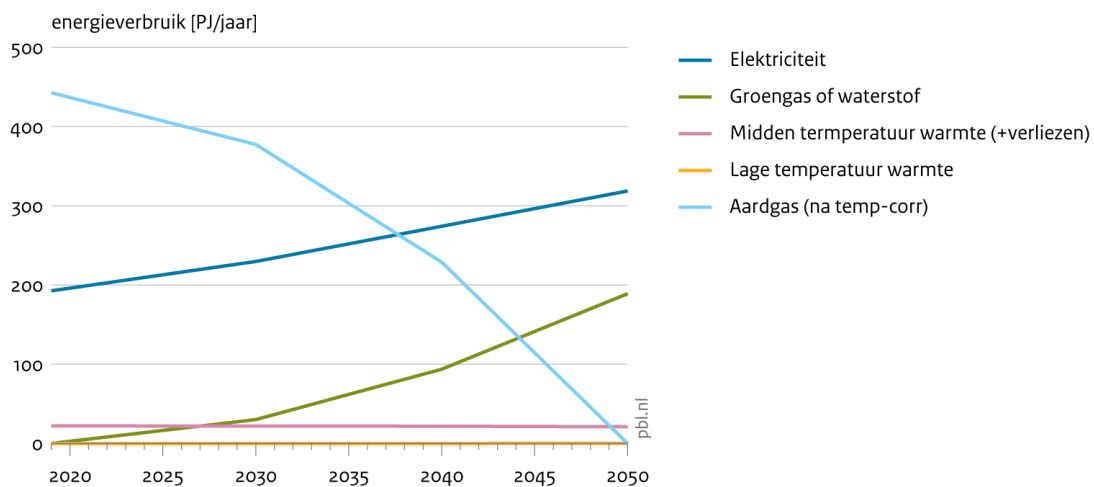
Tabel 44

Ontwikkeling energieverbruik (in PJ per jaar) in de gebouwde omgeving tussen 2019 en 2050 in traject 3 "Schone gassen"

Energieverbruik GO [in PJ]	2019	2030	2040	2050
Bestaande bouw in 2019*	662	622	555	459
Nieuwe woningen	0	21	34	39
Nieuwe utiliteitsgebouwen	0	30	60	87
subtotaal	662	660	619	529
Omgevingswarmte (saldo)	11	29	78	141
Totaal input energie	673	688	696	670
waarvan:				
Elektriciteit	193	230	274	319
Aardgas (na temperatuurcorrectie)	443	378	229	0
Groengas of waterstof	0	30	94	189
MT-warmte (+verliezen)	22	22	22	21
LT-warmte	0	0	0	0

*) Dit is exclusief 1 PJ zonnewarmte en het verbruik van 3 PJ biomassa die in 2019 in gebouwen werd verstoekt. De toekomstig verbruik van deze energiedragers is hier buiten beschouwing gelaten.

Figuur 34
Energieverbruik in de gebouwde omgeving in traject 3



Bron: PBL

7 Traject “All-electric verwarmen”

7.1 Inleiding

Dit hoofdstuk verkent de mogelijkheden om de bouwvoorraad in 2050 zoveel mogelijk te verwarmen met elektrische warmtepompen, ook wel aangeduid als de all-electric aanpak. We beschrijven voor- en nadelen, kosten en randvoorwaarden met het doel dit traject te kunnen vergelijken met de andere trajecten in dit rapport.

In dit traject is verondersteld dat alle gebouwen elektrisch worden verwarmd en dat er op termijn voldoende klimaatneutrale elektriciteit beschikbaar zal zijn. Alleen gebouwen met een bestaande warmtenetaansluiting stappen niet over op een warmtepomp. In dit traject is geen groengas of waterstof beschikbaar.

We brengen de integrale nationale kosten in beeld van het hele all-electric verwarmingssysteem, inclusief kosten van verzwaring van het elektriciteitsnet (waar nodig), verwijdering van het aardgasnet, levering van klimaatneutrale elektriciteit, na-isolatie van gebouwen tot schillabel B, twee typen warmtepompen, LT-afgiftesystemen in woningen, extra ventilatiekosten (waar nodig) en kosten van overstappen op elektrisch koken. We putten daarvoor uit berekeningen voor de Startanalyse 2020, kort toegelicht in Bijlage 1.

Op grond van een vergelijking met de nationale kosten van alternatieve, gasloze opties wordt de nationaal-economische potentie van all-electric verwarmen bepaald. Vervolgens worden kansen en belemmeringen van het realiseren van deze potentie besproken en beschouwen we de mogelijkheden om met aanvullend rijksbeleid de omschakeling naar elektrisch verwarmen voor verwarmen van gebouwen te versnellen.

Het hoofdstuk eindigt met een beschouwing over het tempo waarin het huidige verbruik van aardgas voor cv-ketels in dit traject kan worden vervangen door gebruik van groene stroom.

7.2 Waarom all-electric verwarmen?

All-electric verwarmen is een alternatief voor verwarmen met aardgas waarmee woningen en utiliteitsgebouwen aardgasvrij gemaakt kunnen worden. In het All-electric traject wordt bijna de hele energievraag van de gebouwde omgeving in 2050 met elektriciteit ingevuld, zowel voor verwarming, koeling, productieprocessen als het gebruik van huishoudelijke apparaten. Als de energievraag in een wijk volledig wordt ingevuld met elektriciteit kan het aardgasdistributienet daar worden weggehaald en kunnen de gasaansluitingen uit de gebouwen worden verwijderd. Als de elektriciteit volledig groen is, wordt het energieverbruik van de gebouwde omgeving op deze manier klimaatneutraal.

Gebouwen kunnen elektrisch worden verwarmd met warmtepompen, infraroodpanelen en/of weerstandsverwarming (zoals straalkachels, elektrische vloerverwarming en elektrische cv-ketels). Van deze opties gebruiken warmtepompen de minste elektriciteit per geleverde hoeveelheid nuttige warmte. Infraroodverwarming en straalkachels geven stralingswarmte af en worden meestal gebruikt als bijverwarming.

Voor grootschalige toepassing van all-electric verwarming in de bestaande bouw is het belangrijk dat een groot deel van de gebouwen extra wordt geïsoleerd. Isolatie vergt grote investeringen, maar verlaagt de variabele energiekosten en verhoogt het comfort in het gebouw. Isolatie vermindert ook de piekbelasting van het elektriciteitsnet en de vraag naar hernieuwbare elektriciteit.

In het All-electric traject worden investeringen in een warmtepomp gecombineerd met isolatie tot schillabel B, voor zover de gebouwen nog niet tot dat niveau geïsoleerd zijn. Desondanks zijn extra netverzwaringen en een substantieel hogere stroomproductie nodig. Op piekmomenten in koude periodes kan het voorkomen dat er weinig elektriciteit uit zon en wind wordt opgewerkt. Om dan toch in de elektriciteitsvraag te kunnen voorzien moet er voldoende elektriciteit uit back-up vermogen of opslag beschikbaar zijn. Dit verhoogt de kosten van de elektriciteitsvoorziening.

In het all-electric traject, met goed geïsoleerde gebouwen, zijn de kosten van warmtenetten vrijwel overall hoger dan die van warmtepompen. Ook zal het generiek stimuleren van na-isolatie en aanschaf van warmtepompen er toe leiden dat de kans op een rendabele businesscase voor warmtenetten afneemt, ook in wijken waar warmtenetten op dit moment nog kansrijk zijn, zie hoofdstuk 5. Daardoor wordt het potentieel van warmtenetten in dit traject niet benut. Dat heeft wel het voordeel dat de warmtetransitie sneller kan verlopen omdat afstemming over de aanleg van warmtenetten meer tijd kost dan overstappen op warmtepompen.

Voordelen:

1. Zekerheid van een uitvoerbare oplossing;
2. Gebouweigenaren hebben meer keuzeruimte bij het tempo van maatregelen nemen (voor zover het stroomnet dat toelaat);
3. Minder behoefte aan warmtenetten, met hun complexe, lange implementatietrajecten;
4. Niet afhankelijk van onzekerheden over de beschikbaarheid van schone gassen op termijn;
5. Minder afhankelijk van importen van groengas of waterstof maar mogelijk is wel import van elektriciteit nodig op piekmomenten.
6. Gemakkelijk(er) voldoen aan de EU-doelen voor energie-efficiëntie (EED) en energiebesparing (door de speciale manier waarop die kentallen worden berekend).

Er zijn ook nadelen:

1. Grotere afhankelijkheid van 1 energiedrager; dus minder robuustheid en flexibiliteit in het energiesysteem;
2. Grote behoefte aan na-isoleren van veel gebouwen; dus ook veel vakmensen nodig;
3. Hoge kosten voor woningeigenaren, zowel voor warmtepompen als voor na-isolatie.

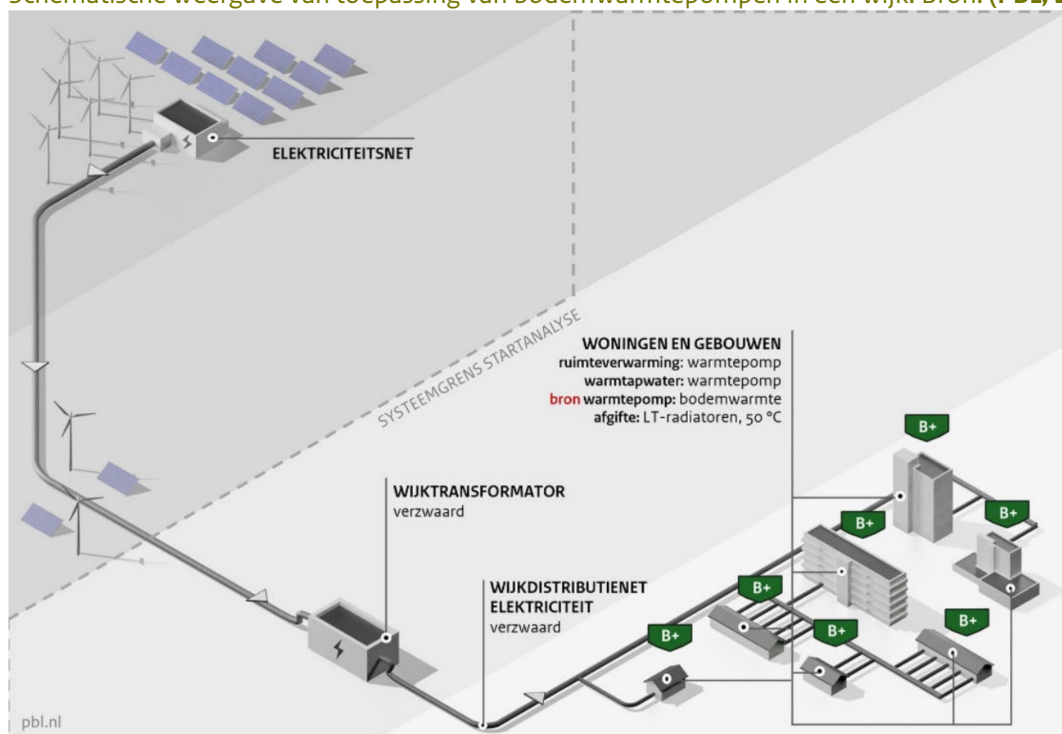
7.3 Is all-electric verwarmen overall mogelijk?

Voor all-electric verwarmen met warmtepompen is het nodig dat het gebouw een geschikt warmteafgiftesysteem heeft. Het is een groot voordeel als het gebouw goed geïsoleerd is. Er moet een geschikte plek met voldoende ruimte zijn om het systeem te plaatsen en er moet een voldoende zware aansluiting op het elektriciteitsnet zijn. We lichten deze eisen hierna verder toe.

Elektrische warmtepompen waarden warmte uit de omgeving op naar een bruikbare temperatuur voor ruimteverwarming en warm tapwater. De gangbare warmtepomptechnologieën zijn gebaseerd op elektrisch aangedreven compressie, condensatie en verdamping van een koelmiddel. De meest voorkomende warmtebronnen zijn de bodem en de buitenlucht. Bodemwarmtepompen en buitenluchtwarmtepompen verschillen in efficiëntie. Tijdens het stookseizoen is de temperatuur in de bodem meestal hoger dan in de buitenlucht, waardoor bodemwarmtepompen een hoger rendement hebben. Beide typen warmtepompen kunnen ook koelen.

Figuur 35

Schematische weergave van toepassing van bodemwarmtepompen in een wijk. Bron: (PBL, 2022a)



All-electric warmtepompen worden tot nu toe vooral toegepast in de nieuwbouw. Eind 2021 waren er volgens het CBS circa 97 duizend bodemwarmtepompen en circa 221 duizend lucht-waterwarmtepompen geïnstalleerd in woningen. In utiliteitsgebouwen waren er circa 9 duizend bodemwarmtepompen en circa 15 duizend lucht-waterwarmtepompen. Daarnaast waren er eind 2021 ongeveer 1,1 miljoen lucht-luchtwarmtepompen in woningen en circa 383 duizend lucht-luchtwarmtepompen in utiliteitsgebouwen. Dit zijn airco's die zowel kunnen koelen als verwarmen, maar meestal niet worden toegepast voor all-electric verwarmen (CBS, 2023wp). In de meeste gevallen worden individuele warmtepompen geplaatst. Collectieve warmtepomp-systemen kunnen een blok huizen of meerdere gebouwen verwarmen. Dit kan met één grote warmtepomp of meerdere warmtepompen die zijn aangesloten op een gemeenschappelijk bron in de bodem (ECW, 2022wp).

Elektrische warmtepompen werken meestal op lagere temperaturen (35 tot 55 °C) dan aardgasgestookte CV-ketels (60 tot 80 °C). Voor verwarming van gebouwen met lagere temperaturen is het nodig dat het gebouw een geschikt verwarmingswarmteafgiftesysteem heeft. De meest geschikte verwarmingsafgiftesystemen zijn vloerverwarming, wandverwarming en speciale lage-temperatuur radiatoren. Soms zijn de bestaande radiatoren in na-geïsoleerde oudere huizen ook geschikt of met aanpassingen geschikt te maken. In goed geïsoleerde gebouwen kan een warmtepomp met minder vermogen en een lagere afgiftetemperatuur worden geïnstalleerd die minder elektriciteit verbruikt. In de Startanalyse aardgasvrije buurten (zie bijlage) is daarom verondersteld dat gebouwen moeten worden verbeterd naar het isolatieniveau van schillabel B⁹¹ om een all-electric warmtepomp te

⁹¹ Dit komt ongeveer overeen met een Rc-waarde van 2,5 voor woningen en een Rc-waarde van 3,5 voor utiliteitsgebouwen.

kunnen toepassen. Gebouwen die vanaf 1995 zijn gebouwd in nieuwbouwwijken hebben vaak al een geschikt isolatieniveau. Andere gebouwen kunnen worden gerenoveerd.

De huidige CV-ketels hebben standaard een ruime overcapaciteit. De capaciteit van warmtepompen wordt afgestemd op de warmtebehoefte van een gebouw. Goede dimensionering van warmtepompen is belangrijk omdat overgedimensioneerde warmtepompen een lager rendement hebben en een grotere investering vereisen.

Als warmtepompen water verwarmen naar een temperatuur tussen de 55 en 75 °C zijn meestal geen aanpassingen nodig aan het warmteafgiftesysteem en de isolatie van een gebouw. Het rendement van de warmteproductie is dan wel lager dan bij gangbare warmtepompen omdat er meer elektriciteit nodig is om warmte op te waarden tot hogere temperaturen. Hoge-temperatuur warmtepompen leiden tot een zwaardere belasting van het elektriciteitsnet. Warmtepompen met afgiftetemperaturen hoger dan 75 graden zijn momenteel nog niet breed beschikbaar in de markt (ECW, 2022wp).

Om elektrische warmtepompen te kunnen toepassen moet er een geschikte plek met voldoende ruimte zijn om de systemen te plaatsen. Elektrische bodemwarmtepompen bestaan uit een bodemcollector met warmtewisselaar en een binnenunit met warmtepomp. Elektrische luchtwarmtepompen bestaan uit een buitenunit met luchtcollector en een binnenunit met de warmtepomp. De ventilator en de compressor van de buitenunit kunnen geluidsoverlast veroorzaken. De overlast kan worden verminderd door de buitenunit optimaal te plaatsen, slimme regeling toe te passen of een geluiddempende kast om de buitenunit te plaatsen (ECW, 2022wp). Er zijn geluidsarme warmtepompen beschikbaar, maar deze hebben een buitendeel met grotere afmetingen en zijn duurder dan de gemiddelde uitvoering (Naber, 2023).

Uit voorgaande kunnen we concluderen dat elektrische warmtepompen op dit moment nog niet overall kunnen worden toegepast, met name wegens gebrek aan geschikte ruimte binnen of buiten het gebouw. Warmtepompen worden echter wel steeds krachtiger, compacter en stiller. Die ontwikkelingen verruimen de mogelijkheden voor toepassing. Omdat onduidelijk is welke toepassingen op lange termijn onmogelijk blijven, is bij de berekeningen van effecten van dit traject verondersteld dat elektrische warmtepompen op termijn in alle bestaande en nieuwe gebouwen kunnen worden toegepast.

7.3.1 Hoeveel elektriciteit is nodig?

In het all-electric traject wordt bijna de hele gebouwde omgeving in 2050 met elektriciteit van energie voorzien, zowel voor verwarming, koeling, productieprocessen als het gebruik van huishoudelijke apparaten. In de berekeningen van de verandering in het stroomverbruik is verondersteld dat investeringen in een warmtepomp worden gecombineerd met isolatie tot schillabel B, voor zover de gebouwen nog niet tot dat niveau geïsoleerd zijn. In de praktijk kunnen (en zullen) die maatregelen op verschillende tijdstippen worden genomen, wanneer dat gebouweigenaren het beste uitkomt. Toch zal enige coördinatie van werkzaamheden nodig zijn, met name voor de tijdige verzwaring van het stroomnet (in buurten waar dat nodig is) en voor het beëindigen van de gasleidingen en weghalen van gasleidingen.

In het all-electric-traject is verondersteld dat tot 2030 in de bestaande bouw 1,5 miljoen bestaande woning-equivalenten kunnen worden voorzien van een all-electric warmtepomp en worden na-geïsoleerd tot schillabel B. In 2040 moet dat aantal zijn gegroeid tot zes miljoen woningequivalenten.

In nieuw gebouwde woningen en utiliteitsgebouwen wordt in dit traject vanaf nu vrijwel uitsluitend all-electric verwarming toegepast. Alleen nieuwbouw in buurten die al een warmtenet hebben, krijgt nog een warmtenetaansluiting. Dat aandeel van 3% is gelijkgesteld aan het aandeel warmtenetten in de bestaande bouw. Het elektriciteitsverbruik van de gebouwde omgeving neemt hierdoor toe van 193 petajoule in 2019 naar 363 petajoule in 2050.

De extra elektriciteitsvraag is sterk geconcentreerd in de winter en met name in (extreem) koude periodes. Als het verschil tussen de buitentemperatuur en de binnentemperatuur groter is, moet de warmtepomp meer warmte produceren om de gewenste binnentemperatuur te behouden. Op deze momenten werken de warmtepompen juist met een lagere efficiëntie. Het stelt hoge eisen aan het elektriciteitssysteem om te garanderen dat op deze momenten voldoende elektriciteit kan worden geleverd. Als het aanbod van stroom uit zon en wind beperkt is, moet op piekmomenten elektriciteitsproductievermogen of -opslagcapaciteit beschikbaar zijn die op andere momenten van het jaar niet wordt gebruikt. Hiervoor zijn grote investeringen in opwekkingscapaciteit en infrastructuur nodig. Dat zorgt in koude periodes voor hoge elektriciteitskosten.

Tabel 45

Ontwikkeling 2019-2050 van het totale elektriciteitsverbruik in de gebouwde omgeving in het traject All-electric, in PJ per jaar.

Elektriciteitsverbruik [PJ/jaar]	2019	2030	2040	2050
Bestaande bouw	193	200	235	262
Nieuwe woningen	0	16	27	31
Nieuwe utiliteitsgebouwen	0	21	45	71
Totaal	193	237	307	363

7.4 Op weg naar overal elektrisch verwarmen

7.4.1 De uitrol van elektrische warmtepompen versnellen

All-electric warmtepompen zijn tot nu toe vooral toegepast in nieuwbouw. Dit is gestimuleerd door de afschaffing van de aansluitplicht op aardgas en de aanscherping van energieprestatie-eisen voor nieuwbouw. Steeds meer nieuwe woningen worden aardgasvrij gebouwd. Voor nieuwbouwwoningen met een bouwaanvraag vanaf 1 juli 2018 zijn de netbeheerders niet meer verplicht een aansluiting op het aardgasnet te realiseren. Voor alle nieuwbouw, zowel woningbouw als utiliteitsbouw, moet de vergunningaanvragen vanaf 1 januari 2021 voldoen aan de eisen voor Bijna Energie Neutrale Gebouwen (BENG). Warmtepompen helpen om aan de BENG-eisen te voldoen.

In 2022 had 25% van de nieuwbouwwoningen een aansluiting op een warmtenet, was 72% all-electric en had 3% nog een aardgasaansluiting. Bij all-electric woningen heeft 66% een warmtepomp en 6% infraroodpanelen. Volgens de Klimaat- en Energieverkenning 2022 worden er in de periode 2021-2030 ongeveer 700.000 woningen bijgebouwd, waarvan naar verwachting 75% met elektrische warmtepompen wordt uitgerust (PBL, TNO, RIVM, 2022fs-kev). In een all-electric-traject is het niet logisch om nieuwe warmtenetten aan te leggen. Daarom krijgen nieuwbouwwoningen hier alleen nog een warmtenetaansluiting als die worden gebouwd in een buurt (inbreilocatie) waar al een warmtenet ligt.

Bij bestaande woningen zijn tot 2022 slechts enkele duizenden overgegaan van een aardgasgestookte cv-ketel naar een warmtepomp. Het beleidsprogramma Versnelling Verduurzaming Gebouwde Omgeving (Ministerie van BZK, 2022) stimuleert de toepassing van warmtepompen en na-isolatie met een mix van normering, beprijzen, financiering, subsidiëring en ondersteuning. Investerings in elektrische warmtepompen in de bestaande bouw worden gestimuleerd met subsidie. Eigenaren van koopwoningen kunnen hiervoor ISDE-subsidie aanvragen. Vanaf 2022 is deze subsidie verhoogd van 20% naar 30% van de investeringskosten van de warmtepomp. De Subsidieregeling energiebesparing eigen huis (SEEH) voor VvE biedt (gemengde) Verenigingen van Eigenaars (VvE's), woonverenigingen en wooncoöperaties subsidie voor investeringen in warmtepompen.

Voor positieve investeringsbeslissingen is het van belang dat de investering in een warmtepomp financieel aantrekkelijk is ten opzichte van de alternatieven. De aantrekkelijkheid van de investering wordt onder andere bepaald door de beprijzing van energie. Verschuiving van de energiebelasting van elektriciteit naar aardgas maakt aardgasbesparende maatregelen, zoals na-isolatie van woningen en gebouwen, aantrekkelijker en stimuleert de toepassing van elektrische warmtepompen. Er zijn ook andere beleidsinstrumenten die de prijzen beïnvloeden. Als er een EU breed emissiehandelssysteem voor de gebouwde omgeving en het wegtransport wordt ingevoerd zullen de energieleveranciers de CO₂-kosten doorberekenen in de prijs van aardgas voor eindgebruikers.

De gemeenten hebben in de transitievisies warmte beschreven welke wijken en buurten ze willen gaan verduurzamen, en welke alternatieven voor aardgas ze daarvoor overwegen. Als vervolgstap gaan de gemeenten hiervoor concrete uitvoeringsplannen maken. Als voor een wijk gekozen wordt voor een all-electric oplossing kan dit duidelijkheid geven die nodig is voor een investeringsbeslissing. Goede informatievoorziening kan ook zorgen dat vaker gekozen wordt voor warmtepompen. Twijfel of de huidige warmtepompen wel geschikt zijn om een woning te verwarmen en warm tapwater te produceren kan tot een afwachtende houding leiden (Naber, 2023).

Met normering kunnen huishoudens, bedrijven en instellingen worden aangezet om op natuurlijke investeringsmomenten te kiezen voor verduurzaming. Het kabinet bereidt normering voor waardoor vanaf 2026 bij het vervangen van een cv-installatie moet worden overgestapt op een duurzamer alternatief, mits de woning of het gebouw daarvoor geschikt is. Met een hybride warmtepomp kan aan de norm worden voldaan, maar er is ook ruimte voor andere duurzame technieken zoals volledig elektrische warmtepompen. De normering gaat gelden voor zowel woningen als utiliteitsbouw. Er is ook beleid aangekondigd voor de uitfasering van woningen en utiliteitsgebouwen met slechte energielabels. Ook is er een voorstel gedaan voor een renovatieverplichting voor gebouwen van publieke instellingen. Op termijn kan de uitrol van elektrische warmtepompen versneld worden door verdergaande normering, mits de keuze voor een elektrische warmtepomp technisch en financieel haalbaar is. Er is aanvullend beleid nodig om kwetsbare huishoudens te ondersteunen bij het verduurzamen van hun woning.

De ingroei van elektrische warmtepompen kan worden belemmerd door tekorten aan vakmensen, productiecapaciteit, materialen en netcapaciteit. De installatie van een warmtepomp neemt meer tijd in beslag dan de installatie van een cv-ketel. Een warmtepomp heeft meerdere componenten die geïnstalleerd moeten worden. De installatie vereist ook bijkomstige werkzaamheden, zoals grondwerk of aanpassing van de verwarmingsinstallatie. Na de installatie is voor warmtepompen relatief veel arbeidsinzet nodig voor onderhoud, omdat een warmtepomp meer componenten kent dan een CV-ketel (EIB, 2022). De overheid kan samen met de installatiebranche inzetten op het reduceren van de installatietijd en het vergroten van het aantal vakbekwame installateurs.

In de loop van 2021 ontstonden problemen met de levering van warmtepompen (SNM, 2022). In 2022 konden de wachttijden oplopen tot een jaar en waren er installatiebedrijven die tijdelijk geen nieuwe orders aannamen. EIB heeft de trends op de bouwmarkt geanalyseerd en verwacht dat deze problemen op korte termijn aanhouden, maar dat ze op middellange en lange termijn zullen verdwijnen omdat producenten in binnen- en buitenland de productiecapaciteit zullen verhogen (EIB, 2022). De productie van warmtepompen in Nederland betreft voornamelijk de assemblage van ingekochte componenten tot een werkend product voor de Nederlandse markt.

7.4.2 Hoe overbelasting van het elektriciteitsnet te voorkomen?

Warmtepompen hebben een relatief hoog elektrisch vermogen en gebruiken vaak gelijktijdig elektriciteit, met name in koude periodes. Als veel gebouwen overgaan op all-electric verwarming wordt het elektriciteitsnet zwaarder belast. Verzwaringen van het elektriciteitsnet kunnen nodig zijn om overbelasting van het net te voorkomen. Er zijn ook manieren om te zorgen dat all-electric warmtepompen het net minder zwaar belasten, zoals aanpassing van het stookpatroon, flexibele inzet van warmtepompen en vermindering van de warmtevraag.

Om inzicht te krijgen in de praktijkprestaties van warmtepompen is in het project Installatiemonitor (Hommelberg, Janssen, & Friedel, 2022) een meetcampagne opgezet bij 450 woningen. De resultaten van de meetcampagne bevestigen dat warmtepompen meer elektriciteit gebruiken bij lagere effectieve buitentemperaturen. De effectieve buitentemperatuur is een functie van de gemiddelde buitentemperatuur en de windsnelheid. Volgens de Installatiemonitor is de piekvraag naar elektriciteit in de avond voor kleinere woningen gemiddeld over de winter ongeveer 1 tot 2 kW_{elektrisch}. Voor een rijtjeswoning met een vloeroppervlak van 125 vierkante meter is de gemeten piek ongeveer 1,75 kW_{elektrisch}. Deze piek is hoger dan de gemiddelde netcapaciteit per woning en kan mogelijk een probleem opleveren voor het elektriciteitsnet. In extreem koude periodes is de piekbelasting aanzienlijk hoger. Voor zeer grote woningen komt de piekbelasting boven de 4 tot 5 kW_{elektrisch} uit. Volgens de resultaten van de meetcampagne is de piekvraag van woningen met een all-electric warmtepomp zo'n anderhalve keer hoger dan voor woningen met een hybride warmtepomp.

All-electric-warmtepompen zijn vaak onder de benodigde piekvraag gedimensioneerd, op circa 90% van de warmtevraag (E-Top, 2021). Het resterende gedeelte van de warmtebehoefte kan worden ingevuld met een elektrisch verwarmingselement. Wanneer het elektrische element bij moet springen daalt het rendement van de warmtepomp. Dit kan zorgen voor een hogere piekbelasting. Bij een deel van de all-electric warmtepompen in de steekproef van de Installatiemonitor werd mogelijk gebruik gemaakt van een elektrisch bijstookelement, maar de onderzoekers hebben dit niet teruggezien in de resultaten.

Vanwege een sterke groei van de vraag naar elektriciteit en een sterke toename van de weersafhankelijke productie van elektriciteit zijn er verzwaringen van het elektriciteitsnet nodig. De netbeheerders hebben aangegeven dat zij de elektriciteitsnetten niet op een adequaat tempo kunnen uitbreiden, onder meer vanwege een tekort aan technici, langlopende ruimtelijke procedures, beperkte ruimte in de ondergrond en beperkte financieringsmogelijkheden (NBNL, 2021).

Door groei van het gebruik van all-electric warmtepompen kunnen extra netverzwaringen nodig zijn. Het is mogelijk dat netverzwaring in een buurt al nodig is om andere redenen, zoals de installatie van grote aantallen zonnepanelen of het opladen van elektrische auto's. Zon-PV systemen hebben ook een relatief hoog vermogen en grote gelijktijdigheid van de netbelasting. In het genoemde

onderzoek bij 450 woningen was de piekvraag van all-electric warmtepompen meestal van dezelfde orde als de piek die zonnepanelen op het net veroorzaakten, maar voor grote woningen in de steekproef was de gemeten piekvraag hoger dan die van zonnepanelen (Hommelberg, Janssen, & Friedel, 2022). Of lokaal verzwaring nodig is hangt af van de capaciteit op het huidige laagspanningsnet en de capaciteit van de bestaande gebouwaansluitingen. Er kunnen ook aanpassingen in hogere netvlakken noodzakelijk zijn.

Om netverzwaringen te kunnen plannen is het belangrijk om te weten waar en wanneer veel elektrische warmtepompen, zonnepanelen en EV-oplaadpunten worden geïnstalleerd. De gemeenten hebben in transitievisies warmte (TVW's) beschreven welke wijken en buurten ze willen gaan verduurzamen en welke alternatieven voor aardgas ze daarvoor overwegen. Als vervolgstap gaan de gemeenten hiervoor concrete uitvoeringsplannen maken. Voor een deel van de wijken wordt gekozen voor een all-electric oplossing maar veel TVW's bieden nog geen duidelijke keuze. De netbeheerders vinden dat snel inzichtelijk moet zijn welke wijken verduurzaamd gaan worden, wanneer en op welke manier, zodat op tijd besloten kan worden tot noodzakelijke netverzwaringen. De netbeheerders hebben voorgesteld om geen subsidie te geven voor elektrische warmtepompen in wijken waar gekozen wordt voor een collectieve warmteoplossing (NBNL, 2022).

Om netverzwaring goed te kunnen plannen is niet alleen inzicht nodig in de te verwachten uitrol van warmtepompen maar ook in die van zon-PV en EV-oplaadpunten. Gezien de verwachte toename van elektrische voertuigen zullen op termijn in alle woonwijken oplaadpunten nodig zijn. Ook de toepassing van PV-panelen wordt overal gestimuleerd, op alle geschikte bestaande en nieuwe daken. Dat betekent dat het elektriciteitsnet waarschijnlijk in alle woonwijken op termijn verzwaard zal moeten worden, ook in wijken waar geen of weinig warmtepompen worden geïnstalleerd. Dat maakt dat de noodzaak van netverzwaring geen belangrijk argument is bij de keuze om in een wijk op termijn wel of geen warmtepompen aan te sluiten. Netverzwaring kan wel een rol spelen bij de timing van een buurtgewijze overstap op warmtepompen; die moet bij voorkeur worden uitgesteld tot na het moment van netverzwaring.

Netverzwaringen zijn niet de enige manier om problemen door een tekort aan netcapaciteit te voorkomen. Het Landelijk Actieprogramma Netcongestie gaat niet alleen over het sneller realiseren van netuitbreidingen, maar ook over betere benutting van het net en vergroten van de flexibele capaciteit (Rijksoverheid, 2022).

Opties voor beperken piekbelasting stroomnetten

De impact van elektrische warmtepompen op het elektriciteitsnet kan op verschillende manieren worden verminderd. Het stookpatroon van elektrische warmtepompen kan worden aangepast om de belasting van het elektriciteitsnet te beperken. Als de woning 's nachts weinig afkoelt is er na koude nachten minder vermogen nodig om het gebouw weer op te warmen. Het snel opwarmen van een woning is op een koude dag minder goed mogelijk, omdat een warmtepomp meestal weinig extra capaciteit heeft. Om die reden is in de Startanalyse een elektrische warmtepomp steeds gecombineerd met na-isolatie van bestaande woningen tot schillabel B.

De resultaten van de Installatiemonitor laten zien dat all-electric warmtepompen die modulerend werken weinig scherpe pieken op het elektriciteitsnet veroorzaakten. De onderzochte hybride warmtepompen veroorzaakten vaak wel scherpe pieken omdat de meeste hybride warmtepompen op buitentemperatuur gestuurd werden.

Om het gevraagde vermogen te verminderen kan een elektrische warmtepomp worden gecombineerd met een voorraadvat voor warm water, ventilatie-warmteterugwinning, douchewarmtewisselaars of buffertanks voor de opslag van warmte voor ruimteverwarming (ECW, 2022wp). Elektrische of thermische opslag kan gebruikt worden om de PV-teruglevering en de warmtepomp-piek beter met elkaar in balans te brengen. Netbeheer Nederland heeft erop aangedrongen om opslag te subsidiëren en/of fiscaal te stimuleren, juist ook voor consumenten (NBNL, 2021).

Als elektrische warmtepompen worden toegepast bij goed geïsoleerde huizen beperkt dit de belasting van het elektriciteitsnet. De netbeheerders hebben daarom voorgesteld om een energielabel A of B verplicht te stellen bij toepassing van elektrische warmtepompen. Een andere optie is om een minimaal energielabel als voorwaarde te stellen voor de subsidiëring van warmtepompen (NBNL, 2022).

DNV GL en TNO onderzochten de mogelijkheden om flexibiliteitsdiensten te ontwikkelen (DNV GL & TNO, 2021). Warmtepompen kunnen via een beheersysteem op afstand worden aangestuurd. Flexibiliteit kan door installateurs worden aangeboden als aanvullende dienst op onderhoud en storingsdetectie. Het is daarbij een voordeel dat elektrische warmtepompen een relatief groot vermogen hebben, vergeleken met bijvoorbeeld een koelkast. Er moet wel rekening mee worden gehouden dat veranderingen in de binnentemperatuur met een halve graad al merkbaar zijn voor klanten en dat de perceptie van comfort kan veranderen als de controle over de verwarming uit handen wordt gegeven. Dat betekent dat flexibiliteitsdiensten alleen kansrijk zijn als de klanten worden ontzorgd en als ze geen extra investeringen vereisen. Verder vraagt het beschikbaar maken van flexibiliteit om een ketenbenadering en samenwerking tussen partijen met specifieke expertises. Met veel partijen in de keten kan het moeilijk worden om een financieel haalbaar verdienmodel te realiseren vanwege administratieve lasten en verdeling van de marge. Het moet immers voor iedere partij aantrekkelijk zijn om mee te doen. De auteurs wijzen er ook op dat markten voor flexibiliteit op termijn meer of minder aantrekkelijk kunnen worden. Dat betekent dat regelsystemen nodig zijn die zonder meerkosten kunnen worden ingezet om verschillende soorten flexibiliteit te benutten (groothandel, balancering, netcongestie) en die schaalbaar zijn.

Ook Accenture heeft onderzoek gedaan naar de mogelijkheid om flexibiliteit te leveren met warmtepompen (Accenture, 2021). Dit kan door middel van piekverschuiving, piekreductie en door op- en afregelen. Netbeheerders kunnen flexibiliteit inkopen of middels tarieven sturen op optimalisatie achter de meter. Optimalisatie achter de meter houdt in dat opwekking en afname binnen het gebouw van de gebruiker op elkaar worden afgestemd en/of dat wordt geoptimaliseerd op basis van prijsprikkels die aan de eindgebruiker worden doorbelast. Over 5-10 jaar wordt het volgens de onderzoekers financieel interessant om pieken en onbalans op het elektriciteitsnet te voorkomen. De grootste financiële besparingen lijken bereikt te kunnen worden door de stroomopbrengst van eigen PV-panelen te gebruiken voor productie van warm tapwater en dat op te slaan. Zolang de salderingsregeling van kracht blijft is dat voor bewoners echter niet rendabel. Ook zijn de huidige types warmtepompen nog nauwelijks stuurbaar en de netbeheerders en energieleveranciers bieden nog onvoldoende financiële prikkels. Onder leiding van het Flexible power Alliance Network en met ondersteuning van TKI Urban Energy wordt gewerkt aan de uitvoering van een roadmap. Dit moet leiden tot standaardisatie in de keten, verbeterde prijsprikkels, meer kennisdeling, grootschalige proefprojecten en een breed gedragen visie op de warmtepomp in het energiesysteem van de toekomst.

7.4.3 Betaalbaarheid voor bewoners

De betaalbaarheid van warmtepompen is voor woningeigenaren een belangrijk criterium om te beslissen over een investering in een warmtepomp. Voor toepassing van all-electric warmtepompsystemen zijn aanzienlijke investeringen nodig.

Het Dashboard Eindgebruikerskosten van TNO geeft inzicht in de eindgebruikerskosten van verschillende warmtestrategieën voor eigenaar-bewoners van koopwoningen, huurders van corporatiewoningen en huurders van particuliere huurwoningen. Het Dashboard onderscheidt vijf verschillende woningtypen (vrijstaand, 2-onder-1-kap, rijwoning tussen, rijwoning hoek en meergezinswoningen), zeven isolatieniveaus (aangeduid met energielabels) en drie verschillende niveaus van energieverbruik (laag, gemiddeld en hoog energieverbruik). In het Dashboard ontbreken utiliteitsgebouwen omdat er op basis van landelijke gemiddelden geen goed beeld te geven was van de eindgebruikerskosten voor utiliteitsgebouwen in een specifieke wijk (Rijksoverheid, 2021).

Tabel 45 laat de geschatte investeringen zien die volgens het Dashboard nodig zijn voor toepassing van luchtwarmtepompen en bodemwarmtepompen in 2-onder-1 kap koopwoningen. De investeringen zijn inclusief isolatie naar schillabel B. Er is ook rekening gehouden met aanpassing van het ventilatiesysteem, aanpassing van het warmte-afgiftesysteem en een overstap naar elektrisch koken. In die tabel is geen rekening gehouden met mogelijke subsidies en uitgespaarde investeringen in een nieuwe HR-ketel. Bij de berekening van eindgebruikerskosten is dat wel gedaan.

Woningen met een energielabel A of B kunnen met de laagste investeringen overgaan op all-electric verwarmen, omdat voor deze woningen geen na-isolatie nodig is. Voor woningen met slechtere labels zijn de benodigde investeringen in isolatie groter dan de investering in de warmtepomp. De investeringen voor toepassing van een bodemwarmtepomp zijn 15-20% hoger dan voor een luchtwarmtepomp.

Tabel 46

Investerings (exclusief subsidie) bij toepassing van elektrische warmtepompen in 2020 voor eigenaar-bewoners van een 2-onder-1 kap koopwoning, in 1000 euro per woning. Bron: Dashboard eindgebruikerskosten (TNO, 2021d).

Energie-label	luchtwarmtepomp	luchtwarmtepomp	bodemwarmte-	bodemwarmte-
	(x 1.000 euro)	(x 1.000 euro)	pomp (x 1.000 euro)	pomp (x 1.000 euro)
	Totaal	waarvan isolatie	Totaal	waarvan isolatie
A	12 (10-14)	0	18 (15-21)	0
B	12 (10-14)	0	18 (15-21)	0
C	23 (19-27)	7 (5-9)	29 (24-35)	7 (5-9)
D	33 (26-39)	15 (12-19)	39 (31-46)	15 (12-19)
E	40 (32-47)	21 (17-26)	46 (37-55)	21 (17-26)
F	39 (31-47)	21 (16-26)	45 (36-54)	21 (16-26)
G	39 (31-47)	21 (16-26)	45 (36-54)	21 (16-26)

Tabel 46 laat de bijbehorende geschatte effecten op het aardgasverbruik en het elektriciteitsverbruik zien. De geschatte reductie van het aardgasverbruik is voor woningen met slechte labels hoger dan voor woningen met goede labels. De baten door vermindering van de energiekosten zijn dus hoger in woningen met slechte labels, maar dit houdt geen gelijke tred met de toename van de investeringen.

Tabel 47

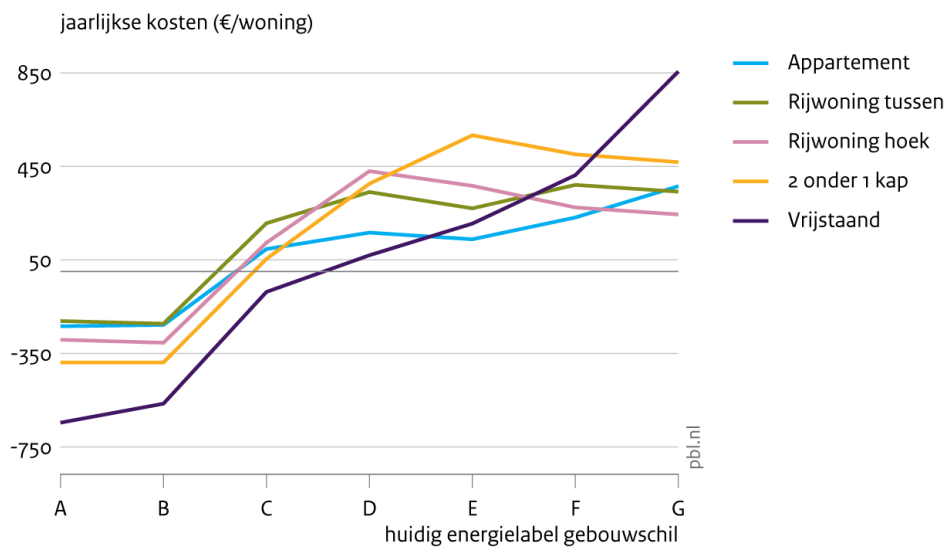
Effect op energieverbruik van elektrische warmtepompen in 2020 voor eigenaar-bewoners van een 2-onder-1 kap koopwoning. Bron: Dashboard eindgebruikerskosten (TNO, 2021d)

Energie-label	lucht-warmtepomp Reductie aardgasverbruik (x 1.000 m ³)	lucht-warmtepomp Extra verbruik elektriciteit (x 1.000 kWh)	bodem-warmtepomp Reductie aardgasverbruik (x 1.000 m ³)	bodem-warmtepomp Extra verbruik elektriciteit (x 1.000 kWh)
A	1,2 (1,0-1,4)	2,6 (2,2-3,1)	1,2 (1,0-1,4)	2,2 (1,8-2,6)
B	1,4 (1,1-1,6)	3,3 (2,7-3,9)	1,4 (1,1-1,6)	3,0 (2,5-3,6)
C	1,5 (1,2-1,8)	3,6 (2,9-4,3)	1,5 (1,2-1,8)	3,3 (2,7-4,0)
D	1,6 (1,3-1,9)	3,7 (3,0-4,4)	1,6 (1,3-1,9)	3,4 (2,8-4,1)
E	1,6 (1,3-2,0)	3,6 (2,9-4,3)	1,6 (1,3-2,0)	3,4 (2,7-4,0)
F	1,7 (1,4-2,1)	3,8 (3,0-4,5)	1,7 (1,4-2,1)	3,5 (2,8-4,2)
G	1,8 (1,4-2,2)	3,8 (3,0-4,7)	1,8 (1,4-2,2)	3,5 (2,8-4,3)

De hierboven vermelde resultaten van het Dashboard zijn een illustratie. Er is een grote spreiding in de kosten en baten van warmtepompen, veroorzaakt door fysieke verschillen tussen woningen, verschillen in stookgedrag en onzekerheden over de toekomstige ontwikkelingen van de kosten van maatregelen en energiedragers. De betaalbaarheid hangt ook af van toekomstige beleidskeuzes, bijvoorbeeld over de manier waarop investeringen in elektrische warmtepompen worden gesubsidieerd en over de energiebelastingtarieven voor aardgas en elektriciteit. De technische eigenschappen van warmtepompen kunnen nog verbeteren. Door innovatie, standaardisatie en opschaling kunnen elektrische warmtepompen in de loop van de tijd goedkoper worden (TKI, 2020) (PBL, 2022a).

De resultaten van het Dashboard laten zien dat de warmtestrategie het meest bepalend is voor de hoogte van de eindgebruikerskosten, naast het huidige energielabel. Figuur 36 toont de eindgebruikerskosten in 2030 van verwarmen met een elektrische luchtwarmtepomp. Het aardgasvrij maken van kleinere woningen is structureel goedkoper dan van grotere woningen. Het niveau van energiegebruik (laag, gemiddeld of hoog) maakt weinig verschil. Er zijn verschillen tussen de eindgebruikerskosten van koop- en huurwoningen. Er kan een huurverhoging plaatsvinden om de kosten voor de investeringen in energiebesparende maatregelen van verhuurders te bekostigen. Woningcorporaties hebben in het Sociaal Huurakkoord afgesproken een deel van de investeringen te verrekenen met hogere huren. Daardoor besparen huurder meestal meer op hun energiekosten dan dat de huren omhoog gaan (Rijksoverheid, 2021).

Figuur 36
Eindgebruikerskosten in 2030 (inclusief subsidies) van verwarmen met een elektrische luchtwarmtepomp



Bron: TNO, Dashboard eindgebruikerskosten

7.5 Het transitietempo naar all-electric verwarmen

In het all-electric traject wordt de hele gebouwde omgeving in 2050 met elektriciteit van energie voorzien, zowel voor verwarming, het gebruik van huishoudelijke apparaten als voor productieprocessen in utiliteitsgebouwen. Voor eenvoud van de berekeningen is verondersteld dat iedere buurt integraal en tegelijkertijd overstapt op toepassing van elektrische warmtepompen en dat warmtepompen een gemiddelde efficiëntie hebben van 350% (een jaargemiddelde COP van 3,5).

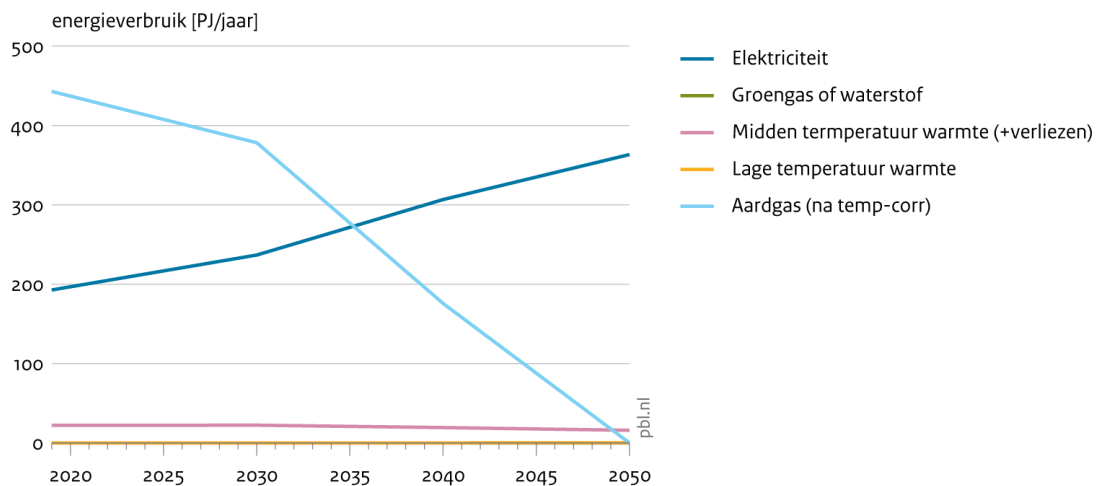
Als alle stimulansen maximaal worden ingezet, zouden in 2030 in de bestaande bouw 1,5 miljoen woningequivalenten voorzien kunnen zijn van een all-electric warmtepomp. In 2040 moet dit aantal zijn toegenomen tot zes miljoen woningequivalenten om in 2050 op 100% te kunnen komen. In nieuw gebouwde woningen en utiliteitsgebouwen wordt vanaf 2020 alleen all-electric verwarming toegepast, tenzij nieuwbouw plaatsvindt in een buurt waar al een warmtenet aanwezig is. Het elektriciteitsverbruik van de gebouwde omgeving groeit bij deze veronderstellingen van 193 petajoule in 2019 naar 363 petajoule in 2050.

Investeringen in een warmtepomp worden gecombineerd met isolatie tot schillabel B (equivalent van de isolatiestandaard), voor zover de gebouwen nog niet tot dat niveau geïsoleerd zijn. Door de combinatie van isolatie en elektrisch verwarmen wordt het energieverbruik (exclusief omgevingswarmte) van de bestaande bouw tussen 2019 en 2050 meer dan gehalveerd van 662 petajoule naar 276 petajoule. Vanwege de groeiende toepassing van elektrische warmtepompen neemt het gebruik van omgevingswarmte toe van 11 petajoule in 2019 naar 259 petajoule in 2050. Het aardgasverbruik neemt af tot er in 2050 geen aardgas meer wordt gebruikt.

In dit traject blijven de al bestaande warmtenetten in gebruik, maar worden er geen nieuwe warmtenetten bijgebouwd. Het aantal aansluitingen kan nog licht toenemen door nieuwbouw van

woningen in buurten met een bestaand warmtenet. De bestaande warmtenetten gaan minder warmte leveren omdat de aangesloten gebouwen met na-isolatie naar minimaal schillabel D worden gebracht.

Figuur 37
Energieverbruik in de gebouwde omgeving in traject 4



Bron: PBL

Tabel 48
Ontwikkeling van het energieverbruik (in PJ/jaar) in de gebouwde omgeving 2019-2050 in het traject All-electric

Energieverbruik GO [in PJ]	2019	2030	2040	2050
Bestaande bouw 2019*	662	591	419	276
Nieuwbouw woningen	0	17	28	32
Nieuwbouw dienstensector	0	30	55	71
subtotaal	662	637	502	379
Omgevingswarmte (saldo)	11	58	168	259
Totaal input energie	673	696	670	638
waarvan:				
Elektriciteit	193	237	307	363
Aardgas (na temperatuurcorrectie)	443	378	176	0
Groengas of waterstof	0	0	0	0
MT-warmte (+verliezen)	22	22	19	16
LT-warmte	0	0	0	0

*) Dit is exclusief 1 PJ zonnewarmte en het verbruik van 3 PJ biomassa die in 2019 in gebouwen werd verstoekt. De toekomstig verbruik van deze energiedragers is hier buiten beschouwing gelaten.

8 Vergelijking van de vier trajecten

8.1 Inleiding

In voorgaande hoofdstukken zijn vier trajecten geschetst om de gebouwde omgeving in 2050 geheel klimaatneutraal te maken. Elk traject heeft een aantal voordelen en nadelen en moet verschillende hindernissen overwinnen om het doel van klimaatneutraliteit in 2050 te kunnen bereiken. In dit hoofdstuk vergelijken we die trajecten op de volgende kenmerken: uitvoerbaarheid (voor bewoners en gebouw-eigenaren, installateurs, netbeheerders en lokale bestuurders), robuustheid (voor beschikbaarheid van energiedragers, voor afhankelijkheid van importen en voor fluctuaties in de stroomproductie), kosten (voor de samenleving als geheel, voor eindgebruikers) en kostenverdeling, en omvang van de cumulatieve CO₂-emissie in de periode 2020-2050. Een vergelijking op materiaalgebruik, stikstofuitstoot, en geluidoverlast zijn hier niet uitgewerkt wegens gebrek aan data voor onderbouwing.

Tabel 49

Vergelijking van 4 trajecten op relevante gekwantificeerde kenmerken.

Kenmerk	Traject 1 Energie besparen	Traject 2 Warmte- netten	Traject 3 Schone gassen	Traject 4 All- electric
Energiebehoefte in 2050				
Elektriciteit (PJ/jaar)	341	322	319	363
MT warmte (PJ/jaar)	44	130	21	16
LT warmte (PJ/jaar)	1	6	0	0
Groengas of waterstof (PJ/jaar)	60	86	189	0
Totaal op te wekken energiedragers (PJ/jaar)	447	544	529	379
Verwarmingsinstallaties in 2050 in bestaande gebouwen anno 2019				
Elektrische warmtepomp (mln. weq)	6,4	4,2	0,1	9,8
MT-warmtenet-aansluiting (mln. weq)	1,2	3,3	0,3	0,3
LT-warmtenet-aansluiting (mln. weq)	0,2	0,3	0,0	0,0
Hybride warmtepomp (mln. weq)	2,4	2,6	9,7	0,0
Woningen met na-isolatie (miljoen)	5,7	4,2	3,9	5,7
Kosten				
Investerings tot 2050 (miljard € ₂₀₁₈)	183	154	80	200
Nationale kosten jaarlijks (miljard € ₂₀₁₈ /jaar)	10,5	9,0	6,6	11,4
CO ₂ -emissie cumulatief 2020-2050 (Mton)	484	474	489	460

Naast een beschrijving van de verschillen tussen de trajecten voor elk van die kenmerken geven we ook een zeer globale indicatie van de orde van grootte van die verschillen. Dat doen we door elk traject per kenmerk te scoren, in een poging om enig gevoel te krijgen voor de mate waarin de

trajecten onderling verschillen. Waar mogelijk leiden we die scores af⁹² van trajectkenmerken die in de achterliggende analyse zijn gekwantificeerd en die zijn samengevat in Tabel 48.

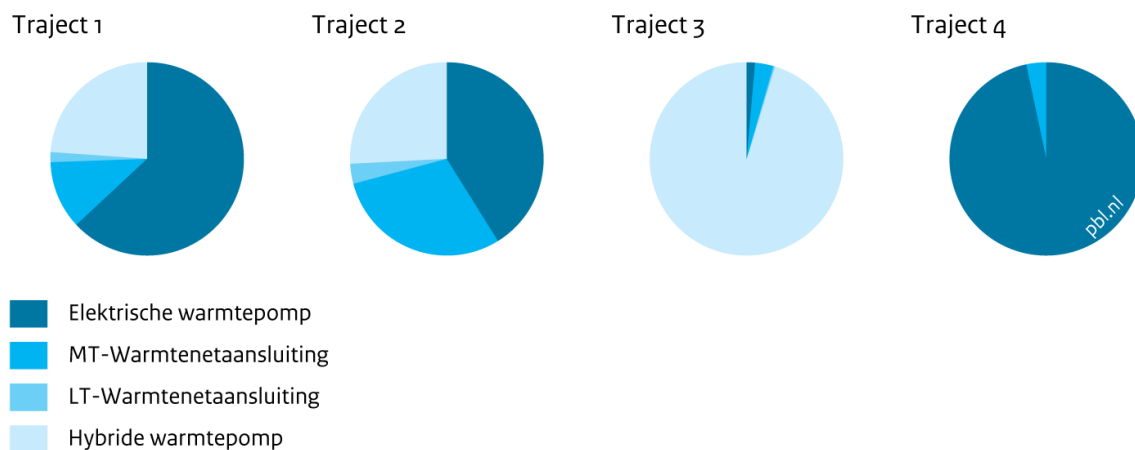
Het doel van de vergelijking van kwantitatieve en kwalitatieve trajectkenmerken is niet om een geobjectiveerde keuze te maken van het beste traject. Dat is onmogelijk omdat het *relatieve* belang van elk onderzocht kenmerk niet objectief kan worden bepaald. Mensen verschillen nu eenmaal in de mate waarin ze bepaalde kenmerken belangrijk vinden. De een vindt bijvoorbeeld onafhankelijkheid van buitenlandse energieproducenten erg belangrijk terwijl een ander meer waarde hecht aan bestuurlijke uitvoerbaarheid. Door de scores per kenmerk onder elkaar te zetten in de laatste tabel van dit hoofdstuk, ontstaat (hopelijk) wel een overzicht van de sterke en zwakke eigenschappen van de vier trajecten. Dat kan behulpzaam zijn bij de verdere discussie over de inrichting van de warmtetransitie in verschillende delen van het land.

8.2 Uitvoerbaarheid

8.2.1 Uitvoerbaarheid voor bewoners

De vier trajecten verschillen onderling in aantallen en typen maatregelen die bewoners gaan nemen om klimaatneutraal te kunnen verwarmen, zie onderstaande tabel. Een traject is makkelijker uitvoerbaar, in praktische zin, en vraagt minder inspanning van bewoners, naarmate minder maatregelen nodig zijn en naarmate de maatregelen minder ingrijpen in de huidige praktijk.

Figuur 38
Verdeling van type verwarmingsinstallaties in 4 trajecten



Bron: PBL

Per traject is een score van de te leveren inspanning door bewoners gemaakt door de benodigde maatregelen te wegen met gewichten uit de laatste kolom van onderstaande tabel. Die gewichten geven (bij gebrek aan empirische data) een grove indicatie van de inspanningen die bewoners

⁹² De methodiek in dit hoofdstuk is intercollegiaal getoetst bij de 7 leden van het onderzoeksteam gebouwde omgeving van PBL.

moeten leveren om een bepaald type maatregel te nemen. We veronderstellen hier dat na-isolatie tot schillabel B bewoners twee keer zoveel inspanning vergt dan na-isolatie tot schillabel D. Na-isoleren van een bestaande woning stuit vaak op allerlei praktische bezwaren. Individuele woningeigenaren moeten hun weg vinden in de grote hoeveelheid informatie die op internet te vinden is of een adviseur in de arm nemen. Het is moeilijk om een (goede) aannemer te vinden en te ontdekken wat een redelijke prijs is. Verder is het onduidelijk hoeveel daadwerkelijk bespaard kan worden op de energierekening. Het is makkelijker om het isoleren nog even uit te stellen, zolang er geen duidelijke aanleiding voor is, zoals een noodzakelijke renovatie of een verhuizing. Er zijn veel andere zaken in het leven die meer aandacht vragen dan het na-isoleren van de eigen woning. Dat geldt in mindere mate voor commerciële en sociale verhuurders die hun woningen op een zakelijkere manier beheren. Zij hebben echter wel instemming nodig van hun huurders en zullen zo dus ook met praktische bezwaren worden geconfronteerd.

Tabel 50

Aantal te nemen maatregelen voor realisatie van klimaatneutrale verwarming van de bestaande bouwvoorraad, in miljoen woningequivalenten, en score voor de benodigde inspanning van bewoners bij uitvoering van alle maatregelen in een traject.

Type maatregel	Traject 1 Energie besparen (mln weq)	Traject 2 Warmte- netten (mln weq)	Traject 3 Schone gassen (mln weq)	Traject 4 All-electric (mln weq)	Inspan- ning be- woners (gewicht)
Na-isolatie woningen niet nodig	2,09	3,53	3,91	2,09	0
Na-isoleren woningen tot label D	0	3,86	3,86	0	1
Na-isoleren woningen tot label B	5,68	0,38	0	5,68	2
Na-isoleren utiliteitsgebouwen a)	2,4	2,4	2,4	2,4	0
Elektrische warmtepompen	6,4	4,2	0,1	9,8	3
MT-Warmtenetaansluitingen	1,2	3,0	0,3	0,3	2
LT-Warmtenetaansluitingen	0,2	0,3	0	0	2
Hybride warmtepompen	2,4	2,6	9,7	0	1
Score inspanning bewoners^{b)}	36	26	15	41	nvt

a) Na-isolatie tot schillabel B, exclusief 0,7 miljoen weq (vnl. industriële bedrijfsgebouwen zonder koeling) die niet zijn meegenomen in de Startanalyse 2020.

b) Score is per traject berekend door het aantal weq te vermenigvuldigen met het gewicht voor inspanning van elk type maatregel (zie laatste kolom) en te sommeren over alle maatregelen.

Iets soortgelijks geldt voor het vervangen van de vertrouwde cv-ketel door een ander type verwarmingsinstallatie. Overstappen op een hybride warmtepomp lijkt betrekkelijk eenvoudig, behalve in woningen die geen plaats hebben voor de (buitenunit van de) warmtepomp. Overstappen naar een aansluiting op een warmtenet kan betekenen dat binnenshuis extra leidingen moeten worden aangebracht (afhankelijk van de huidige locatie van de cv-ketel). In alle gevallen betekent het buitenshuis dat de tuin, de oprit en de straat voor enige tijd moeten worden open gegraven. Overstappen op een elektrische warmtepomp is binnenshuis nog ingrijpender dan de andere opties. Er moet niet alleen plaats zijn voor een (grotere) warmtepomp met voorraadvat (binnen) en een buitenunit maar vaak moeten ook de radiatoren worden aangepast. Meestal is ook extra na-isolatie nodig

maar dat wordt in de scores meegenomen bij de isolatiemaatregelen. Op grond van deze overwegingen krijgt installatie van een hybride warmtepomp gewicht 1, warmtenetten gewicht 2 en de elektrische warmtepomp gewicht 3.

Met deze gewichten blijkt dat traject 3 de minste inspanning van bewoners vraagt, gevolgd door traject 2. De score van traject 3 is duidelijk lager dan van de andere trajecten en met andere gewichten blijft dat zo.

8.2.2 Uitvoerbaarheid voor bouwvakkers en installateurs

Bouwvakkers en installateurs kunnen in beginsel elke maatregel uitvoeren, maar sommige maatregelen zijn ingewikkelder dan andere en kosten meer tijd en menskracht. De huidige schaarste op de arbeidsmarkt voor de bouwsector zou over zijn hoogtepunt heen kunnen zijn, zie paragraaf 3.4. Het EIB ziet “eerste voorzichtige aanwijzingen dat de spanning op de bouwmarkt zijn hoogtepunt heeft bereikt”. Het signaleert echter ook dat “inspanningen nodig (blijven) om de aantrekkingskracht van de bouw op de arbeidsmarkt te behouden en te versterken”. Bij die vooruitzichten zijn trajecten waar minder vaklieden voor nodig zijn in het voordeel.

Per type maatregel zal de arbeidsbehoefte in de praktijk sterk verschillen tussen type gebouwen, bouwjaren en isolatieniveaus. We kennen echter geen studies die die arbeidsbehoefte systematisch in kaart hebben gebracht. Met behulp van aannames (zie Tabel 50) kan wel een globale schatting worden gemaakt van de *relatieve* verschillen in arbeidsbehoefte in de gebouwen tussen de trajecten. Als referentie is het vervangen van een cv-ketel door een hybride warmtepomp gekozen, waar per woning 1 arbeidseenheid voor nodig is.

Tabel 51

Indicatie van relatieve arbeidsbehoefte van maatregelen in bestaande gebouwen.

Type maatregel	arbeid per gebouw (index)
Na-isoleren woningen naar schillabel D	2
Na-isoleren woningen naar schillabel B	4
Na-isoleren utiliteitsgebouwen naar schillabel B	3
Elektrische warmtepomp + LT-afgiftesysteem + elektrisch koken	2
MT-Warmtenetaansluiting: afleverset + leidingwerk	2
LT-Warmtenetaansluiting: afleverset + leidingwerk	2
Hybride warmtepomp	1

Met de indexen uit bovenstaande tabel kan een grove schatting worden gemaakt van de relatieve arbeidsbehoefte in gebouwen voor realisatie van de vier trajecten, zie onderstaande tabel. De arbeidsbehoefte buiten gebouwen wordt geschat in de volgende paragraaf. Onderstaande tabel laat zien dat de arbeidsbehoefte *in gebouwen* veruit het laagst is in traject 3. Dat blijft zo als het verschil in arbeidsbehoefte per type maatregel groter is dan de indexen nu laten zien.

De uitvoerbaarheid van het aanbrengen van verwarmingsinstallaties wordt ook beïnvloed door de fysieke ruimte die elk installatietype nodig heeft. Bij warmtepompen is altijd een buitenunit nodig maar niet elke woning heeft daarvoor geschikte ruimte. Met name bij appartementen kan het lastig zijn individuele buitenunits te plaatsen; daar zijn collectieve warmtepompen op het dak of naast het complex mogelijk een oplossing. Bij hybride warmtepompen is ruimte nodig naast de cv-ketel.

Een elektrische warmtepomp kan de plek van de cv-ketel innemen maar daarnaast is ook ruimte nodig voor een voorraadvat. Dat betekent dat traject 3 en 4 vergelijkbare ruimteproblemen binnenshuis zullen tegenkomen. Omdat trajecten 1 en 2 meer warmtenetaansluitingen hebben, zal daar inpandig ruimtegebrek minder vaak voorkomen.

Tabel 52

Scores voor relatieve arbeidsbehoefte voor maatregelen in gebouwen en indicatie van de inpandige ruimtebehoefte in de vier trajecten.

Type maatregel	Traject 1 Energie besparen	Traject 2 Warmte- netten	Traject 3 Schone gassen	Traject 4 All-electric
Arbeidsbehoefte na-isolatie (score)	30	16	15	30
Arbeidsbehoefte installaties (score)	18	18	11	20
Arbeidsbehoefte totaal (score)	48	34	26	50
Inpandige ruimtebehoefte	xxxx	xxx	xxxxx	xxxxx

a) xxxxx = zeer hoge, x= zeer lage inpandige ruimtebehoefte

8.2.3 Uitvoerbaarheid voor netwerkbedrijven

Elk traject stelt verschillende eisen aan de ontwikkeling van energienetwerken.

Het **elektriciteitsnetwerk** zal uiteindelijk overal verzaamd moeten worden. Dat komt door de verwachting dat netverzwaring sowieso nodig zal zijn om de verwachte ontwikkelingen in het opladen van elektrische voertuigen en installeren van PV-panelen op daken van gebouwen mogelijk te maken. Door toepassing van warmtepompen in de gebouwde omgeving zal het stroomnet ook zwaarder belast worden dan nu. In delen van het land hebben bestaande laagspanningsnetten voldoende ruimte om warmtepompen te kunnen aansluiten. In de Startanalyse is berekend in welke buurten netverzwaring nodig is om warmtepompen te kunnen gebruiken. Dat blijkt in alle vier de trajecten nodig, voor de hybride warmtepompen, maar vaker naarmate meer elektrische warmtepompen worden ingezet.

Het **aardgasnet** kan in het traject met schone gassen in stand blijven. Bij de keuze voor groengas zijn voorzieningen nodig om het invoeden uit regionaal productie-units op het lage- of middendrukgasnet mogelijk te maken. Bij een keuze voor waterstof zullen bestaande gebouwaansluitingen fasegewijs moeten worden omgezet. In buurten die all-electric of met warmtenetten worden verwarmd heeft het aardgasnet geen functie meer en zal het moeten worden verwijderd. In het traject dat de potenties van **warmtenetten** maximaal benut, zullen nieuwe transport- en distributieleidingen moeten worden aangelegd. In het traject Energie besparen is ook ruimte voor uitbreiding van warmtenetten.

We veronderstellen dat de raming van de benodigde investeringen uit de Startanalyse een indicatie geeft van de hoeveelheid werk die in de vier trajecten verzet moet worden om de energienetwerken op orde te brengen. Daarbij moet wel worden bedacht dat investeringen niet alleen betrekking hebben op de inzet van arbeid maar ook op de aanschaf van apparatuur en materiaal. Het aanleggen van warmtenetten vergt relatief veel materiaal, wat maakt dat het aandeel arbeidskosten in de totale investeringen waarschijnlijk lager is dan in de andere trajecten. Daarmee zouden de investeringen mogelijk een overschatting geven van de benodigde inspanningen voor traject 2. Daar staat tegenover, dat het open graven van straten en aanleggen van warmtetransport- en -distributieleidingen veel werk met zich meebrengt; vermoedelijk duidelijk meer dan het realiseren van de trajecten 1 en 4. Aanpassing van de energienetwerken is het minst ingrijpend in traject 3 bij toepassing

van groengas. Dat is ook het geval als het gasnet geschikt gemaakt moet worden voor waterstof. Dat vergt een investering van bijna 5 miljard euro maar nog steeds beduidend minder dan in de andere trajecten. Ook zonder die aanpassing (en kostenpost) is realisatie van netwerken veruit het eenvoudigst in traject 3. Traject 1 en 4 nemen een middenpositie in.

Tabel 53

Investerings in de benodigde aanpassing van energienetwerken in de vier trajecten, als indicator voor uitvoerbaarheid van netwerkenaanpassingen.

Type energienetwerk	Traject 1 Energie besparen (miljard €)	Traject 2 Warmte- netten (miljard €)	Traject 3 Schone gassen (miljard €)	Traject 4 All-electric (miljard €)
Stroomnet verzwaren	6	4	3	9
Gasnet verwijderen	12	10	0	17
Gasnet aanpassen voor groengas	0	0	0	0
Gasnet aanpassen voor waterstof	0	0	5	0
Warmtenet transportleiding	1	3	0	0
Warmtenet distributie	6	23	1	0
Totaal	24	40	9	26

8.2.4 Complexiteit van lokale besluitvormingsprocessen

In het Klimaatakkoord (SER, 2019) hebben gemeenten een grote rol gekregen in de planvorming en uitvoering van de warmtetransitie. Omdat de warmtetransitie ingrijpende gevolgen gaat hebben voor vrijwel alle burgers, vond men het belangrijk om burgers goed te betrekken bij de keuzes die lokaal gemaakt gaan worden over de manier waarop gebouwen klimaatneutraal gemaakt gaan worden en in welk tempo dat gaat gebeuren. Bij een goede legitimatie van die keuzes past democratische besluitvorming op gemeentelijk niveau, zo was de gedachte.

De meeste gemeenten hadden in 2019 nog onvoldoende menskracht, geld en expertise om die rol goed te kunnen vervullen. Voor het maken van transitievisies warmte (TVW's) hebben veel gemeenten adviesbureaus ingeschakeld en tijdelijke medewerkers ingehuurd. Het maken van TVW's heeft in veel gemeenten een stevige impuls gegeven aan het denken over de warmtetransitie maar de ambtelijke ondersteuning is er meestal niet structureel gemaakt. De ROB becijferde dat gemeenten voor hun nieuwe taken 1,8 miljard euro nodig hebben in de periode 2022-2024 (ROB, 2021). Het rijk heeft inmiddels de tijdelijke regeling Capaciteit decentrale overheden voor klimaat- en energiebeleid (CDOKE) gepubliceerd en voor drie jaar ongeveer 1 miljard euro beschikbaar gesteld (Rijksoverheid, 2023). Die regeling wordt vervangen door een wet, waardoor gemeenten meer zekerheid krijgen en nieuwe medewerkers gemakkelijker vaste contracten kunnen aanbieden en het ROB-advies wordt in 2024 herijkt (Minister De Jonge, 2023).

De vier trajecten verschillen in complexiteit, in het aantal en type betrokken partijen en in het soort besluiten dat lokaal genomen moet worden. Die besluiten gaan over de techniekkeuze, maar die zal mede afhankelijk zijn van tal van andere keuzes, bijvoorbeeld over kosten en kostenverdeling, over timing, over ruimtegebruik, et cetera.

Aanleg warmtenetten complexer dan andere opties

Besluitvorming over aansluiten van bestaande gebouwen op warmtenetten is aanmerkelijk complexer dan besluiten over de andere klimaatneutrale opties. Dat komt vooral doordat er veel meer partijen bij betrokken zijn die één gezamenlijk plan moeten maken: gebouweigenaren (particulieren, corporaties, diensten), warmteleveranciers, investeerders, exploitanten. Omdat warmtenetten alleen financieel haalbaar zijn in dichtbevolkte gebieden, is het aantal gebouweigenaren en potentiële warmteleveranciers per plangebied ook groter. Dat maakt het lastiger om overeenstemming te bereiken. Bewoners die op korte termijn hun huis willen verduurzamen met een warmtetaansluiting, moeten wachten totdat het hele project is uitgevoerd.

Verder krijgen gemeenten een nieuwe rol in de aanleg en het beheer van warmtenetten als de nieuwe warmtewet van kracht wordt, die voorschrijft dat nieuwe warmtenetten publiek eigendom moeten worden. Tot nu toe waren warmtenetten het private eigendom van warmteproducenten, die tevens de exploitatie ervan verzorgden. Door de voorgenomen wetswijziging dreigen die zich terug te trekken als (beoogd) investeerder in nieuwe warmtenetten. Dat betekent dat gemeenten op zoek moeten naar nieuwe investeerders en andere partijen die nieuwe warmtenetten willen gaan exploiteren. Dat maakt besluitvorming over warmtenetten – in ieder geval de komende jaren – aanmerkelijk complexer en zorgt waarschijnlijk ook voor vertraging in het uitroltempo.

In het Schone gassen-traject zit de complexiteit van de besluitvorming vooral op het bovengemeentelijk niveau. Daar is afstemming nodig over de toegang van gebieden tot leveranciers van schone gassen middels het in stand houden (en zo nodig aanpassen) van het bestaande gasnetwerk. Daar liggen de belangen van gebouweigenaren vermoedelijk dicht bij elkaar en is minder inspanning nodig om tot een standpuntbepaling te komen. Hier ligt de grootste uitdaging vermoedelijk bij de gasleveranciers, die op tijd voldoende groengas of waterstof moeten kunnen leveren, en bij de netwerkbedrijven die op tijd voor de omschakeling moeten zorgen. Bij de keuze voor waterstof zal dat laatste de nodige coördinatie vereisen omdat per netvak alle aansluitingen tegelijk moeten worden omgezet van aardgas naar waterstof.

Als schone gassen geen optie blijkt te zijn en warmtenetten erg duur worden, dan is elektrisch verwarmen de enige optie en kan elke gebouweigenaar in beginsel zelf bepalen hoe en in welk tempo hij zijn gebouw daarop aanpast. Vanuit de gemeente (in overleg met de gasleverancier of gasnetbeheerder) kan een termijn worden aangekondigd waarop de gasleverantie wordt beëindigd. Dat wordt dan een harde randvoorwaarde voor de individuele besluitvorming van gebouweigenaren maar is geen belemmering om al eerder het aardgasverbruik te beëindigen. Mogelijk gaat de stroomnetbeheerder beperkingen instellen voor het aantal warmtepompen dat in een netvak kan worden geïnstalleerd tot het moment waarop daar netverzwaring is aangebracht.

Al met al zal de besluitvorming in het traject met veel warmtenetten het moeilijkst zijn (hoogste gewicht) en de besluitvorming in de trajecten met schone gassen en all-electric het minst ingewikkeld (maar daarmee allermindst eenvoudig). In het traject Energie Besparen is ruimte voor een beperkter uitbreiding van warmtenetten. Daardoor is de complexiteit van de besluitvorming in dat traject iets hoger gescoord dan in de andere twee trajecten.

Tabel 54

Aantal aansluitingen van bestaande gebouwen per type energienetwerk in 2050 (in miljoen woningequivalenten) en indicatie van de relatieve complexiteit van lokale besluitvorming in vier trajecten.

Type energienetwerk	Eenheid	Traject 1 Energie besparen	Traject 2 Warmte- netten	Traject 3 Schone gassen	Traject 4 All-elec- tric
Elektriciteitsnet (gewicht 1)	mln. weq	6,4	4,2	0,1	9,8
MT-warmtenet (gewicht 3)	mln. weq	1,2	3,0	0,3	0,3
LT-warmtenet (gewicht 4)	mln. weq	0,2	0,3	0,0	0,0
Gas- en stroomnet (gewicht 1)	mln. weq	2,4	2,6	9,7	0,0
Indicatie complexiteit lokale besluitvorming (gewogen)	score	13	17	11	11

8.3 Robuustheid

8.3.1 Beschikbaarheid van energiedragers

Elk traject heeft verschillende hoeveelheden van verschillende soorten energiedragers nodig, zie Tabel 54. De grootste toenames ten opzichte van nu doen zich voor bij warmte (MT en LT) en schone gassen. Zullen die extra hoeveelheden op termijn geleverd kunnen worden?

De toekomstige beschikbaarheid van voldoende warmte is afhankelijk van de hoeveelheid restwarmte die bedrijven op termijn nog kunnen aanbieden (nadat ze hun eigen energieverbruik hebben verduurzaamd) in de buurt van buurten die op een warmtenet willen aansluiten. Waar onvoldoende restwarmte beschikbaar komt, kan overschakelen op geothermie of aquathermie een optie zijn. In delen van het land is de beschikbaarheid van geothermie nog onzeker. Het geplande seismisch onderzoek kan daar meer duidelijkheid in brengen, maar dat geeft nog geen garanties. Er zijn voorlopig nog lokale proefboringen nodig om met zekerheid te kunnen vaststellen of geothermie op die plek een reële optie is.

De toekomstige beschikbaarheid van groengas of waterstof is momenteel ook onzeker. Men denkt nu aan 70 PJ groengas voor de gebouwde omgeving, wat voldoende zou kunnen zijn voor traject 1. Maar bij de verwachte toekomstige schaarste aan biomassa en de grote behoefte aan alternatieve toepassingen (o.a. in de biochemische industrie) wordt toepassing in de gebouwde omgeving minder zeker. Bij waterstof moet de productie (internationaal) nog op gang komen en dringen alle sectoren om voorrang bij de eerste toepassing. De gangbare gedachte is nu, dat de gebouwde omgeving pas aan bod komt als een groot deel van de behoefte van andere sectoren is gedekt. Dat verlaagt de kans op voldoende schone gassen voor de gebouwde omgeving in 2050.

Op grond van deze overwegingen is de kans op voldoende energiedragers het hoogst bij het traject All-electric en het laagst bij Schone gassen. Het traject Warmtenetten neemt een middenpositie in en het Bespaar-traject is iets gunstiger omdat daar minder warmte en schone gassen nodig zijn.

Tabel 55

Behoefte aan energiedragers in vier trajecten in 2050 (in PJ per jaar) en indicatie van de huidige zekerheid over voldoende beschikbaarheid van energiedragers op termijn.

Soort energiedrager	Traject 1 Energie besparen	Traject 2 Warmte- netten	Traject 3 Schone gassen	Traject 4 All-electric
Elektriciteit (PJ/j)	341	322	319	363
MT warmte (PJ/j)	44	130	21	16
LT warmte (PJ/j)	1	6	0	0
Groengas of waterstof (PJ/j)	60	86	189	0
Zekerheid beschikbaarheid	****	***	*	*****

b) ***** = zeer hoge, *= zeer lage zekerheid over beschikbaarheid van energiedragers

8.3.2 Afhankelijkheid van energie-import

Nederland heeft tot nu toe een groot deel van zijn (fossiele) energieverbruik geïmporteerd. Met het sluiten van de Groningse gasvelden is het aandeel import de laatste jaren gestegen. Hoewel de energietransitie aanstuurt op uitbreiding van de binnenlandse productie van hernieuwbare energie, zal het onmogelijk zijn om in ons dichtbevolkte land voldoende ruimte te vinden voor windturbines, zonneparken en geothermiedoubletten om volledig zelfvoorzienend te worden voor klimaatneutrale energie, ook niet als daar één of twee kerncentrales bijkomen. Dat betekent dat Nederland ook in 2050 een deel van zijn energiebehoefte zal importeren (en nauwelijks energie zal exporteren). Door de problemen met Russisch aardgas in 2022 hebben westerse landen ervaren dat het kwetsbaar is om afhankelijk te zijn van een beperkt aantal buitenlandse energieleveranciers. Om zich tegen die kwetsbaarheid te weren, kunnen landen het importvolume beperken en (als dat niet lukt of erg moeilijk is) de importen spreiden over meer landen en importeren uit landen met stabiele(re) regimes.

MT- en LT-warmte worden lokaal geproduceerd en dus niet geïmporteerd. Elektriciteit kan uit omringende landen geïmporteerd worden als de nationale productie (op land en zee) tekort schiet. In twee van de trajecten kan de gebouwde omgeving in de winter een piek in de stroomvraag veroorzaken. Of dat ook tot stroomimport gaat leiden, zal mede afhankelijk zijn van het vraagpatroon in andere sectoren en van de flexibiliteit in de binnenlandse stroomproductie.

Schone gassen kunnen in Nederland geproduceerd worden uit biomassa of groene stroom maar gezien de verwachte beperkte binnenlandse beschikbaarheid van die inputs is het waarschijnlijk dat een aanzienlijk deel van de behoefte geïmporteerd zal moeten worden. Ook hier is de totale Nederlandse importbehoefte mede afhankelijk van de behoefte in andere sectoren.

De mondiale potentie van waterstofproductie is technisch gezien enorm maar de praktijk moet uitwijzen welke landen dat potentieel gaan benutten. In beginsel kan daardoor een ruim aanbod van groene waterstof op gang komen uit een groot aantal landen van uiteenlopende signatuur. Dat verkleint de kans dat exporteurs van waterstof zich verenigen in een kartel, zoals oliestaten dat deden, en daarmee de export als internationaal drukmiddel gaan gebruiken. Dat betekent dat de nadelen van waterstofimport mogelijk kleiner worden dan de nadelen van olie-import maar er zijn geen garanties.

Om de vier trajecten te kunnen vergelijken op hun afhankelijkheid van energie-import, zou hun energiebehoefte geanalyseerd moeten worden in hun interactie met het nationale energiesysteem.

In afwachting van die analyse is een indicatie van de afhankelijkheid van importen afgeleid van de behoefte aan importeerbare energiedragers, zie Tabel 55. Bij een grotere nationale behoefte is de kans immers groter dat een deel daarvan uit import moet komen. Van de vier trajecten leidt het Schone gassen-traject tot de grootste afhankelijkheid van energie-import en het All-electric-traject tot de kleinste afhankelijkheid. Omdat de andere trajecten een deel van de energiebehoefte dekken uit schone gassen, is de afhankelijkheid van importen daar groter dan in het all-electric-traject.

Tabel 56

Behoefte in 2050 aan energiedragers die geïmporteerd kunnen worden (in PJ per jaar) en score voor de mogelijke afhankelijkheid van importen.

Importeerbare energiedrager	Traject 1 Energie besparen	Traject 2 Warmte- netten	Traject 3 Schone gassen	Traject 4 All-electric
Elektriciteit (PJ per jaar)	341	322	319	363
Groengas of waterstof (PJ per jaar)	60	86	189	0
Totaal (PJ per jaar)	401	408	508	363
Indicatie afhankelijkheid import^{a)}	**	**	*****	*

c) ***** = zeer hoge, * = zeer lage afhankelijkheid van import.

8.3.3 Flexibiliteit energiesysteem

De toekomstige klimaatneutrale elektriciteitsproductie wordt in hoge mate afhankelijk van de variabele opbrengst van windturbines en zonneparken. Die variabele productie zal gekoppeld moeten worden aan een energiesysteem dat flexibel genoeg is om met die variabiliteit om te gaan, zodat de geproduceerde elektriciteit optimaal kan worden benut. Die flexibiliteit is gediend met afnemers die flexibel kunnen inspelen op een variabel aanbod, bijvoorbeeld door hun stroomvraag te laten meebewegen op het aanbodpatroon of door in perioden van schaarste te kunnen overstappen op andere energiedragers.

In de gebouwde omgeving bieden alle verwarmingsinstallaties mogelijkheden om de stroomvraag te laten variëren in de tijd, afhankelijk van het stroomaanbod. **Elektrische warmtepompen** kunnen bij stroomtekorten (of hoge stroomprijzen) tijdelijk op lager vermogen draaien of worden uitgeschakeld. Als dat beperkt blijft tot korte perioden (1-2 uur) dan hoeft dat niet te leiden tot slecht verwarmde huizen, zeker niet in huizen die goed geïsoleerd zijn.

Warmtenetten hebben andere mogelijkheden voor flexibiliteit. Hun stroomverbruik is al relatief laag dus flexibiliseren van de vraag draagt weinig bij aan dempen van de piekvraag. Maar warmtenetten kunnen wel bijdragen aan opvangen van stroomoverschotten door warmtebuffers te verwarmen met elektriciteit. Ook het gasverbruik voor piekketels kan flexibel worden afgenomen door tijdelijk extra warmte in het net op te slaan.

Hybride warmtepompen zijn erg flexibel in hun stroomverbruik. Zij zijn bedoeld om de stroomvraag in de koude delen van het stookseizoen te vervangen door een gasvraag, maar kunnen eigenlijk op elk gewenst moment switchen tussen gas en elektriciteit en zo dus flexibel reageren op fluctuaties in de stroomproductie en de warmtebehoefte.

Tabel 57

Aantal aansluitingen per type verwarmingsinstallatie voor vier trajecten (in miljoen weq's in 2050) en score van trajecten op de mogelijke bijdrage aan flexibiliteit van het nationale energiesysteem.

Type verwarmingsinstallatie	Traject 1 Energie besparen	Traject 2 Warmte- netten	Traject 3 Schone gassen	Traject 4 All-electric
Elektrische warmtepomp (mln. weq)	6,4	4,2	0,1	9,8
MT warmtenet + hulpketels (mln. weq)	1,2	3,0	0,3	0,3
LT warmtenet + hulpketels (mln. weq)	0,2	0,3	0	0
Hybride warmtepomp (mln. weq)	2,4	2,6	9,7	0
Score flexibiliteit ^{a)}	16	19	30	11

a) De indicator is berekend met de volgende gewichten voor installaties: elektrische warmtepomp 1, warmtenetaansluitingen 2 en hybride warmtepomp 3. De score is per traject berekend door het aantal aansluitingen per type installatie te vermenigvuldigen met het gewicht per type en vervolgens te sommeren over alle typen aansluitingen.

8.4 Kosten van maatregelen

Bij de vergelijking van de transitiekosten van de vier trajecten kijken we alleen naar de kosten om de *bestaande* bouw te laten overschakelen van aardgas naar klimaatneutrale energiedragers, in combinatie met bijbehorende typen verwarmingsinstallaties en niveaus van na-isolatie. We maken onderscheid tussen nationale kosten (voor de samenleving als geheel) en private kosten waarin belastingen, heffingen en subsidies zijn verrekend (zoals die in 2021 van kracht waren).

8.4.1 Nationale kosten

Het begrip 'nationale kosten' is een abstract begrip dat de meeste mensen weinig zegt omdat het sterk afwijkt van het kostenbegrip dat in het dagelijks leven wordt gehanteerd. Het begrip geeft aan hoeveel iets de samenleving als geheel kost, los van welke partijen in de samenleving welk deel van die kosten voor hun rekening nemen. Verlagen van de *totale* kosten van een project leidt meestal tot een slechter resultaat, maar verandering van de *kostenverdeling* is vrijwel altijd mogelijk zonder het resultaat te schaden. Dat pleit ervoor om de selectie van verschillende werkzaamheden met een identiek einddoel (trajecten in dit geval) te baseren op de laagste totale kosten en vervolgens te besluiten op welke manier de totale kosten het beste verdeeld kunnen worden onder alle betrokkenen.

Uit berekeningen voor de Startanalyse aardgasvrije buurten (PBL, 2020w) is afgeleid dat het traject Schone gassen tegen de laagste nationale kosten kan worden doorlopen (jaarlijks 6,6 miljard euro) en het traject All-electric de hoogste nationale kosten veroorzaakt (jaarlijks 11,4 miljard euro). De verschillen worden vooral veroorzaakt door de kapitaalslasten, die voortkomen uit investeringen in energie-infrastructuur, na-isolatie van gebouwen en verwarmingsinstallaties, zie onderstaande tabel. De jaarlijkse variabele kosten, zoals inkoop van energiedragers en onderhoud en beheer van gebouwen en netwerken, zijn veel kleiner en de verschillen tussen trajecten zijn ook minder groot.

Als traject 3 wordt uitgevoerd met waterstof in plaats van groengas, dan stijgen de jaarlijkse kosten met 2,2 miljard euro per jaar en daalt het kostenverschil met de andere trajecten fors. Voor toepassing van waterstof zijn extra investeringen nodig in de gasdistributienetten (0,2 mld./jaar) en in leidingwerk plus nieuwe gasmeters binnen gebouwen (0,9 mld./jaar). Daarnaast zijn de verwachte

productiekosten van waterstof hoger dan van groengas (0,7 mld./jaar) en is meer geld nodig voor bedrijfsvoering en onderhoud in gebouwen (0,3 mln./jaar) en gasnetwerken (0,1 mld./jaar).

Tabel 58

Raming van jaarlijkse nationale kosten van vier trajecten naar klimaatneutraal verwarmen van bestaande gebouwen, in miljard euro per jaar. Bron: Startanalyse 2020.

Kostenposten	Traject 1 Energie besparen (mld. €/j)	Traject 2 Warmte- netten (mld. €/j)	Traject 3 Schone gassen (mld. €/j)	Traject 4 All-electric (mld. €/j)
Elektriciteitsnet verzwaren	0,2	0,2	0,1	0,4
Gasnet verwijderen	0,5	0,4	0,0	0,6
Warmtenet aanleg	0,4	1,5	0,1	0,0
Gebouw-schil na-isoleren	5,6	3,6	2,6	5,6
Gebouw-installaties vervangen	4,0	3,2	2,1	5,5
subtotaal jaarlijkse kapitaalslasten	10,6	8,8	4,9	12,1
Besparing inkoop aardgas	-4,2	-4,2	-4,2	-4,2
Inkoop warmte	0,1	0,3	0,1	0,1
Inkoop groengas	1,4	1,7	3,3	0,1
Inkoop elektriciteit	2,7	2,2	2,2	3,6
B&O in gebouwen	0,1	-0,1	0,4	0,2
B&O warmtenetten	0,2	0,6	0,0	0,0
B&O elektriciteits- en gasnetten	-0,3	-0,2	0,0	-0,4
subtotaal jaarlijkse variabele kosten	-0,1	0,2	1,8	-0,7
Totaal jaarlijkse nationale kosten	10,5	9,0	6,6	11,4
verschil met laagste nationale kosten	3,9	2,4	0,0	4,8
Extra kosten waterstof ipv groengas			+2,2	

8.4.2 Gevoeligheidsanalyse van kostenramingen

De selectie van verwarmingssystemen in de trajecten is gebaseerd op minimalisering (op buurniveau) van de geraamde nationale kosten in 2030. Andere kostenkentalen zouden tot een andere verdeling van systemen kunnen leiden. Om het effect daarvan te onderzoeken zijn enkele beperkte gevoeligheidsanalyses uitgevoerd.

Gevoeligheidsanalyse op buurniveau

In de Startanalyse aardgasvrije buurten (PBL, 2020w) worden de nationale kosten van 5 strategieën voor elke buurt berekend bij een bandbreedte voor kosten van installaties van plus en min 20 procent en bij een bandbreedte voor de kosten van energiedragers, zie Tabel 64 in de Bijlage. De resultaten daarvan zijn op de website van de Startanalyse grafisch weergegeven in grafieken per buurt maar niet integraal statistisch geanalyseerd. Een visuele inspectie van die grafieken leerde dat het algemene beeld niet werd verstoord door het rekenen met bandbreedtes: in veel buurten behield de groengas-strategie de laagste nationale kosten, gevolgd door de waterstof-strategie. MT-warmtenetten bleven in het buitengebied de duurste strategie en in hoog-stedelijk gebied vaak goedkoper dan de all-electric-strategie.

Gevoeligheidsanalyse op nationaal niveau bij schillabel B

In de bijlage van dit rapport is een beknopte gevoeligheidsanalyse beschreven op nationaal niveau voor verwarmingssystemen met schillabel B. Daar is gekeken naar de invloed van hogere of lagere energiekosten en investeringskosten op de (netto) jaarlijkse nationale kosten van trajecten.

Uit die analyse blijkt dat energiekosten aan de onderkant of bovenkant van de verwachte bandbreedte niets veranderen aan de conclusie dat verwarmen met groengas de optie is met de laagste nationale kosten. Dat zelfde geldt als de investeringskosten met 20% worden verlaagd of met 50% worden verhoogd en bij combinaties van lage investeringskosten met hoge energiekosten en omgekeerd. Het kostenvoordeel van groengas (bij schillabel B) verdwijnt pas als groengas duurder wordt dan 137 cent/m³, ofwel 65% meer dan het geraamde hoge kostenniveau.

Invloed van hogere kosten van groengas

Gezien de onzekerheden over toekomstige nationale kosten van groengas en waterstof, rijst de vraag hoe gevoelig de kostenverschillen tussen de trajecten zijn voor hogere kosten van schone gassen. Uit bovenstaande tabel is af te lezen dat traject 3 jaarlijks 4,8 miljard euro goedkoper is dan traject 4. Het kostenverschil tussen beide trajecten verdwijnt als de jaarlijkse kosten van groengas stijgen van 3,3 miljard naar 8,1 miljard euro, ofwel met 150 procent ($= 4,8 / (3,2 - 0,1)$).

Ten opzichte van traject 2 zou een kostenverschil van 2,4 miljard euro overbrugd moeten worden. Traject 3 gebruikt voor 3,3 miljard euro aan groengas en traject 2 voor 1,7 miljard. Ook hier moeten de kosten van groengas met 150 procent stijgen, om het kostenverschil tussen beide trajecten te overbruggen ($2,4 / (3,3 - 1,7) = 150\%$). Traject 3 wordt pas duurder dan traject 1 als de kosten van groengas met ruim 205 procent stijgen⁹³. Dit alles impliceert dat traject 3 de laagste nationale kosten houdt bij een grote range aan kosten van groengas.

De nationale kosten van groengas zijn hier afgeleid van de verwachte productiekosten in 2030, zie bijlage 1. Als de nationale behoefte aan groengas structureel hoger is dan de productiecapaciteit en als import onmogelijk of beperkt is, dan kunnen de nationale kosten van groengas hoger worden dan de productiekosten. In die situatie daalt kostenvoordeel van een groengas-strategie. Uit bovenstaande berekening blijkt dat trajecten 1, 2 en 4 duurder blijven totdat de groengaskosten stijgen van 67 cent/m³ tot boven de 167 cent/m³. Dat betekent dat het kostenvoordeel van traject 3 ten opzichte van de andere trajecten tamelijk robuust is.

8.4.3 Private kosten en hun verdeling

Als bewoners via de inspraakprocedures van gemeenten een belangrijke stem krijgen in de invulling van de warmtetransitie in hun buurt, dan zullen de te verwachten eindgebruikerskosten vermoedelijk een belangrijke rol spelen bij de selectie van opties. De huidige regelingen voor belastingen, heffingen en subsidies beïnvloeden de manier waarop de nationale transitiekosten worden verdeeld over burgers, bedrijven en de overheid. Er zijn geen studies bekend die deze kostenverdeling van de vier trajecten in kaart hebben gebracht. We kunnen wel een grove indicatie van de te verwachten gemiddelde transitiekosten voor woningeigenaren afleiden uit een studie naar eindgebruikerskosten van de strategievarianten uit de Startanalyse (TNO, 2021d). Maar dat laten we hier achterwege omdat gemiddelde eindgebruikerskosten conform de regelingen uit 2020 eigenlijk niet zo relevant zijn voor een beoordeling van de (toekomstige) trajecten. Dat komt, zoals hier boven al

⁹³ Voor waterstof gelden iets andere bedragen.

is betoogd, doordat de totale nationale kosten van elk traject op uiteenlopende manieren zijn te verdelen over partijen in de samenleving. De besluitvorming daarover kan in beginsel worden losgekoppeld van de trajectkeuze. Daarom is de kostenverdeling geen onderscheidend kenmerk van de trajecten.

In de praktijk heeft de overheid (nog) weinig oog voor de verdelingseffecten van klimaatbeleid, zoals de WRR onlangs opmerkte (WRR, 2023), en bouwt men meestal voort op bestaande regelingen. Zo kan het gebeuren dat de aanleg van ons gasnet en elektriciteitsnet destijds door de rijksoverheid is betaald terwijl de aanleg van warmtenetten tot nu toe door private partijen is bekostigd. De investeringen in lokale uitbreiding van gas- en stroomnetten worden omgeslagen in de nettarieven van álle klanten terwijl de uitbreiding van warmtenetten wordt doorberekend aan alleen de klanten van de uitbreiding. Deze verschillen worden nu gedeeltelijk weggenomen door de nieuwe subsidie-regeling voor investeringen in warmtenetten (RVO, 2023wis).

8.5 Ruimtegebruik buiten gebouwen

De vier trajecten verschillen van elkaar in de hoeveelheid fysieke ruimte buiten de gebouwen die nodig is om alle bijbehorende maatregelen te kunnen nemen. Het gaat daarbij om ruimte voor aanpassingen van de energienetwerken (met kabels, leidingen en schakel- en koppelstations) en om ruimte voor de opwekking van de benodigde energiedragers, in binnen- en buitenland.

Het ruimtegebruik voor energienetwerken is vermoedelijk het grootst bij traject 2 met veel Warmtenetten. Daar is bovengronds ruimte nodig voor uitkoppelstations van restwarmte (meestal op industrieterreinen) en voor de aanleg van geothermiedoubletten bij sommige warmtenetten (meestal in het buitengebied). In de ondergrond is veel ruimte nodig voor de warmtenetten. Met name in oude binnensteden kan het lastig zijn om tussen alle riolering, bestaande afgedankte en nog in gebruik zijnde kabels en leidingen ruimte vrij te maken voor een warmtebuis.

Bij verzwaring van stroomnetten zijn grotere transformatorhuisjes nodig (meestal in bebouwd gebied). Maar omdat netverzwaring in alle trajecten nodig is, discrimineert dit kenmerk niet tussen trajecten. Omdat het bestaande aardgasnet kan worden gebruikt in traject 3, met hier en daar beperkte aanpassingen, zal het directe ruimtebeslag van dat traject vermoedelijk nihil zijn.

Het ruimtegebruik voor energieopwekking voor de trajecten houdt verband met het type energiedragers dat er wordt gebruikt. Voor de productie van hernieuwbare elektriciteit met windparken en zonneweides is veel ruimte nodig. Dat geldt in sterkere mate voor de productie van groene waterstof voor traject 3. Bij geïmporteerde waterstof vindt dat ruimtegebruik in het buitenland plaats, wellicht in gebieden die minder dicht bevolkt zijn. Bij nationale productie van groene of blauwe waterstof is ruimte voor fabriekslocaties nodig. Als traject 3 met groengas wordt uitgevoerd, dat geproduceerd wordt uit plantaardige reststromen, dan is het ruimtegebruik voor energieproductie relatief beperkt. Dan is vooral ruimte nodig voor de productie van groengas en de invoeding op het gasnet. Voor productie van restwarmte ten behoeve van traject 1 en 2 is ook weinig ruimte nodig.

Tabel 59

Indicatie van het ruimtegebruik voor energienetwerken en energie-opwek in de vier trajecten.

	Traject 1 Energie besparen	Traject 2 Warmte- netten	Traject 3 Schone gassen	Traject 4 All-elec- tric
Ruimtegebruik voor netwerken ^{a)}	**	***	*	*
Ruimtegebruik voor energie-opwek ^{b)}	oo	oo	o/ooooo	ooo

b) *** = veel, *= weinig extra fysieke ruimte nodig voor nieuwe netwerken.

c) ooooo = veel, o = weinig extra fysieke ruimte nodig ten opzichte van huidige situatie.

8.6 Tempo van CO₂-reductie tot 2050

Elk traject is zodanig ingericht dat de CO₂-uitstoot van de gebouwde omgeving uiterlijk in 2050 tot nul is gereduceerd. De bijdrage aan beperking van klimaatverandering wordt niet alleen bepaald door het bereiken van nul-emissies, maar meer nog door verlaging van de cumulatieve emissies tussen nu en het moment dat de uitstoot tot nul is teruggebracht. Trajecten die de uitstoot op korte termijn al gedeeltelijk kunnen verlagen veroorzaken mogelijk minder cumulatieve emissies dan trajecten waarin emissiereductie pas later op gang komt.

Het tempo en de mate van emissiereductie in een traject worden bepaald door het tempo waarmee maatregelen kunnen worden uitgevoerd en het effect van die maatregelen op de CO₂-uitstoot. In voorgaande hoofdstukken is per traject beschreven welke factoren het toepassingstempo van maatregelen beïnvloeden en welk beleid dat zou kunnen versnellen. Vervolgens is per traject geschat in welk tempo de verschillende typen maatregelen in praktijk kunnen worden gebracht, gegeven het doel om daarmee uiterlijk in 2050 klaar te zijn. Met die informatie is per traject berekend in welk tempo het verbruik van aardgas kan afnemen en wat dat betekent voor de cumulatieve CO₂-uitstoot tussen 2020 en 2050. Het resultaat staat in Tabel 59. Daaruit blijkt dat de gebouwde omgeving de komende decennia bij deze vier trajecten nog 460 tot 489 megaton CO₂ gaat uitstoten. Waarschijnlijk is het verschil tussen de trajecten van 14-29 Mton (3-6%) niet significant, gezien de moeilijkheid om het toekomstige toepassingstempo van emissiebeperkende maatregelen goed te voorspellen. De gebruikte veronderstelling dat de omschakeling naar aardgasvrije verwarmingssystemen in 2050 moet zijn voltooid, heeft mogelijk tot overschatting van de te verwachten toepassingstemporen geleid⁹⁴. Daar staat tegenover dat de cumulatieve emissies tot 2050 het sterkst beïnvloed worden door emissiereducties in de eerste jaren en die zijn (in theorie) iets makkelijker te voorspellen dan reducties over 20 jaar.

⁹⁴ Uit ervaring met ex-ante evaluaties van klimaatbeleid (en ander beleid) is bekend dat het erg moeilijk is om goede voorspellingen te maken van het tempo waarin burgers en bedrijven meer beoogde maatregelen gaan toepassen. Vaak wordt dat tempo overschat.

Tabel 6oRaming van de cumulatieve CO₂-uitstoot (in Mton) tussen 2020 en 2050 in vier trajecten.

	Traject 1 Energie besparen	Traject 2 Warmte- netten	Traject 3 Schone gassen	Traject 4 All-electric
Cumulatieve CO₂-uitstoot (Mton)	484	474	489	460

De geraamde cumulatieve uitstoot is het hoogst in traject 3. Dat komt doordat verondersteld is dat de toepassing van hybride warmtepompen pas na 2030 grote aantallen gaat bereiken zodat veel huishoudens nog lang aardgas blijven gebruiken. In andere trajecten worden tot 2030 naast hybride warmtepompen ook al warmtenetten of elektrische warmtepompen toegepast, wat tot 2030 al extra aardgasreductie en dus emissiereductie oplevert die cumulatief sterk doorwerkt. Mogelijk is dat effect wat overschat omdat nog geen rekening is gehouden met de vertraging die kunnen gaan optreedt door aanpassingen in de Warmtewet en met mogelijke tegenvallers bij het versnellen van vergaande na-isolatie. Voor de toepassing van hybride warmtepompen zijn minder obstakels en meer stimulansen. Dat maakt het minder waarschijnlijk dat de uitrol van hybride warmtepompen trager gaat verlopen, en de cumulatieve emissie (dus) hoger wordt, dan in traject 3 is verondersteld. In 2030 verbruiken die hybride warmtepompen in 3 trajecten circa 30 PJ groengas terwijl gewerkt wordt aan bijmengen van 70 PJ groengas in het aardgasnet vanaf 2030. Omdat dat bijmengen niet afhankelijk is van een keuze voor een van deze vier trajecten, is het effect daarvan niet aan de trajecten toegerekend. De inzet van 70 PJ groengas in plaats van 30 PJ vervangt 40 PJ extra aardgas (70-30) en bespaart in 2030 jaarlijks ongeveer 2,3 Mton CO₂-uitstoot en tot 2050 cumulatief circa 24 Mton CO₂.

8.7 Conclusies

8.7.1 Verschillen tussen de trajecten

Uit de vergelijking van de onderzochte vier trajecten naar een klimaatneutrale gebouwde omgeving zijn de volgende conclusies te trekken:

- Het hoofddoel van elk traject is CO₂-reductie, maar er is waarschijnlijk geen significant verschil in de cumulatieve CO₂-reductie die de 4 trajecten tot 2050 gaan realiseren. De berekende verschillen zijn klein (3-6%) en de onzekerheden bij het bepalen van het te verwachten tempo waarin beoogde maatregelen zullen worden uitgevoerd zijn groot.
- Er zijn wel duidelijke verschillen in de nationale kosten van de vier trajecten. Nadat alle benodigde maatregelen zijn genomen om klimaatneutraal te worden, zijn de jaarlijkse nationale kosten van overal overstappen op schone gassen het laagst (6,6 miljard euro) en die van overstappen op volledig elektrisch verwarmen het hoogst (11,4 miljard euro). Die kostenverschillen worden hoofdzakelijk veroorzaakt door verschillen in benodigde investeringen in energienetwerken, apparaten en na-isolatie. De kostenverschillen tussen energiedragers (elektriciteit, warmte en schone gassen) hebben veel minder invloed op de verschillen in totale jaarlijkse kosten.
- De vier trajecten zijn op een aantal kwantitatieve en kwalitatieve kenmerken vergeleken, zie onderstaande tabel. De kwalitatieve kenmerken zijn ongelijksoortig, waardoor hun scores niet optelbaar zijn. Bovendien wordt het belang van die kenmerken door verschillende partijen verschillend gewogen, zoals blijkt in het maatschappelijk debat over de warmtetransitie. In Tabel

60 is te zien dat het traject Schone gassen op de meeste kenmerken de hoogste score krijgt, op enige afstand gevolgd door het traject All-electric.

- d. Beschikbaarheid van groengas of waterstof is een cruciale voorwaarde voor realisatie van het Schone gassen-traject. Daarom krijgt dat kenmerk een zwaar gewicht in het maatschappelijk debat. De toekomstige beschikbaarheid voor de gebouwde omgeving kan op twee manieren worden vergroot: 1) door vergroting van toekomstige beschikbare volumes voor Nederland als geheel en 2) door een groter deel van de beschikbare volumes voor de gebouwde omgeving te bestemmen. Beide ontwikkelingen hebben gevolgen voor de manier waarop andere Nederlandse sectoren hun klimaatdoelen kunnen halen. De mogelijkheden en gevolgen daarvan worden in de systeemanalyse van het TVKN-project onderzocht. Gezien de vele voordelen van verwarmen met schone gassen lijkt het de moeite waard om te proberen de beschikbaarheid ervan voor de gebouwde omgeving te vergroten.

Tabel 61

Overzicht van de vergelijking van trajecten op relevante kenmerken.

Kenmerk	Traject 1 Energie bespa- ren	Traject 2 Warmte- netten	Traject 3 Schone gassen	Traject 4 All- electric
Inspanning van bewoners (score)	36	26	15	41
Behoefte vaklieden gebouwen (score)	48	34	26	50
Inpandige ruimtebehoefte	XXXX	XXX	XXXXX	XXXXX
Uitvoerbaarheid netwerken (mld. € invest.) ^a	24	40	4-9	26
Complexiteit lokale besluitvorming (score)	13	17	11	11
Zekerheid voldoende energiedragers	****	***	*	*****
Afhankelijkheid van importen	**	**	*****	*
Flexibiliteit energiesysteem (score)	16	19	30	11
Nationale kosten jaarlijks (miljard € ₂₀₁₈ /jaar) ^a	10,5	9,0	6,6/8,8	11,4
Ruimtegebruik energienetwerken	**	***	*	*
Ruimtegebruik energie-opwek ^a	00	00	0/00000	000
CO ₂ -emissie cumulatief 2020-2050 (Mton)	484	474	489	460

a) In traject 3 geldt het eerste bedrag voor groengas, het tweede voor waterstof.

Transitietempo is moeilijk te voorspellen

De meeste CO₂-reductie is (cumulatief) te bereiken door snel maatregelen te nemen; snelheid is belangrijker dan grote stappen ineens. Maar bij verschillende soorten maatregelen blijkt het moeilijk om de toepassing te versnellen. Zo gebeurt het na-isoleren van bestaande woningen meestal met één maatregel per keer en is de stimulans om dat uit te breiden naar twee maatregelen per keer door het huidige kabinet afgeschaft. Het is nog onduidelijk of de verhoging van de subsidie, die daarvoor in de plaats kwam, wel tot een versnelling kan leiden. Ook komt de uitbreiding van warmtenetten in bestaande bouw maar moeizaam van de grond. De Startmotor die in het Klimaatakkoord werd aangekondigd heeft niet voor de beoogde snelle uitbreiding gezorgd. De koerswijziging ten aanzien van het publieke eigendom van warmtenetten, die in 2022 is ingezet, heeft weerstand opgeroepen bij partijen die traditioneel voor uitbreiding van warmtenetten zorgden. De verkopen van hybride warmtepompen zijn recent wel gestegen en mogelijk gaat de aangekondigde normering ervoor zorgen dat het huidige groeitempo wordt volgehouden. Dat kan alleen als de

installatiebranche erin slaagt om snel meer personeel op te leiden en de productiecapaciteit van hybride warmtepompen uit te breiden. Voor alle trajecten geldt, dat de structurele krapte op de arbeidsmarkt het transitietempo kan afremmen.

Van trajecten naar regionaal maatwerk

De onderzochte vier trajecten laten zien wat er mogelijk en nodig is als de warmtetransitie wordt benaderd vanuit één leidinggevende gedachte over een preferent verwarmingssysteem. Dat kan orde scheppen in de grote diversiteit van technische mogelijkheden en komt tegemoet aan de veelgeuite behoefte aan meer duidelijkheid en regie.

Dat betekent niet dat in elk traject slecht één technische optie wordt toegelaten. In alle trajecten komen verschillende opties aan bod (zie Tabel 48) omdat rekening is gehouden met de huidige warmtenetten, met regionale verschillen in dichtheid van bebouwing en aanwezigheid van warmtebronnen en met verschillen in toekomstige beschikbaarheid van schone gassen. Binnen die randvoorwaarden is gezocht naar een combinatie van technieken met de laagste nationale kosten. Op die manier zou de warmtetransitie zo efficiënt mogelijk doorlopen kunnen worden. In de praktijk zullen ook andere overwegingen een rol spelen bij de keuze van klimaatneutrale verwarmingstechnieken.

8.7.2 Implicaties voor beleid

Hybride warmtepompen voorlopig een veilige keus

De snelste en goedkoopste manier om het aardgasverbruik en de bijbehorende CO₂-emissies te verminderen is vervangen van HR-ketels door hybride warmtepompen. Het effect wordt groter als dat gecombineerd wordt met meer na-isolatie van gebouwen maar daarmee lopen de kosten sneller op dan de CO₂-reductie. Bij de huidige subsidieregelingen en verwachte energieprijzen en warmtepompkosten wordt verwarmen met een hybride in veel woningen snel voordeliger dan met een HR-ketel (zie Tabel 23). Na de aangekondigde normering vanaf 2026 lijkt dus geen aanvullend rijksbeleid nodig om deze ontwikkeling verder te stimuleren. Het valt zelfs te overwegen om de subsidie na 2026 te beëindigen, zoals de Duitse regering onlangs heeft aangekondigd.

Of overstappen op hybride warmtepompen voldoende is om klimaatneutraliteit te bereiken, is afhankelijk van de toekomstige beschikbaarheid van schone gassen om aardgas te vervangen. Bij uitzicht op voldoende beschikbaarheid kan het beleid zich richten op instandhouding van het aardgasnet en stimuleren van de productie van duurzame gassen. De huidige subsidies op elektrische warmtepompen en warmtenetten zouden dan kunnen vervallen. Voortzetting van het huidige isolatiebeleid, gericht op realisatie van de isolatiestandaard in bestaande woningen in 2050, kan de behoefte aan groengas voor de bestaande bouw verlagen van 150 naar 142 PJ per jaar (zie Tabel 41). Dat vergroot de kans op voldoende schoon gas wel iets maar kost jaarlijks ook 3 miljard euro aan extra isolatiekosten en is dus verre van doelmatig⁹⁵.

Komen duurzame gassen slechts beperkt beschikbaar voor de gebouwde omgeving (of tegen een zeer hoge prijs), dan zijn hybride warmtepompen voor een deel van de gebouwen 'slechts' een

⁹⁵ Na-isoleren van alle bestaande gebouwen tot de isolatiestandaard kost jaarlijks 5,6 miljard (zie traject 1 in Tabel 57) terwijl na-isoleren tot schillabel D 2,6 miljard euro kost (zie traject 3 in dezelfde tabel). Besparen van 1 PJ groengas middels na-isolatie tot de standaard in combinatie met hybride warmtepompen kost dus 375 miljoen euro (3000/8) terwijl de nationale productiekosten van 1 PJ groengas in 2030 ongeveer 20 miljoen euro bedragen.

tussenstap naar klimaatneutraliteit en moet daarna worden overgestapt op andere verwarmings-technieken.

Elektrische warmtepompen zijn zekere maar dure keus

Als zeker zou zijn dat schone gassen niet of heel beperkt beschikbaar komen voor de gebouwde omgeving, dan resten slechts twee technieken om klimaatneutraliteit te bereiken: warmtenetten en elektrische warmtepompen. Uit de Startanalyse blijkt dat verwarmen met warmtepompen in bijna 70% van de gebouwenvoorraad lagere nationale kosten heeft dan verwarmen met warmtenetten. Uit het Dashboard Eindgebruikerskosten blijkt dat dat ook geldt voor de kosten die bewoners gaan betalen (bij de subsidieregelingen die in 2020 van kracht waren, zie Tabel 23). Zonder schone gassen is het dus raadzaam beleid te ontwikkelen dat de toepassing van elektrische warmtepompen stimuleert, afgestemd op regionale netverzwinging, en op beleid dat de elektriciteitsproductie geschikt maakt om de piekvraag te kunnen opvangen. Als uitbreiding van netcapaciteit traag verloopt, kan dat de toepassing van warmtepompen vertragen. In mei 2023 stonden 5600 bedrijven op de wachtlijst en in juli waren dat al 8000 bedrijven voor teruglevering en 6000 voor afname van stroom (NBNL, 2023w). Ook met realisatie van het Landelijk Actieplan Netcongestie blijft netcongestie de komende tien jaar nog optreden (Rijksoverheid, 2022).

De nationale kosten van het All-electric-traject zijn jaarlijks 4,8 miljard euro (ofwel 72%) hoger dan die van het Schone gassen-traject (zie Tabel 57) onder de aannames van de Startanalyse 2020. Die meerkosten kunnen dalen door een deel op warmtenetten aan te sluiten; dan ontstaat een mengvorm van traject 4 en 1 dat jaarlijks (grof geschat) 3,6 miljard euro meer zou kunnen kosten dan traject 3. De meerkosten ten opzichte van traject 3 zijn te beschouwen als de prijs voor zekerheid over het beschikbaar komen van voldoende klimaatneutrale energiedragers.

Na-isoleren is nuttig maar meestal niet rendabel

De meeste methoden om het effect van na-isoleren te bepalen overschatten de besparing op het energieverbruik voor verwarmen die in de praktijk wordt gerealiseerd, zie hoofdstuk 4. Dat komt onder andere door afwijkende bouwkundige eigenschappen van bestaande woningen, suboptimaal uitgevoerde isolatiemaatregelen en aanpassing van het stookgedrag na uitvoering van de maatregelen (reboundeffect). Er zijn wellicht mogelijkheden om het reboundeffect te verkleinen met intensieve voorlichtingscampagnes (bijvoorbeeld: 19 graden is de norm). Hogere energieprijzen kunnen ook aanzetten tot zuiniger stoken, maar vermoedelijk vooral bij huishoudens met lage inkomens, wat weer als oneerlijk wordt ervaren.

Het rendement van na-isoleren is niet alleen afhankelijk van de besparing op het energieverbruik maar ook van de kosten van isolatiemaatregelen en energie. Met de subsidies en aangekondigde verhoging van de energiebelasting op aardgas uit 2020 lijkt na-isoleren tot schillabel B niet rendabel, zoals bleek uit Figuur 8 (TNO, 2021b). Sindsdien zijn isolatiekosten niet met 9% gedaald (zoals in die studie nog werd verondersteld) maar met circa 20% gestegen en is de subsidie verhoogd van 20% naar 30%. De prijzen van aardgas lijken na de prijsexplosie van 2022 weer terug te bewegen naar niveaus die vóór de Oekraïne-oorlog werden verwacht. Met deze ontwikkelingen blijft na-isoleren de komende jaren zeer waarschijnlijk niet rendabel. Recente landsdekkende studies naar de

financiële gevolgen van na-isoleren van woningen bij actuele financiële regelingen ontbreken helaas⁹⁶.

Het is de vraag of het doelmatig is om na-isolatie tot de standaard met veel subsidie te blijven stimuleren. Beperken van subsidies tot na-isolatie tot schillabel D levert waarschijnlijk meer CO₂-reductie op per euro subsidie en speelt schaarse vakmensen en materialen vrij voor de woningen waar de meeste verbeteringen zijn te realiseren. Dit biedt een minimaal niveau van betaalbare comfort aan álle huishoudens en laat extra comfort voor rekening van de woningeigenaren.

Groei warmtenetten interacteert met subsidies voor warmtepompen en isoleren

Warmtenetten zijn bij vergaand geïsoleerde woningen aanmerkelijk duurder dan andere opties, zowel voor bewoners als voor de samenleving (zie hoofdstuk 4). Het ligt dus niet voor de hand om een beleid dat vergaande na-isolatie stimuleert te combineren met beleid dat de uitbreiding van warmtenetten ondersteunt. In hoofdstuk 5 is uitgelegd dat verwarmen met hybride warmtepompen en groengas, bij na-isolatie tot schillabel D, bijna overal goedkoper is dan verwarmen met een warmtenet. Dat geldt – bij de huidige subsidieregelingen – ook voor elektrische warmtepompen en na-isoleren tot schillabel B. Dat betekent dat ongericht stimuleren van hybride en elektrische warmtepompen ertoe kan leiden dat de ontwikkeling van nieuwe warmtenetten wordt gehinderd doordat huishoudens met een (hybride) warmtepomp geen financieel voordeel hebben bij overstappen op een warmtenet. Hier lopen het individuele belang van huishoudens niet parallel met het collectieve belang van een buurt om de gezamenlijke transitiekosten te minimaliseren. Die discrepantie kan ten opzichte van hybride warmtepompen worden hersteld door in beoogde warmtenetgebieden aan te kondigen dat de gaslevering binnen afzienbare tijd wordt beëindigd. Dat zal mensen er echter niet van weerhouden een *elektrische* warmtepomp aan te schaffen. Hun financiële voordeel vervalt pas als ze geen subsidie meer krijgen. Om dat mogelijk te maken, moet de huidige generieke subsidieregeling worden verbijzonderd naar gebieden en moeten gemeenten gebieden aanwijzen waar een warmtenet wordt aangelegd. Dat kan tot vertraging leiden in de afbouw van het aardgasverbruik, niet alleen omdat de besluitvorming over aanleg van een warmtenet langer duurt dan die over aanschaf van een warmtepomp, maar vooral als na jaren van onderzoek en voorbereiding uiteindelijk geconstateerd zou worden dat een warmtenet toch geen haalbare optie is.

⁹⁶ TNO en CPB hebben in 2023 zo'n studie uitgevoerd en gepubliceerd, zie: [Inkomenseffecten van woningisolatie naar de isolatiestandaard | CPB.nl](#). Hij is later ingetrokken wegens fouten in de dataverwerking. De site vermeldt: "De hoofdconclusie van de studie dat het isoleren van oudere huizen vaak goed is voor de portemonnee en dat er wel vrij grote verschillen in inkomenseffecten zijn blijft staan, maar met name de resultaten uitgesplitst naar de diverse subgroepen (type huishoudens en type woningen) zijn op dit moment onvoldoende betrouwbaar." In het oorspronkelijke rapport stond dat na-isoleren tot de isolatiestandaard rendabel is bij iets minder dan de helft van de woningen die vóór 1992 zijn gebouwd. Bij huishoudens met lage inkomens is dat aandeel kleiner. Bij die berekeningen was overigens verondersteld dat bewoners de binnentemperatuur niet verhogen, wat in de praktijk waarschijnlijk meestal wel gebeurt en comfortverbetering oplevert. Zonder subsidies en afspraken met woningcorporaties zou dit type maatregelen het besteedbaar inkomen van de meeste huishoudens doen dalen.

Behoeftte aan regionale planning van aanpassing energienetten

Om de warmtetransitie beter te kunnen plannen, en daarmee sneller te kunnen uitvoeren, is meer inzicht nodig in waar welk type energienetwerk beschikbaar blijft of komt. Aanleg, onderhoud en uitbreiding van energienetten kost veel geld en duurt lang. Daarom zijn er wettelijke regelingen opgesteld om te voorkomen dat er meer netwerkcapaciteit wordt gebouwd dan nodig. Dat maakt het moeilijk tot onmogelijk om te anticiperen op een verwachte toekomstige behoefte aan nieuwe of zwaardere aansluitingen. Mochten die mogelijkheden worden verruimd, dan zijn nauwkeurige schattingen nodig van de toekomstige behoefte aan aansluitingen (naar aantallen, capaciteit en plaats) om overinvesteringen te voorkomen. Zulke schattingen zijn echter niet te maken zolang niet duidelijk is in welke buurten welke verwarmingstechnieken worden aangesloten. De bestaande lichting TVW's biedt daarvoor nog onvoldoende aanknopingspunten (van der Molen & al., 2023).

Ondertussen heeft het huidige beleidsinstrumentarium voor de warmtetransitie wel invloed op de toekomstige kosten van energienetten. Subsidies, normen en energietarieven zijn nu in het hele land gelijk. Dat betekent dat gebouweigenaren hun eigen keuze kunnen maken bij de overstap naar een alternatief voor de cv-ketel, waarbij hun woonplaats geen invloed heeft op de financiële stimulansen die geboden worden. Als daaruit een willekeurige ruimtelijke spreiding ontstaat van hybride warmtepompen (die een gasnet nodig hebben), elektrische warmtepompen (die juist geen gasnet nodig hebben maar wel een stevig stroomnet) en warmtenetaansluitingen, dan betekent dat voor de netwerken dat ze hun huidige landelijke dekking moeten behouden om alle klanten te kunnen blijven bedienen. Voor het stroomnetwerk betekent dat een verzwaring, maar die was toch al voorzien om de toename van PV-panelen en laadpalen te accommoderen en die opgave wordt niet zwaarder door de ongerichte subsidiëring van warmtepompen. Maar voor gasnetten kan dat wel een probleem opleveren. De overstap op hybride warmtepompen zorgt al voor een halvering van het gasverbruik per aansluiting maar als her en der aansluitingen vervallen door overschakeling op volledig elektrisch verwarmen, dan daalt ook het aantal gasaansluitingen en gaan de netwerkkosten per resterende gasaansluiting omhoog. Zo draagt de generieke subsidieregeling voor elektrische warmtepompen bij aan een groeiende ondoelmatigheid van het gasnet. Dat kan voorkomen worden door te bepalen in welke gebieden het gasnet in stand blijft en daar geen subsidie te geven voor elektrische warmtepompen.

9 Referenties

- Accenture. (2021, april 17). *Flexibele inzet warmtepompen voor een duurzaam energiesysteem*. Opgehaald van www.topsectorenergie.nl:
<https://www.topsectorenergie.nl/sites/default/files/uploads/Urban%20energy/publicaties/Flexibele-inzet-warmtepompen-voor-een-duurzaam-energiesysteem.pdf>
- ACM. (2021). *Rendementsmonitor warmteleveranciers 2019-2020*. Den Haag: Autotiteit Consument en Markt.
- Anon. (1999, juni 21). *Uitvoeringsnota Klimaatbeleid*. Opgehaald van <https://zoek.officielebekendmakingen.nl/kst-26603-2.pdf>
- Anon. (2017, mei 23). *Convenant 10 PJ energiebesparing gebouwde omgeving*. Opgehaald van www.energie-nederland.nl: <https://www.energie-nederland.nl/app/uploads/2017/05/Convenant-10-PJ-Gebouwde-Omgeving-tekenversie1.pdf>
- Anon. (2021, juni 30). *HyWay27: realisatie van het landelijk waterstofnetwerk*. Opgehaald van www.hyway27.nl: <https://www.hyway27.nl/actueel/hyway-27-realisatie-van-het-landelijk-waterstofnetwerk>
- Anon. (2022, maart 22). *Thermostaat 2 graden lager: meeste Nederlanders willen daarmee €250 tot €500 besparen*. Opgehaald van www.businessinsider.nl:
<https://www.businessinsider.nl/thermostaat-lager-besparen-energie-rekening-gas-nederland/>
- Anon. (2022, november 9). *Tien huizen in Lochem verwarmd met waterstof*. Opgehaald van nationaalwaterstofprogramma.nl:
<https://nationaalwaterstofprogramma.nl/themas/thema+gebouwde+omgeving/2343378.aspx?t=Tien-huizen-in-Lochem-verwarmd-met-waterstof>
- Anon. (2023, januari 9). *Internetconsultatie Kwaliteitscriteria waterstof*. Opgehaald van [Overheid.nl](http://www.internetconsultatie.nl):
<https://www.internetconsultatie.nl/kwaliteitscriteriawaterstof/b1>
- Atriensis Projecten; Ennatuurlijk; Vattenfall; Fakton; en VBMT advocaten. (2022). *Ambitiedocument voor haalbare warmtenetten*. Eindhoven: Atriensis.
- CBRE. (2022, december 29). *Kantoren voldoen niet aan nieuwe regels; onderzoek in opdracht van Nieuwsuur*. Opgehaald van rtvmonitor.nl:
<https://dashboard.rtvmonitor.nl/summary/ffcf26f313844b7d89d90e5ac44a4a15>
- CBS. (2020, december 16). *Prognose: Bevolking blijft komende 50 jaar groeien*. Opgehaald van www.cbs.nl: <https://www.cbs.nl/nl-nl/nieuws/2020/51/prognose-bevolking-blijft-komende-50-jaar-groeien>
- CBS. (2023, februari 13). *Aardgasverbruik woningen 2022 voorlopige cijfers*. Opgehaald van www.cbs.nl:
<https://www.cbs.nl/nl-nl/achtergrond/2023/07/aardgasverbruik-woningen-2022-voorlopige-cijfers>
- CBS. (2023wp, april 19). *Warmtepompen; aantallen, thermisch vermogen en energiestromen, 1994-2021*. Opgehaald van www.cbs.nl: <https://www.cbs.nl/nl-nl/cijfers/detail/82380NED>
- CE Delft. (2020). *Potentieel van lokale biomassa en invoedlocaties van groengas; een verkenning voor 2030*. Delft: CE Delft.
- CE Delft. (2022). *Terugverdientijd verduurzamingsmaatregelen; Achtergronddocument*. Delft: CE Delft.
- CE Delft. (2022d). *Beleid voor Energietransitie Gebouwde Omgeving; beleidsdoorlichting art. 4.1 BZK 2015-2020*. Delft: CE Delft.
- CE Delft. (2022gg). *Bijmengverplichting groen gas; Ontwerpopties en effectanalyse*. Delft: CE Delft.

- CE Delft. (2022w). *Warmtenetten in Vesta MAIS*. Delft: CE Delft.
- CLO. (2020). *Temperatuur in Nederland en mondiaal, 1907 - 2019*. Den Haag: PBL. Opgeroepen op 12 25, 2022, van <https://www.clo.nl/indicatoren/nlo226-temperatuur-mondiaal-en-in-nederland>
- De Gemeynt. (2018). *Green Liaisons; Hernieuwbare moleculen naast duurzame elektronen. contouren van een routekaart Hernieuwbare Gassen 2050*. Klarenbeek: De Gemeynt Coöperatie.
- de Klerk, L., & van der Wouden, R. (2021). *Ruimtelijke ordening*. nai010 Uitgevers.
- dGMR. (2022, mei 12). *Meerinvesteringen en besparing op energiekosten; Onderzoek naar uitvoeringslasten bij voorgestelde eindnormen 2050*. Opgehaald van open.overheid.nl: <https://open.overheid.nl/documenten/ronl-3593314490cc1doc6abd01ccf74f1aac5d76b8of/pdf>
- DGMR Bouw. (2020, november 30). *Kostenoptimaliteitsonderzoek eindnorm bestaande utiliteitsbouw*. Opgehaald van [rijksoverheid.nl](https://www.rijksoverheid.nl): <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2020/11/30/kostenoptimaliteitsonderzoek-eindnorm-bestaande-utiliteitsbouw>
- DNE Research. (2020). *Het Nationale Warmtenet Trendrapport 2021*.
- DNV. (2022). *Hydrogen forecast 2050*. Høvik, Norway: DNV AS.
- DNV en KIWA. (2022). *Kwaliteitseisen voor waterstof t.b.v. het transportnet*. Groningen: DNV Energy Systems. Opgehaald van <https://www.internetconsultatie.nl/kwaliteitscriteriawaterstof/b1>
- DNV GL & TNO. (2021, februari). *Flexibiliteit in de gebouwde omgeving: wegwijzer voor ondernemers*. Opgehaald van energy.nl: https://energy.nl/media/TKI-rapport_Flexibiliteit-in-de-gebouwde-omgeving_Feb2021-gecomprimeerd.pdf
- Ecorys. (2021). *Inzicht in aanvullende beleidspakketten voor de verduurzaming van de gebouwde omgeving*. Rotterdam: Ecorys.
- Ecorys. (2021h). *De waarde van de hybride warmtepomp voor de warmtetransitie in de gebouwde omgeving*. Rotterdam: Ecorys. Opgehaald van <https://open.overheid.nl>: <https://open.overheid.nl/repository/ronl-fbcaf58c-ac51-475f-9d95-90bf85452c6f/1/pdf/de-waarde-van-de-hybride-warmtepomp-voor-de-warmtetransitie.pdf>
- ECW. (2022, januari 30). *Template Businesscase warmtenetten*. Opgeroepen op januari 30, 2023, van Expertisecentrum Warmte: <https://www.expertisecentrumwarmte.nl/themas/marktordering+en+financiering/template+businesscase+warmtenetten/default.aspx>
- ECW. (2022wp, oktober). *Techniekfactsheets Elektrische warmtepomp*. Opgehaald van www.expertisecentrumwarmte.nl: <https://www.expertisecentrumwarmte.nl/themas/technische+oplossingen/techniekfactsheets+gebouwmaatregelen/elektrische+warmtepomp/default.aspx>
- EIB. (2019). *Klimaatbeleid tegen het licht*. Opgehaald van [https://www.eib.nl/pdf/EIB%20rapport%20Klimaatbeleid%20tegen%20het%20licht%20\(WEB\).pdf](https://www.eib.nl/pdf/EIB%20rapport%20Klimaatbeleid%20tegen%20het%20licht%20(WEB).pdf)
- EIB. (2022). *Trends op de bouwmarkt 2022-2026*. Opgehaald van [www.eib.nl](https://www.eib.nl/publicaties/trends-op-de-bouwarbeidsmarkt-2022-2026/): <https://www.eib.nl/publicaties/trends-op-de-bouwarbeidsmarkt-2022-2026/>
- EIB. (2022, november). *www.eib.nl*. Opgehaald van *Trends op de bouwmarkt 2022-2026*: <https://www.eib.nl/publicaties/trends-op-de-bouwarbeidsmarkt-2022-2026/>
- Engie. (2022). *Hoeveel bespaar je doorje thermostaat met 10 te verlagen?* Opgehaald van [www.engie.nl](https://www.engie.be/nl/support/faq/contract/hoeveel-bespaar-thermostaat-met-10C-verlagen/#): <https://www.engie.be/nl/support/faq/contract/hoeveel-bespaar-thermostaat-met-10C-verlagen/#>
- E-Top, E. T. (2021, januari). *Elektrificatie van vraagprofiel 2030*. Opgehaald van [www.ce.nl](https://ce.nl/publicaties/elektrificatie-en-vraagprofiel-2030/): <https://ce.nl/publicaties/elektrificatie-en-vraagprofiel-2030/>

- Filippidou, F., Nieboer, N., & Visscher, H. (2019). Effectiveness of energy renovations: a reassessment based on actual consumption savings. *Energy Efficiency*, 12(1), pp. 19-35.
- Fraunhofer IEE. (2022, januari). *The limitations of hydrogen blending in the european gas grid*. Opgehaald van www.iee.fraunhofer.de:
https://www.iee.fraunhofer.de/content/dam/iee/energiesystemtechnik/en/documents/Studies-Reports/FINAL_FraunhoferIEE_ShortStudy_H2_Blending_EU_ECF_Jan22.pdf
- Gasunie and Tennet. (2019). *Infrastructure Outlook 2050*. X: Gasunie.
- Hommelberg, M., Janssen, G., & Friedel, P. (2022). *Installatiemonitor; Publieke eindrapportage februari 2022*. Harderwijk: BDH.
- Hommelberg, M., Janssen, G., & Friedel, P. (2022). *Installatiemonitor; Publieke eindrapportage januari 2022*. Harderwijk: BDH.
- Hoogervorst, N. (2020). *Waterstof voor de gebouwde omgeving; operationalisering in de Startanalyse 2020*. Den Haag: PBL.
- Hoogervorst, N. (2020e). *Kosten van klimaatneutrale elektriciteit in 2030; operationalisering voor de Startanalyse 2020*. Den Haag: PBL.
- Hoogervorst, N., Menkveld, M., & Tigchelaar, C. (2019, april 19). *Achtergronddocument effecten ontwerp klimaatakkoord: Gebouwde Omgeving*. Opgehaald van www.pbl.nl:
https://www.pbl.nl/sites/default/files/downloads/pbl-2019-achtergronddocument-effecten-ontwerp-klimaatakkoord-gebouwde-omgeving_3711.pdf
- Hylkema, W. (2023, januari 7). *Een warmtepomp die geen stroom verbruikt maar gas*. Opgehaald van Energiea: <https://energiea.nl/energiea-artikel/40105331/een-warmtepomp-die-geen-stroom-verbruikt-maar-aardgas>
- IEA. (2022). *Global hydrogen review 2022*. Parijs: International Energy Agency.
- IenW. (2020, oktober 16). *Kamerbrief Duurzaamheidskader biograndstoffen*. Opgehaald van open.overheid.nl: <https://open.overheid.nl/documenten/rnl-2f6f5972-9321-49c4-8420-3e694e04f0fc/pdf>
- Janssen, W. (2023, januari 16). *Weernieuws*. Opgehaald van www.weeronline.nl:
<https://www.weeronline.nl/nieuws/dit-bespaar-je-door-je-verwarming-een-graad-lager-te-zetten>
- Jetten, R. (2022, december 2). *Kamerbrief. Kamerbrief Programma Groen Gas*. Den Haag. Opgehaald van <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/kamerstukken/2022/12/02/programma-groen-gas>
- Keulartz, J. (2023). *Strijd om de ruimte; Het debat over de inrichting van stad en land*. Uitgeverij Noordboek.
- KIWA. (2020, september 8). *De impact van het bijmengen van waterstof op het gasdistributienet en de gebruiksmateriaal*. Opgehaald van www.kiwa.com:
https://www.kiwa.com/qaca77/globalassets/netherlands/kiwa-technology/downloads/kiwa_waterstof-bijmenging.pdf
- Klimaatexpert. (2023, april). *www.klimaatexpert.com*. Opgehaald van COP, SCOP en rendement: <https://www.klimaatexpert.com/warmtepomp/technisch/cop-scop-en-rendement>
- KNMI. (2014). *Klimaatscenario's voor Nederland*. Opgehaald van https://cdn.knmi.nl/knmi/pdf/bibliotheek/klimaatbrochures/Brochure_KNMI14_NL.pdf
- Korbee, H., Smolders, B., & Stofberg, F. (1979, oktober 27). *Milieu voorop bij uitwerking van een globaal bestemmingsplan*. BOUW, 22.
- Kremer, A. (2022, maart 29). *Gebouwenmatrix energie 2020 op 1 januari 2020 en 1 januari 2021*. Opgehaald van www.cbs.nl: <https://www.cbs.nl/nl-nl/maatwerk/2022/13/gebouwenmatrix-energie-2020-op-1-januari-2020-en-1-januari-2021>

- KWA bedrijfsadviseurs. (2021). *Definitief rapport "Procesgebonden aardgasverbruik binnen de wijkgerichte aanpak"*. Utrecht: RVO. Opgehaald van <https://open.overheid.nl/documenten/ronl-2b929aec-823d-4778-b35b-aa957a34cd9f/pdf>
- Lund, H. Ø. (2021). Perspectives on fourth and fifth generation district heating. *Energy*, 227, 120520. Opgehaald van <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544221007696>
- Majcen, D. (2016). *Predicting energy consumption and savings in the housing stock, A Performance gap analysis in the Netherlands*. Delft: Delft University of Technology, Faculty of Architecture and the Built Environment, OTB - Research for the Built Environment.
- Majcen, D., Itard, L., & Visscher, H. (2013). Theoretical vs. actual energy consumption of labelled dwellings in the Netherlands: Discrepancies and policy implications. *Energy policy*, 54, pp. 125-136.
- Menkveld, M. (2020, mei 11). *Kentallen notitie Utiliteitsbouw*. Opgehaald van [energy.nl: https://energy.nl/publications/kentallen-notitie-utiliteitsbouw/](https://energy.nl/publications/kentallen-notitie-utiliteitsbouw/)
- Menkveld, M., & al, e. (2020). *Kosten en baten isolatiestandaard en streefwaarden woningen, rapport TNO 2020 P11608*. Amsterdam: TNO.
- Menkveld, M., & Sipma, J. (2022, maart). *Ambitieniveau dienstenconvenant*. Opgehaald van [repository.tno.nl: https://repository.tno.nl/uuid%3Ac4f79be7-f538-4ac5-aabf-d0a7553103ad](https://repository.tno.nl/uuid%3Ac4f79be7-f538-4ac5-aabf-d0a7553103ad)
- Menkveld, M., & Sipma, J. (2022b, april 22). *Artikel 6 EED renovatieverplichting gebouwen van publieke instellingen*. Opgehaald van [www.rvo.nl: https://www.rvo.nl/sites/default/files/2022-05/artikel-6-eed-renovatieplicht-gebouwen-publieke-instellingen.pdf](https://www.rvo.nl/sites/default/files/2022-05/artikel-6-eed-renovatieplicht-gebouwen-publieke-instellingen.pdf)
- Minister De Jonge. (2023, juli 20). *Brief Verduurzaming van de gebouwde omgeving*. Opgehaald van rijksoverheid.nl.
- Ministerie van BZK. (2021, maart 18). *Standaard voor woningisolatie. Brief aan de Tweede Kamer*. Den Haag: Ministerie van BZK.
- Ministerie van BZK. (2022). *Beleidsprogramma Versnelling verduurzaming gebouwde omgeving*. Den Haag: Ministerie BZK - Volkshuisvesting en Ruimtelijke Ordening.
- Ministerie van BZK. (2022). *Beleidsprogramma Versnelling Verduurzaming Gebouwde Omgeving*. Den Haag: Ministerie van BZK.
- Ministerie van BZK. (2023, juni 16). *Voortgangsrapportage PVGO, versie 1.0*. Opgehaald van [open.overheid.nl: https://open.overheid.nl/documenten/da7bc7fe-311e-463a-abea-3b5ebd550272/file](https://open.overheid.nl/documenten/da7bc7fe-311e-463a-abea-3b5ebd550272/file)
- Ministerie van EZK. (2023, augustus 16). *Ontwerp Meerjarenprogramma Klimaatfonds 2024*. Opgehaald van [open.overheid.nl: https://open.overheid.nl/documenten/ronl-d9e4ed924cd01b96a46871e0f15fd5bbcod7be9b/pdf](https://open.overheid.nl/documenten/ronl-d9e4ed924cd01b96a46871e0f15fd5bbcod7be9b/pdf)
- Naber, N. e. (2023). *Update kengetallen installaties Vesta MAIS 2022*. Delft: CE Delft.
- NAT. (2022, december 7). *Praktijk*. Opgehaald van [Netwerk Aquathermie: https://aquathermie.nl/bibliotheek/handlerdownloadfiles.ashx?idnv=2372947](https://aquathermie.nl/bibliotheek/handlerdownloadfiles.ashx?idnv=2372947)
- Nationaal Warmtefonds. (2022, 9 27). *Over ons*. Opgehaald van [Warmtefonds: https://www.warmtefonds.nl/over-ons](https://www.warmtefonds.nl/over-ons)
- NBNL. (2021, oktober 29). *Keuzes voor het energienet van de toekomst - tbv formatie*. Opgehaald van [www.netbeheernederland.nl: https://www.netbeheernederland.nl/_upload/Files/Brief_NBNL_aan_kabinetsformatie_Koolmees_en_Remkes__01-11-2021_226.pdf](https://www.netbeheernederland.nl/_upload/Files/Brief_NBNL_aan_kabinetsformatie_Koolmees_en_Remkes__01-11-2021_226.pdf)
- NBNL. (2022, april 5). *Netbeheerders investeren volop in uitbreiding netcapaciteit*. Opgehaald van [www.netbeheernederland.nl: https://www.netbeheernederland.nl/artikelen/nieuws/netbeheerders-investeren-volop-uitbreiding-netcapaciteit](https://www.netbeheernederland.nl/artikelen/nieuws/netbeheerders-investeren-volop-uitbreiding-netcapaciteit)

- NBNL. (2022, april). *Quickscan coalitieakkoord energiesysteem*. Opgehaald van [www.netbeheernederland.nl](https://www.netbeheernederland.nl/_upload/RadFiles/New/Documents/Quickscan%20NB_NL_Quickscan%20Coalitieakkoord%2010%20juni%202022.pdf): https://www.netbeheernederland.nl/_upload/RadFiles/New/Documents/Quickscan%20NB_NL_Quickscan%20Coalitieakkoord%2010%20juni%202022.pdf
- NBNL. (2023, Oktober 12). *Integrale infrastructuurverkenning 2030-2050 editie 2*. Opgehaald van [netbeheernederland.nl](https://www.netbeheernederland.nl/publicatie/i13050-eindrapport): <https://www.netbeheernederland.nl/publicatie/i13050-eindrapport>
- NBNL. (2023w, juli 25). *Ondanks hoog bouwtempo nemen wachtlijsten toe*. Opgehaald van [netbeheernederland.nl](https://www.netbeheernederland.nl/artikelen/nieuws/ondanks-hoog-bouwtempo-nemen-wachtlijsten-toe): <https://www.netbeheernederland.nl/artikelen/nieuws/ondanks-hoog-bouwtempo-nemen-wachtlijsten-toe>
- Niessink, R., & Menkveld, M. (2022). *Het besparingspotentieel bij bedrijfshallen in de dienstensector*. Amsterdam: TNO. Opgehaald van <https://energy.nl/publications/energiebesparing-bedrijfshallen/>
- Nordkamp, L., Bakker, J., Schutte, R., Strijker, B., & Bosma, J. (2021). *Versnellingsprogramma verduurzaming bedrijventerreinen (VPVB): fase I en II*. Amsterdam: TNO.
- NRI. (2021). *Rapport standaard en streefwaardes bestaande woningbouw; referentie warmtevraag bestaande bouw*. Zwolle: Nieman Raadgevend Ingenieurs.
- Ollongren, K. (2021). *Brief aan Tweede Kamer betreffende Standaard voor woningisolatie, kenmerk 2021-0000125785*. Den Haag: Ministerie BZK.
- Panteia. (2022). *Renovaties in de Utiliteit; onderzoeksverantwoording meting 2022*. Opgehaald van [www.rvo.nl](https://www.rvo.nl/sites/default/files/2022-11/Renovaties-in-de-Utiliteit-2022.pdf): <https://www.rvo.nl/sites/default/files/2022-11/Renovaties-in-de-Utiliteit-2022.pdf>
- Paradies, G., Dreijerink, L., & Menkveld, M. (2020). *Effectmeting verbeterd verbruiks en kostenoverzicht*. Amsterdam: TNO.
- PBL. (2014, december 19). *Energie besparen gaat niet vanzelf. Evaluatie energiebesparingsbeleid voor de gebouwde omgeving*. Opgehaald van [www.pbl.nl](https://www.pbl.nl/publicaties/energie-besparen-gaat-niet-vanzelf-evaluatie-energiebesparingsbeleid-voor-de-gebouwde-omgeving): <https://www.pbl.nl/publicaties/energie-besparen-gaat-niet-vanzelf-evaluatie-energiebesparingsbeleid-voor-de-gebouwde-omgeving>
- PBL. (2020b). *Advies uitfasering houtige biomassagrondstoffen voor warmtetoepassingen*. Den Haag: PBL.
- PBL. (2020c, maart 11). *Isolatiemaatregelen woningen, 1982-2018*. Opgehaald van [www.clo.nl](https://www.clo.nl/indicatoren/nlo383-isolatiemaatregelen-woningen): <https://www.clo.nl/indicatoren/nlo383-isolatiemaatregelen-woningen>
- PBL. (2020g). *Startanalyse voor aardgasvrije buurten, versie 2020; Gemeenterapport met toelichting bij tabellen met resultaten van de Startanalyse*. Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving. Opgehaald van <https://themasites.pbl.nl/leidraad-warmte/2020/>
- PBL. (2020w, oktober). *Startanalyse aardgasvrije buurten, website*. Opgehaald van [themasites PBL](https://themasites.pbl.nl/leidraad-warmte/2020/): <https://themasites.pbl.nl/leidraad-warmte/2020/>
- PBL. (2021k). *Klimaat- en Energieverkenning (KEV) 2021*. Den Haag: PBL.
- PBL. (2022a). *Startanalyse aardgasvrije buurten 2020 - Achtergrondrapport*. Den Haag: PBL. Opgehaald van <https://www.pbl.nl/publicaties/startanalyse-aardgasvrije-buurten-2020-achtergrondrapport>
- PBL. (2022k). *Klimaat- en Energie Verkenning (KEV) 2022*. Den Haag: PBL.
- PBL. (2023tvw, juni). *Overzicht transitievisies warmte; Signalen, obstakels en potentieel*. Opgehaald van www.pbl.nl.
- PBL. (2024). *Trajectverkenning Klimaatneutraal 2050; Trajecten naar een klimaatneutrale samenleving voor Nederland in 2050*. Den Haag: PBL.
- PBL. (2024bio). *Beschikbaarheid biogrondstoffen in NL en de EU; Notitie bij studie Trajectverkenning klimaatneutraal Nederland 2050*. Den Haag: PBL.
- PBL. (2024g). *Productie, import en opslag van waterstof in Nederland; Achtergrondstudie in het kader van TVKN 2050*. Den Haag: PBL.

- PBL. (2024l). *Mogelijke trajecten naar klimaatneutrale landbouw, landgebruik en voedsel in 2050; Achtergrondrapport bij studie Trajectverkenning klimaatneutraal Nederland 2050*. Den Haag: PBL.
- PBL, R. C. (2022kev). *Klimaat- en Energieverkenning 2022, tabellenbijlage*. Den Haag: PBL.
- PBL, TNO, RIVM. (2022fs-kev). *Beleidsverzicht en factsheets beleidsinstrumenten. Achtergronddocument bij de Klimaat- en Energie-verkenning 2022*. Opgehaald van www.pbl.nl:
<https://www.pbl.nl/publicaties/beleidsverzicht-en-factsheets-beleidsinstrumenten-achtergronddocument-bij-de-klimaat-en-energieverkenning-2022>
- Platform Geothermie, DAGO, Stichting Warmtenetten, EBN. (2018). *Masterplan Aardwarmte in Nederland; een brede basis voor een duurzame warmtevoorziening*. Platform Geothermie.
- Pothof, I., Vreeken, T., & van Meerkerk, M. (2022). *Field measurements on lower radiator temperatures in existing buildings; Manuscript for energy and buildings*. WarmingUP.
- PWC. (2022). *Effecten van publiek eigendomsverplichting op de realisatiekracht voor collectieve warmtesystemen*. Amsterdam: PWC. Opgehaald van <https://www.vemw.nl/kennisbank-detail/2022/08/05/Rapport-PwC-Effecten-publiek-eigendomsverplichting-op-realisatiekracht-collectieve-warmtesystemen>
- PZH. (2021, november 19). *Duurzame warmtebronnen in Zuid-Holland*. Opgehaald van www.zuid-holland.nl: <https://www.zuid-holland.nl/onderwerpen/energie/warmtetransitie/duurzame-warmtebronnen-zuid-holland/>
- Rijksoverheid. (2021). *Wegwijzer Dashboard Eindgebruikerskosten*. Opgehaald van expertisecentrumwarmte.nl:
<https://expertisecentrumwarmte.nl/documenten/wegwijzer/HandlerDownloadFiles.ashx?idnv=1971003>
- Rijksoverheid. (2022, december 21). *Landelijk Actieprogramma Netcongestie*. Opgehaald van www.rijksoverheid.nl:
<https://www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2022/12/21/landelijk-actieprogramma-netcongestie>
- Rijksoverheid. (2023, februari 27). *Staatscourant 2023 nr. 6282*. Opgehaald van overheid.nl:
<https://zoek.officielebekendmakingen.nl/stcrt-2023-6282.pdf>
- ROB. (2021, januari 25). *Advies 'Van Parijs naar praktijk, Bekotiging en besturing van de decentrale uitvoering van het klimaatakkoord'*. Opgehaald van www.raadopenbaarbestuur.nl:
<https://www.raadopenbaarbestuur.nl/documenten/publicaties/2021/01/25/advies-van-parijs-naar-praktijk>
- Rosenow, J. (2022). *Is heating homes with hydrogen all but a pipe dream? An evidence review*,. *Joule*, p. 3. Opgehaald van <https://doi.org/10.1016/j.joule.2022.08.015>
- RVO. (2021). *Monitor Energiebesparing Gebouwde Omgeving*. Utrecht: RVO.
- RVO. (2022, november 7). *Richtsnoeren voor veilig omgaan met waterstof*. Opgehaald van www.rvo.nl:
<https://www.rvo.nl/onderwerpen/richtsnoeren-waterstof#richtsnoeren-voor-veiligheid>
- RVO. (2022m). *Monitor Verduurzaming Gebouwde Omgeving 2022*. Opgehaald van www.rvo.nl:
<https://www.rvo.nl/sites/default/files/2022-12/Monitor-Verduurzaming-Gebouwde-Omgeving-2022.pdf>
- RVO. (2023, april 17). *wis*. Opgehaald van [rvo.nl](http://www.rvo.nl): <https://www.rvo.nl/subsidies-financiering/wis>
- RVO. (2023wis, april 17). *Warmtenetten Investeringsubsidie (WIS)*. Opgehaald van www.rvo.nl:
<https://www.rvo.nl/subsidies-financiering/wis>
- RvS. (2022). *Meedenkers over vleermuizen in spouwmuren*. Opgehaald van www.raadvanstate.nl:
<https://www.raadvanstate.nl/contact/meedenkers-vleermuizen-in-spouw/>
- Savelkoul, J. (2022, augustus 16). *Softwarebedrijf haalt €10 mln op voor digitale kopieën van warmtenetten*. *Energiea*, pp. x-y.

- SCAN. (2022, maart 9). *Nieuws*. Opgehaald van [scanaardwarmte.nl](https://scanaardwarmte.nl/landelijke-seismische-campagne-afgerond-scan-verzamelt-1800-kilometer-nieuwe-ondergronddata/):
- Schilder, F., & van der Staak, M. (2022). *Besturen in het begin van de warmtetransitie*. Opgehaald van [www.pbl.nl](https://www.pbl.nl/publicaties/besturen-in-het-begin-van-de-warmtetransitie): <https://www.pbl.nl/publicaties/besturen-in-het-begin-van-de-warmtetransitie>
- Schöne, S. (2022, November 24). *Het laagspanningsnet wordt het volgende knelpunt*. Opgehaald van Energiepodium: <http://www.energiepodium.nl/artikel/het-laagspanningsnet-wordt-het-volgende-knelpunt>
- SCP. (2021). *Woningverduurzaming: kunnen en willen betekent nog niet doen; Drijfveren en ervaren barrières bij woningverduurzaming*. Den Haag: SCP.
- SCP. (2021a). *Kwesties voor het kiezen 2021*. Den Haag: SCP. Opgehaald van <https://www.scp.nl/publicaties/publicaties/2021/03/10/kwesties-voor-het-kiezen>
- SCP. (2021b, 3 11). *Samenvatting kwestie van meedoen aan woningverduurzaming*. Opgehaald van [digitaal.scp.nl](http://digitaal.scp.nl/pdf/kwesties-voor-het-kiezen-2021/samenvatting-kwestie-meedoen-aan-woningverduurzaming.pdf): <http://digitaal.scp.nl/pdf/kwesties-voor-het-kiezen-2021/samenvatting-kwestie-meedoen-aan-woningverduurzaming.pdf>
- SER. (2013). *Energieakkoord voor duurzame groei*. Den Haag: SER. Opgehaald van <https://open.overheid.nl/repository/ronl-archief-2c12d99a-e816-4e93-a199-f9e9feef318c/1/pdf/energieakkoord-voor-duurzame-groei.pdf>
- SER. (2019). *Klimaatakkoord*. Den Haag: SER. Opgehaald van <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2019/06/28/klimaatakkoord>
- SER. (2020). *Biomassa in balans; Een duurzaamheidskader voor hoogwaardige inzet van biograndstoffen*. Den Haag: Sociaal-Economische Raad.
- Sipma, J. (2021). *De zoektocht naar een gelijkwaardig alternatief op basis van het werkelijk energiegebruik, als equivalent voor de 'BENG2 Eindnorm 2050' binnen de utiliteitssector*. Opgehaald van [repository.tno.nl](https://repository.tno.nl/islandora/object/uuid%3A457a44f9-e882-41d2-89f3-0a1b245a1e01): <https://repository.tno.nl/islandora/object/uuid%3A457a44f9-e882-41d2-89f3-0a1b245a1e01>
- Sipma, J. (2022k, oktober 28). *Het werkelijk energiegebruik van kantoren in het jaar 2019, opgedeeld naar EPA labelklassen, als input voor de ontwikkeling van een EnergieKompas door Innax, TVVL en DGBC*. Opgehaald van [repository.tno.nl](https://repository.tno.nl/islandora/object/uuid%3A972c65d7-a9fe-4ddb-9e95-71796edc7f51): <https://repository.tno.nl/islandora/object/uuid%3A972c65d7-a9fe-4ddb-9e95-71796edc7f51>
- SNM. (2022). *Gasmonitor 2022*. Utrecht: Stichting Natuur en Milieu. Opgehaald van <https://natuurenmilieu.nl/app/uploads/Gasmonitor-2022.pdf>
- SNM. (2022, september). *Gasmonitor 2022; Marktcijfers warmtetechnieken*. Opgehaald van [natuurenmilieu.nl](https://natuurenmilieu.nl/app/uploads/Gasmonitor-2022.pdf): <https://natuurenmilieu.nl/app/uploads/Gasmonitor-2022.pdf>
- SodM. (2022, december 1). *Waterstofproject in Lochem kan veilig van start*. Opgehaald van [www.sodm.nl](https://www.sodm.nl/actueel/nieuws/2022/12/01/inspectierapport-initiatie--en-opstartfase-waterstofpilot-lochem): <https://www.sodm.nl/actueel/nieuws/2022/12/01/inspectierapport-initiatie--en-opstartfase-waterstofpilot-lochem>
- Steevensz, L., & Harten, A. v. (2023, februari 21). *Utrecht dwingt woningen van het gas af, een voorbode voor de toekomst?* Opgehaald van www.omgevingsweb.nl: <https://www.omgevingsweb.nl/nieuws/utrecht-dwingt-woningen-van-het-gas-af-een-voorbode-voor-de-toekomst/>
- Stichting PHH. (2023, mei 19). *www.passieffhuis.nl*. Opgehaald van [Wat is en passieffhuis?](https://www.passieffhuis.nl/wat-is-een-passieffhuis/): <https://www.passieffhuis.nl/wat-is-een-passieffhuis/>
- Teunis, T. (2023). *Literatuurreview verwarmen met waterstof*. Den Haag: PBL.

- Tiktak, A., Boezeman, D., van den Born, G. J., & van Hingsberg, A. (2021). *Quickscan van twee beleidspakketten voor het vervolg van de structurele aanpak stikstof*. Den Haag: Planbureau voor de leefomgeving.
- TKI. (2020, april 4). *De ontwikkeling en kansen van warmtepompen*. Opgehaald van www.topsectorenergie.nl: <https://www.topsectorenergie.nl/tki-urban-energy/kennisdossiers/de-ontwikkelingen-en-kansen-voor-warmtepompen>
- TKI Urban energy. (2020, juli 24). *Kennisdocument verduurzaming utiliteitsbouw*. Opgehaald van www.topsectorenergie.nl: [https://www.topsectorenergie.nl/sites/default/files/uploads/Urban%20energy/publicaties/Kennisdocument%20overduurzaming%20utiliteitsbouw%20\(007%20openbaar\).pdf](https://www.topsectorenergie.nl/sites/default/files/uploads/Urban%20energy/publicaties/Kennisdocument%20overduurzaming%20utiliteitsbouw%20(007%20openbaar).pdf)
- TNO. (2016). *Verkleinen van het verschil tussen voorspeld en werkelijk energiegebruik door betere inschatting van gebruikersgedrag*, TNO 2016 R11482. Den Haag: TNO.
- TNO. (2021). *Eindgebruikerskosten, Technische achtergrondrapportage*. Amsterdam: TNO - Energie Transitie.
- TNO. (2021b). *Duiding van de eindgebruikerskosten voor het aardgasvrij maken van Nederlandse woningen. Rapport TNO2021 P12146*. Den Haag: TNO. Opgehaald van <https://repository.tno.nl/islandora/object/uuid%3A7d19ac7a-b8b5-49d3-8c5d-467ea7d84092>
- TNO. (2021d). *Dashboard Eindgebruikerskosten*. Opgehaald van energy.nl: <https://energy.nl/tools/dashboard-eindgebruikerskosten/>
- TNO. (2022). *Koopkrachtcrisis vraagt om bouwvakkers in plaats van deurwaarders*. Den Haag: TNO. Opgehaald van <https://www.tno.nl/nl/newsroom/2022/10/bouwvakkers-plaats-deurwaarders-strijd/>
- TNO. (2022w). *Financiering warmtenetten*. TNO, Energie Transitie. Amsterdam: TNO.
- TNO. (2024e). *Verkenning van toekomstige ontwikkelingen en uitdagingen voor een klimaatneutraal elektriciteitssysteem in Nederland, 2030-2050, Achtergrondrapport bij de PBL studie Trajectverkenning Klimaatneutraal Nederland 2050*. Den Haag: TNO.
- TNO en CPB. (2023, april 6). *Inkomenseffecten van woningisolatie naar de isolatiestandaard*. Opgehaald van cpb.nl: <https://www.cpb.nl/inkomenseffecten-van-woningisolatie-naar-de-isolatiestandaard>
- van den Brom, P., Berben, J., Valk, H., & Nuiten, P. (2022, juli 15). *Maatwerkadvies NTA8800; Een omschrijving van de aangepaste parameters en de validatie procedure*. Opgehaald van documenten.isso.nl: https://documenten.isso.nl/s/uSoHK7Om2kkgKFdnI9bkT5ggqSsr4ZY4b/20220715_validatierapportage_MWA_v1.1.pdf
- van den Brom, P., Meijer, A., & Visscher, H. (2018). Performance gaps in energy consumption: household groups and building characteristics. *Building Research & Information*, 46(1), pp. 54-70.
- van den Wijngaart, R., & van Polen, S. (2020). *Bepaling energiebesparing door isolatie van woningen in de Startanalyse 2020; Schatting op basis van gemeten en berekend aardgasverbruik*. Den Haag: PBL.
- van der Belt, H. (2021). *Towards energy efficiency in Dutch Social Housing*. Delft: TU-Delft-UEI.
- van der Molen, F., & al., e. (2023). *Overzicht transitievisies warmte*. Den Haag: PBL.
- van der Molen, F., van Polen, S., van den Wijngaart, R., Tavares, J., van Bommel, B., Langeveld, J., & Hoogervorst, N. (2021). *Functioneel ontwerp Vesta MAIS 5.0*. Den Haag: PBL.
- van Kempen, M. (2022, juli 22). *Versnellen naar waterstof: wanneer zijn we H2-ready?* Opgehaald van www.duurzaamgebouwd.nl: https://www.duurzaamgebouwd.nl/artikel/20220722-versnellen-naar-waterstof-wanneer-zijn-we-h2-ready?utm_source=Nieuwsbrief&utm_medium=email&utm_campaign=Nieuws

- brief%2027%20juli%202022&utm_content=Lees%20meer%20Versnellen%20naar%20waterstof:%20w
- van Polen, S., van den Wijngaart, R., van Bommel, B., Hoogervorst, N., Luteijn, G., van der Molen, F., & Latino Tavares, J. (2022). *Startanalyse aardgasvrije buurten 2020; Achtergrondrapport*. Den Haag: PBL.
- Van Rijn, E., Muijsson, B., Jansen, A., van Brakel, D., Rens, D., & de Vries, A. (2020). *Impactanalyse streefdoel 2030*. Brink Management Advies. Opgehaald van <https://open.overheid.nl/documenten/ronl-2b929aec-823d-4778-b35b-aa957a34cd9f/pdf>
- van Rossum, W. (2022). *The impact op heat load on the business case of MT DH systems; master thesis*. Utrecht: Utrecht University.
- Vringer, K., Boomsma, M., & van Soest, D. (2021). *Energieverbruiksmanagers in Nederland; energie besparen met de slimme meter*. Den Haag: PBL.
- VRO. (2022). *Programma Woningbouw*. Den Haag: Ministerie BZK. Opgehaald van <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2022/03/11/programma-woningbouw>
- Wegatech. (2023, februari). *Komt bald das Verbot der Gasheizung?* Opgehaald van www.youtube.com:https://youtu.be/TzFnShpWums
- Wetzels, W., Hoogervorst, N., Van Beijnum, B., Daniëls, B., & Strengert, B. (2024). *Vier trajecten naar een klimaatneutrale gebouwde omgeving; Achtergrondstudie ten behoeve van het TVKN-project*. Den Haag: PBL.
- WRR. (2023). *Rechtvaardigheid in klimaatbeleid; Over de verdeling van klimaatkosten*. Den Haag: WRR.
- Zoogdiervereniging. (2023, januari 11). *Reactie 28 Zoogdiervereniging, Vleermuizenwerkgroep Nederland*. Opgehaald van www.raadvanstate.nl:https://www.raadvanstate.nl/contact/meedenkers-vleermuizen-in-spouw/

Bijlage 1: Toelichting op kostenberekeningen in de Startanalyse 2020

Startanalyse 2020 belangrijkste databron

Bij de vergelijking van de vier trajecten naar een klimaatneutrale gebouwde omgeving spelen kosten een belangrijke rol. De kostenberekeningen die hiervoor zijn gebruikt, zijn ontleend aan de Startanalyse aardgasvrije buurten 2020; een studie van PBL om gemeenten informatie te geven voor de selectie van technische opties voor de transitie naar aardgasvrije buurten. De kenmerken van die opties zijn beschreven in het Gemeenterapport (PBL, 2020g), de resultaten zijn gepubliceerd op een website (PBL, 2020w) waar voor elk van de ruim 13.600 buurten in Nederland een tabellenboekje met resultaten gedownload kan worden. Die website biedt ook een samenvatting van de belangrijkste uitgangspunten en kaarten met de belangrijkste resultaten.

De Startanalyse presenteerde nationale kosten (zie volgende paragraaf) van 24 technische opties voor klimaatneutraal verwarmen van woningen en utiliteitsgebouwen. Nationale kosten worden in dit rapport gebruikt om te onderzoeken welke opties voor Nederland als geheel tegen de laagste kosten gerealiseerd zouden kunnen worden. Van die opties zijn een jaar later ook de eindgebruikerskosten berekend (TNO, 2021b). Die kostencijfers worden in dit rapport gebruikt om te onderzoeken welk deel van de nationale kosten bewoners en gebouweigenaren gaan betalen als de huidige en aangekondigde belastingen en subsidies niet worden aangepast.

Sinds het verschijnen van beide studies zijn de kosten van aardgas, elektriciteit en verwarmingsinstallaties flink gestegen. Consumptiegoederen en diensten werden in 2022 gemiddeld 10% duurder. Het is nog niet duidelijk hoeveel de kosten van klimaatneutrale energiedragers en efficiënte verwarmingsinstallaties zoals warmtepompen zijn gestegen en of de kostenstijging verschilt per type investering. Voor de analyse in dit rapport zijn vooral de toekomstige kostenverschillen tussen aardgasvrije opties van belang en niet zozeer de absolute hoogte van die kosten. Het vertrekpunt van de analyse is immers dat Nederland in 2050 zijn gebouwen klimaatneutraal gaat verwarmen. In deze trajectverkenning onderzoeken we (onder andere) op welke manier dat tegen de laagste nationale kosten gerealiseerd zou kunnen worden. We veronderstellen dat de kostenverschillen die in de Startanalyse zijn berekend nog steeds een goede indicatie geven van de kostenverschillen die de komende jaren verwacht kunnen worden.

Het begrip Nationale Kosten

Nationale kosten zijn kosten die de samenleving (de natie) moet maken om over goederen of diensten te kunnen beschikken. Ze hebben vaak betrekking op productiekosten, soms op kosten van import. De nationale kosten van aardgas worden afgeleid van de groothandelsprijzen op de internationale gasmarkt TTF. De nationale kosten van groene stroom, groengas en klimaatneutrale waterstof zijn afgeleid van de verwachte productiekosten in Nederland. Die duurzame energiedragers zouden (op termijn) ook geïmporteerd kunnen worden, maar internationale groothandelsmarkten voor deze goederen bestaan nog niet en kunnen dus niet gebruikt worden om kostenramingen op te baseren. Nationale kosten van apparaten en installaties zijn afgeleid van marktprijzen (voor zover beschikbaar) en worden gecorrigeerd voor subsidies, belastingen en heffingen. Die kostencomponenten zijn wel relevant voor eindgebruikers – de burgers en bedrijven die producten kopen – maar hebben geen invloed op de kosten die alle ingezetenen tezamen betalen. Subsidies zijn overdrachten van de ene groep burgers (namelijk de belastingbetalers) aan een andere groep burgers,

net als belastingen en heffingen. Subsidies, belastingen en heffingen hebben dus wel invloed op de verdeling van de nationale kosten, maar niet op de absolute hoogte ervan⁹⁷. Beide aspecten zijn belangrijk. Over het algemeen wordt er meer politieke strijd gevoerd over de verdeling van kosten dan over beperking van de hoogte van de totale nationale kosten. Het eerlijk verdelen van kosten is over het algemeen eenvoudiger naarmate het om kleinere bedragen gaat. Daarom is het wenselijk de warmtetransitie zo in te richten dat de nationale kosten geminimaliseerd worden. In het Klimaatpakket is daarom afgesproken dat gemeenten bij het opstellen van hun Transitievisies Warmte gaan programmeren op de laagste nationale kosten. De Startanalyse aardgasvrije buurten (PBL, 2020w) heeft gemeenten de daarvoor benodigde kostenramingen beschikbaar gesteld.

Prijspeil 2018 en 2019

In de Startanalyse 2020 zijn de nationale kosten van energiedragers en installaties uitgedrukt in euro's van 2018 (PBL, 2022a).

De nationale kosten van isolatiemaatregelen zijn gebaseerd op een rapport van Arcadis uit 2019 en bewerkt en geleverd door TNO. Hoewel TNO vermeldt dat die kosten zijn uitgedrukt in euro's van 2019 (TNO, 2021), is niet uit te sluiten dat ze in euro's van 2018 zijn gegeven, gezien de herkomst van die data. Die kosten van TNO zijn ook gebruikt voor berekening van eindgebruikerskosten van de verwarmingsopties die in de Startanalyse zijn geanalyseerd. In 2019 was de inflatie 2,6%, bepaald met de consumentenprijzenindex.

Kosten in 2030 van maatregelen tot 2050











Om de (nationale) kosten van de warmtetransitie te kunnen bepalen, is informatie nodig over de hoeveelheid maatregel die genomen moeten worden en over de kosten per maatregel. De hoeveelheid te nemen maatregelen kan worden afgeleid van wat nodig is om de hele gebouwde omgeving in 2050 klimaatneutraal te kunnen verwarmen. In de Startanalyse zijn daarvoor 24 technische opties gedefinieerd, gegroepeerd in 5 strategieën, zie Figuur 39. Bij elke optie is per gebouw bepaald welke maatregelen nog genomen moeten worden op de optie te realiseren. Die maatregelen moeten uitgevoerd worden in de periode tussen nu (2019) en 2050.

Voor het totale aantal te nemen maatregelen is de timing van de realisatie onbelangrijk, maar die timing heeft wel invloed op de te maken kosten. Het is zeker dat de kosten van maatregelen de komende jaren zullen veranderen. Van maatregelen of installaties die nu nog relatief nieuw zijn, zoals warmtepompen en elektrolyzers, wordt een substantiële kostendaling verwacht als gevolg van innovatie, opschaling en standaardisatie. Voor een gedetailleerde kostenraming zou de fasering van de uitvoering van maatregelen bekend moeten zijn en gekoppeld moeten worden aan een prognose van de kostenontwikkeling tot 2050 van alle maatregelen. Zowel die fasering als zo'n kostenprognose zijn helaas onbekend.

⁹⁷ Deze bewering klopt niet helemaal als buitenlandse burgers en bedrijven ook subsidie ontvangen en/of belasting en heffingen betalen. Bij de warmtetransitie in de gebouwde omgeving is de financiële betrokkenheid van buitenlandse burgers en bedrijven waarschijnlijk relatief gering.

Figuur 38

Vijf strategieën voor aardgasvrij verwarmen in de gebouwde omgeving. Bron: Startanalyse 2020

Infrastructuur	 Elektriciteit	 Warmtenet met MT-bron	 Warmtenet met LT-bron	 Groengas	 Waterstof
Isolatieniveau					
Warmtebron of -productie	50°C Lucht-WP Bodem-WP	>70°C Restwarmte Geothermie Groengas in hulpketels	30, 50, 70°C Restwarmte Water-WP Bodem-WP Aquathermie WKO	>70°C Hybride WP HR-ketel	>70°C Hybride WP HR-ketel

Tabel 62

Toelichting en codes van de onderzochte aardgasvrije strategieën en varianten

Code	Naam strategie	Warmtebron of -installatie	schillabel	variant-code
S1	Individuele elektrische warmtepomp	- Lucht-warmtepomp (WP)	- B+	- S1a
S1		- Bodem-WP	- B+	- S1b
S2	Warmtenet met MT-HT-bronnen	- MT-restwarmte - MT-geothermie - MT-geothermie overall	- B+ en D+ - B+ en D+ - B+ en D+	- S2a,d - S2b,e - S2c,f
S3	Warmtenet met LT-bronnen	- LT-warmtebron, levering 30°C	- B+	- S3a
		- LT-warmtebron, levering 70 °C	- B+ en D+	- S3b,f
		- WKO, levering 70 °C, hele buurt	- B+ en D+	- S3c,g
		- WKO, levering 50 °C	- B+	- S3d
		- TEO+WKO, levering 70 °C	- B+ en D+	- S3e,h
S4	Groengas	- Hybride-WP	- B+ en D+	- S4a,c
		- HR-ketel	- B+ en D+	- S4b,d
S5	Waterstof	- Hybride-WP	- B+ en D+	- S5a,c
		- HR-ketel	- B+ en D+	- S5b,d

Voor het doel van de Startanalyse is zo'n gedetailleerde kostenraming echter niet nodig. Om per buurt of gemeente te kunnen bepalen welke optie de laagste nationale kosten heeft, is het belangrijker om een goede indicatie te hebben van de kostenverschillen tussen de opties dan van de absolute hoogte van die kosten. In de Startanalyse is daarom de hypothese gehanteerd dat schattingen van maatregelkosten in 2030 een bruikbare indicator zijn van de kostenverschillen die in de periode tot 2050 gaan optreden tussen de 24 onderzochte opties. Die maatregelkosten in 2030 zijn afgeleid van de huidige maatregelkosten (in 2018 en 2019) en van de verwachtingen onder deskundigen van

de kostenmutaties die de komende jaren gaan optreden als gevolg van het nakomen van de afspraken die in het Klimaatakkoord zijn gemaakt.

Die benadering betekent dat de nationale kosten van de warmtetransitie in de Startanalyse worden berekend door het aantal (tot 2050) te nemen maatregelen te vermenigvuldigen met de maatregelkosten in 2030. Dat maakt het ook lastig om te spreken van de kosten in een bepaald jaar. De totale kosten in 2030 zullen lager zijn dan wat op deze manier is berekend omdat in 2030 nog (lang) niet alle (tot 2050 benodigde) maatregelen genomen zullen zijn. De kosten in 2050 zullen ook afwijken van het berekende bedrag omdat de maatregelkosten in 2050 lager of hoger zullen zijn dan die in 2030, maar niemand weet hoeveel. Om die reden zou het correct zijn om de kostenraming niet te voorzien van een jaartal.

Gezien de onzekerheid in toekomstige kosten, is in de Startanalyse voor elk maatregel- en energietype een bandbreedte voor de kosten in 2030 bepaald. Daarmee is een (beperkte) gevoeligheidsanalyse uitgevoerd. De resultaten daarvan staan voor elke buurt op de website (PBL, 2020w). Een van onderstaande paragrafen toont de effecten van hogere of lagere kosten van maatregelen en energiedragers op de nationale kosten van zes aardgasvrije verwarmingssystemen met schillabel B.

Investerings- en jaarlijkse kosten

Investeringskosten hebben betrekking op kosten van maatregelen die langer dan 1 jaar effect hebben. Vaak gaat het om isolatiemaatregelen of de aankoop van een bepaald type verwarmingsinstallatie zoals een warmtepomp of een lage-temperatuurradiator. De hoogte van een investering in 2030 is bepaald door het gemiddelde investeringsbedrag (van een maatregel) in 2018 te vermenigvuldigen met een index die de verwachte kostenontwikkeling tussen 2018 en 2030 aangeeft, zie Tabel 62.

Tabel 63

Investeringskosten in 2018 en 2030 en technische levensduur per type maatregel conform de Startanalyse 2020, in euro per woning.

Type maatregel	Gemiddelde investering in 2018 (euro ₂₀₁₈)	Verwachte* kostenmutatie 2018-2030 (index)	Gemiddelde investering in 2030 (euro ₂₀₁₈)	Technische levensduur (jaar)
Isolatiemaatregelen, bv rijtussenwoning F naar B	9.964	100 – 91 – 82	9.067	30
Hybride warmtepomp in woningen	2.315 €/aansl. + 250 €/kW	100 – 77,5 – 55	1.794 €/aansl. + 194 €/kW	15
Elektrische luchtwarmtepomp in woningen	4.998 €/aansl. + 410 €/kW	100 – 81 – 62	4048 €/aansl. + 332 €/kW	15
Warmtenetten, 5 MW	1097 €/meter	100 – 89,5 – 79	982 €/meter	30
Geothermiebron	1523 €/kW	100 – 87 – 74	1325 €/kW	40
Verzwaren LS-stroomnet	110 €/meter	100 – 100 – 100	110 €/meter	50

*) Deze kolom toont drie indexen voor respectievelijk geen, gemiddelde en hoge kostendaling. Een volledig overzicht van kosten en kostenmutaties voor alle geanalyseerde typen maatregelen is opgenomen in (van der Molen, et al., 2021).

Investeringskosten worden omgerekend naar jaarlijkse kapitaalkosten met behulp van een afschrijvingsstermijn en een rentepercentage. Bij de berekening van nationale kosten wordt de rente op 3% gesteld, conform de voorschriften voor maatschappelijke kosten-batenanalyses (MKBA's) en wordt de afschrijvingstermijn gelijkgesteld aan de technische levensduur van een maatregel.

Bij de investeringen in energiebesparing gaat het om de *meerkosten* van het verbeteren van bouw- en installatiedelen in plaats van het louter in stand houden van de oorspronkelijke kwaliteit aan het einde van de technisch-economische levensduur. Naast de kosten van gebruikte materialen en benodigde arbeid is ook rekening gehouden met algemene administratiekosten (9,8%), bouwplaatskosten (8%) en een opslag voor winst en risico (3,3%). Kosten van vooronderzoek en vergunningen zijn buiten beschouwing gelaten.

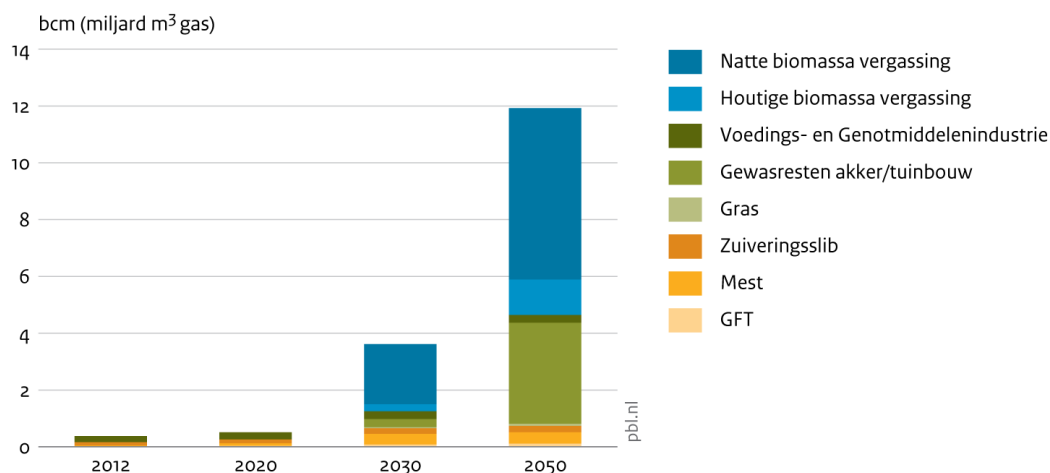
Productiepotentieel, kosten en waarde van groengas

In 2018 werd 9,6 PJ groengas (finale energie) geproduceerd uit 11,1 PJ biogas, vrijwel volledig op basis van (mest)vergisting. In 2030 zou dat volgens een doelstelling uit het klimaatakkoord moeten zijn toegenomen tot 70 PJ (ofwel 2 miljard kubieke meter, bcm) groengasproductie. Dat was gebaseerd op studies van De Gemeynt (De Gemeynt, 2018), New Energy Coalition (2019) en CE Delft (CE Delft, 2020) naar het productiepotentieel van groengas.

Volgens de Gemeynt ligt het *technische* productiepotentieel van groengas op circa 3,6 bcm in 2030 (mix van vergisting en vergassing) en bijna 12 bcm in 2050, zie Figuur 40. Momenteel worden biogas en groengas geproduceerd middels vergisting van allerlei soorten biomassa en dan vooral mest, al dan niet in combinatie met andere (rest)stromen uit de landbouw. De grootste productietoename werd op termijn echter verwacht van thermische en superkritische vergassing; nieuwe technieken die nog volop in ontwikkeling zijn. Inmiddels wordt thermische vergassing beschouwd als een bewezen techniek maar zijn er nog grote twijfels of superkritische vergassing van de grond gaat komen. CE Delft zag voor 2030 een groter technisch potentieel, gebaseerd op een regionale inventarisatie van potentieel beschikbare grondstoffen. Als vergisting de dominante techniek blijft dan zou daarmee 5,1 bcm geproduceerd kunnen worden maar als vergassing snel doorbreekt dan zou 9,8 bcm groengas technisch mogelijk zijn in 2030. Het grotere potentieel komt onder andere door een ruimere inzet van dunne mest waarvan 75% in 2030 beschikbaar kan komen voor vergisting of vergassing (CE Delft, 2020, p. 68). De mestproductie zou echter flink kunnen dalen als besloten wordt de stikstofproblematiek en de tegenvallende reductie van methaan- en N₂O-emissies (deels) op te lossen door inkrimping van de veestapel. In een aantal door PBL onderzochte scenario's⁹⁸ en in de achtergrondrapportage over de landbouwsector in het kader van het TVKN-project (PBL, 2024) gaat het om 30% krimp en meer.

⁹⁸ Het PBL heeft recent twee beleidspakketten geanalyseerd om de stikstofuitstoot uit de landbouw terug te dringen en in beide scenario's werd uitgegaan van een reductie van 30% van de veestapel (Tiktak, Boezeman, van den Born, & van Hingsberg, 2021).

Figuur 39
Technisch potentieel groengas-productie in Nederland



Bron: De Gemejnt 2018

De TVKN-studie over biogronstoffen (uitgevoerd in 2022) komt tot een lager *technisch* potentieel dan CE Delft in 2020 omdat de bijdrage van superkritische vergassing niet meer wordt meegeteld. Beide studies schatten de maximale beschikbaarheid van alle biogronstoffen in 2050 op 268 PJ. De grondstofstromen die vergist kunnen worden (mest, gewasresten, VGI, ONF, GFT, niet-houtige reststromen uit landschappen, slib en de organische fractie van restafval) hebben tezamen een energie-inhoud van 68 tot 113 PJ. De efficiëntie van vergisting is hooguit 90% (maar gemiddeld lager) dus dan zou daaruit – bij een zeer optimistische schatting – ongeveer 60 tot 100 PJ ofwel een kleine 2 tot 3 bcm groengas gemaakt kunnen worden, in 2050 (PBL, 2024bio). Dat is dan beschikbaar voor álle toepassingen in Nederland. Dat zou nog aangevuld kunnen worden met import van groengas maar tot op heden gebeurt dat niet, onder andere doordat er niet kan worden gehandeld in groengascertificaten.

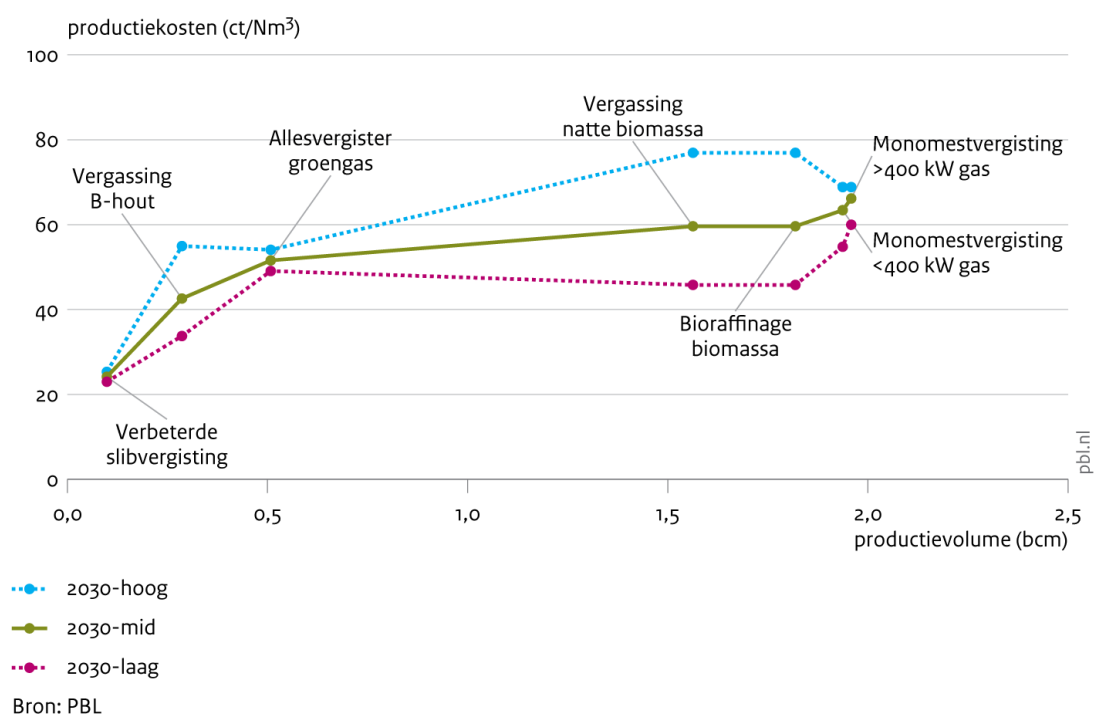
Het *economisch* potentieel van groengasproductie in 2030 schat De Gemejnt op 2 bcm met daarvoor een bescheiden inzet van dierlijke mest. Die studie geeft wel indicaties over mogelijke kostenreductie per techniek tot 2030-50 maar geen kostenraming voor 2030. De studie van CE Delft geeft wel kostenramingen en schat het economisch potentieel afhankelijk van het toekomstig stimuleringsbeleid. Bij gematigd stimuleringsbeleid voor vergisting zou 0,7 bcm groengas geproduceerd kunnen worden in 2030, wat bij sterk beleid kan oplopen tot 1,7 bcm. Wordt het beleid op vooral vergassing gericht, dan zou het in 2030 economisch rendabel zijn om bij gematigd beleid 1,4 bcm te produceren en bij sterk beleid 3,2 bcm. CE Delft concludeerde daaruit in 2020 dat het doel van 2 bcm in 2030 alleen haalbaar is met sterk stimuleringsbeleid dat de productiekosten voor vergisting met 8-16% en die voor vergassing met 34% doet dalen. In een geactualiseerde studie schat CE Delft het economisch potentieel voor 2030 op 1,4 tot 1,6 bcm groengas (CE Delft, 2022gg, p. 43), waarbij rekening is gehouden met 20% minder mestproductie vanaf 2024.

Nationale kosten van groengas in 2030

Voor de analyse van productiekosten van groengas in de Startanalyse 2020 heeft PBL verondersteld dat het ambitieuze productiedoel van 2 bcm in 2030 gehaald wordt en dat de kostendaling die CE Delft aangeeft slechts voor de helft gerealiseerd wordt. Ten behoeve van een gevoeligheidsanalyse heeft PBL ook een laag en hoog kostenniveau geschat, afgeleid van de kostendaling conform de CE

Delft raming (laag) en geen kostendaling vanaf 2018 (hoog). Met deze aannames kan voor groengas een aanbodcurve met bandbreedtes geconstrueerd worden (zie Figuur 41). Die figuur ordent de verschillende productiemethoden van groengas naar oplopende kosten per kubieke meter gas. De figuur laat zien dat mestvergisting in 2030 naar verwachting de duurste techniek is maar dan nog weinig wordt benut. Die figuur laat ook zien dat de onzekerheid over kosten van vergassing veel groter is dan over kosten van vergisting. Als het lukt de kosten van vergassing van natte biomassa te verlagen ten opzichte van 2018 (zie de blauwe stippellijn in Figuur 41), dan kan dat goedkoper worden dan mestvergisting, maar daar zijn nog geen aanwijzingen voor.

Figuur 40
Aanbodcurve groengas in Nederland, 2030

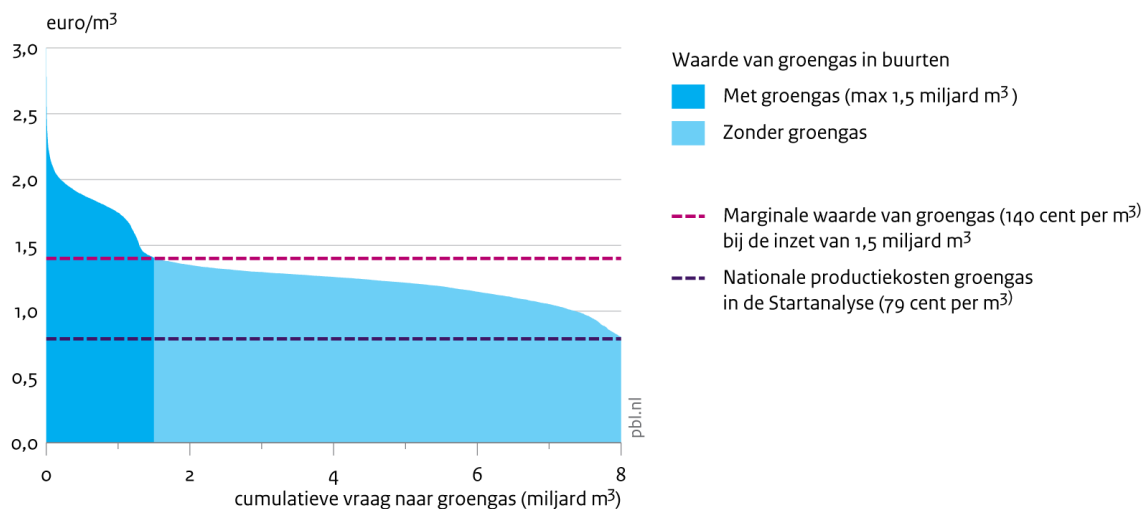


Voor de Startanalyse is de informatie uit Figuur 41 gebruikt om de gemiddelde nationale productiekosten van 2 bcm groengas te bepalen. Bij de gemiddelde productiekosten van 56 cent per kubieke meter zijn 11 cent/m³ opgeteld voor de kosten van opslag van de CO₂ die vrijkomt bij de productie van groengas. Ook is (net als bij aardgas) een vergoeding van 12 cent/m³ in rekening gebracht voor de distributiekosten voor kleinverbruikers. Zo ontstaat een raming van de nationale kosten van groengas in 2030 van 79 cent/m³, met een bandbreedte van 65 tot 95 cent. Ter vergelijking: de nationale kosten van aardgas voor kleinverbruikers in 2030 (inclusief levering en marge) werden in de Startanalyse geschat op 37 cent/m³ (PBL, 2022a).

De waarde van groengas in de gebouwde omgeving

Door groengas te gebruiken voor verwarming van gebouwen, hoeven andere, duurdere verwarmingstechnieken (zoals warmtenetten en elektrische warmtepompen) niet toegepast te worden en kan dus op kosten worden bespaard. Er zijn grote regionale verschillen in de kostenbesparingen die hiermee kunnen worden bereikt. Kennis van die verschillen kan gebruikt worden voor de ruimtelijke allocatie van beperkte hoeveelheden groengas.

Figuur 41
De waarde van groengas in de gebouwde omgeving volgens de Startanalyse 2020



Bron: PBL 2020g, Gemeenterapport Startanalyse 2020

De omvang van die mogelijke besparingen is weergegeven in Figuur 42. Het donkerblauwe deel van die figuur geeft aan hoeveel nationale kosten bespaard kunnen worden door 1,5 miljard m³ groengas (ofwel 1,5 bcm ofwel 53 PJ) toe te passen in de buurten waar het goedkoopste gasloze alternatief duurder is⁹⁹. Tegenover die besparing staan nog wel de kosten van 79 cent/m³ groengas, aangegeven met de paarse lijn in de grafiek. Dat zowel het donkerblauwe als het lichtblauwe deel van de grafiek boven de paarse lijn uit komen, betekent dat verwarmen met groengas in bijna¹⁰⁰ alle buurten de goedkoopste optie is (bij de kostenramingen van alle onderzochte opties in de Startanalyse). Uit de grafiek is ook af te lezen dat bij de bovenkant van de bandbreedte van de geraamde groengaskosten (95 cent/m³) een inzet van circa 7 bcm groengas nog steeds een nationaal kostenvoordeel oplevert.

De roze lijn in de grafiek laat zien dat de kosten van groengas tot 140 cent/m³ kunnen stijgen, voordat inzetten van 1,5 miljard m³ groengas geen nationaal kostenvoordeel meer oplevert.

Met de informatie uit deze figuur kan (in theorie) worden bepaald hoe een bepaalde hoeveelheid groengas over buurten verdeeld kan worden om de totale nationale kosten te minimaliseren. Elke buurt kan de waarde van groengas afleiden uit de lokale kosten van alternatieve verwarmingssystemen. Als nationaal ‘slechts’ 1,5 bcm groengas beschikbaar is, dan moet de waarde van groengas in een buurt hoger zijn dan 140 cent/m³ om aanspraak te kunnen maken op een deel van die 1,5 bcm. De praktijk zal natuurlijk veel ingewikkelder zijn, maar deze benadering kan wel helpen bij de ontwikkeling van een allocatiemechanisme voor groengas binnen de gebouwde omgeving.

⁹⁹ Verwarmen met waterstof is hierbij dus buiten beschouwing gelaten. In de grafiek zijn de buurten geordend naar afnemende nationale kosten van het minst dure alternatief voor groengas.

¹⁰⁰ Alleen in buurten met veel goed geïsoleerde woningen heeft verwarmen met elektrische warmtepompen lagere nationale kosten. Maar dat komt weinig voor en is daarom op de schaal van de figuur niet zichtbaar.

Productiepotentieel, kosten en waarde van waterstof

Het technisch productiepotentieel van blauwe waterstof is (naast de beschikbaarheid van aardgas) vooral afhankelijk van de maximaal beschikbare opslagcapaciteit van kooldioxide. Uitgaande van een maximale opslagcapaciteit van 25 Mton CO₂ per jaar, die volledig wordt benut voor de productie van blauwe waterstof, kan in Nederland per jaar 400 PJ blauwe waterstof worden geproduceerd (Hoogervorst, Waterstof voor de gebouwde omgeving; operationalisering in de Startanalyse 2020, 2020, p. 16).

Het technisch potentieel van de productie van groene waterstof is afhankelijk van de beschikbare hoeveelheid groen geproduceerde elektriciteit¹⁰¹. Uitgaande van een maximale capaciteit van 72 GW wind op zee op het Nederlandse deel van de Noordzee¹⁰² zou 800 PJ aan groene waterstof geproduceerd kunnen worden, naast elektriciteit voor andere toepassingen (Hoogervorst, Waterstof voor de gebouwde omgeving; operationalisering in de Startanalyse 2020, 2020). Elektrolyse is financieel aantrekkelijk op momenten met goedkope stroom, dat wil zeggen bij een overaanbod van elektriciteit uit zon en wind. Dat gaat de komende jaren steeds vaker voorkomen, naarmate de productiecapaciteit van zon- en windparken verder toeneemt. Op grond van bestaande projecten en plannen wordt naar verwachting maar een deel van het technisch potentieel van 800 PJ benut: 42–87 PJ in 2030, 103–212 PJ in 2040 en 172–357 PJ in 2050, waarbij de bovengrenzen zeer ambitieus worden gevonden (PBL, 2024g). Daarnaast kan de binnenlandse beschikbaarheid van waterstof verder toenemen door waterstof te importeren.

Om alle bestaande gebouwen met waterstof te verwarmen is jaarlijks ongeveer 145 PJ waterstof nodig (in combinatie met hybride warmtepompen en matige na-isolatie van woningen), zo blijkt uit de Startanalyse 2020. Voor de verwachte nieuwbouw tot 2050 is nog eens 34 PJ waterstof nodig, zie paragraaf 6.4.4. De hierboven veronderstelde technische productiecapaciteit van waterstof in Nederland zou dus ruim voldoende kunnen zijn voor de behoefte in de gebouwde omgeving maar vooral de industrie en de chemie hebben grotere hoeveelheden waterstof nodig, onder andere voor de productie van synthetische brandstoffen. De mate waarin dat productiepotentieel benut gaat worden, zal vooral bepaald worden door het te voeren stimuleringsbeleid en de kostendaling die de komende jaren gerealiseerd zal worden.

¹⁰¹ Waterstof produceren met grijze stroom leidt tot extra CO₂-uitstoot en past dus niet in trajecten naar klimaatneutraliteit.

¹⁰² Hiermee wordt het scenario 'Nationaal' uit de geactualiseerde CE-Delft-studie Net van de toekomst (Gasunie and Tennet, 2019) aangevuld met 20 GW extra wind op zee.

Nationale kosten van waterstof in 2030

Om de kosten van verwarmen met waterstof te kunnen vergelijken met die van andere klimaatneutrale opties, is voor de Startanalyse 2020 een schatting gemaakt van de te verwachten nationale productiekosten van blauwe en groene waterstof in 2030. Voor *blauwe* waterstof zijn die kosten geschat op 3,61 euro per kilogram met een bandbreedte van 2,40 tot 5,27 €/kg., inclusief kosten van seizoensopslag en CO₂-afvang plus -opslag maar exclusief de distributiekosten van de gasleveranciers. De nationale kosten van *groene* waterstof in 2030 zijn geschat op 3,83 euro per kilogram, met een bandbreedte van 2,80 tot 5,33 €/kg., inclusief kosten van seizoensopslag maar exclusief die van distributie naar afnemers. In Tabel 63 zijn die kosten omgerekend naar kosten per kubieke meter aardgasequivalent (ae) om ze te kunnen vergelijken met die van groengas en aardgas. Daar blijkt dat de productiekosten van waterstof in 2030 naar verwachting vier keer zo hoog zijn als die van aardgas en anderhalf keer zo hoog als die van groengas.

Tabel 64

Nationale productiekosten* van blauwe en groene waterstof in 2030, vergeleken met die van groengas en aardgas. Bron: (Hoogervorst, 2020)

	Blauwe waterstof (€/kg H ₂)	Groene waterstof (€/kg H ₂)	Blauwe waterstof (€/m ³ ae)	Groene waterstof (€/m ³ ae)	Groengas (€/m ³ ae)	Aardgas (€/m ³ ae)
Laag	2.40	2.80	0.63	0.74	0.53	0.15
Midden	3.61	3.83	0.95	1.01	0.67	0.25
Hoog	5.27	5.33	1.39	1.41	0.83	0.35

**) De kosten zijn uitgedrukt in euro per kilogram waterstof (€/kg H₂) en in euro per kubieke meter aardgasequivalent (€/m³ ae). De waterstofkosten zijn opgebouwd uit energiekosten, productiekosten (opex + capex), kosten van seizoensopslag en (bij blauwe H₂) kosten van CO₂-afvang en opslag.*

De groothandelsprijzen van aardgas zijn in 2022, als reactie op de oorlog in Oekraïne, gestegen naar 150 tot 200 €/MWh, wat ongeveer overeenkomt met 1,50 tot 2 €/m³. Medio 2023 was dat weer gedaald naar 0,35 – 0,40 €/m³ maar bij nieuwe onrusten kunnen die prijzen weer snel stijgen. Een (flink) hogere groothandelsprijs van aardgas werkt direct door in de nationale kosten van blauwe waterstof maar heeft relatief weinig invloed op de nationale kosten van groene waterstof en groengas. Dat komt doordat de productiekosten van groene waterstof mede bepaald worden door de nationale productiekosten van elektriciteit uit windparken op zee. Die kosten zijn niet (of indirect)¹⁰³ afhankelijk van de kosten van aardgas. Dat de *marktprijs* van elektriciteit doorgaans stijgt als aardgas duurder wordt, doet daar niets aan af.

Blauwe waterstof werd vooral een rol toegedacht in de snelle opschaling van de vraag naar waterstof. Het is immers een beproefde technologie op basis van een grondstof (aardgas) die altijd ruim voor handen was. Naarmate aardgas langer duur blijft, wordt het nationaal-economisch aantrekkelijker om de productie van groene waterstof te stimuleren. In dat geval zal de toename in het verbruik van waterstof voornamelijk worden bepaald door het tempo waarin de productie van groene waterstof gaat groeien, nieuwe elektrolyzers worden gebouwd en de kosten ervan dalen. Voor een meer diepgaande analyse van de toekomstige kosten van waterstof en het te verwachten tempo van productie-uitbreiding wordt verwezen naar de waterstofrapportage (PBL, 2024g).

¹⁰³ Hogere energieprijzen leiden tot hogere kosten van staalproductie en zo tot duurdere windturbines.

In diezelfde analyse uit 2022 kwam PBL tot ramingen¹⁰⁴ van *private* kosten voor blauwe en groene waterstof in 2030. Die kosten zijn lastig te vergelijken met de nationale kosten in bovenstaande tabel (zie voetnoot bij de tabel) omdat ze geen rekening houden met kosten van seizoensopslag maar wel met verwachte marktprijzen voor aardgas en elektriciteit, investeringsaftrek, belastingen, inflatie en opbrengsten uit verkoop van gratis verkregen CO₂-emissierechten. Zo komen de private kosten van blauwe waterstof¹⁰⁵ inclusief transport en opslag in 2030 op 1,80 €/kg. Dat is aanmerkelijk lager dan wat in de Startanalyse is gebruikt, maar dat komt deels doordat hier is gerekend met opbrengsten van 0,6 – 0,7 €/kg uit verkoop van gratis verkregen emissierechten.

Voor groene waterstof komt die studie op Nederlandse productiekosten met wind op zee van 4,30 – 6,90 €/kg in 2030 en 3,80 – 6,00 €/kg in 2040 (PBL, 2024g). De IEA schat dat die productiekosten in 2030 al gedaald zijn naar 1,9 – 5,0 \$/kg, onder andere omdat elektrolyzers sneller goedkoper worden (IEA, 2022). De mondiale productiekosten zouden na 2030 kunnen dalen naar 2 – 1,5 \$/kg rond 2050 (DNV, 2022). Dit betekent dat toekomstige kosten van groene waterstof erg onzeker zijn en vermoedelijk pas na 2030 gaan dalen naar (en onder) niveaus die in de Startanalyse zijn gebruikt. Gezien de recente afbouw van de import van aardgas, ligt een snelle uitbreiding van de productie van blauwe waterstof nu minder voor de hand. Omdat uitbreiding van groene waterstofproductie de laatste jaren veel aandacht kreeg, zijn kostenramingen van groene waterstof waarschijnlijk een betere indicatie voor nationale waterstofkosten. Dat betekent dat de gehanteerde kostenraming in de Startanalyse (3,61 €/kg ofwel 0,95 €/m³ae) nog steeds een bruikbare indicatie geeft van de kosten van waterstof na 2030.

De waarde van waterstof in 2030

Door waterstof te gebruiken voor verwarming van gebouwen, hoeven andere, duurdere verwarmingstechnieken (zoals warmtenetten en elektrische warmtepompen) niet toegepast te worden en kan dus op kosten worden bespaard. De omvang van die mogelijke besparingen is weergegeven in Figuur 43. Het blauwe vlak in die figuur geeft aan hoeveel nationale kosten bespaard kunnen worden – bij afwezigheid van groengas – door in alle buurten met waterstof te verwarmen. In elke buurt bestaan de besparingen uit de kosten van het goedkoopste gasloze alternatief dat niet aangelegd hoeft te worden als er waterstof beschikbaar komt¹⁰⁶. Tegenover die besparing staan nog wel de kosten van 95 cent/m³ ae waterstof, aangegeven met de paarse lijn in de grafiek. Dat de paarse lijn nergens hoger ligt dan het hele blauwe deel van de grafiek, betekent dat – bij afwezigheid van groengas – verwarmen met waterstof in bijna¹⁰⁷ alle buurten de goedkoopste optie is (bij de kostenramingen van alle onderzochte opties in de Startanalyse).

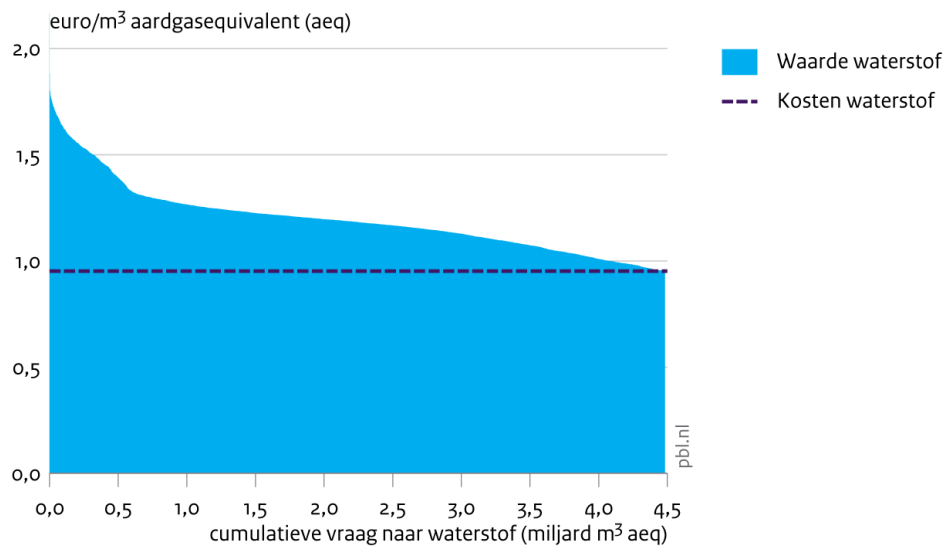
¹⁰⁴ volgens de methodiek voor berekening van basisbedragen voor de toekenning van SDE++-subsidies.

¹⁰⁵ Deze ramingen horen bij 88% CO₂-afvang en een gasprijs van 21,5 €/MWh, wat aansluit bij de gehanteerde veronderstellingen in de Startanalyse. Een verhoging van de gasprijs naar 46,1 €/MWh resulteert in circa 0,9 €/kg hogere kosten (bij de omzettingsrendementen in de hier gekozen varianten).

¹⁰⁶ In de grafiek zijn de buurten geordend naar afnemende nationale kosten van het minst dure alternatief voor waterstof.

¹⁰⁷ Alleen in buurten met veel goed geïsoleerde woningen heeft verwarmen met elektrische warmtepompen lagere nationale kosten. Maar dat komt zeer weinig voor (uiterst rechts in de grafiek) en is daarom op de schaal van deze figuur niet zichtbaar.

Figuur 42
Waarde van waterstof voor de gebouwde omgeving



Bron: PBL, Startanalyse 2020

De grafiek laat zien dat de waarde van waterstof varieert tussen buurten. Dat betekent dat het (nationaal economisch) steeds aantrekkelijker wordt om meer waterstof in de gebouwde omgeving in te zetten naarmate de productiekosten ervan dalen. Zo is uit de grafiek ook af te lezen dat bij de bovenkant van de bandbreedte van de geraamde waterstofkosten (140 cent/m³ aeq) een inzet van circa 0,5 bcm waterstof nog steeds een nationaal kostenvoordeel oplevert.

Gevoeligheid voor gehanteerde kostenramingen voor 2030

Om recht te doen aan de inherente onzekerheid van kostenramingen voor 2030, zijn bandbreedtes opgesteld voor afzonderlijke kostenposten en is in de Startanalyse voor elke buurt een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd. De gehanteerde bandbreedte voor nationale kosten van energiedragers in 2030 staan in Tabel 64. Voor restwarmte is geen bandbreedte bepaald door gebrek aan data. Maar dat is niet erg omdat de kosten van restwarmte minder dan 5% van de totale kosten van een warmtenetsysteem uitmaken.

Tabel 65

Nationale kosten van klimaatneutrale energiedragers in 2030 in de Startanalyse 2020, vergeleken met nationale kosten van aardgas en grijze elektriciteit (PBL, 2022a)

Energiedrager	Eenheid ^{a)}	2019	2030			2030 KEV-2022
			Laag	Midden	Hoog	
Aardgas	€/m ³ ae	0,21	0,15	0,25	0,35	0,49
Groengas	€/m ³ ae		0,53	0,67	0,83	
Blauwe waterstof	€/m ³ ae		0,63	0,95	1,39	
Groene waterstof ^{b)}	€/m ³ ae		0,74	1,01	1,41	
Elektriciteit Grijs	€/MWh	87		101		
Elektriciteit Groen	€/MWh		97	137	162	

b) In euro₂₀₁₈; ae = aardgas-equivalent.

c) In de Startanalyse is gerekend met kosten van blauwe waterstof in plaats van groene omdat dat voor 2030 een meer betrouwbare kostenraming geeft. Na 2030 kunnen de kosten van groene waterstof verder dalen en lager worden dan die van blauwe waterstof.

Voor de berekening in Tabel 22 van de verschillen tussen de nationale kosten (gemiddeld per woningequivalent) in 2030 van aardgasvrije verwarmingssystemen met schillabel B zijn de middenwaarden van de energiekosten uit Tabel 64 gebruikt. Als dezelfde berekening wordt uitgevoerd met de lage energiekosten uit Tabel 64, dan verandert er relatief weinig in de kostenverschillen tussen de systemen, zie Tabel 65, en blijft verwarmen met groengas de optie met de laagste nationale kosten. Dat zelfde geldt voor berekeningen met de hoge energiekosten uit Tabel 64. Hierbij is verondersteld dat de kosten van energiedragers allemaal tegelijk naar de onderkant of bovenkant van de bandbreedte bewegen. Dat is aannemelijk omdat toekomstige productiekosten van klimaatneutrale energiedragers voor een aanzienlijk deel worden bepaald door innovatie en schaalvergroting. Hun kostenontwikkeling is ook gekoppeld doordat die energiedragers fysiek in elkaar (kunnen) worden omgezet: groene stroom wordt groene waterstof en restwarmte; aardgas wordt blauwe waterstof; bij vergisting van biomassa ontstaat groengas en restwarmte. De productiekosten van groengas zijn wellicht minder gekoppeld aan die van groene stroom en klimaatneutrale waterstof. Dat betekent dat bovenstaande conclusie (dat verwarmen met groengas de laagste nationale kosten heeft) kan veranderen als de productiekosten van groengas een afwijkende ontwikkeling gaan vertonen.

Die conclusie wordt pas anders als de middenwaarde van groengas (0,67 €/m³) meer dan 45% hoger wordt dan verondersteld (0,97 €/m³) terwijl de andere energiedragers (en alle overige kosten) op hun middenwaarde blijven. Bij lage energiekosten zou de kostenraming van groengas (0,53 €/m³) meer dan 68% moeten stijgen (voorbij 0,89 €/m³) en bij hoge energiekosten zou de groengasraming (0,83 €/m³) meer dan 23% moeten stijgen (voorbij 1,02 €/m³) om verwarmen met groengas en een hybride warmtepomp duurder te maken dan verwarmen met een elektrische warmtepomp.

Tabel 66

Effect van hogere of lagere kosten van **energie** op de gemiddelde totale nationale kosten van zes aardgasvrije verwarmingssystemen met schillabel B, in euro₂₀₁₈ per weq per jaar in 2030.

	HR-ketel Aardgas	Lucht-wa- ter-warmte- pomp Stroom	MT-net Rest- warmte	LT-net levering 30° Omgevings- warmte + stroom	Hybride warmte- pomp Groengas +stroom	HR-ketel Groengas
Laag	1067	1711	2111	1785	1525	1437
Midden	1221	1824	2208	1893	1669	1606
Hoog	1367	1895	2286	1960	1796	1791

Ook de kosten van investeringen hebben invloed op de kostenverschillen tussen de verwarmingssystemen. Tabel 66 toont de kostenverschillen die ontstaan als de middenwaarde van de energiekosten wordt gecombineerd met een bandbreedte voor investeringskosten van plus en min 20 procent ten opzichte van de middenwaarden die in de Startanalyse zijn gebruikt. Die middenwaarde ligt 9 tot 15 procent onder de kosten in 2019; de helft van de verwachte kostendaling die de afspraken in het Klimaatakkoord zouden bewerkstelligen. Die kostendalingen werden in 2019 al ter discussie gesteld (EIB, 2019) en zijn tot nu toe niet opgetreden. Dat betekent dat een variant met 20% hogere kosten (ten opzichte van de waarden in de Startanalyse) min of meer overeenkomt met constante investeringskosten vanaf 2019. Om het effect van kostenstijging ten opzichte van 2019 te laten zien, is daarom hier ook een variant met 50% hogere kosten doorgerekend. Veranderingen in investeringskosten beïnvloeden de kostenverschillen tussen verwarmingssystemen omdat het aandeel investeringen in de totale kosten verschilt, zie Tabel 22. Warmtenetten hebben relatief veel materiaalkosten omdat een buizenstelsel moet worden aangelegd voor het transport van warm water naar afnemers. All-electric verwarmen heeft relatief hoge investeringen omdat elektrische warmtepompen duur zijn. Uit berekeningen blijkt dat bij alle niveaus van investeringskosten (en middenwaarden voor energiekosten) verwarmen met groengas de laagste nationale kosten blijft houden.

Tabel 67

Effect van hogere of lagere kosten van **investeringen** in netwerken, na-isolatie en installaties op de gemiddelde totale nationale kosten van zes aardgasvrije verwarmingssystemen met schillabel B, in euro₂₀₁₈ per woningequivalent per jaar in 2030.

	HR-ketel Aardgas	Lucht-wa- ter-warmte- pomp Stroom	MT-net Rest- warmte	LT-net levering 30° Omgevings- warmte + stroom	Hybride warmte- pomp Groengas + stroom	HR-ketel Groengas
Laag (80%)	1057	1537	1883	1591	1453	1443
Midden	1221	1824	2208	1893	1669	1606
Hoog (120%)	1385	2112	2532	2195	1885	1770
Hoog (150%)	1631	2543	3019	2648	2208	2016

Bij lage investeringskosten én lage energiekosten is verwarmen met groengas ook de goedkoopste optie, zie Tabel 67. Dat verandert pas als de productiekosten van groengas (in die situatie) hoger worden dan 0,75 €/m³, ofwel 42% boven het geraamde lage kostenniveau. Bij 50% hogere investeringskosten én hoge energiekosten is verwarmen met groengas ook de goedkoopste optie (zie

laatste regel in Tabel 67), totdat de productiekosten van groengas hoger worden dan 1,37 €/m³, ofwel 65% boven het geraamde hoge kostenniveau. De combinaties van lage investeringskosten met hoge energiekosten en omgekeerd, zijn hier niet doorgerekend omdat het niet waarschijnlijk is dat die tegelijk voorkomen.

Tabel 68

Effect van hogere of lagere kosten van **investeringen én energie** op de gemiddelde totale nationale kosten van zes aardgasvrije verwarmingssystemen met schillabel B, in euro₂₀₁₈ per woningequivalent per jaar in 2030.

	HR-ketel Aardgas	Lucht-wa- ter-warmte- pomp Stroom	MT-net Rest- warmte	LT-net levering 30°C Omge- vings- warmte + stroom	Hybride warmte- pomp Groengas + stroom	HR-ketel Groengas
Laag (80%)	904	1424	1786	1483	1310	1273
Midden	1221	1824	2208	1893	1669	1606
Hoog (120%)	1531	2182	2610	2262	2012	1955
Hoog (150%)	1777	2614	3097	2715	2335	2200

Uit bovenstaande beknopte gevoeligheidsanalyse blijkt, dat binnen de opgestelde bandbreedtes voor nationale kosten van energie en investeringen het verwarmen met groengas (gemiddeld) steeds de laagste nationale kosten heeft. Dat beeld verandert pas als de bandbreedte van de productiekosten van groengas met tientallen procenten wordt opgerekt, afhankelijk van de hoogte van de andere kostenposten.

Deze berekeningen voor een gemiddeld gebouw van 1 woningequivalent geven wel een algemeen beeld maar zeggen weinig over de situatie in een bepaalde buurt omdat de nationale kosten per woning bij elk verwarmingssysteem een grote spreiding vertonen. Dat maakt dat de kostenverschillen tussen verwarmingssystemen van buurt tot buurt verschillen. Desondanks zijn de te verwachten nationale kosten¹⁰⁸ van verwarmen met groengas (bij schillabel B) in vrijwel alle buurten en bij 96% van de gebouwvoorraad lager dan die van andere systemen.

Dat kostenvoordeel wordt nog groter als de woningen die groengas gebruiken worden na-geïsoleerd tot schillabel D in plaats van tot schillabel B. De besparingen op isolatiekosten zijn dan gemiddeld hoger dan de extra kosten voor een hoger verbruik van groengas. Bij minder vergaande na-isolatie dalen de gemiddelde totale kosten voor een woning met schillabel D met een HR-ketel op groengas van 1606 euro per weq (zie Tabel 67) naar 1371 euro per weq per jaar. Bij hoge energiekosten en 50% hogere investeringskosten dalen de gemiddelde totale kosten dan van 2200 naar 1833 euro per weq per jaar.

¹⁰⁸ Berekend bij de middenwaarden van alle kostenposten, bij na-isolatie tot schillabel B en bij voldoende beschikbaarheid van groengas.