

**TNO-rapport**

TNO Energietransitie Studies  
Radarweg 60  
1043 NT Amsterdam

[www.tno.nl](http://www.tno.nl)

T +31 88 866 50 10

**TNO 2022 P10584****Trendrapport over verduurzamingsoplossingen  
voor de gebouwde omgeving**

|               |   |
|---------------|---|
| Datum         | 9 december 2022   |
| Auteur(s)     | Vera Rovers, Robin Niessink, Frank Lenzmann,<br>Luuk Engbers, Jorrit Bakker, Renee Kooger |
| Review        | Casper Tigchelaar, Joost Gerdes, Richard van der Gaag                                     |
| Opdrachtgever | TKI Urban Energy  |

Alle rechten voorbehouden.

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

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

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

© 2022 TNO

## Samenvatting

TKI Urban Energy (UE) wil graag een beter beeld krijgen van de ontwikkelingen in de energietransitie om te weten of Nederland op koers ligt om de ambities in het Klimaatakkoord te halen. TNO heeft daarom trendrapporten gemaakt voor verschillende deelprogramma's van de Meerjarige Missiegedreven Innovatieprogramma's (MMIP's) van TKI UE. Deze deelonderwerpen zijn allen belangrijk voor de energietransitie in de gebouwde omgeving (Tabel 1). In de trendrapporten is via interviews met 2-3 experts per onderwerp verkend wat huidige en toekomstige ontwikkelingen zijn ten aanzien van de bestaande woningvoorraad. Elk deelrapport geeft inzicht in wat de geïnterviewde experts de belangrijkste knelpunten, ontwikkelingen en randvoorwaarden vinden om opschaling te realiseren. Daarnaast is de impact van potentiële marktontwikkelingen berekend op de reductie van CO<sub>2</sub>-emissie en nationale kosten.

De potentiële marktontwikkelingen worden afgezet tegen een Basispad, de ontwikkeling volgens de Klimaat- en Energieverkenning (KEV) voor 2030 die gebaseerd is op het vastgesteld en voorgenomen beleid (PBL, 2021). In dit Basispad gaat de energietransitie in de bestaande woningvoorraad nog langzaam: het aantal woningen waar een cv-ketel wordt vervangen door een warmtepomp groeit bijvoorbeeld van 28.000 naar 43.000 in 2030 en het aantal bestaande woningen dat op een warmtenet wordt aangesloten neemt met 84.000 woningen toe. In de bestaande bouw is daarom een versnelling van de energietransitie nodig.

### Randvoorwaarden voor opschaling

Wat opvalt aan de interviews is dat de opschaling in sommige gevallen gebaat is bij (technologische) innovaties, maar vaak ontbreekt het eerder aan; 1) het vertrouwen in en de bekendheid met de technologie en de voordelen ervan; 2) een goede business case waardoor er een *incentive* is om te investeren; en 3) een gunstige context voor de implementatie. Zo is ook het draagvlak voor verduurzaming bij bewoners niet zozeer gerelateerd aan de kenmerken van een product of dienst, maar vooral aan bestaande aannames die bewoners hebben en hun ervaringen met het gehele proces richting duurzaam wonen.

Bij warmtepompen en lage temperatuurwarmtenetten heerst er bijvoorbeeld nog onzekerheid bij woningeigenaren, woningcorporaties, installateurs en warmtebedrijven of de woning met lage temperatuur wel comfortabel verwarmd kan worden. Dat deze systemen ook koeling kunnen leveren, wat een belangrijke rol gaat spelen in de toekomst door toenemende oververhitting in woningen, wordt in de overweging ook nog niet meegenomen. Het bestaan van een industriële aanpak van renovatie van bestaande woningen is nog onbekend waardoor de vraag ernaar erg beperkt is. Verder worden de voordelen van goede ventilatie voor de gezondheid en energiebesparing niet altijd gezien waardoor ventilatie na renovatie vaak onvoldoende is. Ook de toegevoegde waarde van warmteopslag voor een meer gelijkmatige warmtelevering en het ontlasten van het elektriciteitsnet op piekmomenten door buffering wordt nog niet altijd erkend. Onder andere pilot projecten, demonstraties en goede disseminatie van de informatie zouden de aantrekkelijkheid van onbekendere oplossingen kunnen vergroten.

Het ontbreken van een gerechtvaardigde waardering van de voordelen van warmteopslag maakt het ook lastig om een goede business case te realiseren. Ook is hier sprake van een scheve business case waar de opbrengsten (zoals het voorkómen van kosten voor netverzwaring) niet altijd bij de partij terechtkomen die de investering doet. Bij energiecollectieven is de kredietwaardigheid een knelpunt in de toegang tot financiering. Verder vergen alle deelonderwerpen in dit rapport hoge initiële investeringskosten waar niet wordt verwacht dat deze op korte termijn flink zullen dalen. Als de baten ook significant zijn hoeft dit echter niet te betekenen dat er geen goede business case mogelijk is, maar onbekendheid met de technologie kan de financiering bij banken bemoeilijken. De recente stijgingen in de energieprijzen hebben in die zin een gunstig effect, omdat besparingen in energie dan ook een grotere besparing in energiekosten betekent.

Een belangrijke contextuele factor is dat er een tekort is aan (specialistische) arbeidskrachten om de energietransitie uit te voeren en op te schalen. Industriële renovatieconcepten zouden hier een oplossing voor kunnen bieden, maar in de praktijk is daar nog weinig vraag naar. Een belangrijke context bij warmteopslag dat elke locatie uniek is, niet alleen wat betreft de ondergrond, maar ook ten aanzien van de beleidsregels, vergunningsvoorwaarden en toetsingskaders. Om energiegemeenschappen te kunnen opschalen is een helder juridisch kader bijvoorbeeld belangrijk. Een duidelijke visie en beleid vanuit de overheid kan de opschaling van verschillende in dit rapport behandelde deelonderwerpen ondersteunen door een gunstige context te creëren, bijvoorbeeld door middel van subsidies voor ventilatiesystemen en warmteopslag, door meer consistentie aan te brengen in lokale regels en werkwijzen, door te kunnen sturen op prestatie-eisen en deze te kunnen handhaven.

Waar duidelijk naar voren komt dat innovatie nodig is, is bij tapwatersystemen, bij de installatie van warmtepompen en ventilatiesystemen en bij de doorontwikkeling van PV-technologie en warmteopslag. Bij lagetemperatuurverwarming moet een aparte installatie in warmtapwater voorzien waarvoor goede opties momenteel ontbreken en het een knelpunt wordt in de energietransitie. Om de installatie van warmtepompen en ventilatiesystemen te versnellen kunnen plug & play methoden een grote bijdrage leveren aan het verminderen van de benodigde arbeidsuren, kosten en expertise. Om het toepassingsgebied van PV te vergroten is bijvoorbeeld innovatie nodig bij de ontwikkeling van drijvende panelen om corrosie tegen te gaan en bij het ontwerp van PV-parken waarbij landbouw, natuur en elektriciteitsproductie kunnen samengaan. Ook kunnen innovatieve opslagtechnologieën zoals hogetemperatuuropslag (HTO), thermochemische opslagmaterialen (TCM) en phase-changing materials (PCM) nieuwe mogelijkheden bieden om warmte efficiënter, compacter en, op termijn, goedkoper op te kunnen slaan.

### **Impact op CO<sub>2</sub>-emissiereductie en nationale kosten**

Voor een aantal deelonderwerpen is de impact van 3 potentiële marktontwikkelingen berekend:

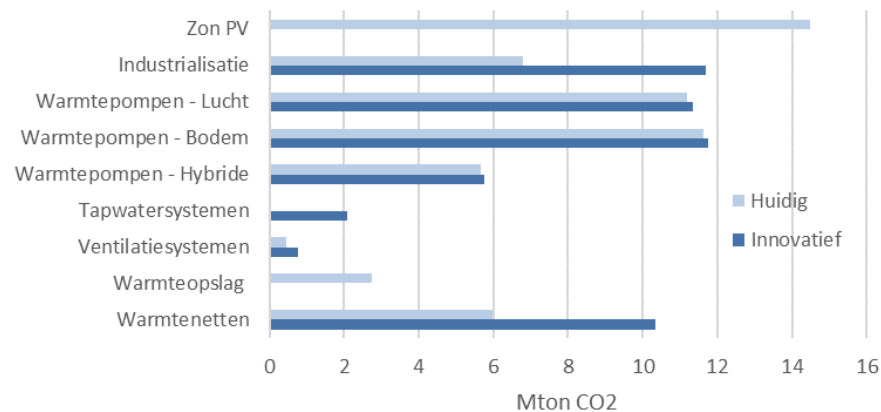
1. Verdubbeling: Een verdubbeling van de toepassing van het deelonderwerp zoals deze in de KEV wordt aangenomen voor 2030
2. Natuurlijk moment: de technologie wordt toegepast wanneer er sprake is van een natuurlijk moment van vervanging

3. Het 'technisch potentieel': de technologie wordt maximaal toegepast.  
Bijvoorbeeld: alle woningen worden uitgerust met een warmtepomp.

De bestudeerde marktontwikkelingen zijn nadrukkelijk geen , maar laten het bereik zien van de mogelijkheden binnen een deelonderwerp. Bij de berekeningen is onderscheid gemaakt tussen de impact van een hoger marktaandeel met de huidige stand van de techniek en een hoger marktaandeel bij een innovatieve toepassing in dit onderwerp. Voor de impactberekeningen is alleen gekeken naar de additionele CO<sub>2</sub>-emissiereductie en nationale kosten van potentiële marktontwikkelingen. Daarmee blijven andere effecten uit beeld en worden niet gekwantificeerd. In de deelrapporten worden de gebruikte kentallen en aannames verder toegelicht.

De totale directe CO<sub>2</sub>-emissie door de woningvoorraad is in de KEV is geraamd op 15,8 Mton in 2020 en, na het uitvoeren van vastgesteld en voorgenomen beleid, op 13,8 Mton in 2030, het Basispad. De marktontwikkeling 'Verdubbeling' leidt niet tot veel extra CO<sub>2</sub>-emissiereductie ten opzichte van het Basispad. Figuur 1 geeft de resultaten weer voor het technisch potentieel en laat zien dat bij Zon PV en warmtepompen (lucht en bodem) met maximale toepassing van de huidige techniek al meer dan 80% van de CO<sub>2</sub>-emissies uit de KEV raming voor 2030 voorkomen zou kunnen worden. Met innovaties als geïndustrialiseerde renovatie en lagetemperatuurwarmtenetten worden veel meer CO<sub>2</sub>-emissies vermeden met dan een klassieke renovatie en middentemperatuurnetten en deze twee onderwerpen komen dan ook rond de 80% reductie uit. Het technisch potentieel laat daarmee zien dat er nog veel ruimte is voor energie- en CO<sub>2</sub>-besparing ten opzichte van de KEV.

### CO<sub>2</sub>-emissiereductie bij het Technisch potentieel



Figuur 1 CO<sub>2</sub>-emissiereductie van het technisch potentieel van verschillende deelonderwerpen in 2030 ten opzichte van 2020. De emissiereductie van de deelonderwerpen kunnen niet bij elkaar worden opgeteld. Bij de 'innovatieve techniek' van Industrialisatie is uitgegaan van volledige schilrenovatie naar niveau 4 van Standaard en Streefwaarden (RVO, 2022), maar een geïndustrialiseerde aanpak is ook mogelijk op gebouwonderdelen.

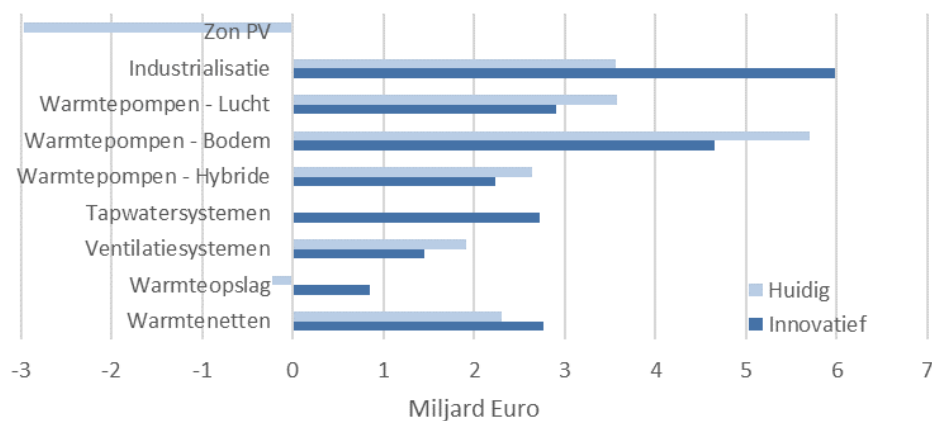
Figuur 2 geeft een overzicht van de nationale kosten, dat wil zeggen het saldo van kosten en baten voor heel Nederland, voor het toepassen van de huidige en de innovatieve variant van de techniek bij benutting van het volledig technisch

potentieel, bepaald ten opzichte van het Basispad. In de grafiek is te zien dat een innovatie soms tot lagere kosten leidt. Bij warmtepompen is bijvoorbeeld een afname in de kosten aangenomen door kostenbesparing bij installatie, transport, opslag en import. Wat betreft ventilatie kan door op een innovatieve manier balansventilatie met warmteterugwinning in bestaande woningen toe te passen extra energie bespaard worden ten opzichte van het meer gebruikelijke mechanische ventilatiesysteem.

Soms zijn er echter ook hogere kosten. Bij renovatie op een geïndustrialiseerde manier in plaats van de klassieke aanpak is aangenomen dat een hoger isolatieniveau wordt bereikt (niveau 4 van Standaard en Streefwaarden in plaats van niveau 3) wat tot veel meer energiebesparing leidt, maar ook hogere kosten. Daarbij moet worden vermeld dat indien het hogere isolatieniveau op de traditionele manier zou worden bereikt de kosten nog hoger zouden zijn. De hogere kosten voor lagetemperatuurnetten ten opzichte van middentemperatuurnetten zijn toe te schrijven aan de aanschafkosten van een apart tapwatertoestel bij lagetemperatuurverwarming. Ook hier staat tegenover de hogere kosten ook een hogere CO<sub>2</sub>-besparing.

Er zijn ook deelonderwerpen met negatieve kosten, oftewel waar de baten hoger uitvallen dan de kosten, zoals bij zonnepanelen. Ook warmteopslag in een ondergrondse laag (aangeduid als de 'huidige techniek') heeft negatieve kosten doordat extra warmte benut kan worden. Warmteopslag in een tank ('innovatieve techniek') is duurder en komt daardoor uit op positieve kosten.

### Nationale meerkosten bij het Technisch potentieel



Figuur 2 Nationale meerkosten van het technisch potentieel van verschillende deelonderwerpen ten opzichte van het Basispad in 2030. De kosten van de deelonderwerpen kunnen niet bij elkaar worden opgeteld. Bij de 'innovatieve techniek' van Industrialisatie is uitgegaan van volledige schilrenovatie naar niveau 4 van Standaard en Streefwaarden (RVO, 2022), maar een geïndustrialiseerde aanpak is ook mogelijk op gebouwonderdelen.

# Inhoudsopgave

## Samenvatting

## Inleiding

- A. **Deelrapport Zon PV**
- B. **Deelrapport Industrialisatie van renovatieconcepten**
- C. **Deelrapport Drijfveren van en barrières voor woningeigenaren**
- D. **Deelrapport Warmtepompen**
- E. **Deelrapport Afgiftesystemen**
- F. **Deelrapport Tapwatersystemen**
- G. **Deelrapport Ventilatiesystemen**
- H. **Deelrapport Kleinschalige warmteopslag**
- I. **Deelrapport Warmtenetten**
- J. **Deelrapport Grootschalige warmteopslag**
- K. **Deelrapport Energiecollectieven**
- L. **Deelrapport Human capital en arbeidsproductiviteit**

## Bibliografie

### Bijlage(n)

|           |   |
|-----------|---|
| Bijlage   | Algemene kentallen                      |
| Bijlage A | Zon PV                                  |
| Bijlage B | Industrialisatie van renovatieconcepten |
| Bijlage D | Warmtepompen                            |
| Bijlage E | Afgiftesystemen                         |
| Bijlage F | Tapwatersystemen                        |
| Bijlage G | Ventilatiesystemen                      |
| Bijlage I | Warmtenetten                            |
| Bijlage J | Grootschalige Warmteopslag              |

# Inleiding

## Aanleiding en vraagstelling

Om de energietransitie (versneld) te realiseren ondersteunt het Topconsortium voor Kennis en Innovatie Urban Energy (TKI UE) innovaties. Zij doet dit door innovatieprogramma's uit te werken, de zogenaamde Meerjarige Missiegedreven Innovatieprogramma's (MMIP's), en door partijen te ondersteunen bij innovatietrajecten. TKI UE werkt aan twee missies: een CO<sub>2</sub>-vrije gebouwde omgeving in 2050 en een volledig CO<sub>2</sub>-vrij elektriciteitssysteem in 2050. TKI UE heeft daarvoor vier verschillende programma's geformuleerd:

- MMIP2: Hernieuwbare elektriciteitsopwekking op land
- MMIP3: Versnelling van energierenovaties in de gebouwde omgeving
- MMIP4: Duurzame warmte en koude in de gebouwde omgeving (inclusief glastuinbouw)
- MMIP5: Elektrificatie van het energiesysteem in de gebouwde omgeving.

Onder de MMIP's vallen verschillende deelprogramma's (zie Tabel 1). Per deelprogramma heeft TKI UE Key Performance Indicators (KPI's) of uitdagingen geformuleerd die cruciaal zijn voor de (versnelde) implementatie van de technologie of toepassing in dat deelprogramma.

TKI UE wil graag een beter beeld krijgen van de ontwikkelingen in de energietransitie om te weten of Nederland op koers ligt om de ambities in het Klimaatakkoord te halen. TKI UE heeft TNO daarom verzocht om voor een aantal deelprogramma's te verkennen wat huidige en toekomstige trends zijn in relatie tot de bestaande woningvoorraad en wat de impact daarvan is. Op basis hiervan kan zij haar innovatieprogramma aanscherpen en eventueel bijsturen.

Dit document bevat meerdere deelrapporten die elk de ontwikkelingen in een deelprogramma beschrijven. Tabel 1 geeft een overzicht van alle deelprogramma's en welke daarvan zijn uitgewerkt in een informatieblad. De selectie van deelprogramma's is hoofdzakelijk gebaseerd op de markttrends die TKI UE heeft geformuleerd. De letters in de tabel verwijzen naar het betreffende blad. Tabblad L is een verdiepend onderwerp ten aanzien van de arbeidsmarkt dat betrekking heeft op meerdere MMIP's.

## Onderzoeksvraag en aanpak

Om een beter beeld te krijgen van ontwikkelingen rond deelprogramma's heeft TNO de vraag van TKI UE in twee delen gesplitst:

1. Wat zijn de ontwikkelingen in een deelonderwerp?
2. Wat is de potentiële impact van opschaling en innovatie-ontwikkeling van het betreffende deelonderwerp?

Tabel 1 Overzicht deelprogramma's MMIP TKI Urban Energy. De letter in de laatste kolom verwijst naar het deelrapport waar het deelprogramma wordt uitgewerkt.

| Deelprogramma   | Titel   | Deelrapport                                |
|---|---|--|
| <i>MMIP2: Hernieuwbare elektriciteitsopwekking op land</i>                              |   |  |
| 1   | Innovaties en breed toepasbare technologische enablers                |  |
| 2a  | Zonnestroomsystemen in de gebouwde omgeving                           | A. Zon PV                                  |
| 2b  | Zonnestroomsystemen in het buitengebied                               |  |
| 2c  | Windparken in het buitengebied  |  |
| 2d  | Overige opties hernieuwbare elektriciteitsopwekking                   |  |
| <i>MMIP3: Versnelling van energierenovaties in de gebouwde omgeving</i>                 |   |  |
| 3.1   | Ontwikkeling van integrale renovatieconcepten                         |  |
| 3.2   | Industrialisatie en digitalisering van het renovatieproces            | B. Industrialisatie van renovatieconcepten |
| 3.3   | Gebouweigenaren en -gebruikers centraal bij energierenovaties         | C. Drijfveren                              |
| <i>MMIP4: Duurzame warmte en koude in de gebouwde omgeving (inclusief glastuinbouw)</i> |   |  |
| 1   | Warmtepompen  | D. Warmtepompen                            |
| 2.1   | Afgiftesystemen   | E. Afgiftesystemen                         |
| 2.2   | Tapwatersystemen  | F. Tapwatersystemen                        |
| 2.3   | Ventilatiesystemen  | G. Ventilatiesystemen                      |
| 3   | Kleinschalige warmteopslag  | H. Kleinschalige Warmteopslag              |
| 4   | Duurzame warmte- en koudenetten                                       | I. Warmtenetten                            |
| 5   | Grootschalige warmteopslag  | J. Grootschalige Warmteopslag              |
| 6   | Geothermie  |  |
| 7.1-7.4   | Bodemwarmte, aquathermie, zonthermie, lage-temperatuur restwarmte     |  |
| <i>MMIP5: Elektrificatie van het energiesysteem in de gebouwde omgeving</i>             |   |  |
| 1   | Elektrificatie op gebouwniveau  |  |
| 2   | Elektrificatie van wijken & bedrijfsterreinen                         | K. Energiecollectieven                     |
| 3   | Nieuwe kaders voor het elektriciteitssysteem van de gebouwde omgeving |  |
| 4   | Elektrische infrastructuur in de gebouwde omgeving                    |  |
| <i>Doorsnijdende thema's die MMIP-overstijgend zijn voor de hele Topsector</i>          |   |  |
|   | Human Capital Agenda (HCA)  | L. Human capital en arbeidsproductiviteit  |

### Ontwikkelingen (kwalitatief)

De ontwikkelingen en innovaties binnen een deelonderwerp worden kwalitatief beschreven op basis van interviews met 2 à 3 experts van het betreffende onderwerp. In deze interviews is ingegaan op:

- Wat zijn de innovaties en ontwikkelingen binnen het deelprogramma en in welk stadium van ontwikkeling bevinden zich deze innovaties?
- In welke mate kunnen ze bijdragen aan de KPI's die binnen MMIP's van TKI UE zijn geformuleerd?



- Wat zijn randvoorwaarden voor verdere ontwikkeling?
- Wat zijn de verwachte ontwikkelingen in de markt en waar is opschaling van afhankelijk?

In de deelrapporten heeft TNO op basis van deze informatie, onder het hoofdstuk 'ontwikkelingen in de technologie', een beeld geschetst van de lopende innovatietrajecten op dit onderwerp en op welke manier deze bij kunnen dragen aan de doelstellingen van het TKI UE deelprogramma. Onder het hoofdstuk 'randvoorwaarden voor opschaling' is samengevat hoe de experts de ontwikkelingen in de markt zien en aan welke randvoorwaarden deze gebonden zijn. Dit kwalitatieve onderdeel geeft daarmee geen volledige beschrijving van het onderwerp en de ontwikkelingen op dit gebied, maar inzicht in wat de geïnterviewde experts zien als de belangrijkste knelpunten, ontwikkelingen en randvoorwaarden om opschaling te realiseren. Enige achtergrondkennis van het onderwerp is daarom ook nodig om de deelrapporten te kunnen begrijpen.

#### *Potentiële impact (kwantitatief)*

In dit deel wordt de potentiële impact van een deelonderwerp op CO<sub>2</sub>-emissies en nationale kosten berekend bij verschillende marktontwikkelingen. TNO heeft nadrukkelijk geen voorspelling gedaan van de marktontwikkeling. De ontwikkeling van het marktaandeel van deelonderwerpen is ook afhankelijk van externe factoren die los staan van de innovatie zelf. De ontwikkeling van energieprijzen, overheidsbeleid en de beschikbaarheid van concurrerende opties hebben een grote invloed op de marktpenetratie van innovaties. Het voorspellen van marktontwikkelingen van innovaties vraagt daarom ook om een zeer uitgebreide analyse van die externe ontwikkelingen. Deze analyse past niet binnen het kader van dit onderzoek. Bovendien sneeuwt in zo'n gecombineerde prognose de rol van innovatie onder, terwijl de rol van technologieontwikkeling centraal staat in de vraag van TKI Urban Energy.

Het is wel belangrijk om te zien wat voor potentie een innovatie kan hebben en hoe groot het verschil is tussen de huidige ontwikkeling en dit potentieel. Dit maakt TNO inzichtelijk door de impact weer te geven bij drie vooraf gedefinieerde, hypothetische marktontwikkelingen. Deze ontwikkelingen zijn hetzelfde genomen voor elke innovatie, waardoor de potentiëlen van de verschillende innovaties met elkaar vergeleken kunnen worden.

1. Verdubbeling: Een verdubbeling van de toepassing van de technologie zoals deze in de KEV wordt aangenomen voor 2030
2. Natuurlijk moment: de technologie wordt toegepast wanneer er sprake is van een natuurlijk moment van vervanging
3. Het 'technisch potentieel': de technologie wordt maximaal toegepast. Bijvoorbeeld: alle woningen worden uitgerust met een warmtepomp.

Deze potentiële marktontwikkelingen worden weergegeven ten opzichte van wat we het Basispad noemen, de ontwikkeling volgens de Klimaat- en Energieverkenning (KEV) voor 2030 die gebaseerd is op het vastgesteld en voorgenomen beleid (PBL, 2021). Daarmee stellen we nadrukkelijk niet dat wij voorspellen dat die gepresenteerde potentiëlen ook gerealiseerd worden. De potentiële marktontwikkelingen laten echter zien aan dat er een groter bereik mogelijk is dan wat er in de KEV wordt geschetst en zijn daarmee een gedachte-experiment over de omvang van de CO<sub>2</sub>-reductie en bijbehorende kosten dan wel baten. Welk deel van de potentiëlen gerealiseerd kan worden hangt sterk af van de keuzes die gemaakt worden in het beleid en of daarmee de juiste randvoorwaarden worden geschapen. De deelrapporten onderzoeken welke randvoorwaarden hiervoor relevant zijn.

### *Onderscheid in doelgroepen*

Per deelonderwerp maken we onderscheid in doelgroepen, zoals eengezins- of meergezinswoningen, of huur- en koopwoningen. Welke indeling relevant is, is afhankelijk van het onderwerp.

### *Impact bij hoger marktaandeel en Impact bij hoger marktaandeel + innovatie*

Voor alle potentiële marktontwikkelingen wordt het effect op de CO<sub>2</sub>-uitstoot en op de nationale kosten en baten berekend ten opzichte van de Klimaat- en Energieverkenning (KEV). De KEV geeft jaarlijks een verwachting van de effecten van vastgesteld en voorgenomen beleid op de CO<sub>2</sub>-uitstoot. Bij het berekenen van de effecten rekent TNO ook zoveel mogelijk met dezelfde onderliggende aannames en kentallen als die ook in de KEV worden toegepast. Een toelichting op deze aannames staat in de bijlagen.

Het potentiële effect op CO<sub>2</sub>-reductie en kosten en baten wordt bepaald door twee factoren: een toename van het marktaandeel van een deelonderwerp en een (efficiëntie-) verbetering van de deelonderwerp zelf. Bij het voorbeeld van warmtepompen kan de penetratiegraad van warmtepompen in woningen toenemen en daarnaast ook het rendement van de warmtepomp zelf. Om het effect van beide ontwikkelingen apart zichtbaar te maken worden er twee resultaten weergegeven:

1. Impact hoger marktaandeel van de huidige techniek: de impact van de technologie of toepassing volgens de huidige stand van ontwikkeling indien deze op grotere schaal wordt geïmplementeerd. De resultaten zijn het effect van een hogere marktpenetratie dan aangenomen in de KEV.
2. Impact hoger marktaandeel met innovatieve techniek: indien een nieuwe ontwikkeling in de techniek een effect heeft op CO<sub>2</sub>-uitstoot of kosten dan wordt ook een impact van deze 'innovatieve techniek' berekend. De schaal van de toepassing van de techniek wordt hetzelfde gehouden als die is bij de 'huidige techniek', maar de kentallen voor de berekening van de impact worden veranderd.

Dit rapport richt zich alleen op een kwantitatieve impactberekening van de CO<sub>2</sub>-emissiereductie en van de nationale kosten. Andere effecten van een hoger marktaandeel of een innovatie blijven daarmee buiten beschouwing, maar zijn uiteraard niet onbelangrijk.

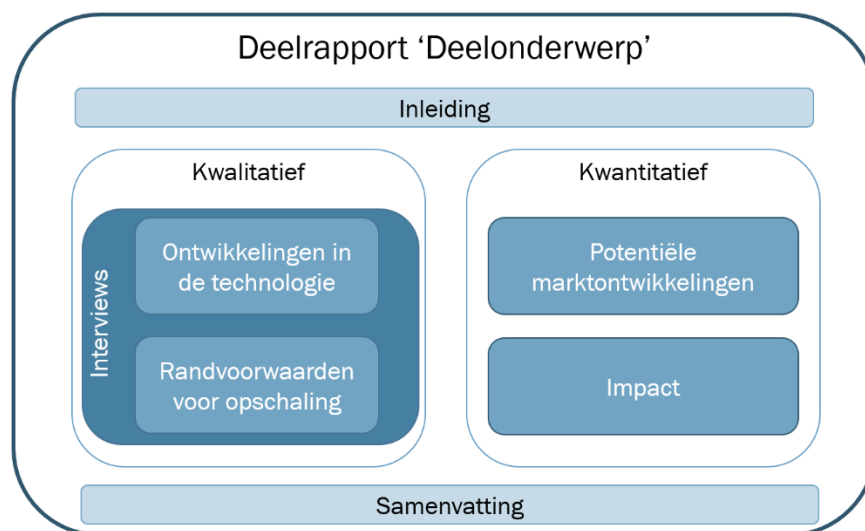
### **Leeswijzer deelrapporten**

Hierna volgen de deelrapporten over de verschillende technologieën. Tabel 2 geeft een overzicht van alle deelrapporten. Elk deelrapport heeft dezelfde opbouw, zie Figuur 3. Na een introductie waarin de context en scope wordt toegelicht, worden de inzichten uit de interviews beschreven onder 'ontwikkelingen (in de technologie)' en 'randvoorwaarden voor opschaling'.

De meeste deelrapporten, behalve C, H, K en L, hebben ook een kwantitatief gedeelte. Dit deel begint met 'potentiële marktontwikkelingen'. Hierin worden de potentiële marktontwikkelingen voor die specifieke technologie uitgewerkt en worden randvoorwaarden en eventueel benodigde innovaties voor deze marktontwikkelingen beschreven. De resultaten van de berekeningen van CO<sub>2</sub>-emissies en nationale kosten staan onder het hoofdstuk 'Impact'. De inzichten uit beide delen worden samengebracht in de samenvatting. Het document sluit af met de bijlagen die een overzicht geven van de kentallen en aannames die voor de berekeningen zijn gebruikt en van de achterliggende resultaten van de impactberekeningen.

Tabel 2 Overzicht deelrapporten

| Deelrapport | Deelonderwerp                           | Kwantitatief |
|-------------|---|--------------|
| A           | Zon PV                                  | ✓            |
| B           | Industrialisatie van renovatieconcepten | ✓            |
| C           | Drijfveren en barrières                 |              |
| D           | Warmtepompen                            | ✓            |
| E           | Afgiftesystemen                         | ✓            |
| F           | Tapwatersystemen                        | ✓            |
| G           | Ventilatiesystemen                      | ✓            |
| H           | Kleinschalige warmteopslag              |              |
| I           | Warmtenetten                            | ✓            |
| J           | Grootschalige warmteopslag              | ✓            |
| K           | Energiecollectieven                     |              |
| L           | Human capital en arbeidsproductiviteit  |              |



Figuur 3 Opbouw van een deelrapport

# A. Deelrapport Zon PV

## Inleiding

### Context

PV is wereldwijd en met name ook in Nederland in de laatste jaren zeer sterk gegroeid. Met een actueel geïnstalleerd vermogen van 14,4 GWp in Nederland levert PV nu ruim 11 TWh elektriciteit per jaar op<sup>1</sup>, dat wil zeggen > 10% van de Nederlandse elektriciteitsopwekking. Sinds twee jaar is er sprake van een jaarlijkse vermogenstoename van 3,5 GWp. Als deze trend doorzet dan is dat een sterkere groei dan de KEV scenario's, die uitgaat van een omvang van 23 TWh elektriciteitsopwekking door PV per 2030. Zoals in dit deelrapport wordt toegelicht, wordt PV technologie gekenmerkt door grote potentiëlen wat betreft de verdere technologische verbetering op het gebied van functionaliteit, kosten, maatschappelijke aspecten en schaalbaarheid. TKI UE heeft voor dit deelonderwerp de trend gedefinieerd:

*'Nieuwe toepassingsgebieden voor PV waardoor het areaal groeit'*

Dit deelrapport zal dan ook extra aandacht besteden aan nieuwe toepassingsgebieden in de gebouwde omgeving en in het buitengebied.

### Scope

In het kader van dit onderzoek wordt PV onderscheiden in twee typologieën, "PV in de gebouwde omgeving" (typische schaalgrootte van enkele kW tot meer dan 1 MW) en "PV in het buitengebied" (typische schaalgrootte van enkele tot tientallen MW), waarvoor TKI UE in 2020 de in Tabel A 1 getoonde KPI's heeft gedefinieerd (in "KPI's TKI Urban Energy 2020"). In de gebouwde omgeving en nog meer in het buitengebied is er sprake van ontwikkelingen die de ontsluiting van nieuwe toepassingsgebieden nastreven, waardoor het totale areaal groeit. Concreet gaat dit b.v. over het gebruik van PV niet alleen op daken, maar ook als deel van gevels van gebouwen, idealiter als integraal onderdeel van bouwelementen, of het gebruik van PV op water of als onderdeel van infrastructurele oppervlakken (zoals bijvoorbeeld geluidsschermen).

Tabel A 1 KPI's PV technologie in MMIP2 van TKI UE

| KPI                              |
|----------------------------------|
| <b>Functionaliteit</b>           |
| Omzettingsrendement              |
| Specifieke opbrengst             |
| Levensduur                       |
| Zelfconsumptie                   |
| Inpassing in het energiesysteem  |
| <b>Kosten</b>                    |
| CAPEX, OPEX, LCOE                |
| <b>Maatschappelijke aspecten</b> |
| Functionele integratie           |
| Ecologische integratie           |
| Esthetiek                        |

<sup>1</sup> <https://opendata.cbs.nl/#/CBS/nl/dataset/82610NED/table?dl=718AF>

| KPI                            |
|--------------------------------|
| Veiligheid                     |
| <b>Schaalbaarheid</b>          |
| Toepassingspotentieel          |
| Potentiële groeisnelheid keten |

## Leeswijzer

Het kwalitatieve deel van dit deelrapport bestaat uit de onderdelen 'ontwikkelingen in de technologie' en 'randvoorwaarden voor opschaling' en is gebaseerd op inzichten uit zowel de recente literatuur als interviews met experts. Voor PV waren dat Wijnand van Hooff (Holland Solar), Wiep Folkerts en Wim Sinke (beide TNO).

Het kwantitatieve deel, bestaande uit de onderdelen 'potentiële marktontwikkelingen' en de 'impact', is opgesteld door TNO. De aannames die hierbij gehanteerd zijn, zijn afgestemd met TKI UE en komen zoveel mogelijk voort uit de interviews, de literatuur en de Klimaat- en Energieverkenning (PBL, 2021). Zoals toegelicht in de inleiding stellen we nadrukkelijk dat wij niet voorspellen dat die gepresenteerde potentiële ook gerealiseerd worden. De potentiële marktontwikkelingen laten echter zien aan dat er een groter potentieel is, dat volgens de KEV nog niet wordt benut.

Het deelrapport wordt afgesloten met een samenvatting van de inzichten uit beide onderdelen.

## Ontwikkelingen in de technologie

*Gecombineerde samenvatting van de interviews met Wijnand van Hoof (Holland Solar), Wiep Folkerts (TNO), en Wim Sinke (TNO)*

Hieronder worden de actuele en in de nabije toekomst (tot 2030) verwachte ontwikkelingen in de PV-technologie per KPI beschreven. Aangezien voor PV op daken en PV in het buitengebied grotendeels dezelfde KPI's van toepassing zijn, wordt er bij de beschrijvingen geen verschil gemaakt tussen deze twee systeemtypologieën. Waar een KPI wel specifiek is voor een van deze typologieën is dit aangegeven. De beschrijvingen geven ook onderbouwde voorspellingen voor technologische kenmerken in de toekomst (2030). Waar dat van toepassing is worden deze gebruikt voor de kwantificering van de impacts, in combinatie met de scenario's voor de marktontwikkeling. De ontwikkelingen in de eerste twee KPI-categorieën (functionaliteit, kosten) zijn redelijk robuust voorspelbaar aangezien deze volop binnen de focus van het R&D-landschap van de laatste 20 jaar liggen en er op die basis veel kennis over leercurves en "learning rates"<sup>2</sup> is. Daarentegen betreffen de andere twee KPI-categorieën grotendeels nieuwe R&D-gebieden en zijn de verwachtingen over de ontwikkelingen daarom veel onzekerder.

---

<sup>2</sup> De "learning rate" geeft de procentuele verandering van een gegeven parameter aan (bijvoorbeeld kosten, rendement, etc.), als het cumulatief geproduceerde PV-vermogen verdubbelt.

## KPI's omtrent functionaliteit

### Omzettingsrendement

Het omzettingsrendement van PV-panelen kent een stabiele learning rate tussen de 6-7%. Met de verwachte groei van de mondiale PV-markt tot 2030 (naar rond 10 TW<sub>p</sub>) is op die basis robuust voorspelbaar dat het actuele PV paneelrendement van gemiddeld ongeveer 20% naar ongeveer 25% zal toenemen (Goldschmidt, Wagner, Pietzecker, & Friedrich, 2021). Ontwikkelingen zoals de zogenaamde tandemtechnologie (wel of niet op basis van perovskiet), waarbij door stapeling van zonnecellen, die in verschillende gebieden van het lichtspectrum gevoelig zijn, nog hogere rendementen van ~ 30% te verwachten zijn, komen tot 2030 eventueel ook al commercieel beschikbaar.

### Specifieke opbrengst

De specifieke opbrengst geeft de jaarlijkse elektriciteitsproductie van een gegeven PV systeem per vermogen aan en wordt uitgedrukt in kWh/kW<sub>p</sub>. De specifieke opbrengst is vooral afhankelijk van de geografische locatie en eventuele lokale belemmeringen van de instraling (b.v. door schaduw). Verliezen door schaduw en andere factoren kunnen deels door verbeteringen van technologische configuraties beperkt worden, waardoor de specifieke opbrengst toeneemt. Ook de in toenemende mate toegepaste bifaciale PV-modules (in PV-parken) zorgen voor hogere specifieke opbrengsten. Het European Technology and Innovation Platform (ETIP) houdt een conservatieve learning rate aan van 2% ETIP, 2020), waardoor momenteel in Nederland behaalde specifieke opbrengsten van rond 850 – 900 kWh/kW<sub>p</sub> voor systemen op daken en 900-950 kWh/kW<sub>p</sub> voor systemen in het buitengebied (Lensink & Schoots, 2021) tot 2030 naar verwachting nog verder zullen toenemen. Dit geldt voor locaties die vergelijkbaar zijn met die van op dit moment geïnstalleerde PV-systemen. Voor ongunstigere locaties, zoals bijvoorbeeld daken op het noorden, oost- of westfaçades etc., die naar verwachting in de toekomst vooral voor de gebouwgebonden systemen vaker gebruikt gaan worden, zullen de specifieke rendementen daarentegen waarschijnlijk dalen. De gemiddelde specifieke opbrengst over alle locaties zou daarom – ondanks de technologische innovatie – min of meer constant kunnen blijven.

### Levensduur

Op het moment wordt over het algemeen uitgegaan van een (praktische, niet technische) levensduur/gebruiksduur van rond de 25 jaar voor PV-modules (Goldschmidt, Wagner, Pietzecker, & Friedrich, 2021). Ondanks de verwachting dat dit nog verder verbeterd kan worden is het aannemelijk dat dit pas op na 2030 realiteit wordt. Vanwege de verwachte voortzetting van stijgende systeemrendementen en -opbrengsten kunnen namelijk nog economische prikkels blijven bestaan om oudere systemen door nieuwe te vervangen. Op de langere termijn is het de verwachting dat een levensduur/gebruiksduur van 30-50 jaar haalbaar en realistisch is (bijvoorbeeld door robuustere PV-moduleconfiguraties zoals dubbelglas encapsulatie, hetgeen met name voor PV-systemen in het buitengebied nu al steeds vaker wordt toegepast). In feite wordt de huidige gebruiksduur van PV-systemen waarschijnlijk vaker door economische dan door technologische aspecten tot 25 jaar beperkt.

### Zelfconsumptie (PV in de gebouwde omgeving)

De zelfconsumptie of eigen verbruik van PV-systemen op daken, d.w.z. het aandeel van de geproduceerde elektriciteit die direct lokaal gebruikt wordt (i.p.v. in het net in-gevoerd te worden), is variabel en onder andere sterk afhankelijk van elektriciteitsgebruikspatronen. Particuliere daksystemen, die meestal zonder opslag zijn ontworpen, bereiken gemiddeld een zelfconsumptie van rond de 30% (De Heer, Fiorini, & Winters, 2022), grotere commerciële daksystemen bereiken 60 – 65 % (Lensink & Schoots, 2021). Door de verwachte sterke

toename van systeemontwerpen inclusief opslag (bijvoorbeeld in batterijen) zal de zelfconsumptie van nieuwe systemen in de nabije toekomst naar verwachting aanzienlijk verder stijgen (Wirth, 2022).

### Inpassing in het energiesysteem

In algemene zin vallen onder deze KPI alle ontwikkelingen op het gebied van PV-technologie die de invloed van PV op de stabiliteit, betrouwbaarheid, betaalbaarheid en veiligheid van het energiesysteem als geheel optimaliseren. Het overkoepelende sleutelbegrip hierbij is 'flexibiliteit', waarmee onder meer wordt bedoeld op de mogelijkheid om vraag en/of aanbod te kunnen regelen of te sturen (Sinke, Folkerts, & Weeber, 2021). Dit omvat ook de mogelijkheden om zonnestroom om te zetten in andere vormen van energie, zoals warmte of brandstoffen, waardoor meer flexibiliteit door de koppeling tussen de sectoren elektriciteit, warmte en mobiliteit ontstaat (sectorkoppeling).

Tot enkele jaren terug lag de focus bij de installatie van PV systemen in Nederland vooral op opschaling. Er is een sterke groei gerealiseerd, waarbij de jaarlijkse vermogenstoename op dit moment een niveau van 3,5 GWp heeft bereikt en het totaal geïnstalleerde vermogen ondertussen uitkomt op ruim 14 GWp. Aangezien PV hierdoor inmiddels een bijdrage van > 10% van de elektriciteitsopwekking in Nederland levert, worden aspecten die te maken hebben met de inpassing in het energiesysteem steeds belangrijker.

Een actuele uitdaging in die context is bijvoorbeeld de (beperkte) capaciteit van de Nederlandse elektriciteitsnetten, waar steeds vaker sprake is van congestie. Congestie kan worden versoepeld door het inzetten van dezelfde netaansluiting voor zonne- en windparken ("cable pooling"), waardoor dankzij de grote mate aan complementariteit in de opwekprofielen van zon en wind de netwerkcapaciteit effectiever kan worden gebruikt. De brancheverenigingen Holland Solar, NWEA en Energie Samen hebben in 2021 een modelovereenkomst voor cable pooling opgesteld.

### KPI's omtrent kosten

#### CAPEX, OPEX, LCOE

In 2021 lag de CAPEX voor systemen van meer dan 15 kW<sub>p</sub> bij 500 – 600 €/kW<sub>p</sub> (Lensink & Schoots, 2021). De CAPEX learning rate van PV was decennia redelijk constant. Voor PV-modules lag die rond de 25% en voor PV-systemen als geheel, inclusief o.a. omvormers en installatiesystemen, rond de 20% (Goldschmidt, Wagner, Pietzecker, & Friedrich, 2021). Op dit moment is er sprake van macro-economische verstoringen van markten en toeleveringsketens als gevolg van de Covidpandemie en de oorlog in Oekraïne. Hierdoor laat de kostprijs van PV (en nagenoeg alle andere producten) actueel een stijging zien. Het is niet voorspelbaar, hoe de kostprijsontwikkeling voor PV en andere producten zich in de komende jaren gaat ontwikkelen, maar de goede, relatieve concurrentiepositie van PV zal naar verwachting niet veranderen. Daarom wordt voor de beeldvorming in dit deelrapport de actuele marktverstoring genegeerd.

Op die basis en met een per 2030 verwacht mondiaal PV-vermogen van rond 10 TW<sub>p</sub> zou de daling ongeveer 50% bedragen ten opzichte van het huidige niveau, dat wil zeggen naar ~ 250 – 300 €/kW<sub>p</sub>. De daling van de kostprijs van PV is het gevolg van enerzijds schaalvergroting en anderzijds innovatie (bijvoorbeeld hogere rendementen, minder materiaalgebruik).

Er zijn minder gegevens beschikbaar en bekend over de ontwikkeling van de OPEX, die in vergelijking met de CAPEX echter minder invloed heeft op de LCOE. In het kader van dit rapport wordt daarom aangenomen dat de LCOE voorlopig ruwweg in lijn met de CAPEX daalt, d.w.z. met rond 50% tot 2030 en dan gemiddeld in Nederland van het huidige niveau van 0,04 – 0,08 €/kWh daalt naar 0,02 – 0,04 €/kWh bereikt (Sinke, Folkerts, & Weeber, 2021).

## KPI's omtrent maatschappelijke aspecten

### Functionele integratie

Met functionele integratie worden geavanceerde ontwerpen van PV-systemen bedoeld waarbij landschappelijke inpassing en combinaties met land- en tuinbouw (agri-PV), infrastructuur, etc. gerealiseerd wordt. Anno 2022 zijn er weliswaar eerste succesvolle voorbeelden, zoals solar carports (b.v. op het parkeerterrein van het Lowlands festival in Biddinghuizen), maar in de breedte wordt functionele integratie nog weinig toegepast omdat de concepten nog in de ontwikkelfase zijn en de eerste prototype-installaties daarom ook nog relatief duur zijn. De mogelijkheden worden echter steeds meer onderzocht, ook in het kader van demonstratieprojecten. Het belang van voortgezette kennisontwikkeling hieromtrent is om verschillende redenen groot. Ten eerste vanwege de kans op ontsluiting van grote extra ruimtelijke potentiëlen, die anders niet voor de toepassing van PV voor de hand zouden liggen. En ten tweede, omdat door functioneel geïntegreerde ontwerpen maatschappelijke spanningsvelden opgelost kunnen worden (bijvoorbeeld tussen landbouw en energieopwekking). De verwachting is dat functionele integratie in Nederland tot 2030 stapsgewijs van de grond zal komen en dat de ontwikkeling dan marktrijp is als het innovatiebeleid hierop adequaat inzet.

### Ecologische integratie (buitengebied)

Het doel van ecologische integratie is het wegnemen of minimaliseren van risico's van aantasting van natuur, ecologie (biodiversiteit, bodemkwaliteit, etc.) of landschap en de combinatie van PV en recreatie of natuurontwikkeling (Theelen, et al., 2021). In dit verband is energielandschapsarchitectuur een belangrijk en relatief nieuw vakgebied. In de praktijk wordt er ondertussen gewerkt aan een eco-certificaat voor PV-parken, waarmee de verbeterde ecologische integratie op basis van meetbare gegevens over biodiversiteit en bodemkwaliteit bevorderd kan worden. Dit vakgebied is nog volop in ontwikkeling en zal tot 2030 zeker steeds belangrijker worden. Er wordt in Nederland op dit moment aan een certificaat gewerkt waarmee ecologisch hoogwaardige integratie op basis van meetbare gegevens aangetoond kan worden. Hierdoor zal het onderwerp meer aandacht krijgen en kan het certificaat als onderdeel van de eisen binnen de projectontwikkeling gebruikt worden.

### Duurzaamheid

Ook duurzaamheid en circulariteit krijgen pas recent meer aandacht van de PV-branche nu cruciale mijlpalen qua rendement en kosten zijn bereikt. Er zijn nog veel belangrijke ontwikkelingen nodig, zoals het ontwerpen van beter te recyclen PV-panelen ('design for recycling') en het verbeteren van grondstoffenterugwinning via nieuwe recyclingtechnologieën (Theelen, et al., 2021). Deze ontwikkelingen zijn nog in de beginfase. Ook de carbon footprint van PV-systemen zal naar verwachting nog verder dalen. Actuele levenscyclusanalyses voor representatieve PV-productie in China tonen waardes van ~ 1250 kg CO<sub>2</sub>-eq/kW<sub>p</sub> (Goldschmidt, Wagner, Pietzecker, & Friedrich, 2021). Voor instralingscondities zoals in Nederland komt dit per kilowattuur neer op ~ 55 g CO<sub>2</sub>-eq/kWh. Met een learning rate van 10 – 14% (Goldschmidt, Wagner, Pietzecker, & Friedrich, 2021) zal de carbon footprint per 2030 dalen naar ~ 850 kg CO<sub>2</sub>-eq/kW<sub>p</sub> (38 g CO<sub>2</sub>-eq/kWh). Significante verdere dalingen zijn



haalbaar, bijvoorbeeld door de toepassing van meer duurzame elektriciteit in de hele productieketen (Lenzmann, et al., 2021).

### Esthetiek

Zoals de meeste andere KPI's in de categorie maatschappelijke aspecten zijn ook de mogelijkheden ter verbetering van de esthetiek pas recent onder de aandacht gekomen, omdat het bereiken van een competitief kostenniveau prioriteit had. De momenteel meest voorkomende systemen worden daarom nu nog gekenmerkt door relatief weinig aandacht voor een aantrekkelijke vormgeving. De overheersende vormgeving voor PV in de gebouwde omgeving nu zijn "add-on"-systemen op daken: PV-panelen die met behulp van montagestructuren over de al bestaande dakbedekking geplaatst worden. Voor PV in het buitengebied worden nu veelal systemen gerealiseerd waarbij de PV-panelen op dragerstructuren met maximale dichtheid geplaatst worden met weinig aandacht voor esthetische belangen qua inpassing in het landschapsbeeld.

Op het gebied van esthetiek zijn daarom nog veel kansen voor verbetering. Building integrated PV (BIPV), dat wil zeggen systemen waar PV-panelen in de schil van gebouwen geïntegreerd zijn en mogelijk ook direct als bouwelementen geleverd worden, is in ontwikkeling, evenals PV-panelen met verschillende kleuren. Het huidige aandeel van BIPV is nog erg gering, in ieder geval minder dan 5 %. De verwachting is dat het marktaandeel van deze esthetisch hoogwaardige PV-systemen tot 2030 zal toenemen.

### Veiligheid (PV in de gebouwde omgeving)

Actuele PV-systemen kunnen zonder voorbehoud als zeer betrouwbaar en veilig worden beschreven. Toch was er enkele jaren terug enige onrust over veiligheid ontstaan in verband met enkele uitzonderlijke brandincidenten (Sinke, Folkerts, & Weeber, 2021). Terwijl deze brandincidenten vaker met gebrekkige installatiekwaliteit en verkeerde componentkeuze te maken hadden dan met de technologie als zodanig, is er toch naar aanleiding hiervan is de aandacht voor verder onderzoek op het gebied van veiligheid verhoogd. Het is de verwachting dat de waarborging van veiligheid van PV-systemen per 2030 op een nog hoger niveau terecht komt.

## KPI's omtrent schaalbaarheid

### Potentiële groeisnelheid keten

De toeleveringsketens op het gebied van PV, zeker wat betreft de upstream-kant tot en met het PV-paneel, zijn op dit moment zeer sterk geconcentreerd in Zuid-Oost Azië, met name China. Om diverse redenen, waaronder het verminderen van de afhankelijkheid en het realiseren van economische kansen, zijn er in de EU groeiende ambities om weer meer onderdelen van de toeleveringsketens in Europa te gaan vestigen. Dit zal naar verwachting ook positieve implicaties op de robuustheid en mogelijk ook de groeisnelheid van de ketens hebben. Een kernbegrip in deze context is "mass customization". Hiermee wordt een ontwikkeling bedoeld waarmee verschillende varianten van een eindproduct grootschalig geautomatiseerd worden geproduceerd. Deze ontwikkeling staat nog maar aan het begin en het is nog onzeker wat de status hiervan per 2030 zal zijn.

### Toepassingspotentieel

Naar het toepassingspotentieel van PV in Nederland is recent uitgebreid onderzoek gedaan door TKI UE (Van Hooff, Kuijers, Quax, & Witte, 2021). Aangezien PV in Nederland (en ook

daarbuiten) nog een jonge markt is, was de elektriciteitsopwekking door PV in 2020 nog beperkt (8 TWh). Ondanks de dynamische groei van de laatste 2-3 jaren ligt dit nog ver onder het technisch potentieel. Volgens recent onderzoek door TKI Urban Energy is het ruimtelijke potentieel op de langere termijn met 200 TWh nog ruim 25 keer groter dan de opwekking in 2020. Zoals in de inleiding al vermeld is de KEV projectie van 23 TWh PV tot 2030 – gezien de groeisnelheid van 3,5 TWh per jaar die in de laatste 2 jaar is bereikt - mogelijk te conservatief. Als deze groeisnelheid tot 2030 constant blijft, is in 2030 een omvang rond 40 TWh te verwachten. Essentieel voor het constant houden (of zelfs versnellen) van de groei is wel dat de gunstige ontwikkeling van de diverse KPI's inderdaad aanhoudt, zoals in het volgende hoofdstuk wordt toegelicht.

## Randvoorwaarden voor opschaling

Voor de opschaling van PV in Nederland tot 2030 zijn meerdere factoren van belang. Vanuit het perspectief van de steeds verder toenemende congestieproblematiek in de elektriciteitsnetten behoren de factoren omtrent inpassing in het energiesysteem en verhoging van zelfconsumptie zeker tot de meest urgente van deze factoren. Dat betekent dat bij het ontwerpen van PV-systemen een veel sterkere koppeling met flexibiliteitstechnologieën (zoals o.a. energieopslag, -conversie en vraagsturing) gerealiseerd zou moeten worden dan nu gebruikelijk is. Daarnaast is zeker ook een verzwaring van het elektriciteitsnet nodig.

Tegelijkertijd is het nodig dat het maatschappelijke draagvlak voor PV positief blijft. In dit verband is het belangrijk dat de ontwikkelingen die onder de maatschappelijke KPI's beschreven zijn, bijvoorbeeld functionele integratie, gestimuleerd worden. Met name in Nederland, waar ruimtelijke beperkingen vaker optreden dan in minder dichtbevolkte landen, is het multifunctionele gebruik van ruimte een veelbelovend concept voor toepassing bij verdere opschaling. Maar ook de verbetering van recycling en circulariteit is van belang om de duurzame waarde van PV en de publieke waarneming hiervan niet in gevaar te brengen.

Bovendien is wel duidelijk dat voor alle ontwikkelingen die in de vorige paragraaf zijn beschreven innovatie nodig is, want voor het doorzetten van de leercurves waarnaar is gerefereerd is de opschaling van de industriële productie niet voldoende. Er is een combinatie met innovatie nodig die in de productie toegepast wordt. Nederland heeft op sommige van de beschreven KPI's in het mondiale innovatielandschap een bijzonder sterke positie die dan ook een meer dan proportionele bijdrage aan de mondiale ontwikkelingen kunnen leveren. Dit betreft met name de ontwikkeling van tandemtechnologie, functionele en ecologische integratie en toepassingen op water.

## Potentiële marktontwikkelingen

### Beschrijving

#### Basispad

Zoals in de andere deelrapporten is het Basispad identiek aan dat uit de KEV-raming uit 2021 voor 2030, die t.o.v. 2020 ongeveer neerkomt op een verdrievoudiging van de elektriciteitsproductie uit PV van 8 TWh in 2020 naar 23 TWh in 2030. Wat betreft de verdeling over woningen, utiliteit en het buitengebied gaat dit rapport uit van het recente TKI-rapport (Hooff, Kuijers, Quax, & Witte, 2021), waarin een mogelijke verdeling van

respectievelijk 37% (8,5 TWh), 41% (9,5 TWh) en 22% (5 TWh) over de genoemde drie marktsegmenten wordt beschreven.

### Verdubbeling

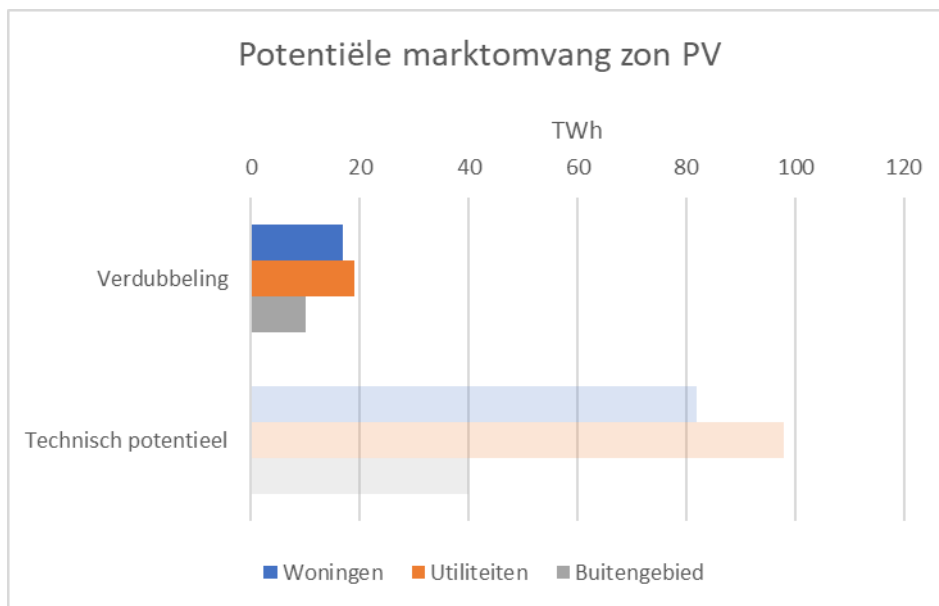
Een verdubbeling van de KEV-raming voor 2030 betekent een doorgroei van de elektriciteitsopwekking door PV naar 46 TWh. Dit zou betekenen dat er tussen 2020 en 2030 een gemiddelde groei van 3,8 TWh per jaar plaatsvindt, wat niet veel meer is dan wat in de afgelopen twee jaar inderdaad is gerealiseerd, namelijk ~ 3 TWh per jaar. Vanuit dit perspectief stelt het scenario van verdubbeling weliswaar een hoge ambitie voor, maar lijkt die niet onhaalbaar. Wel zou het voor het realiseren van dit scenario naar verwachting nodig zijn dat de elektriciteitsinfrastructuur door middel van netverzwaring en/of uitrol van voldoende flexibiliteit (o.a. energieopslag en -conversie) in staat is de extra hoeveelheid fluctuerende elektriciteitsopwekking door PV op te vangen. Voor de verdeling over de drie marktsegmenten wordt in dit scenario dezelfde aanname gehanteerd als voor het basisscenario. Wel is het natuurlijk mogelijk dat in dit scenario een andere verdeling zou ontstaan dan in het basispad, omdat er momenteel omtrent PV in het buitengebied een zekere maatschappelijke weerstand heerst en dit marktsegment bovendien bijzonder gevoelig is voor netcongestie. Met nadrukkelijke aandacht voor functionele integratie en adequate elektriciteitsinfrastructuur zijn deze uitdagingen echter naar verwachting beheersbaar.

### Technisch potentieel

In plaats van het technisch potentieel gaat dit rapport in eerste instantie uit van de bevindingen over het ruimtelijke potentieel in het TKI-rapport (Van Hooff, Kuijers, Quax, & Witte, 2021). Het technische potentieel is naar verwachting groter. Met name voor het marktsegment PV in het buitengebied is ervan uit te gaan, dat het potentieel vooral ook een politiek/ maatschappelijke keuze is. Op basis van het genoemde rapport gaan we voor de twee marktsegmenten woningen en utiliteit- uit van 82 TWh (woningen) en 98 TWh (utiliteit). Voor het buitengebied wordt uit een indicatieve schatting van  $\geq 40$  TWh afgeleid. In de grafieken wordt alsnog de term "technisch potentieel" gehanteerd, om geen van de andere deelrapporten afwijkende, nieuwe begrip in te voeren.

Tabel A 2 Beschrijving van de potentiële marktontwikkelingen van zon PV waarvan de impact in dit deelrapport is berekend

| Potentiële marktontwikkelingen PV          |   |
|--|---|
| Beschrijving                               |   |
| <b>Verdubbeling</b>                        | 46 TWh elektriciteitsopwekking door PV in 2030<br>(woningen: 17 TWh, utiliteit: 19 TWh, buitengebied: 10 TWh)                     |
| <b>Technisch potentieel</b>                | Ruim 200 TWh elektriciteitsopwekking door PV<br>(woningen: 82 TWh, utiliteit: 98 TWh, buitengebied $\geq 40$ TWh)                 |
| Randvoorwaarden                            |   |
| <b>Verdubbeling / Technisch potentieel</b> | Inpassing in het energiesysteem, functionele en ecologische integratie. Beschikbaarheid van adequate elektriciteitsinfrastructuur |



Figuur A 1 Potentiële marktontwikkelingen en technisch potentieel voor PV uitgedrukt in TWh elektriciteitsopwekking voor de drie marktsegmenten woningen, utiliteit en buitengebied. Voor PV in het buitengebied is het potentieel onzeker en toont de grafiek slechts een minimumpotentieel (zie tekst voor meer uitleg).

## Benodigde innovaties

Zoals onder de paragraaf “Randvoorwaarden voor opschaling” al is toegelicht is de continuering van een algemeen hoog innovatieniveau van de PV-sector nodig om de doorgroei mogelijk te maken, zeker als het gaat om een mate van opschaling die over het niveau van de KEV (23 TWh in 2030) heen gaat.

In het licht van de eerder benoemde congestieproblematiek van de elektriciteitsnetten zijn hierbij de innovaties omtrent de inpassing in het energiesysteem van bijzonder groot belang. De koppeling van PV met flexibiliteitstechnologieën (bijvoorbeeld energieopslag, demand side management, etc.) biedt oplossingen op alle niveaus van het elektriciteitsnet, d.w.z. op hoog-, midden- en laagspanningsniveau.

Voor het ontsluiten van additionele toepassingsmogelijkheden zijn verder innovaties omtrent functionele en ecologische integratie nodig zoals bijvoorbeeld agri-PV en eco-certificaten voor PV-parken en daarnaast de doorontwikkeling van innovatieve nieuwe toepassingsgebieden zoals bijvoorbeeld BIPV en PV op water. Zonder innovaties op deze gebieden komen de betreffende ruimte en oppervlakken naar verwachting niet beschikbaar voor PV.

## Impact

In dit deel wordt de potentiële impact van een deelonderwerp berekend bij verschillende marktontwikkelingen. Dit onderdeel richt zich alleen op een kwantitatieve impactberekening van de CO<sub>2</sub>-emissiereductie en van de nationale kosten. Andere effecten van een hoger marktaandeel of een innovatie blijven daarmee buiten beschouwing.

## CO<sub>2</sub>-emissiereductie

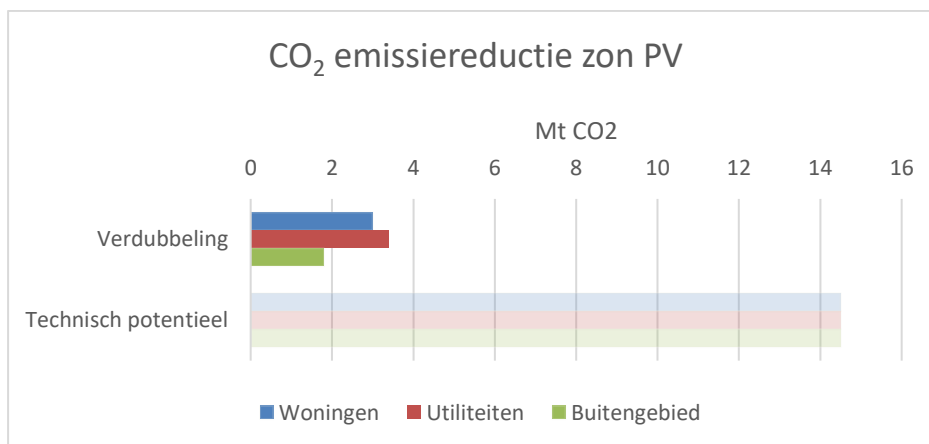
Voor de bepaling van extra CO<sub>2</sub>-emissiereductie (t.o.v. het basispad) gaat dit rapport ervan uit dat additionele opwekking van elektriciteit door PV tot gevolg heeft dat hiermee fossiele elektriciteitsopwekking in 2030 vervangen wordt. Volgens de KEV-projectie is dit in 2030 nog

rond 40 TWh met een bijbehorende CO<sub>2</sub>-emissie van 14,5 Mt CO<sub>2</sub> (Van Capellen, Wielders, & Scholten, 2021).

De waarde van 14,5 Mt CO<sub>2</sub>-emissies is in deze beschouwing daarom de bovengrens voor de haalbare emissiereductie door PV in 2030, waarbij de emissies voor PV dus als nihil worden aangenomen.<sup>3</sup> Die bovengrens zou overigens hoger komen te liggen als de elektriciteitsvraag nog verder toeneemt door elektrificatie van warmte en mobiliteit dan nu in de KEV raming wordt aangenomen (omdat hierdoor de te vervangen resterende fossiele elektriciteitsopwekking hoger zou liggen). Aan de andere kant zou die grens lager komen te liggen als er behalve door PV ook nog door windenergie extra elektriciteitsopwekking boven het niveau van de KEV-projectie in 2030 gerealiseerd zou worden. Deze twee factoren omtrent de bovengrens worden hier echter buiten beschouwing gelaten.

In het scenario “verdubbeling van de KEV-projectie” zou er in 2030 sprake zijn van 23 TWh extra elektriciteitsopwekking door PV (met daarom een totaal van 46 TWh). De additionele emissiereductie door PV komt dan uit op ruim 8 Mt CO<sub>2</sub>. De verdeling over de drie marktsegmenten, gebouwen, utiliteit en het buitengebied is in dit scenario respectievelijk 3, 3,4 en 1,8 Mt.

Zoals onder potentiële marktontwikkelingen toegelicht is het technisch potentieel van PV in Nederland met rond 200 TWh nog vele malen hoger dan 46 TWh. De in 2030 volgens de KEV nog resterende fossiele elektriciteitsopwekking (40 TWh) en hieraan gerelateerde CO<sub>2</sub>-emissies (14,5 Mt) kunnen door verdere opschaling van PV daarom in theorie volledig worden vervangen danwel opgeheven. In de praktijk vereist het vervangen van regelbaar vermogen door fluctuerend vermogen echter ingrijpende veranderingen van het elektriciteitssysteem bijvoorbeeld door toevoegen van opslagcapaciteit.



Figuur A 2 CO<sub>2</sub>-emissiereductie (in Mt CO<sub>2</sub>) door de vervanging van in 2030 nog resterende fossiele elektriciteitsproductie door PV. Aangezien die (grotendeels fossiele) productie tot 40 TWh beperkt is, kent ook de emissiereductie een bovengrens (14,5 Mt). Die bovengrens wordt al in het scenario “verdubbeling” voor meer dan de helft genaderd omdat in dit scenario de PV-energieproductie vanuit de drie marktsegmenten bij elkaar opgeteld 23 TWh is.

<sup>3</sup> De onder de KPI duurzaamheid vermelde levenscyclusemissies, die grotendeels voortkomen uit de productie van PV systemen, worden in deze analyse niet meegewogen (dit om consistentie te bereiken met de andere deelrapporten, waar ketenemissies uit gebrek aan beschikbare informatie ook niet worden meegewogen).

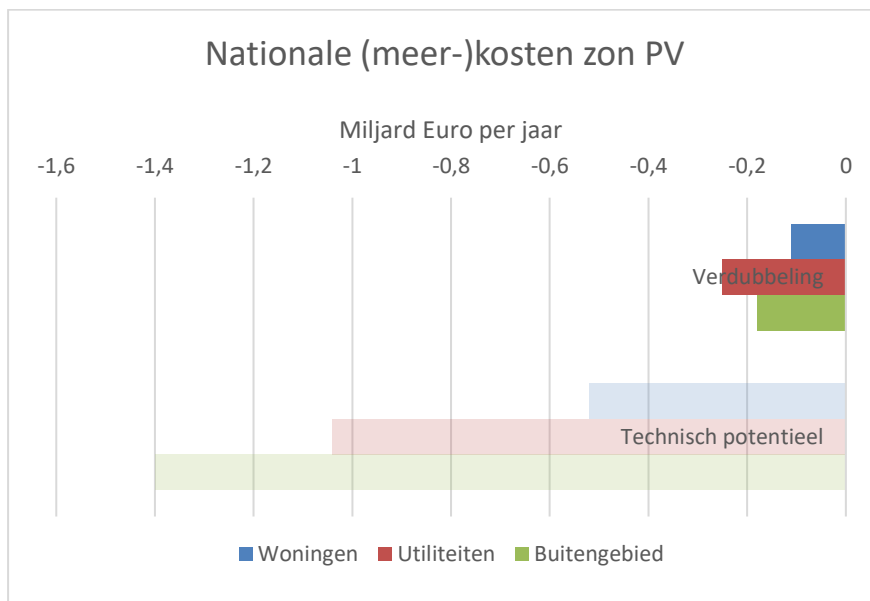
## Nationale kosten

In analogie met de vorige paragraaf over CO<sub>2</sub>-emissies gaat ook de bepaling van de nationale kosten uit van de vervanging van resterende fossiele elektriciteitsopwekking door elektriciteit uit PV. Voor de kwantificering van de nationale kosten maakt dit rapport gebruik van de levelized cost of electricity (LCOE), die alle kosten in verband met elektriciteitsopwekking omvat en in de eenheid €/kWh uitgedrukt wordt.

Voor de in 2030 binnen de resterende fossiele elektriciteitsopwekking overheersende STEG-centrales (stoom- en gasturbine) is de LCOE voor 2030 recent door CE Delft op 0,069 €/kWh geschat (Rooijers & Jongsma, 2020). Door vermenigvuldiging met de verwachte fossiele elektriciteitsopwekking van rond de 40 TWh komt dit neer op een totale omvang van de nationale kosten van € 2,76 miljard. De op basis van leercurves verwachte LCOE van PV ligt in 2030 voor alle drie de marktsegmenten (deels ruim) onder 0,05 €/kWh. Aangezien extra elektriciteitsproductie door PV in 2030 (boven het niveau van het basispad) door geleidelijk tijdens de periode van 2020 tot 2030 geïnstalleerde PV systemen gerealiseerd zou worden, gaat dit rapport echter van de gemiddelde LCOE voor PV tussen 2020 en 2030 uit. Ook in dat geval blijft de LCOE voor alle PV marktsegmenten onder 0,06 €/kWh en is er daarom in ieder geval sprake van een vermindering van de nationale kosten. De kosten voor inpassing in het energiesysteem zijn in deze berekening niet meegenomen.

Met deze aannames wordt in het scenario “verdubbeling van de KEV-projectie” door alle drie segmenten bij elkaar een vermindering van de nationale kosten van ruim € 0,5 miljard gerealiseerd, waarbij de verdeling over de segmenten € 0,11 miljard voor woningen, € 0,25 miljard voor utiliteiten en € 0,18 miljard voor het buitengebied bedraagt. Aangezien bij de gebruikte simpele benadering in dit scenario met 23 TWh extra elektriciteitsopwekking door PV iets meer dan de helft van de in 2030 nog resterende fossiele elektriciteitsopwekking (40 TWh) vervangen wordt, kan gesteld worden dat de maximaal haalbare vermindering van de nationale kosten iets onder de € 1 miljard ligt. Hierbij is geen rekening gehouden met kosten voor aanpassingen aan elektriciteitsinfrastructuur en -opslag. Het is verder duidelijk dat deze grens van de maximale kostenbesparing ruim voor het bereiken van het technische potentieel (~200 TWh) bereikt wordt.

De maximaal mogelijke vermindering van de nationale kosten volgt uit het verschil tussen de LCOE voor elektriciteitsproductie door PV en door STEG-centrales met een omvang van 40 TWh in totaal. Aangezien alle 3 marktsegmenten gekenmerkt worden door een eigen LCOE-waarde (met een dalende tendens in de volgorde woningen > utiliteit > buitengebied) is voor elk segment een eigen maximaal mogelijke vermindering van de nationale kosten van toepassing. De betreffende waarden liggen rond de € 0,52 miljard (woningen), € 1,04 miljard (utiliteit) en € 1,4 miljard (buitengebied). Deze waarden kunnen niet bij elkaar opgeteld worden (omdat elke waarde op zichzelf al resulteert uit een extra elektriciteitsproductie van 40 TWh).



Figuur A 3 Vermindering van de nationale kosten door vervanging van in 2030 nog resterende fossiele elektriciteitsproductie door PV. Aangezien die fossiele productie tot 40 TWh beperkt is, kent de vermindering van de nationale kosten bovengrenzen van respectievelijk 0,52, 1,04 en 1,4 Mrd euro voor de drie PV marktsegmenten. De naar marktsegmenten gewogen bovengrens wordt al in het scenario "verdubbeling" voor meer dan de helft genaderd omdat in dit scenario de elektriciteitsproductie met PV vanuit de drie marktsegmenten bij elkaar opgeteld 23 TWh is.

## Samenvatting

Verdere toepassing van PV op woningen, utiliteit en in het buitengebied kan een substantiële bijdrage leveren aan de energietransitie. Bij continuering van de huidige dynamische groei (3 TWh per jaar) zal deze de totale marktomschrijving van de KEV raming (23 TWh) in 2030 gaan overtreffen. Daarnaast ligt het ruimtelijk potentieel van PV op basis van recente studies (Van Hooff, Kuijers, Quax, & Witte, 2021) met minstens 200 TWh ruim boven de te verwachten marktomschrijving in 2030. Door een verdubbeling van de KEV-projectie zou een aanzienlijke CO<sub>2</sub>-emissiereductie en vermindering van de nationale kosten met een omvang van ruim 8 Mt CO<sub>2</sub> en 0,5 miljard euro bereikt kunnen worden. Het uitgangspunt voor deze cijfers is dat de extra elektriciteitsproductie door PV in 2030 nog resterende fossiele elektriciteitsproductie (40 TWh) vervangt.

Voor de realisatie van een marktomschrijving boven de KEV-raming is – naast andere factoren, zoals bijvoorbeeld het waarborgen van voldoende arbeidscapaciteit - de voortzetting van een ambitieus innovatiebeleid nodig. Dit innovatiebeleid zou in ieder geval barrières voor de verdere marktontwikkeling zoals netcongestie en maatschappelijke weerstand tegen PV in het buitengebied moeten omvatten, zoals ook de ontsluiting van nieuwe toepassingsgebieden (bijvoorbeeld PV op water of agri-PV). Innovaties die hiervoor nodig zijn betreffen de ontwikkeling van een omvormer voor inpassing in het net, van drijvende panelen, van functionele integratie van PV-parken in landelijk gebied en van het terugbrengen van de impact van de productie en recycling van zonnepanelen. Daarnaast bieden ontwikkelingen op het gebied van mass customization ook industriële ontwikkelingskansen door (her-)stimulatie van de Europese en Nederlandse PV-maakindustrie.

# B. Deelrapport Industrialisatie van renovatieconcepten

## Inleiding

### Context

In het kader van het klimaatakkoord moet het tempo van verduurzaming worden opgevoerd naar 300.000 woningen per jaar vóór 2030 en nog meer woningen per jaar daarna, zodat tegen 2050 zo'n 7 miljoen woningen zijn getransformeerd. Voor het MMIP3 'Versnelling van energierenovaties in de gebouwde omgeving' heeft TKI Urban Energy KPI's gedefinieerd om innovaties op dit vlak te bevorderen. Industrialisatie van renovatieconcepten is één van de mogelijkheden die kan bijdragen aan de noodzakelijke opschaling en is de focus van dit informatieblad. Tabel B 1 geeft een overzicht van de KPI's en richtwaarden die betrekking hebben op industrialisatie.

Tabel B 1 KPI's en richtwaarden die betrekking hebben op de industrialisatie van renovatieconcepten zoals gedefinieerd in het MMIP3 van TKI UE

| KPI  | Richtwaarden 2030   |
|--|---|
| <b>Verduurzaming</b>                       |   |
| CO <sub>2</sub> -besparing                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 3,4 Mton</li> </ul>  |
| Energieprestatie                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 30 - 50 kWh/m<sup>2</sup> primair (woningen)</li> </ul>  |
| Circulariteit                              | <ul style="list-style-type: none"> <li>• MPG: ≤0,8 €/m<sup>2</sup> BVO</li> </ul>   |
| <b>Schaalbaarheid</b>                      |   |
| Productiecapaciteit                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 200.000 woningen per jaar</li> </ul>   |
| Beoogd marktvolume (aantal gebouwen in NL) | <ul style="list-style-type: none"> <li>• % van de renovaties dat geïndustrialiseerd kan worden aangepakt</li> </ul>   |
| <b>Kosten</b>                              |   |
| Kostprijsreductie                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 20-40% besparing op initiële investeringskosten t.o.v. 2019 en autonome kostenontwikkeling</li> </ul>  |
| Woonlasten en exploitatielasten            | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Woonlasten- of exploitatielastenneutraliteit</li> </ul>  |
| <b>Maatschappelijke aspecten</b>           |   |
| Aantrekkelijkheid                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Verhogen conversieratio met &gt;10% (offertes)</li> <li>• Klanttevredenheidsscore ≥ 7,8 of een Net Promoter Score (NPS) ≥ 0 (bouwproces)</li> <li>• Prestatie op comfort en binnenmilieu (betere prestatie/kwaliteit)</li> </ul> |
| Arbeidsproductiviteit                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 30% stijging arbeidsproductiviteit t.o.v. 2017</li> <li>• Uitbreiding arbeidspotentieel: 481.000 arbeiders i.p.v. 445.000 in 2018</li> </ul>   |

### Scope

TKI Urban Energy spreekt van industrialisatie als de nadruk in productieprocessen verschuift van handarbeid naar machinale fabricage. Dat betekent vaak ook dat het productieproces verplaatst van de bouwplaats naar de fabriek. De ontwikkeling van nieuwe renovatieconcepten zelf valt buiten de scope van de factsheet, de focus ligt op industrialisatie van het productieproces voor de verduurzaming van de bestaande woningvoorraad.



## Leeswijzer

Het kwalitatieve deel van dit deelrapport bestaat uit de onderdelen 'ontwikkelingen in de technologie' en 'randvoorwaarden voor opschaling' en is gebaseerd op desk research en de interviews met Marjet Rutten (Constructief) en Huub Keizers (TNO en TKI Bouw en Techniek)). Het kwalitatieve deel is daarmee een selectie van wat volgens de geïnterviewden de belangrijkste knelpunten, ontwikkelingen en randvoorwaarden zijn om opschaling te realiseren.

Het kwantitatieve deel, bestaande uit de onderdelen 'potentiële marktontwikkelingen' en 'impact', is opgesteld door TNO. De aannames die hierbij gehanteerd zijn, zijn afgestemd met TKI UE en komen zoveel mogelijk voort uit de interviews en de Klimaat- en Energieverkenning (KEV) (PBL, 2021). Zoals toegelicht in de inleiding stellen we nadrukkelijk dat wij niet voorspellen dat die gepresenteerde potentiëlen ook gerealiseerd worden. De potentiële marktontwikkelingen laten echter zien aan dat er een groter potentieel is, dat volgens de KEV nog niet wordt benut.

Het deelrapport wordt afgesloten met een samenvatting van de inzichten uit beide onderdelen.

## Ontwikkelingen in de technologie

*Gecombineerde samenvatting van de interviews met Marjet Rutten (Constructief) en Huub Keizers (TNO en TKI Bouw en Techniek)*

Veel initiatieven op het gebied van industrialisatie zijn gericht op de nieuwbouw. Voor de bestaande bouw zijn eerste productielijnen opgezet en vindt er een aantal innovatieve projecten plaats. Voor de bestaande bouw kunnen deze duurzame industrialisatieconcepten onderscheiden worden:

- Renovatie van de volledige schil
- Renovatie van één bouwdeel, zoals buitengevelisolatie of dakrenovatie (vervanging)
- Deelconcepten
- Energiemodules (met gecombineerde installaties).

De experts merkten op dat men deze concepten die van belang zijn voor de ontwikkelingen op het gebied van industrialisatie van bestaande bouw apart moet bekijken:

*Renovatie van de volledige schil:* Een voordeel van deze vorm van renovatie is dat een hogere isolatiegraad bereikt kan worden dan bij klassieke renovatie en dat de levensduur van woningen verder verlengd kan worden. De kosten van een dergelijke renovatie zijn hoog, maar een echt integrale oplossing inclusief verwarmingsinstallatie, energie-opwek en ventilatie kan toch attractief zijn.

*Buitengevelisolatie:* De kosten voor buitengevelisolatie zijn hoog en kunnen bij grondgebonden woningen alleen uit bij lage energielabels, waardoor het potentieel steeds kleiner wordt omdat steeds meer woningen al zijn verbeterd. Voor de meeste particulieren zijn de kosten te hoog en is er met name een markt voor de woningcorporaties. Bij gestapelde bouw kan er meer potentie zijn. De vraag is ook of zo'n vergaande isolatie van de gevel nodig is. Zo kan bijvoorbeeld de standaard (RVO, 2022) ook met minder ingrijpende maatregelen worden gerealiseerd.

*Dakrenovatie:* Dakrenovatie is makkelijker dan gevelrenovatie, omdat je bij gevels te maken hebt met meer openingen en daarmee met meer maatwerk.

*Deelconcepten:* Voor eengezinswoningen zou met een deelconceptoplossing een grote slag kunnen worden gemaakt richting 2030: bijvoorbeeld door een combinatie aan te bieden van enkel glas vervangen, binnenisolatie, kierdichting, ventilatie en eventueel een warmtepomp en dat als industrieel product op de markt te brengen. Industrialisatie van deelconcepten sluit goed aan bij een aanpak die isoleert richting de standaard.

*Energiemodules:* dit is een concept waarbij de installaties compact en in één keer kunnen worden geïnstalleerd in de woning (plug & play).

## KPI - Verduurzaming

Een industriële aanpak heeft een aantal voordelen op het gebied van duurzaamheid:

- Er is veel minder afval: voor nieuwbouw is er nu nog maar een kilo aan afval in plaats van 18 m<sup>3</sup> per woning, omdat de inkoop van materialen veel beter kan worden afgestemd op maatvoering van het element.
- De losmaakbaarheid is over het algemeen beter. Standaardisatie betekent dat materialen aan het einde van de levensduur beter hergebruikt kunnen worden.
- Minder materiaalgebruik en een betere recycling heeft invloed op de Milieuprestatie Gebouwen. Door de schaalgrootte kun je meer aandacht besteden aan de footprint van materialen en een markt creëren voor het gebruik van nieuwe (bijvoorbeeld circulaire of biobased) producten.
- Er zijn minder vervoersbewegingen nodig, zowel voor het materiaal als het personeel. Hierdoor wordt bespaard op brandstof en wordt (geluids-)overlast in de omgeving van de bouwplaats vermeden. Wat betreft het personeel komt dit doordat er minder mensen nodig zijn en omdat de werknemers over het algemeen dicht bij de fabriek wonen, maar niet noodzakelijk in de buurt van de bouwplaats zelf.
- Reductie van de uitstoot van NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub> en fijnstof op de bouwplaats.
- Doordat machines veel preciezer elementen op maat kunnen maken, passen de verschillende onderdelen beter in elkaar waardoor de luchtdichtheid van de bouwdelen beter is. Hierdoor heeft de woning energetisch een betere kwaliteit.

De geïnterviewde experts schatten in dat een industriële renovatie niet zal leiden tot verdergaande renovatie dan wanneer de traditionele aanpak zou worden gekozen, omdat de klant een bepaalde mate van isolatie vraagt en deze Rc-waarde het uitgangspunt is. Maar als er minder mankracht nodig is en de gevraagde Rc-waarde goedkoper kan worden gerealiseerd, dan kunnen met dezelfde arbeidsuren en hetzelfde budget meer woningen worden verduurzaamd of naar een hoger isolatieniveau.

***Een industriële aanpak kan met name een impact hebben op het verbeteren van de circulariteit van het bouw- en renovatieproces. Ook kan er een reductie in de CO<sub>2</sub>-uitstoot plaatsvinden doordat het bouwproces in de fabriek minder vervoersbewegingen vraagt en doordat de energieprestatie van de woning verbetert door een hogere isolatiegraad en een betere kierdichting.***

## KPI - Schaalbaarheid

In 2018 werden 1.200 woningen industrieel gerenoveerd. Voor gevelvervangings van grondgebonden woningen ligt de markt momenteel zo goed als stil. De kleine groep woningen waarvoor een buitengevelisolatie interessant is zijn woningen met slechte labels die al vóór 2030 moeten worden aangepakt. Ook naar de renovatie van hele woningen lijkt weinig vraag te zijn, maar de omvang is onbekend. Voor dakrenovatie lijkt er een groter potentieel te zijn.

De geïnterviewden geven aan dat bouwbedrijven gefrustreerd raken door de achterblijvende vraag. Het is ook de vraag in hoeverre industriële renovatie ter sprake komt bij de planvorming. Ondernemers die investeren in renovatie zullen met een voorstel voor de aanpak komen waar ze aan verdienen en woningcorporaties hebben al vaste leveranciers die niet industrieel werken.

***Op het moment is er geen sprake van opschaling en ligt de markt voor industriële renovatie van de hele schil en de gevel stil; voor dakrenovaties is er beperkte vraag. Het volgende hoofdstuk gaat verder in op randvoorwaarden voor opschaling.***

### KPI - Kostprijsreductie

De grootste kostprijsreductie door industrialisatie zit in het proces waarbij de opdrachtgever en opdrachtnemer minder uren kwijt zijn. Industriële renovatie van het dak kan daarmee in potentie zo'n 20-40% goedkoper zijn dan de traditionele aanpak. De vraag is of het momenteel wel minder dan voor de prijs van de traditionele aanpak wordt aangeboden. Vanwege de schaarste op de markt kunnen partijen de marktprijs vragen zoals men gewend is voor traditionele renovatie.

Een belemmering voor de (verdere) kostprijsreductie is dat de capaciteit van de fabrieken momenteel bij lange na niet volledig benut wordt (slechts voor zo'n 24%). Een fabriek vergt een grote investering, dus als er weinig volume wordt gedraaid is de bijdrage aan de kapitaalinvestering per woning hoog. Verder is de productie momenteel versnipperd (voor nieuwbouw zijn er al zo'n 35 fabrieken) en is het belangrijk dat de output per fabriek voldoende is.

***Voor industriële dakrenovaties lijkt een kostprijsreductie van 20-40% inderdaad realistisch, maar dan moet de capaciteit van de fabrieken beter benut worden.***

### KPI - Aantrekkelijkheid

Een groot voordeel van industriële renovatie is dat het minder gedoe voor de bewoner oplevert (er worden bijvoorbeeld minder fouten gemaakt) en het veel sneller verloopt, bijvoorbeeld renovatie in een week. De renovatie van de schil geeft de woning ook een nieuwe uitstraling wat de woning aantrekkelijker maakt.

Het is wel cruciaal dat de consument keuzevrijheid wordt geboden, anders ontstaat er weerstand tegen het concept. Het kan ook helpen als woningeigenaren opties zouden kunnen kiezen op basis van 3D-beelden om het concreet te maken.

***Industriële renovatie heeft aspecten die het voor woningeigenaren aantrekkelijk maken ten opzichte van de klassieke methode waarbij het aanbieden van keuzevrijheid nog een belangrijk element is om weerstand tegen fabrieksmatig bouwen weg te nemen.***

### KPI – Arbeidsproductiviteit

Een probleem voor de klassieke manier van renovatie is dat er niet genoeg arbeidskrachten zijn. Voor industrialisatie is minder menskracht nodig en ook op de bouwplaats kunnen de processen nog verder geoptimaliseerd worden. De productiviteit ligt bij een industriële aanpak een stuk hoger dan bij de traditionele manier. Voor een nieuwbouwwoning van een volledig industriële bouwer zijn volgens geïnterviewden bijvoorbeeld maar 230 uur nodig ten opzichte van 1200 uur bij de traditionele bouw. Bij de industriële aanpak kan je tijd winnen bij een goede woningopname, tijdens het productieproces en bij de afronding, omdat je niet 2 of

3 keer terug moet naar de woning om fouten te herstellen. Ook op het gebied van industriële installaties verwacht je een betere arbeidsproductiviteit, omdat je op de bouwplaats zelf minder denkwerk hoeft te verrichten en bij de installatie minder aansluitingen hebt. De arbeidsproductiviteit kan nog verder toenemen naar 2030 als het volume van de industriële bouw toeneemt.

In een fabriek zijn andere specialismen nodig dan op een bouwplaats, wat het makkelijker kan maken om aan personeel te komen en mensen om te scholen. De industrialisatie biedt bijvoorbeeld de mogelijkheid voor medewerkers die op grote schaal één taak uitvoeren en daar een minder brede opleiding voor nodig te hebben. Alleen voor kritische werkzaamheden zijn specialistisch opgeleide werknemers nodig, zoals het inregelen van de warmtepomp. Verder is het belangrijk dat werknemers digitaal onderlegd zijn. Deze vaardigheden moeten nu in de opleidingen worden opgenomen.

Werken in een fabriek kan ook aantrekkelijker zijn, omdat het werk fysiek minder zwaar is en de weersomstandigheden geen rol meer spelen. Dat biedt ook mogelijkheden voor mensen met een afstand tot de arbeidsmarkt en voor een duurzame inzetbaarheid van medewerkers.

***De richtwaarde van TKI UE van 30% productiviteitsverbetering door de industriële aanpak lijkt eerder een ondergrens en kan veel hoger zijn. Daarnaast kan de prettige werkomgeving en het minder fysieke en specialistische karakter ervoor zorgen dat er meer arbeidskrachten beschikbaar zijn.***

## Randvoorwaarden voor opschaling

De vraag naar industriële renovatie is momenteel beperkt, omdat het niet bekend is en omdat vergaande renovatie hoge kosten met zich mee brengt. Om deze nieuwe manier van renoveren van de grond te krijgen is het daarom cruciaal dat opdrachtgevers anders gaan inkopen. Industrialisatie zou beter onder de aandacht moeten worden gebracht als een optie voor renovatie. Als er grotere volumes worden geproduceerd in de fabrieken kunnen ook de kosten omlaag, wat het weer gunstiger maakt om voor industriële renovatie te kiezen. Vraagbundeling van opdrachtgevers zou ook kunnen helpen om grotere volumes te produceren, bijvoorbeeld door particulieren te laten aansluiten bij woningcorporatie-initiatieven. Ook zou je kleinere bedrijven de mogelijkheid kunnen bieden om gebruik te maken van (flexibele) productielijnen, met name bij deelconceptoplossingen.

Verder is het belangrijk dat er attractieve oplossingen worden geboden, waaronder keuzevrijheid voor de consument. Dit betekent dat partijen een flexibele aanpak moeten bieden ('mass customisation').

## Potentiële marktontwikkelingen

In het Klimaatakkoord is afgesproken dat de gebouwde omgeving in 2050 CO<sub>2</sub>-neutraal moet zijn. In de woningvoorraad moet de CO<sub>2</sub>-uitstoot in 2030 met 2,4 Mton gereduceerd zijn, wat betekent dat meer dan 50.000 woningen per jaar moeten worden verduurzaamd, in totaal een half miljoen woningen. Uit (Mulder, Nauta, Klerks, & Donkervoort, 2021) blijkt dat met de huidige gegevens niet te achterhalen is wat het tempo van renovaties is.

In deze verkenning worden de potentiële marktontwikkelingen voor industrialisatie van renovatieconcepten uitgedrukt in het aantal gerenoveerde woningen t/m 2030, zie Figuur B 1.

Daarbij wordt ervan uitgegaan dat alleen woningen ouder dan 1995 (van na het bouwbesluit van 1992) een renovatie behoeven, de aanname is dat dit deel van de voorraad nog in oorspronkelijke staat verkeert en/of nog niet voldoende is na-geïsoleerd om aardgasgasvrij verwarmd te worden. De potentiële marktontwikkelingen worden hieronder toegelicht en kort beschreven in Tabel B 2.

Uit de interviews kwam naar voren dat industriële renovatieconcepten makkelijker toepasbaar lijken bij gestapelde woningen dan bij grondgebonden woningen. Ook wordt verwacht dat deze nieuwe manier van renoveren, met name buitengevelisolatie, vanwege de hoge kosten vooral door woningcorporaties zal worden uitgevoerd, en minder snel door individuele eigenaar-bewoners. Daarom maken wij in de marktontwikkelingen onderscheid in vier doelgroepen:

- eengezins - huurwoningen
- eengezins - koopwoningen
- meergezins - huurwoningen
- meergezins – koopwoningen

## Beschrijving

### Basispad & Verdubbeling

De Klimaat- en Energieverkenning 2021 (PBL, 2021) vormt in principe de leidraad voor het Basispad van de potentiële marktverkenningen in dit rapport. In de KEV zien we wel een toename van het aantal individuele energiebesparende maatregelen, maar er worden geen uitspraken gedaan over het aantal renovaties op woningniveau. We nemen daarom voor het Basispad geen aanname op over het aantal gerenoveerde woningen. De potentiële marktontwikkeling 'verdubbeling' vervalt daarmee ook.

### Natuurlijk moment

Deze benadering gaat uit van renovatie op een natuurlijk moment. De aanname is in dit geval dat de levensduur van isolatie 50 jaar is. Tussen 2020 en 2030 zou dan 10/50<sup>e</sup> van de woningvoorraad gerenoveerd worden, ruim één miljoen woningen. De helft van dit scenario is het tempo van verduurzaming waar het Klimaatakkoord zich op richt.

### Technisch potentieel

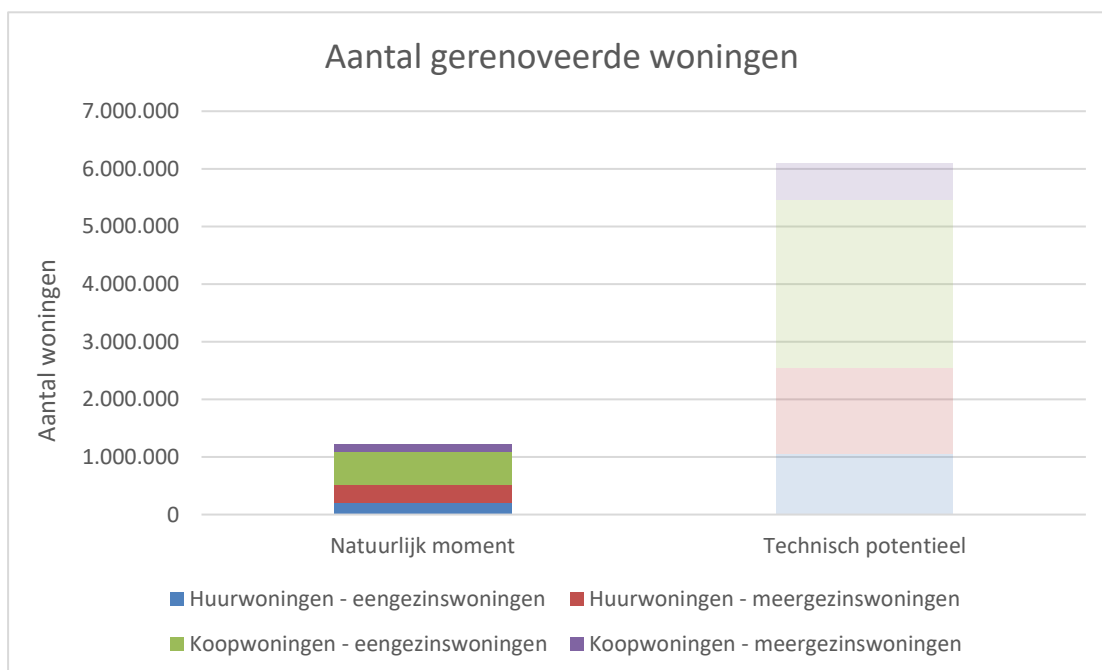
Het technisch potentieel is het maximaal theoretisch haalbare potentieel waarbij verondersteld is dat alle woningen ouder dan 1995 in 2030 zijn gerenoveerd. Het Klimaatakkoord streeft in 2050, 20 jaar later, naar 100% verduurzaming. Het gaat er in deze verkenning dan ook vooral om de impact te laten zien van zoveel gerenoveerde woningen.

Om zoveel woningen te hebben gerenoveerd moet wel aan een aantal voorwaarden worden voldaan. Ten eerste aan de kant van de woningeigenaar: deze moet bereid zijn om een investering te doen en om een renovatie uit te voeren met al het gedoe en de overlast die daarbij komen kijken. Renovaties tot het hoogste isolatieniveau, niveau 4 van Standaard en Streefwaarden (zie ook 'Impact'), kosten ruim 20.000 Euro voor een meergezinswoning en 30 à 40.000 Euro voor een eengezinswoning. Lagere investeringskosten zouden daardoor bijdragen aan een gunstiger business case. Ook het verminderen van ongemakken tijdens de renovatie zouden kunnen helpen om het aantrekkelijker te maken. Bij een klassieke renovatie vinden er wekenlang bouwwerkzaamheden plaats in de woning. Verder moet er aan de aanbodkant voldoende capaciteit en materialen zijn voor het uitvoeren van renovaties, zowel in aantal arbeidskrachten als de expertise.

Een industriële renovatie-aanpak heeft de potentie om op al deze punten een positieve bijdrage te leveren: lagere kosten, snellere uitvoering ter plaatse en hogere arbeidsproductiviteit.

Tabel B 2 Beschrijving van de potentiële marktontwikkelingen bij industriële renovatie waarvan de impact in dit deelrapport is berekend

| Potentiële marktontwikkelingen Industrialisatie |   |
|---|---|
| Beschrijving                                    |   |
| <b>Verdubbeling</b>                             | Er wordt in de KEV geen aanname gedaan over het aantal gerenoveerde woningen en daarmee kan er ook geen verdubbeling worden vastgesteld   |
| <b>Natuurlijk moment</b>                        | Met de aanname dat de levensduur van isolatie 50 jaar is zal tussen 2020 en 2030 al 10/50e van de woningvoorraad (ouder dan 1995) gerenoveerd worden.   |
| <b>Technisch potentieel</b>                     | 100% van de woningen ouder dan 1995 zijn in 2030 gerenoveerd  |
| Randvoorwaarden                                 |   |
| <b>Verdubbeling</b>                             | n.v.t.  |
| <b>Natuurlijk moment / Technisch potentieel</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Kostprijsreductie van renovaties</li> <li>- Een gunstige business case voor en investeringsbereidheid van de woningeigenaar</li> <li>- Oplossingen die aantrekkelijk zijn voor de (individuele) woningeigenaar</li> <li>- Voldoende arbeidscapaciteit en -expertise</li> <li>- Voldoende bouwmaterialen</li> </ul> |



Figuur B 1 Het aantal gerenoveerde woningen tot en met 2030 per potentiële marktontwikkeling en met onderscheid naar doelgroepen.

## Benodigde innovaties

Industrialisatie kan pas van de grond komen bij een grote vraag. Een grote vraag ontstaat pas als de kosten sterk dalen en het concept bekend wordt. De kosten zullen pas dalen bij een grote vraag. Industrialisatie zit daarmee gevangen in een patstelling. Het is van belang om deze patstelling te doorbreken om grootschalige industrialisatie van de grond te laten komen. Dit vergt niet als eerste innovaties, maar andere acties en maatregelen. Onder 'randvoorwaarden voor opschaling' wordt een aantal suggesties gedaan hoe de industrialisatie van renovatieconcepten zou kunnen toenemen.

## Impact

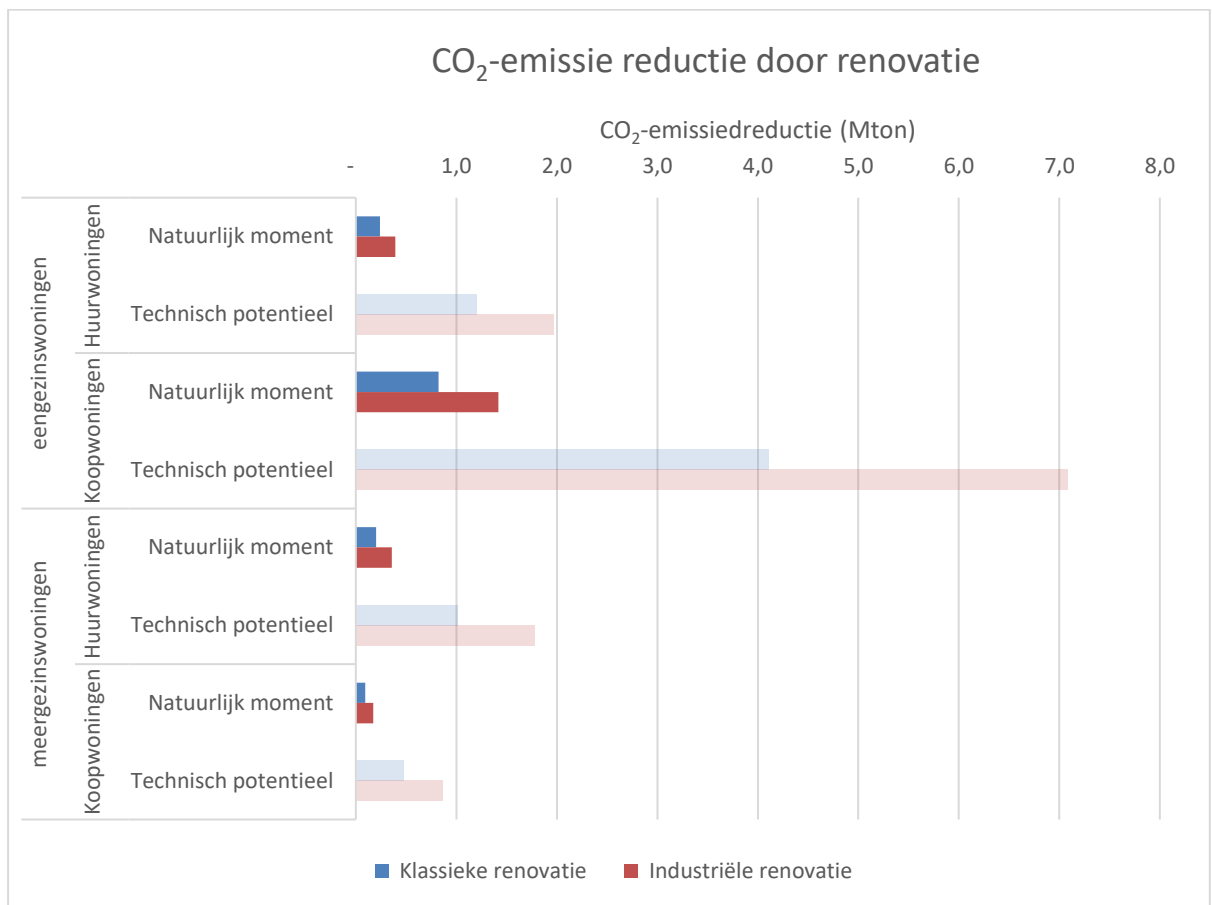
In dit deel wordt de potentiële impact van een deelonderwerp berekend bij verschillende marktontwikkelingen. Dit onderdeel richt zich alleen op een kwantitatieve impactberekening van de CO<sub>2</sub>-emissiereductie en van de nationale kosten. Andere effecten van een hoger marktaandeel of een innovatie blijven daarmee buiten beschouwing.

Bij de berekening van de impact maken we onderscheid tussen renovatie op de 'klassieke' manier, ambachtelijk werk op de bouwplaats, en middels een geïndustrialiseerde aanpak in de fabriek. Bij de klassieke manier gaan we ervan uit dat woningen worden verbeterd naar isolatieniveau 3 van 'Standaard en Streefwaarden' (S&S) (RVO, 2022), wat betekent dat de bovengrens van gangbare maatregelen wordt opgezocht. De kosten en energiebesparing (op aardgas) van deze renovatie voor de verschillende categorieën zijn ook afgeleid van S&S (zie de bijlage voor de kentallen).

Bij industriële renovatie past het isolatieniveau 4 van Standaard en Streefwaarden, 'vergaande maatregelen', beter, omdat een heel bouwdeel wordt vernieuwd. Ook hier zijn de kosten en energiebesparing afgeleid van S&S, maar de kosten zijn vervolgens met 30% verminderd. Uit de interviews kwam naar voren dat, in ieder geval voor dakrenovaties, deze kostenbesparing gerealiseerd kan worden met een industriële aanpak. Een uitgebreide toelichting op de aannames en kentallen staat in de bijlage.

## CO<sub>2</sub>-emissies

Renovatie op de klassieke manier levert een besparing op het aardgasgebruik van ongeveer 700 m<sup>3</sup>/jaar voor een eengezinswoning en 400 m<sup>3</sup>/jaar voor een meergezinswoning. Bij industriële renovatie is de besparing respectievelijk 1200 m<sup>3</sup>/jaar en 700 m<sup>3</sup>/jaar voor deze woningtypen. Als alle woningen gebouwd voor 1995 op de klassieke wijze worden gerenoveerd zou 6,8 Mton CO<sub>2</sub> bespaard worden. Als de woningen in plaats daarvan op een industriële wijze worden gerenoveerd zou daarmee 11,7 Megaton CO<sub>2</sub> worden bespaard. Zie Figuur B 2 voor de verschillende potentiëlen. De directe CO<sub>2</sub>-emissie door de woningvoorraad wordt in de KEV geraamd op 15,8 Mton in 2020 en op 13,8 Mton in 2030, waardoor renovatie van de woningvoorraad een zeer significant aandeel van de CO<sub>2</sub>-uitstoot zou reduceren.



Figuur B 2 CO<sub>2</sub>-emissiereductie in 2030 als gevolg van aardgasbesparing door renovatie op de klassieke manier en bij industriële renovatie

## Nationale kosten

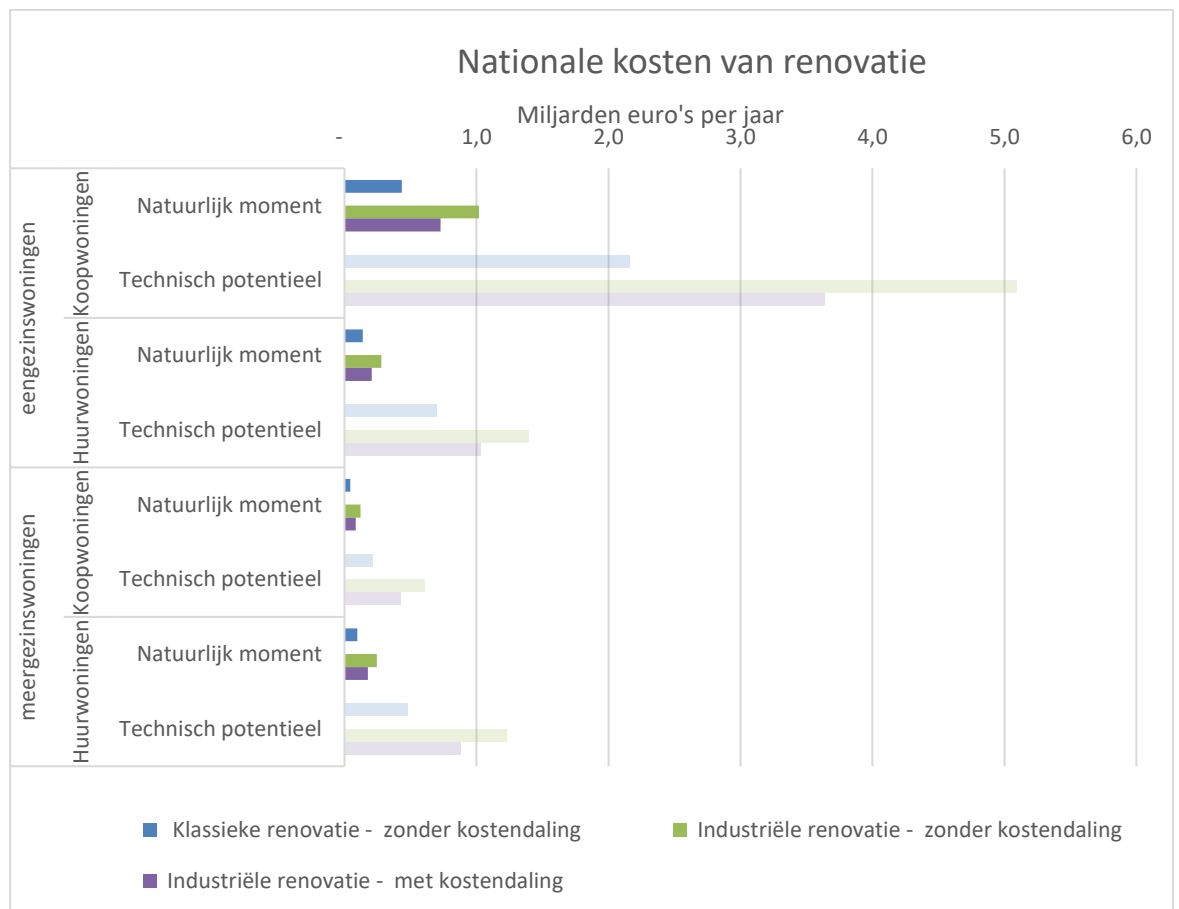
De nationale kosten van de verschillende potentiële marktontwikkelingen zijn weergegeven in Figuur B 3<sup>4</sup>. De nationale kosten bestaat uit de investeringen die nodig zijn voor de renovaties en de baten van de daling in energiekosten door de besparing op aardgas. De verandering in gemiddelde onderhoudskosten aan de isolatie is buiten beschouwing gelaten in de berekening van de nationale kosten (hier aangenomen is dat voorafgaand aan renovatie er geen periodiek onderhoud werd gedaan en na de renovatie nog alleen beperkt of geen onderhoud meer nodig is). De jaarlijkse investeringskosten worden verdeeld over 50 jaar (de aangenomen levensduur van isolatie).

De jaarlijkse investeringskosten voor renovatie naar niveau 4 volgens S&S zijn ongeveer een factor 3 hoger dan renovatie naar niveau 3 (in beide gevallen zonder kostendaling). Voor de klassieke renovatie is geen kostendaling verondersteld. In de situatie met kostendaling door innovatie veronderstellen we op basis van de interviews een kostendaling van 30% voor industriële renovaties, omdat er veel minder arbeidsuren nodig zijn voor een renovatie. Deze jaarlijkse besparing op de energiekosten is in verhouding circa 20% van de jaarlijkse investeringskosten (zowel voor klassiek als industrieel renoveren).

<sup>4</sup> Omdat het Basispad geen aanname voor renovatie heeft, spreken we hier niet van nationale meerkosten, de additionele kosten ten opzichte van de KEV, maar gewoon van nationale kosten.



De reden dat de nationale kosten voor industriële renovatie hoger zijn dan van klassieke renovatie heeft te maken met de hogere isolatiegraad die verondersteld is bij industriële renovatie. Daardoor zijn er hogere initiële investeringskosten ten opzichte van klassieke renovatie, ook met 30% kostendaling door industrialisatie. De kostenbesparing door industriële renovatie is ook hoger (en de reductie in CO<sub>2</sub>-emissies is flink hoger), maar compenseert de extra investeringskosten ten opzichte van klassieke renovatie maar deels. Het is voor een vergelijking van kosteneffectiviteit eerlijker om te kosten per vermeden ton CO<sub>2</sub> te vergelijken. Die zijn voor klassieke renovatie zonder kostendaling 360 euro per ton vermeden CO<sub>2</sub>. Voor industriële renovatie met 30% kostendaling inbegrepen zijn deze 470 euro per ton vermeden CO<sub>2</sub> (dat is dus een verschil van 30%).



Figuur B 3 Nationale kosten in 2030 voor klassieke renovatie in vergelijking met industriële renovatie (zonder én met kostendaling).

## Samenvatting

Industrialisatie is in potentie een manier om renovatieconcepten grootschalig, met minder ongemak, goedkoper, duurzamer en met hogere kwaliteit te produceren. 30% kostenreductie voor een industriële dakrenovatie ten opzichte van een renovatie op de traditionele manier zou bijvoorbeeld mogelijk moeten zijn. Ook kan makkelijker een hogere isolatiegraad bereikt worden waardoor extra CO<sub>2</sub>-emissie wordt voorkomen. Er zijn initiatieven voor gestart, maar op dit moment stopt de vraag naar zulke concepten. Dit betekent dat de kosten per renovatie hoog blijven en het voor bedrijven niet aantrekkelijk is om te investeren in industrialisatie. Om

de emissiereductie door renovatie van woningen te versnellen is het noodzakelijk om de vraag naar industrieel geproduceerde renovatieconcepten te stimuleren. Eén manier om dit te doen is om de consument aantrekkelijke opties te bieden voor renovatieconcepten, bijvoorbeeld door middel van 'mass customisation'.

Hoewel de eerste praktijkgevallen in het Stroomversnellingsprogramma gericht waren op grondgebonden woningen, geven de geïnterviewde experts aan dat gestapelde bouw in potentie beter geschikt is voor industriële concepten. Met name woningcorporaties kunnen een belangrijke rol spelen in het creëren van voldoende vraag. Mogelijk kunnen koopwoningen meeliften op deze vraagimpuls.

# C. Deelrapport Drijfveren van en barrières voor woningeigenaren

## Inleiding

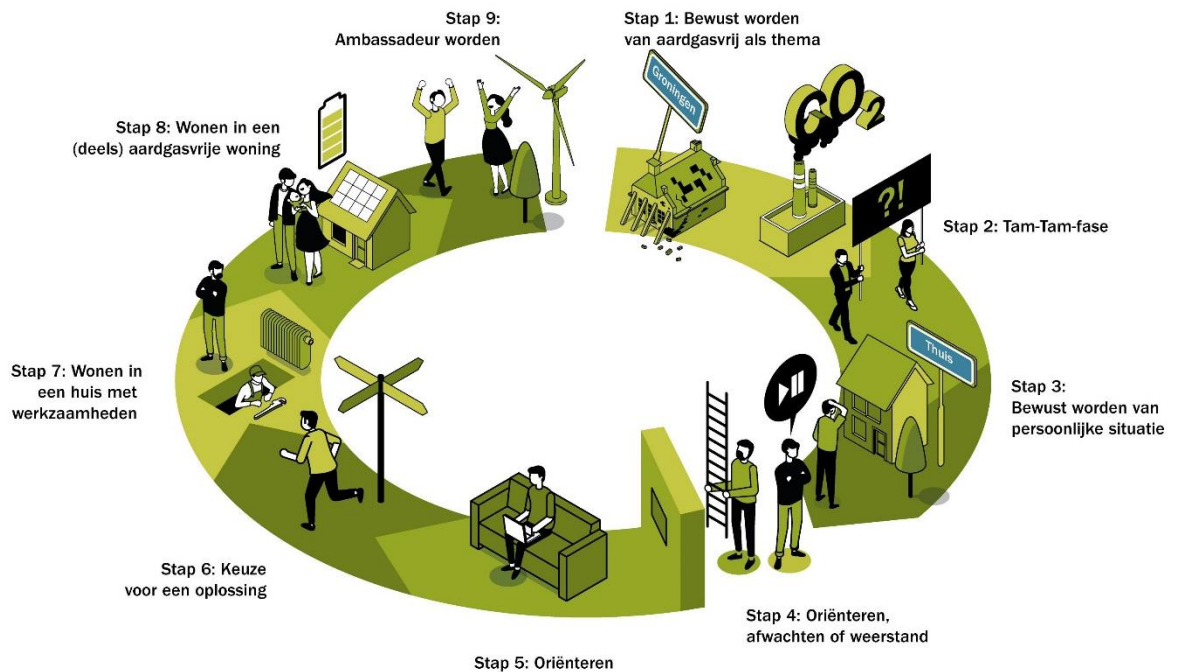
De woningeigenaar speelt uiteraard een belangrijke rol in de energietransitie in de gebouwde omgeving. Dit deelonderwerp beschrijft de drijfveren van en barrières voor woningeigenaren bij het nemen van duurzame maatregelen in hun woning.

## Context

### De klantreis aardgasvrij wonen

Bewoners doorlopen verschillende stappen naar een aardgasvrije woning. TNO heeft hiervoor de 'klantreis aardgasvrij wonen' ontwikkeld die bestaat uit 9 stappen Figuur C 1 (de Koning, Kooger, Hermans, & Tigchelaar, 2019). De eerste drie stappen gaan voornamelijk over bewustwording. Bewoners verzamelen in deze stappen informatie en vormen een (initiële) mening over het verduurzamen van hun woning. In de stappen 4 t/m 6 staat besluitvorming centraal. Bewoners gaan zich in deze stappen oriënteren op en uiteindelijk een besluit nemen over of ze hun woning willen verduurzamen of niet. De laatste stappen 7 t/m 9 gaan over de ervaringen die bewoners hebben met wonen in een huis waar duurzame maatregelen zijn toegepast. Dit kunnen zowel isolatiemaatregelen zijn als maatregelen voor duurzame energieopwekking of alternatieven voor verwarmen met aardgas. Op basis van onderzoek naar deze klantreis in de praktijk zijn er een aantal hoofdconclusies:

1. Bewoners doorlopen verschillende stappen in het proces richting een duurzame/aardgasvrije woning
2. Bewoners kunnen uitvallen bij een bepaalde stap doordat er niet wordt voldaan aan de voorwaarden om over te gaan naar de volgende stap in het proces
3. Bewoners bevinden zich op verschillende momenten in verschillende stappen van de klantreis.
4. In de verschillende stappen van de klantreis worden verschillende drijfveren en barrières ervaren.



Figuur C 1 Klantreis naar aardgasvrij wonen

### Drijfveren en barrières rondom attitudes en betrokkenheid bij het proces zijn het meest bepalend voor draagvlak

De drijfveren en barrières zijn ook in te delen naar soort. Er zijn specifieke drijfveren en barrières die te maken hebben met

- een product of dienst (dit kan ook een bepaalde financieringsvorm zijn),
- de karakteristieken van individuele bewoners,
- bestaande aannames of attitudes en/of
- ervaringen met het proces.

Hoewel in beleidsontwikkeling vaak veel nadruk wordt gelegd op product- of bewonerskarakteristieken, blijkt in de praktijk dat bestaande aannames die bewoners hebben (ontwikkeld) en hun ervaringen met het gehele proces richting duurzaam wonen belangrijkere indicatoren zijn voor draagvlak. Enkele voorbeelden van aannames zijn: “aardgas is een schone brandstof (barrière)”, “de elite legt het ons op (barrière)”, “uiteindelijk moeten we toch van het aardgas af (drijfveer)”, “aardgasvrij wonen is veiliger (drijfveer)”. Enkele voorbeelden van ervaringen met het proces zijn: “ik heb het gevoel geen keuze te hebben (barrière)”, “mijn inbreng over wat er technisch mogelijk is in mijn woning wordt niet serieus genomen (barrière)”, “ik heb het idee dat er goed naar mij geluisterd wordt (drijfveer)”, “ik heb vertrouwen in het wijkteam (drijfveer)”.

Het draagvlak voor (financiële) producten is daarom voor een belangrijk deel afhankelijk van het draagvlak voor de (lokale) warmtetransitie. Deze drijfveren en barrières spelen in het algemeen een belangrijke rol, of het nu de aansluiting op een warmtenet, all-electric wonen of stap voor stap verduurzamen betreft. In de interviews met bewoners wordt niet of zelden aangegeven dat er behoefte is aan meer of een ander soort verduurzamingsmaatregelen voor in de woning.

Op de site van De energieke gemeente<sup>5</sup> staan tips, tools en praktijkvoorbeelden van hoe om te gaan met verschillende uitdagingen rondom bewonersparticipatie, die behalve voor gemeenten uiteraard ook relevant kunnen zijn voor andere geïnteresseerde partijen.

### Bewoners ervaren specifieke drijfveren en barrières bij de aansluiting op een warmtenet

In een onderzoek dat TNO heeft uitgevoerd voor Enpuls is onderzocht hoe bewoners warm kunnen worden gemaakt voor een warmtenet (Kort, de Koning, & Kooger, 2020). Een aantal belangrijke conclusies uit dit rapport zijn:

- Over het algemeen is het kennisniveau onder bewoners over wat een warmtenet precies is en hoe het werkt laag.
- Bewoners hebben vaak weinig vertrouwen in warmtebedrijven.
- Bewoners hechten sterk aan autonomie en onafhankelijkheid en ervaren weerstand tegen monopolypositie van warmtebedrijven. Dit maakt ook dat bewoners positiever staan tegenover buurtwarmtenetten.
- De waarden verbondenheid en invloed spelen een belangrijke rol. De wijze en het moment waarop bewoners worden betrokken bij het besluitvormingsproces bepalen daarom in hoge mate hun houding ten opzichte van warmtenetten.
- De keuze van de warmtebron voor een warmtenet heeft invloed op het draagvlak onder bewoners. Bewoners staan positiever tegenover warmtenetten met duurzame bronnen.

### Financiering van duurzame maatregelen in woningen

Naast onderzoek naar drijfveren en barrières van bewoners ten aanzien van de warmtetransitie heeft TNO ook onderzoek gedaan naar de perceptie die woningeigenaren hebben van financieringsinstrumenten voor aardgasvrije investeringen (Hermans, van Lidth, Klösters, Tigchelaar, & Kooger, 2020). Inzichten uit dit onderzoek zijn:

- Mensen zijn over het algemeen leen-avers. De communicatie rondom financieringsconstructies moet vooral het uiteindelijke doel, een duurzame woning, centraal stellen en niet de lening an sich. Mensen zien dit als een nuttig doel waarvoor ze eventueel wel een lening zouden overwegen. Financiering wordt gezien als een middel dat de eigenaar-bewoners ondersteunt bij het bereiken van dit doel.
- Houd bij het bespreken en aanbieden van financieringsopties voor verduurzaming van woningen aan ouderen rekening met de afwijkende percepties die deze groep heeft over verduurzaming en financieringsmogelijkheden.
- Bied afdoende ondersteuning en zekerheid voor huiseigenaren met een laag inkomen en/of weinig eigen vermogen (spaargeld), zodat zij zich minder zorgen hoeven te maken over de mogelijke gevolgen van financiering van verduurzaming van hun woning

### Leeswijzer

Dit deelrapport heeft alleen een kwalitatief deel wat bestaat uit de onderdelen 'ontwikkelingen' en 'randvoorwaarden voor opschaling'. Onder 'Ontwikkelingen' wordt beschreven welke marktinnovaties er momenteel zijn. Bij 'Randvoorwaarden' zal worden beschreven wat woningeigenaren nodig hebben om de energietransitie op te schalen en tenslotte wordt samengevat wat de trends zijn voor dit deelonderwerp.

---

<sup>5</sup> <https://energy.nl/tools/de-energieke-gemeente/>

## Ontwikkelingen

Er is al veel kennis en wordt nog veel kennis opgedaan over het thema bewonersparticipatie. Ook zijn er op dit moment al verschillende marktinnovaties beschikbaar of in ontwikkeling om bewoners, gemeenten en energieadviseurs te ondersteunen.

Er zijn bijvoorbeeld meerdere partijen die zich richten op een totaalaanbod voor woningverduurzaming, zoals Woonduurzaam en De Energiebespaarders, die beiden bewoners gedurende de hele klantreis adviseren en ontzorgen bij het nemen van duurzame maatregelen. Een ander voorbeeld is Winst uit je Woning die grootschalige inkoopacties via gemeentes organiseren gekoppeld aan energie-adviezen. Op dit moment wordt met Winst uit je Woning in samenwerking met TNO onderzocht hoe zij hun dienstverlening verder kunnen verbeteren.

Er zijn ook marktpartijen die inspelen op de behoefte om participatiemethoden op te schalen. Een voorbeeld hiervan is TheEarlybirds die bewoners via een digitale omgeving laten meedenken over bijvoorbeeld het aardgasvrij maken van een wijk of het plaatsten van een zonneveld.

Verder zijn er adviesbureaus actief die gemeentes kunnen ondersteunen bij de transitie naar duurzame woningen. Toch zijn er nog veel gemeentes die worstelen bij het vormgeven en uitvoeren van een goede gebiedsgerichte aanpak.

Tenslotte heeft het bedrijf Energiepaleis samen met onder andere TNO en de Hogeschool Utrecht gewerkt aan een opleidingsprogramma en een tool om adviseurs voor woningverduurzaming te ondersteunen bij zowel het geven van technisch advies als bij het luisteren en begrijpen van bewonerswensen. Op dit moment zijn beiden nog in ontwikkeling.

Vaak is er echter nog te weinig ondersteuning in de uitvoeringsfase en moet een bewoner veel zelf uitzoeken en regelen. Ook zijn innovaties vaak nog niet volledig uitontwikkeld, bereiken ze een beperkte doelgroep, of zijn ze vooral in bepaalde situaties geschikt. Dit maakt dat marktinnovaties op het moment nog niet volledig in de behoeftes kunnen voorzien.

## Randvoorwaarden voor opschaling

De volgende zeven punten beschrijven behoeftes om bewoners nog beter te ondersteunen in de transitie naar duurzaam wonen:

### 1 Het opschalen van participatiemethodieken

Participatieprocessen zijn vaak tijdrovend. Wat kan werken voor een relatief kleine groep bewoners, kan niet zomaar worden opgeschaald naar grotere wijken of gemeentes. Er is meer kennis nodig over hoe participatiemethoden kunnen worden opgeschaald zonder de impact en werking van kleinschalige aanpakken te verliezen.

### 2 Een aantrekkelijk totaalaanbod voor woningverduurzaming

Meer onderzoek is nodig naar de voorwaarden waaronder bewoners bereid zijn sneller en meer duurzame maatregelen in één keer te nemen. Bewoners nemen nu één, of soms twee maatregelen per keer. Om de transitie te versnellen moet er meer aandacht komen voor een aanbod dat goed is afgestemd op de wensen en behoeftes van bewoners in verschillende typen woningen en afgestemd op de mogelijkheden vanuit de markt.

### **3 Meer ondersteuning voor bewoners in de uitvoeringsfase**

Vaak is er ondersteuning voor bewoners in de verkennende fase van de transitie naar een aardgasvrije woning. Er worden bijvoorbeeld adviseurs beschikbaar gesteld om met de bewoner af te stemmen wat voor maatregelen er mogelijk zijn en welke financieringsvormen daarbij passen. Het komt echter vaak voor dat de bewoner er daarna alleen voorstaat. Zij/hij moet dan zelf offertes gaan opvragen en de afstemming regelen tussen aannemer, vloerlegger, ramenzetter etc. Bewoners kunnen hierdoor ontmoedigd raken en de renovatieplannen staken.

### **4 Meer onderzoek naar behoeftes van specifieke doelgroepen**

Mensen met energie(armoede), anderstaligen en jongeren zijn drie groepen die nog niet voldoende betrokken zijn/worden bij de warmtetransitie. Meer onderzoek is nodig naar wat deze groepen nodig hebben om mee te kunnen en willen komen in de transitie en wat de rol van de gemeente, woningcorporaties en andere relevante partijen hierin is.

### **5 Meer ondersteuning voor gemeentes om uitvoering van aardgasvrije wijken te realiseren**

Veel (niet-proeftuin) gemeentes hebben een (groot) tekort aan mensen, tijd en geld voor de planning en uitvoering van aardgasvrije wijken. Meer ondersteuning is nodig om genoeg tijd en aandacht te besteden aan o.a. een goed proces met bewoners.

### **6 Meer ondersteuning voor bewonerscollectieven**

Bewonerscollectieven kunnen een belangrijke partner zijn van gemeentes in de planning en uitvoering van duurzame woningen/aardgasvrije wijken. Er wordt vaak nog niet optimaal gebruik gemaakt van bewonerscollectieven. Ook worstelen de collectieven zelf met hun rol en het in stand houden van het collectief. Er is betere wederzijdse hulp en afstemming nodig tussen beide partijen.

### **7 Betere interactie tussen bewoner, adviseur en installateur**

Installateurs en adviseurs kunnen een belangrijke rol spelen in het uiteindelijke besluit van een bewoner wel of niet over te gaan op een (bijvoorbeeld) aardgasvrij alternatief. Bewoners hebben behoefte aan installateurs/adviseurs die naast technisch ook sociaal onderlegd zijn, maar deze hebben deze vaardigheden niet altijd of worstelen bijvoorbeeld met beperkte tijden voor woningopnames. Meer inzicht is nodig over hoe de interactie tussen bewoner en installateur/adviseur verbeterd kan worden en wat beide partijen daarin nodig hebben.

## **Samenvatting**

Er is de afgelopen jaren steeds meer aandacht gekomen voor de sociale aspecten van de energie- en warmtetransitie, naast de technische en economische. Dit heeft geleid tot toegenomen aandacht en interesse in het faciliteren en betrekken van bewoners in de transitie naar duurzaam wonen. Er is en wordt veel onderzoek gedaan en praktijkervaring opgedaan met het in kaart brengen van bewonerswensen en zorgen, de mogelijkheden en obstakels van gemeentes om dergelijke processen vorm te geven, het ontstaan van kleine en grootschalige bewonersinitiatieven, energiecorporaties, energieloketten en commerciële organisaties die bijdragen het ontwikkelen van onder andere dienstverlening op het gebied van woningverduurzaming. In aardgasvrije en niet-aardgasvrije proeftuinen worden langzaam meer en meer woningen aardgasvrij gemaakt waarbij bewoners steeds meer centraal komen te staan.

Toch blijft grootschalige woningverduurzaming nog uit. We moeten richting een situatie waarbij gemeentes voldoende middelen hebben om de transitie op lokale schaal uit te voeren. Het is zaak om de opgedane kennis over bewonersparticipatie te gaan opschalen en fijn te slijpen zodat; 1) ook moeilijk bereikbare doelgroepen een stem krijgen; 2) er voldoende ruimte is voor een persoonlijke aanpak en dat niet ten koste gaat van onrealistisch veel geld en tijd; 3) er nog meer met bewoners wordt georganiseerd in plaats van over hun hoofden heen besloten. Bewoners die willen moeten beter ondersteund worden in de uitvoeringsfase. Het kost bewoners nu vaak nog zeer veel tijd goed af stemmen tussen vele verschillende uitvoerders, aannemers en installateurs.

We moeten naar een situatie waarbij er niet wordt verwacht van gemeentes om deze grote opgave zonder (financiële) ondersteuning, tijd en expertise op te lossen en waar er geen tijd of kennis is over hoe bewoners betrokken kunnen worden. Daarnaast moet het besef doordringen wat een grote ingreep het verduurzamen / aardgasvrij maken voor bewoners is, financieel, emotioneel en qua tijd. Er wordt nog te makkelijk gedacht dat met de keuze voor een aardgasvrij alternatief de grootste hobbel is genomen. Het Rijk en commerciële partners kunnen een belangrijke rol spelen om deze zaken op te lossen en een slinger te geven aan de warmtetransitie.



# D. Deelrapport Warmtepompen

## Inleiding

### Context

In het Klimaatakkoord is afgesproken dat in 2030 1,5 miljoen woningen aardgasvrij zijn gemaakt. Ongeveer de helft daarvan zal naar verwachting worden ingevuld met warmtepompen. TKI Urban Energy heeft op een rijtje gezet welke (door)ontwikkeling van warmtepompen nodig is om deze ambitie te realiseren en heeft deze vertaald in KPI's en richtwaardes voor het innovatieprogramma, zie Tabel D 1.

Tabel D 1 KPI's en richtwaardes voor warmtepompen zoals gedefinieerd in het MMIP4 van TKI UE. Voor KPI 7 en 8 zijn geen concrete doelstellingen geformuleerd, maar deze zijn ten behoeve van de interviews opgenomen in de lijst. (SPF = Seasonal Performance Factor; LTV = lagetemperatuurverwarming)

| Systeem KPI                     |                 |                  | 2019<br>(referentie) | Richtwaarde<br>2025 | Richtwaarde 2050         |
|---------------------------------|-----------------|------------------|----------------------|---------------------|--------------------------|
| 1. Investeringskosten           |                 |                  |                      |                     | 50% reductie t.o.v. 2019 |
| 2. Operationele kosten (€/jaar) |                 |                  |                      |                     | 50% reductie t.o.v. 2019 |
| 3. SPF                          | Lucht-<br>water | LTV              | 4                    | 5                   | 5,5                      |
|                                 |                 | Warm<br>tapwater | 1,75                 | 2                   | 2,5                      |
|                                 |                 | Koeling          | 3                    | 4                   | 4,5                      |
|                                 | Water-<br>water | LTV              | 5,5                  | 6                   | 6,5                      |
|                                 |                 | Warm<br>tapwater | 2,5-3                | 3,25                | 3,5                      |
|                                 |                 | Koeling          | 45                   | 50                  | 55                       |
| 4. Geluid (dB)                  |                 |                  |                      |                     | <40/30/27*               |
| 5. Global Warming Potential     |                 |                  | 1430-3950            | < 150               | < 5                      |
| 6. Systeemintegratie            |                 |                  |                      | Smart grid<br>ready | Smart grid friendly      |
| 7. Compactheid                  |                 |                  |                      |                     |                          |
| 8. Installatieproces            |                 |                  |                      |                     |                          |

\* buiten/binnen (verkeersruimte)/binnen (verblijfsruimte)

### Scope

In dit deelrapport richten we ons hoofdzakelijk op all electric warmtepompen voor individuele woningen in de bestaande woningvoorraad. Daarbij hebben we naar de warmtepomp zelf gekeken (de binnen- en/of de buitenunit) en niet specifiek naar ontwikkelingen betreffende de warmtebron, het afgiftesysteem en tapwateropslag.

### Leeswijzer

Het kwalitatieve deel van dit deelrapport bestaat uit de onderdelen 'ontwikkelingen in de technologie' en 'randvoorwaarden voor opschaling' en is gebaseerd op deskresearch en interviews met Charles van Geelen (Infinitus en technische secretaris van de Vereniging Warmtepompen) en Richard Kemp (TNO). Het kwalitatieve deel is daarmee een selectie van wat volgens de geïnterviewden de belangrijkste knelpunten, ontwikkelingen en randvoorwaarden zijn om opschaling te realiseren.

Het kwantitatieve deel, bestaande uit de onderdelen 'potentiële marktontwikkelingen' en 'impact', is opgesteld door TNO. De aannames die hierbij gehanteerd zijn, zijn afgestemd met TKI UE en komen zoveel mogelijk voort uit de interviews en de Klimaat- en

Energieverkenning 2021 (KEV) (PBL, 2021). Zoals toegelicht in de inleiding stellen we nadrukkelijk dat wij niet voorspellen dat die gepresenteerde potentiële ook gerealiseerd worden. De potentiële marktontwikkelingen laten echter zien aan dat er een groter potentieel is, dat volgens de KEV nog niet wordt benut.

Het deelrapport wordt afgesloten met een samenvatting van de inzichten uit beide onderdelen.

## Ontwikkelingen in de technologie

*Samenvatting van het interview met Charles Geelen (Infinitus en technische secretaris van de Vereniging Warmtepompen) en Richard Kemp (TNO)*

Tot 2030 worden door de geïnterviewden weinig fundamentele veranderingen bij warmtepompen verwacht. De nieuwe typen warmtepompen zoals thermo-akoestisch en magneto-calorisch zullen pas na die tijd een rol van betekenis spelen. Daarnaast worden er warmtepompen ontwikkeld die beter functioneren op hogere bedrijfstemperaturen, zoals de CO<sub>2</sub>-warmtepomp (en mogelijk de thermo-akoestische warmtepomp). Verder richtten de ontwikkelingen zich tot nu toe voornamelijk op ruimteverwarming, maar er wordt nu ook ingezet op warmtepompen voor warm tapwater met hogere rendementen. Daarbij is er onder andere aandacht voor ontwerp van de tank, temperatuursensoren, het ervoor zorgen dat het water voldoende, maar niet te veel opwarmt, en voor 'slimme' controlesystemen die ervoor zorgen dat het water op een gunstig moment wordt opgewarmd, bijvoorbeeld als er een overschot is aan elektriciteit of vlak voor een verwachte warmwatervraag.

Hieronder zullen we ingaan op ontwikkelingen rond de KPI's die door TKI UE zijn opgesteld in het MMIP. Het is goed om hier op te merken dat deze KPI's niet alleen zijn gerelateerd aan de warmtepomp zelf, maar aan het hele systeem eromheen. Voor het rendement is bijvoorbeeld ook de warmtebron van belang, de software, gebruiksinstellingen, het buffervat en de buitentemperatuur.

### KPI: Investeringskosten

De productie van warmtepompen is volgens de geïnterviewden vrijwel uitontwikkeld en (onderdelen van) warmtepompen worden al massaal geproduceerd, dus schaalvergroting levert nog nauwelijks voordeel op. De productiekosten zullen naar verwachting dan ook niet veel verder dalen. Wel kunnen er kostenbesparingen optreden in het installatieproces in de woning, welke momenteel hoog zijn.

Ten eerste kan het installatieproces worden vergemakkelijkt met bijvoorbeeld plug & play-systemen (zie de KPI 'Installatieproces'). Daarnaast kunnen installateurs door meer ervaring betere inschattingen maken van de risico's. Op dit moment hebben installateurs veel zekerheden ingebouwd om risico's door onervarenheid met deze relatief nieuwe techniek te vermijden. De hoge relatieve marge op de cv-ketel passen installateurs ook toe op warmtepompen, waarbij het dan om veel hogere absolute bedragen gaat. Tot slot is er nog reductie mogelijk van de kosten voor transport, opslag en import. Een ruwe schatting van de geïnterviewden is dat er in totaal zo'n 15% reductie in de investeringskosten mogelijk is richting 2030.

***De doelstelling van 50% reductie in de investeringskosten in 2050 lijkt daarmee niet haalbaar met de gangbare warmtepompen.***

### KPI: Rendement

In het gangbare type warmtepompen zijn geen grote stappen meer te verwachten in technologische rendementsverbeteringen van de warmtepomp zelf. Volgens de geïnterviewden is hier wellicht nog ruimte voor zo'n 5-10% verbetering.

Belangrijke rendementsverbeteringen kunnen wel nog worden gehaald door gebruiks- en installatievriendelijkere systemen en meer ervaring met warmtepompen bij installateurs en ontwerpers. Een beter ingeregeld afgiftesysteem en een bewoner die goed met de karakteristieken van de warmtepomp kan omgaan kunnen voor een veel betere prestatie van de warmtepomp zorgen.

Een voordeel van de bodemwarmtepomp in dit opzicht is dat deze in tegenstelling tot een lucht-lucht- of lucht-waterwarmtepomp de COP<sup>6</sup> ook hoog kan houden op de koudste dagen. Dit maakt een substantieel verschil voor de netbelasting van circa 2 kW per woning. De toepassing van individuele bodemwarmtepompen in de bestaande bouw stuiten wel vaak op het bezwaar van de noodzaak van heraanleg van een deel van de tuin (tenzij dit onder de oprit zou kunnen bij iets ruimer aangelegde woonwijken). In plaats van individuele bodemwarmtesystemen is het in de bestaande bouw gunstiger om een grote bodemwarmtepomp te plaatsen voor meerdere woningen met een lokaal warmtenet(je). Deze klein-collectieve systemen (op straatniveau) geven minder overlast en kosten, maar zijn nog onderbelicht en onbekend, mogelijk omdat het vraagt om samenwerking tussen meerdere bewoners, wat complexer is.

Verder zijn er nieuwe type warmtepompen in ontwikkeling, zoals de thermo-akoestische warmtepomp en de Stirling warmtepomp, die een hoge COP lijken te behouden met verschillende bronnen en afgiftetemperaturen.

Tot slot is een lagere COP op momenten van overschot aan energie minder erg dan op momenten van schaarste. Een KPI 'Piekbelasting van het elektriciteitsnet' zou interessant zijn om te onderzoeken. Onderzoek naar deze KPI zou voor meerdere technieken kunnen plaatsvinden, niet alleen voor warmtepompen. Het verschil in rendement op verschillende momenten zou ook kunnen worden gedekt door de KPI operationele kosten vanwege de correlatie tussen energieprijzen en beschikbaarheid.

***De rendementsverbetering in de KPI-doelstelling van 37% voor lagetemperatuurverwarming (LTV) door lucht-waterwarmtepompen en 18% voor water-waterwarmtepompen met gangbare warmtepompen moet vooral worden gezocht in een betere afstelling door de installateur interactie met andere installaties en door efficiënter gebruik door de bewoner.***

### KPI: Operationele kosten

De operationele kosten zijn afhankelijk van de rendementen die, zoals hiervoor beschreven, niet veel gaan veranderen. Er worden dan ook geen grote ontwikkelingen verwacht in de operationele kosten.

***De doelstelling van 50% reductie in de operationele kosten in 2050 lijkt daarmee niet haalbaar met de voorziene technische ontwikkelingen van warmtepompen.***

---

<sup>6</sup> Coefficient of Performance (COP) is aanduiding voor de verhouding tussen geleverde warmte en verbruik. Een hoge COP houdt dat een warmtepomp veel warmte levert met een laag verbruik.

### KPI: Geluid

Technisch is het mogelijk om het geluid van de luchtwarmtepomp verder te reduceren, maar niet elke producent doet dat. Warmtepompen die met aandacht voor geluid zijn ontworpen zijn nu zo'n 2 tot 3 dB stiller dan vijf jaar geleden. Het geluid wordt veroorzaakt door de compressor en de ventilator. Geluid van de compressor kan met goede trillingsdemping en isolatie verminderd worden. Bij de ventilator valt nog veel te winnen met een goed ontwerp van de bladen en een diffuse verdeling van de luchtstroom. Verder produceren grotere ventilatoren ook minder geluid, dus de gewenste/intuïtieve trend naar compactere warmtepompen is natuurkundig strijdig met deze KPI. Tot slot zijn er geluiddempende kasten voor warmtepompen, maar die zijn vrij duur (> 1000 Euro).

***Technisch bestaat de mogelijkheid om warmtepompen veel stiller te maken en daarmee de doelstellingen te behalen.***

### KPI: Global warming potential (GWP)

Het global warming potential (GWP) is een aanduiding voor de mate waarin een broeikasgas in de atmosfeer bijdraagt aan klimaatverandering. Recent heeft er een grote verschuiving plaatsgevonden van het gebruik van R410 als koudemiddel naar R32. R32 heeft een lager GWP en wordt nu algemeen toegepast. Er moet wel een afweging worden gemaakt tussen het GWP, giftigheid en ontvlambaarheid van koudemiddelen, maar al met al wordt het risico op lekkage acceptabel geacht voor woningtoepassing.

Er zijn veel ontwikkelingen gaande op het gebied van natuurlijke koudemiddelen. Propaan is nu bijvoorbeeld in opkomst, maar wordt nog hoofdzakelijk in buitenunits gebruikt. Vanwege de brandbaarheid is binnenshuis nu maximaal 150 gram toegestaan, te weinig voor toepassing als koudemiddel. Om natuurlijke koudemiddelen te stimuleren zou de toegestane hoeveelheid propaan moeten worden opgerekt naar ca. 1000 gram.

Andere natuurlijke koudemiddelen hebben ook zo hun beperkingen, zoals ammoniak, dat vanwege giftigheid niet snel in woningen toegepast zal worden, en CO<sub>2</sub>, dat een hogere druk vereist en door zwaardere componenten en leidingen ook een duurder systeem.

Synthetische koudemiddelen met een lager GWP worden ook verder ontwikkeld, maar een nadeel is dat een aantal van deze middelen in de atmosfeer een conversie kunnen ondergaan waardoor ze alsnog een zeer hoog GWP (ordegrootte 10.000) kunnen hebben.

Over het algemeen is de verwachting voor 2030 dat in monoblocs<sup>7</sup> propaan het meest zal worden toegepast en in split units nog steeds R32.

***De verwachting van de experts is dat in nieuwe monoblocs vanaf 2030 vooral propaan (GWP: 3) wordt gebruikt, waarmee de doelstelling van GWP<5 voor 2050 al eerder gehaald wordt. Voor split units zal voorlopig echter nog R32 (GWP: 675) worden gebruikt, wat hoger ligt dan de richtwaarde van TKI UE in 2025 voor een GWP van <150.***

### KPI: Systeemintegratie

Nieuwe warmtepompen van gerenommeerde merken zijn vrijwel allemaal smart grid-ready. Dat houdt in dat het gebruik van warmtepompen kan worden afgestemd op de actuele netbelasting. Hierdoor kan de piekbelasting van het net worden verminderd, waardoor minder

---

<sup>7</sup> Bij een monobloc zijn alle componenten ingebouwd in één (buiten)unit.

investeringen in netverzwaring nodig zijn. De inhoudelijke uitdaging zit in de normering van de communicatieprotocollen tussen de warmtepomp en de netbeheerder. De organisatorische uitdaging ligt bij de vraag wie het voortouw neemt. Op macroniveau wordt door velen een initiatief van de netbeheerders/TenneT verwacht. Op microniveau (binnen een individuele woning) zijn er, weliswaar in een vroeg stadium, al een aantal mogelijkheden om huishoudelijk apparaten met elkaar te laten communiceren om zo te komen tot spreiding van de netbelasting. Ook kunnen slimme warmtepompen de warmteproductie bijvoorbeeld in de tijd verschuiven naar een moment waarop de elektriciteitsvraag van het net laag is.

***De doelstelling voor smart grid-ready warmtepompen in 2025 is nu al gehaald. Ze worden echter nog niet als zodanig gebruikt.***

#### KPI: Compactheid

Warmtepompen zijn al erg compact ontworpen, en de verwachting is niet dat dit bij gelijkblijvend vermogen nog veel compacter kan. Als de capaciteit omlaag kan door betere isolatie van de woning dan kan de warmtepomp nog wel kleiner worden.

Daarbij dient te worden opgemerkt dat grotere warmtepompen een beter rendement hebben, met name vanwege de grote warmtewisselaar, en ze produceren minder geluid, vanwege de grotere ventilator. Je zou de buitenunit (van de luchtwarmtepomp) daarom zo groot mogelijk willen maken. Er is dus een tegengesteld belang tussen compactheid enerzijds en rendement en geluidsbeperking anderzijds.

***De verwachting is niet dat warmtepompen nog veel compacter kunnen worden ontworpen. De buitenunit zou je zelfs liever zo groot mogelijk willen uitvoeren.***

#### KPI: Installatieproces

Om het installatieproces te vergemakkelijken zijn er ontwikkelingen nodig die vooral draaien om plug & play en vertrouwdheid met de warmtepomp. Denk hierbij bijvoorbeeld aan: hydraulische verbindingen en gestandaardiseerde hydraulische modules, een gestandaardiseerde printplaat, controle-instellingen die voorgeprogrammeerd zijn, systemen die de controle bij de installatie vergemakkelijken en het snel kunnen koppelen van het leidingwerk (zonder solderen bijvoorbeeld). Bovendien draagt een makkelijkere installatie ook bij aan een betere kwaliteit van de installatie en de werking.

***De geïnterviewden bevestigen het grote belang van het vergemakkelijken van installatiewerkzaamheden***

## Randvoorwaarden voor opschaling

De technologie van warmtepompen is op zich goed genoeg ontwikkeld om op grote schaal toe te passen. Voor bijna alle woonsituaties bestaat wel een geschikte warmtepomp. Een klein beetje isolatie is vaak al voldoende, eventueel aangevuld met ventilatorradiatoren. Bij twijfel kan een hybride warmtepomp worden geïnstalleerd die flexibel is en al gauw de helft minder gas gebruikt of bij een goed geïsoleerde woning meer. Ook het aanbod van warmtepompen hoeft geen probleem te zijn, de fabrikanten kunnen de productie aan. Wel kunnen er momenteel leveringsproblemen zijn door materiaal- en chiptekort of logistieke problemen.

De stijgende gasprijzen zijn op dit moment de belangrijkste driver voor het plaatsen van warmtepompen. Dat betekent dat de hoogte van de investering een belangrijk aspect is in de afweging van de woningeigenaar.

Op dit moment zijn de grootste belemmeringen voor de opschaling van warmtepompen barrières bij het installeren. De twee hoofdredenen daarvoor zijn:

- De kosten van het installeren zijn te hoog (zie ook 'KPI investeringskosten')
- Er zijn te weinig gekwalificeerde installateurs

Plug & play systemen voor warmtepompen zijn daarom cruciaal. Deze vergemakkelijken het installatieproces waardoor de kosten omlaag kunnen en er minder arbeidskrachten nodig zijn.

Inpassing in bestaande gebouwen is voor installateurs risicovoller dan toepassing van warmtepompen in nieuwbouw. In nieuwbouw is er meer controle op wat je gaat bouwen en kan verwachten. Bij bestaande bouw kan van tevoren worden ingemeten, maar het is de vraag of het achteraf werkt zoals verwacht: wordt het huis wel goed warm, moet de installateur toch terugkomen? Het is daarom belangrijk dat er zekerheid wordt geboden aan de woningeigenaren en er betere richtlijnen moeten komen om problemen te ondervangen.

Er moet een afweging gemaakt worden tussen de mate van isolatie en de installaties. Wil je vergaande isolatie om een warmtepomp met een laag vermogen te kunnen plaatsen, of is het gunstiger om een warmtepomp met een hoger vermogen, hogetemperatuur of een hybride warmtepomp te plaatsen? Per (type) woning moet het optimum bepaald worden van iets dat energetisch goed werkt, betrouwbaar levert en niet te veel kost. Overigens blijkt 60% van de woningen al LT-ready te zijn volgens een studie van WarmingUP (Pothof, Vreeken, & Meerkerk, 2022).

Verder kan een voorstel voor nieuwe regelgeving rond Legionella gevolgen hebben voor warmtepompen voor warmtapwater (zie het deelrapport 'Tapwatersystemen'). Deze regelgeving zou betekenen dat de temperatuur in het hele opslagvat continu op minimaal 60 graden moet worden gehouden. Dat betekent een slechtere COP en eventueel elektrisch bijstoken als de warmtepomp het zelf niet aan kan.

Tot slot moet de lokale impact van de toepassing van all electric warmtepompen in oenschouw genomen worden. Als een hele wijk op all electric overschakelt (en een elektrische auto en zonnepanelen heeft) zal dat bij het uitblijven van maatregelen voor het spreiden van de netbelasting leiden tot overbelasting van het elektriciteitsnet.

## Potentiële marktontwikkelingen

De potentiële marktontwikkelingen voor warmtepompen worden hieronder beschreven, waarbij wordt toegelicht wat de randvoorwaarden zijn om deze ontwikkeling te realiseren en welke innovaties hiervoor nodig zijn.

We bekijken hier drie typen warmtepompen: de all-electric lucht-water-warmtepomp, de all-electric bodemwarmtepomp en een hybride warmtepomp bestaande uit een lucht-water-warmtepomp en cv-ketel. In de marktontwikkelingen van warmtepompen maken we onderscheid tussen één- en meergezinswoningen, omdat uit de interviews naar voren kwam dat bodemwarmtepompen geschikter zijn voor collectieve systemen en daardoor makkelijk te realiseren zijn in bestaande bouw .

## Beschrijving

### Basispad

We zetten de potentiëlen af tegen het Basispad dat we baseren op de Klimaat en Energieverkenning 2021 (KEV) (PBL, 2021) wat aangeeft hoeveel woningen in 2030 een warmtepomp hebben, zowel bestaande bouw als nieuwbouw. Om te bepalen in hoeveel bestaande woningen een cv-ketel is vervangen door een warmtepomp is gekeken naar de woningen gebouwd vóór 1995. Deze vervanging heeft tot 2020 bij zo'n 28.000 woningen plaatsgevonden. In de KEV groeit het aantal bestaande woningen waar een warmtepomp wordt geplaatst ter vervanging van een cv-ketel naar ca. 43.000 in 2030. Het gaat hier dus om slechts een zeer beperkt deel van de gehele woningvoorraad, omdat de verwachting is dat zonder additioneel beleid vooral warmtepompen in nieuwbouwwoningen worden geplaatst en minder vaak in bestaande woningen. Er zijn slechts indicaties te geven voor het aantal hybride systemen op het totaal aantal warmtepompsystemen waardoor we voor het Basispad geen onderscheid maken tussen all-electric en hybride systemen. Volgens CBS-statistieken over verwarmingsinstallaties gebruikte 0,8% van het totaal aantal woningen in Nederland in 2021 een elektrisch verwarmingssysteem met relatief 'laag' of 'hoog' gasverbruik (CBS, 2022). Uit dezelfde CBS-tabel blijkt dat 2,4 % van de woningen elektrische verwarming heeft. Daaruit volgt dat circa 1/3e hybride (elektrisch) verwarmd wordt. Dit aandeel is indicatief omdat het woningen met elektrische warmtepomp of andere vorm van elektrische verwarming betreft.

### Verdubbeling

Een andere potentiële marktontwikkeling die we hier bekijken is het ten opzichte van het Basispad verdubbelen van het tempo waarin cv-ketels worden vervangen door warmtepompen. Hierbij gaan we uit van het aantal bestaande woningen in het Basispad waar een cv-ketel is vervangen door een all-electric warmtepomp tussen 2020 en 2030 en verdubbelen dit aantal.

Om een verdubbeling te realiseren ten opzichte van de KEV denken we op basis van inzichten uit de interviews dat er een aantal voorwaarden zijn. Ten eerste is een gunstiger kosten-baten verhouding nodig voor de woningeigenaar. Warmtepompen zijn een stuk duurder in de aanschaf dan een cv-ketel. Daarnaast zijn er meestal bijkomende kosten in de vorm van na-isolatie en lagetemperatuurverwarming. Dit kan mensen ervan weerhouden om over te stappen. Een gunstiger kosten-batenverhouding ten opzichte van cv-ketels kan bereikt worden door kostendaling voor warmtepompen, subsidies, een verlaging van de elektriciteitsprijs en/of een verhoging van de gasprijs. Gedurende het schrijven van dit deelrapport zijn de gas- en elektriciteitsprijzen flink gestegen, waardoor de vraag naar warmtepompen in een versnelling is gekomen. Het is onzeker hoelang de aardgasprijzen zo hoog blijven. Ook bij een gunstiger kosten-batenverhouding zal er investeringsbereidheid moeten zijn bij de woningeigenaar. Hij of zij moet ook geld te besteden hebben of dit willen lenen. Daarnaast moet de warmtepomp ook een aantrekkelijk alternatief bieden voor de eigenaar ten opzichte van de cv-ketel en moet hij/zij er vertrouwen in hebben dat het systeem in de woning werkt. Tenslotte moeten er voldoende installateurs beschikbaar zijn.

### Natuurlijk moment

Bij deze potentiële ontwikkeling worden cv-ketels op een natuurlijk moment vervangen door warmtepompen. Uitgaande van een levensduur van een cv-ketel van 15 jaar zal dan in de tien jaar tussen 2020 en 2030 bij benadering 10/15<sup>e</sup> van de cv-ketels aan vervanging toe zijn. Voor de hybride warmtepomp is deze ontwikkeling opgenomen in het beleid: vanaf 2026 wordt het naar verwachting verplicht om bij de vervanging van een cv-ketel over te stappen op een hybride warmtepomp (of een ander duurzaam alternatief)<sup>8</sup>.

Ten opzichte van de verdubbeling betekent deze potentiële marktontwikkeling een zeer snelle toename van het aantal warmtepompen. Dit legt een belasting op de installatiecapaciteit die momenteel al beperkt is. Om de cv-ketels op natuurlijke momenten te kunnen vervangen zou daarom bijvoorbeeld het aantal (gekwalficeerde) arbeidskrachten moeten toenemen, zou de installatie vergemakkelijkt moeten worden, zodat er minder expertise nodig is en meer mensen dit kunnen uitvoeren, en zou de installatietijd verkort moeten worden.

### Technisch potentieel

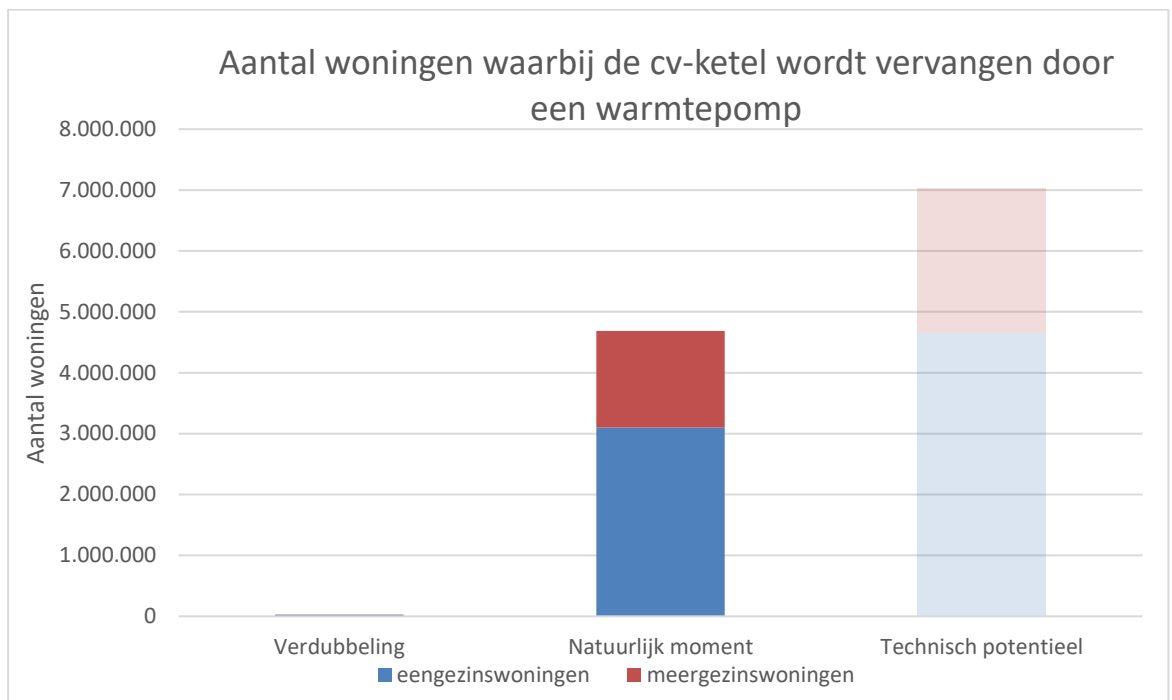
De laatste potentiële marktontwikkeling gaat ervan uit dat 100% van alle woningen die volgens de KEV nog een cv-ketel hebben in 2030 zullen zijn overgestapt op een warmtepomp. Het potentieel waarin 100% van de woningen die nog een cv-ketel heeft een warmtepomp neemt noemen we het 'technisch potentieel'. De randvoorwaarden voor 100% vervanging zijn hetzelfde als voor 'vervanging op een natuurlijk moment'. Tabel D 2 geeft een beknopte omschrijving van de potentiële marktontwikkelingen.

Tabel D 2 Beschrijving van de potentiële marktontwikkelingen van warmtepompen waarvan de impact in dit deelrapport is berekend.

| Potentiële marktontwikkelingen all electric warmtepompen |  |
|--|--|
| Beschrijving   |  |
| <b>Basispad</b>  | Het aantal cv-ketels in bestaande woningen dat wordt vervangen door een all electric of hybride warmtepomp op basis van vastgesteld en voorgenomen beleid        |
| <b>Verdubbeling</b>                                      | Verdubbeling van het aantal bestaande woningen waarbij een cv-ketel wordt vervangen door een all electric of hybride warmtepomp                                  |
| <b>Natuurlijk moment</b>                                 | In woningen wordt de cv-ketel op een natuurlijk moment vervangen door een all electric of hybride warmtepomp   |
| <b>100%</b>  | In 100% van de woningen die volgens de KEV in 2030 nog een cv-ketel hebben wordt de ketel vervangen door een all electric of hybride warmtepomp                  |
| Randvoorwaarden  |  |
| <b>Basispad</b>  | - Vastgesteld en voorgenomen beleid wordt toegepast  |
| <b>Verdubbeling</b>                                      | - Hoge gasprijzen/lage kosten van de warmtepomp<br>- Interesse, investeringsbereidheid en vertrouwen eigenaar  |
| <b>Natuurlijk moment/<br/>Technisch<br/>potentieel</b>   | - Hoge gasprijzen/lage kosten van de warmtepomp<br>- Interesse, investeringsbereidheid en vertrouwen eigenaar<br>- Voldoende installatiecapaciteit en -expertise |

<sup>8</sup> <https://www.rijksoverheid.nl/actueel/nieuws/2022/05/17/hybride-warmtepomp-de-nieuwe-standaard-vanaf-2026>





Figuur D 1 Aantal woningen ten opzichte van het Basispad waarbij in 2030 een cv-ketel vervangen is door een warmtepomp bij de diverse potentiële marktontwikkelingen.

## Benodigde innovaties

Warmtepompen zijn relatief duur in de aanschaf en het kost ook meer tijd om ze te installeren dan een cv-ketel, waardoor meer installateurs (arbeidsuren) nodig zijn en de installatie duurder is. Het opschalen van de vervanging van cv-ketels door warmtepompen legt daarmee extra druk op de beschikbare installateurscapaciteit. Bij dit obstakel kan een innovatie als een plug & play-installatie die het installatieproces vergemakkelijkt en versnelt een uitkomst bieden. Dit zou de benodigde arbeidsuren en vereiste expertise kunnen verlagen en zo de belangrijkste barrières kunnen wegnemen voor opschaling.

## Impact

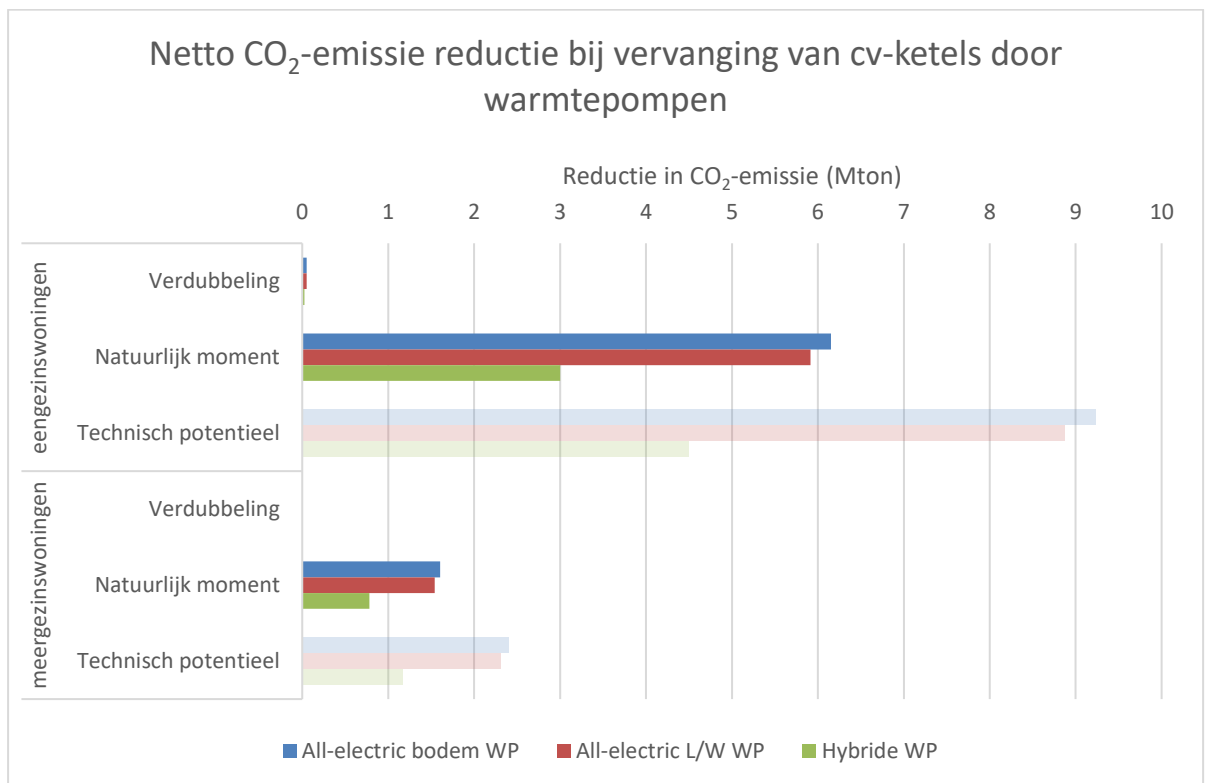
In dit deel wordt de potentiële impact van een deelonderwerp berekend bij verschillende marktontwikkelingen. Dit onderdeel richt zich alleen op een kwantitatieve impactberekening van de CO<sub>2</sub>-emissiereductie en van de nationale kosten. Andere effecten van een hoger marktaandeel of een innovatie, zoals stillere en compactere systemen en snellere installatietijden (dus kortere oponthoud), blijven daarmee buiten beschouwing.

Warmtepompen vormen nu slechts een klein deel van de markt voor installaties in de bestaande bouw, en in de KEV 2021 is ook niet voorzien dat dit snel toe zal nemen bij het toen geldende beleid. Daardoor zal een verdubbeling ten opzichte van het Basispad maar een zeer beperkt effect hebben (ca 30.000 woningen) op de groei van het totale aantal warmtepompen. Een ambitieuzere aanpak is nodig voor het grootschalig vervangen van cv-ketels door warmtepompen. Hieronder worden de potentiële effecten op CO<sub>2</sub>-emissies en nationale kosten verder toegelicht. De achterliggende tabellen met gedetailleerde resultaten zijn te vinden in de bijlage.

## CO<sub>2</sub>-emissie

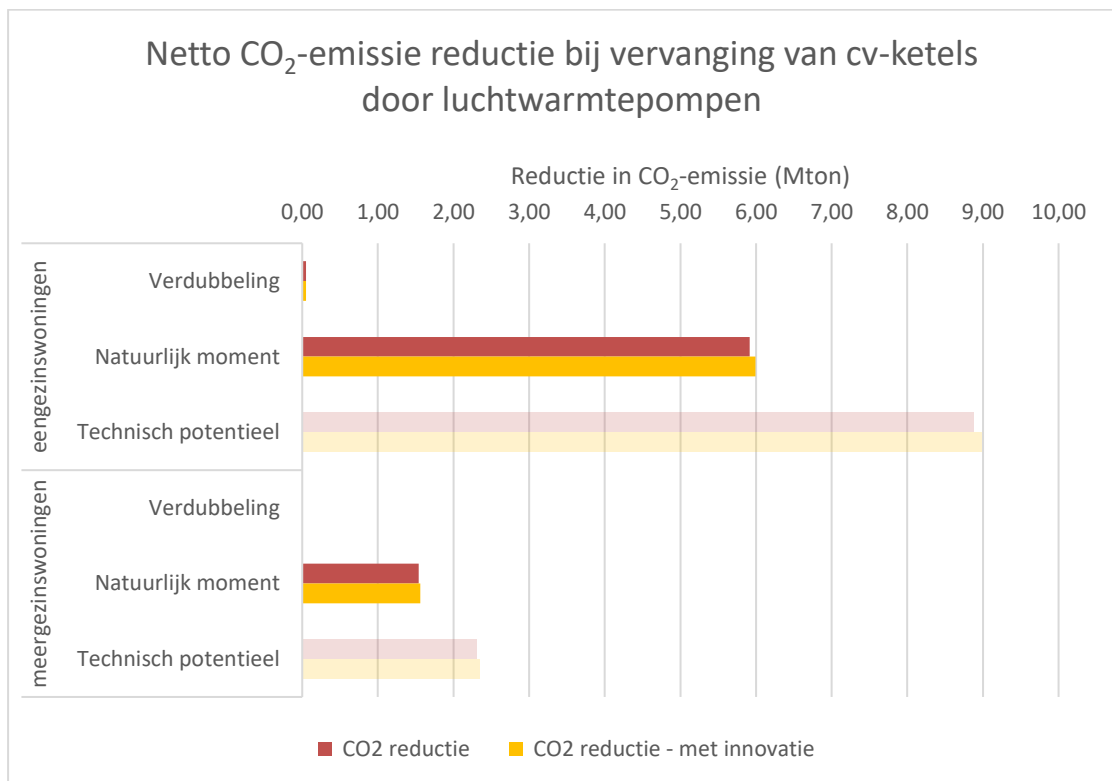
Wanneer een cv-ketel wordt vervangen door een volledig elektrische warmtepomp is er geen aardgasgebruik meer voor ruimteverwarming en warm tapwater. Bij een hybride verwarmingssysteem in bestaande woningen is als uitgangspunt genomen dat het aandeel van de warmtevraag voor ruimteverwarming en warm tapwater dat wordt ingevuld met de warmtepomp de helft is. Het technisch potentieel voor all-electric warmtepompen komt uit op een potentiële emissiereductie van 13,3 Mton CO<sub>2</sub> in 2030. Ter vergelijking, de totale directe CO<sub>2</sub>-emissie (temperatuurgecorrigeerd) door de woningvoorraad in het Basispad in de KEV is geraamd op 15,8 Mton in 2020 en op 13,8 Mton in 2030 (PBL, 2021). Dit houdt dus in dat er nog een restemissie overblijft. De reden dat de CO<sub>2</sub>-emissie niet op nul uitkomt is dat in deze marktontwikkeling alleen de woningen die in het Basispad in 2030 nog een cv-ketel hebben deze vervangen door een warmtepomp. Woningen die worden verwarmd met een andere technologie (o.a. stadsverwarming, hybride warmtepomp) blijven nog CO<sub>2</sub> uitstoten. Het technisch potentieel voor hybride warmtepompen komt uit op een potentiële emissiereductie van 6,7 Mton CO<sub>2</sub> in 2030.

De toepassing van warmtepompen leidt tot een toename van indirecte CO<sub>2</sub>-emissies in de elektriciteitssector. De emissiefactor van elektriciteitsproductie neemt in de KEV2021 raming voor 2030 echter zeer sterk af (zie Bijlage Algemene Kentallen). Voor het technisch potentieel bij all-electric luchtwarmtepompen is dat een toename van 2,1 Mton wat een netto reductie (verlaging directe emissies – verhoging indirecte emissies) geeft van 11,2 Mton. Vanwege het hogere rendement van bodemwarmtepompen is daar minder elektriciteit voor nodig en leidt dit tot een lagere indirecte CO<sub>2</sub>-emissie (1,6 Mton), en komt de totale reductie voor bodemwarmtepompen hoger uit met 11,6 Mton. Bij hybride warmtepompen leidt het elektriciteitsgebruik tot 1 Mton indirecte CO<sub>2</sub>-emissies en komt de netto CO<sub>2</sub>-besparing op 5,7 Mton. Figuur D 2 geeft de netto emissiereductie met onderscheid naar eengezins- en meergezinswoningen.



Figuur D 2 Netto CO<sub>2</sub>-emissiereductie in 2030 als gevolg van de vervanging van cv-ketels door warmtepompen bij de verschillende marktontwikkelingen.

Dezelfde berekeningen zijn gedaan voor de innovatieve technologie waarbij wordt aangenomen dat door technische ontwikkelingen bij warmtepompen de komende jaren het rendement in 2030 tot 7,5% zal zijn toegenomen, zoals uit de interviews naar voren komt. Daarbij houden we dezelfde aantallen woningen per marktontwikkeling aan. Een rendementsverbetering leidt tot een lagere toename van het elektriciteitsverbruik en daardoor lagere indirecte CO<sub>2</sub>-emissies in de elektriciteitssector. In totaal wordt daardoor netto 1% meer CO<sub>2</sub>-emissie voorkomen dan met de huidige techniek.



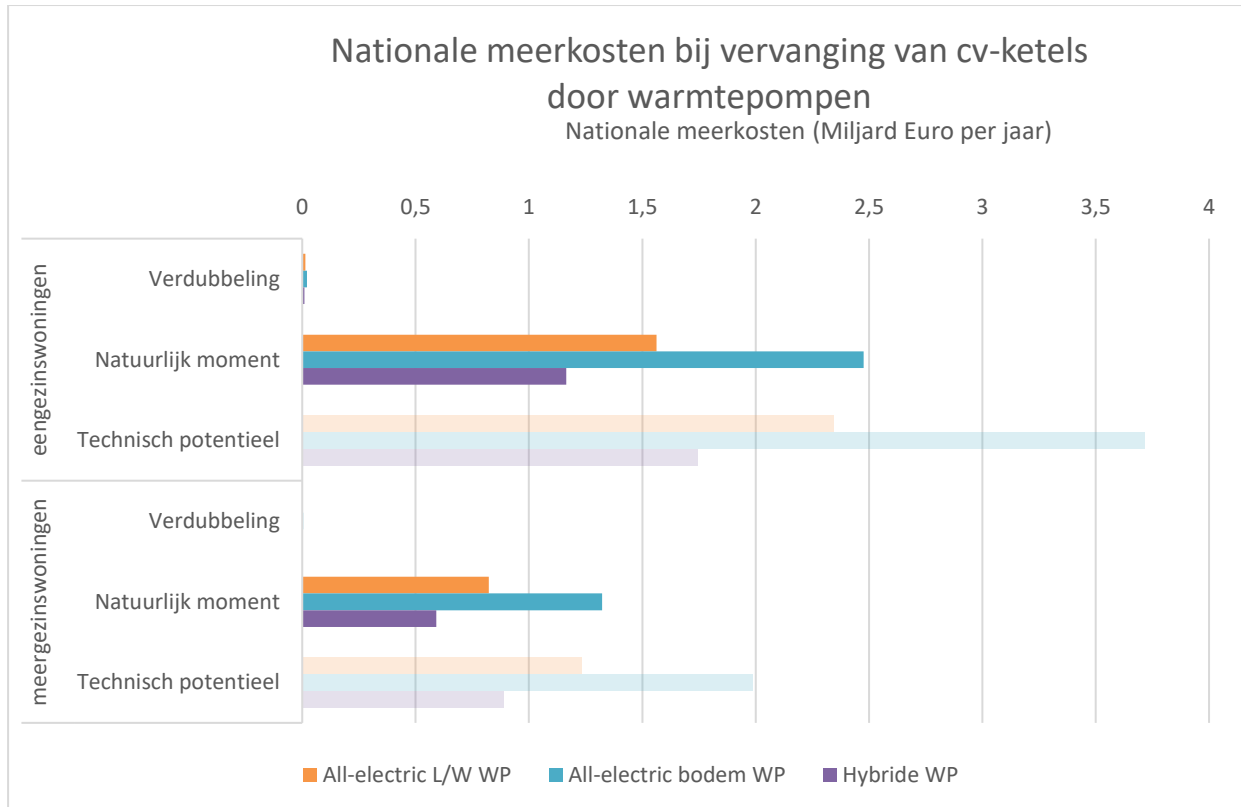
Figuur D 3 Een vergelijking van de netto CO<sub>2</sub>-emissiereductie in 2030 door luchtwarmtepompen volgens de huidige technologie en de innovatieve technologie.

## Nationale meerkosten

De nationale meerkosten zijn het verschil in jaarlijkse kosten voor de investering, onderhoudskosten en energiekosten van warmtepompen ten opzichte van de cv-ketel én additioneel ten opzichte van het basispad. Er zijn geen isolatiekosten meegenomen in deze analyse. Er is dus vanuit gegaan dat de woningen geschikt zijn voor lagetemperatuurverwarming op het moment dat deze een warmtepomp installeren. Uitgangspunt is dat deze woningen autonoom worden gerenoveerd naar het isolatieniveau conform Standaard en Streefwaarden (RVO, 2022). Dit is een standaard die aangeeft wanneer een woning goed genoeg is geïsoleerd om van het aardgas af te kunnen gaan.

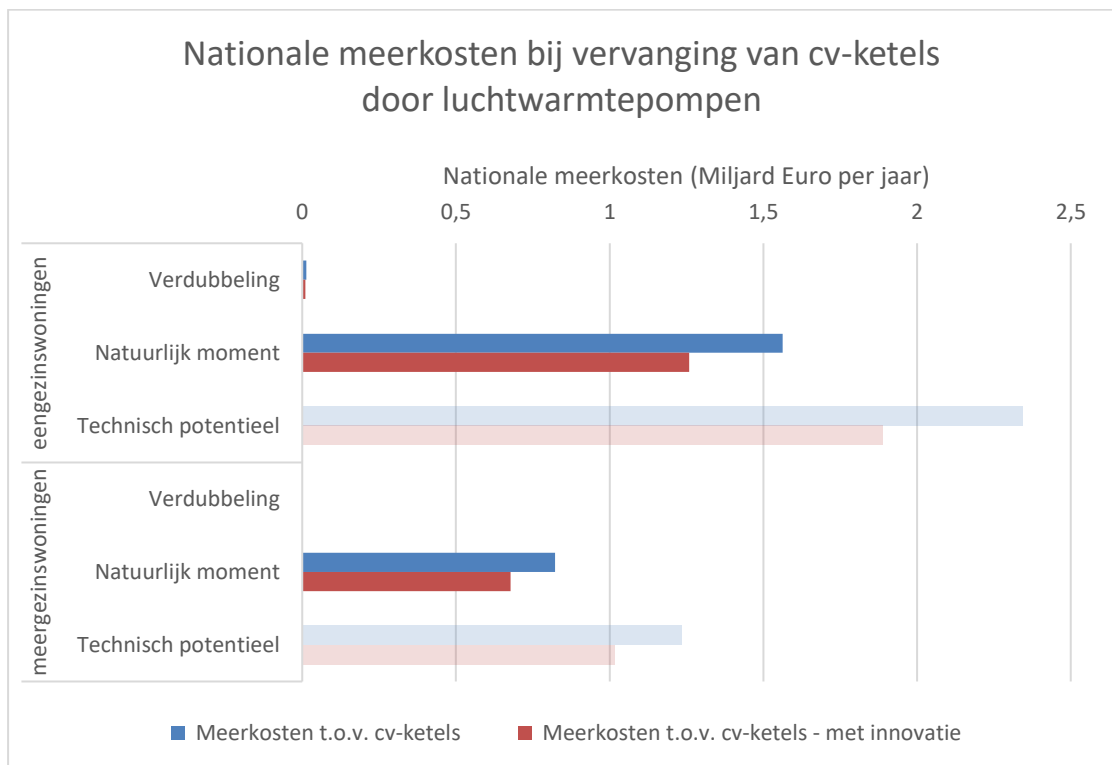
De jaarlijkse investeringskosten van warmtepompen zijn aanzienlijk hoger dan die van cv-ketels ( op jaarbasis 3 à 8 hoger dan de cv-ketel afhankelijk van type warmtepomp). De operationele kosten per jaar van warmtepompen zijn circa een factor 2 hoger dan voor cv-ketels. De nationale energiekosten (voor de benodigde energiedragers) ten opzichte van cv-ketels nemen af bij het gebruik van warmtepompen; 30% afname bij bodemwarmtepompen, 10% afname bij luchtwarmtepompen en 5% afname bij hybride warmtepompen. Gerekend met de KEV 2021 energieprijzen zijn de jaarlijkse energiekosten voor hybride, lucht-water en bodemwarmtepompen respectievelijk 84%, 73% en 55% van de jaarlijkse kosten van die van aardgasgestookte cv-ketels (referentie). Inmiddels zijn de groothandelsprijzen voor zowel aardgas als elektriciteit fors hoger, wat de baten door aardgasbesparing vergroot ten opzichte van de extra elektriciteitskosten. De investeringskosten voor bodemwarmtepompen zijn hoger dan voor luchtwarmtepompen door de toevoeging van bodemsystemen, waardoor de meerkosten ten opzichte van cv-ketels daarvan hoger zijn (Figuur D 5).

Hybride warmtepompen vergen een lagere investering, wat tot lagere meerkosten leidt dan andere soorten warmtepompen. Het verschil in operationele en energiekosten ten opzichte van een cv-ketel is minder groot vergeleken met andere typen warmtepompen.



Figuur D 4 Nationale meerkosten in 2030 voor de vervanging van cv-ketels door verschillende typen warmtepompen.

Voor de innovatieve technologie is de aanname dat de investeringskosten in 2030 met 15% zijn gedaald door kostenbesparing bij installatie, transport, opslag en import, zoals uit de interviews naar voren komt. De daling van investeringskosten zou afhankelijk van het soort warmtepomp tot een besparing van 15% tot 20% op de nationale meerkosten leiden, vanwege de lagere investering, lagere onderhoudskosten en besparing op energiekosten. Zie Figuur D 5 voor de resultaten van luchtwarmtepompen (voor bodemwarmtepompen zie de bijlage).



Figuur D 5 Nationale meerkosten in 2030 voor de vervanging van cv-ketels door luchtwarmtepompen volgens de huidige technologie en de innovatieve technologie.

## Samenvatting

Uit de berekeningen blijkt dat het vervangen van cv-ketels door warmtepompen een grote impact kan hebben op de reductie van de CO<sub>2</sub>-uitstoot van de gebouwde omgeving. De hoge initiële investeringskosten kunnen wel een belemmering vormen. Uit interviews met experts blijkt dat zij beperkte ruimte zien voor technologische rendementsverbetering (5-10%), maar wel nog verbetering door gebruiksvriendelijkere en beter geïnstalleerde systemen, of voor kostenreductie (15%), met name in installatie, transport, opslag en import. De zeer hoge energieprijzen tijdens het schrijven dit rapport maken dat de business case voor warmtepompen wel gunstiger wordt. Andere belangrijke factoren zijn het vertrouwen en de bekendheid met de warmtepomp bij zowel de woningeigenaar als de installateur. Het versnellen en vereenvoudigen van het installatieproces blijkt verder een cruciale voorwaarde voor opschaling. Het ontwikkelen van een plug & play-installatiemethode kan hier een grote bijdrage aan leveren door de kosten en benodigde arbeidsuren te verminderen.

# E. Deelrapport Afgiftesystemen

## Inleiding

### Context

Afgiftesystemen zijn een integraal onderdeel van het systeem voor verwarming (en koeling) in woningen. De rol van afgiftesystemen hierbij is het overdragen van warmte - nu normaliter nog opgewekt door cv-ketels en in de komende jaren steeds meer door bijvoorbeeld warmtepompen en LT-warmtenetten - aan een kamer. Als medium voor de warmteoverdracht wordt in nagenoeg alle verwarmingssystemen in Nederlandse woningen water gebruikt, dat tussen de warmtebron en het afgiftesysteem, vaak radiatoren, gecirculeerd wordt.

In de huidige situatie gebruikt de meerderheid van verwarmingssystemen dus nog cv-ketels met een hoog temperatuurniveau voor het rondgepompte water (60 - 90°C). Een van de meest belangrijke en opvallende trends in de warmtetransitie is het toepasbaar maken van lagere systeemtemperaturen (30 - 55°C), waardoor het gehele warmtesysteem efficiënter wordt. Bij een lagere systeemtemperatuur kunnen warmtepompen namelijk bijvoorbeeld meer warmte per eenheid elektriciteitsverbruik leveren en hebben warmtenetten lagere warmteverliezen. Innovatieve of geavanceerde afgiftesystemen spelen in dit verband een belangrijke rol, ze zijn als het ware een “enabler” voor lagere systeemtemperaturen.

TKI UE heeft voor afgiftesystemen de volgende aandachtspunten, waarbij een zekere nadruk ligt op laagtemperatuur afgiftesystemen zoals bijvoorbeeld convectoren en vloer-, wand- en plafondverwarming. Desalniettemin kunnen ook paneelradiatoren met ventilatoren oplossingen bieden.

- Verlagen van aanschaf en installatiekosten
- Verhogen van rendementen en optimaliseren van afgiftesystemen
- Toevoegen en optimaliseren van het koelvermogen van afgiftesystemen
- Verbeteren van afgiftesysteemintegratie in (renovatieconcepten voor) de bestaande bouw
- Verlagen van geluidsproductie
- Verslimmen van afgiftesystemen
- Doorontwikkelen van circulaire concepten voor afgiftesystemen.

### Scope

Het deelrapport afgiftesystemen kan gezien worden als een aanvulling op de deelrapporten over warmtepompen en warmtenetten, waarin innovaties op het gebied van ruimteverwarming beschreven worden vanuit het perspectief van de warmteopwekking. In dit deelrapport staat het perspectief van de afgifte in de focus en wordt dieper ingezoomd op specifieke innovaties op dat gebied.

### Leeswijzer

Het kwalitatieve deel van dit deelrapport bestaat uit de onderdelen ‘ontwikkelingen in de technologie’ en ‘randvoorwaarden voor opschaling’ en is gebaseerd op deskresearch en interviews met Jan Verdonk (JAGA climate designers) en Andries van Wijhe (TNO). Het kwalitatieve deel is daarmee een selectie van wat volgens de geïnterviewden de belangrijkste knelpunten, ontwikkelingen en randvoorwaarden zijn om opschaling te realiseren.

Het kwantitatieve deel, bestaande uit de onderdelen ‘potentiële marktontwikkelingen’ en ‘impact’, is opgesteld door TNO. De aannames die hierbij gehanteerd zijn, zijn afgestemd met TKI UE en komen zoveel mogelijk voort uit de interviews en de Klimaat- en

Energieverkenning 2021 (KEV) (PBL, 2021). Zoals toegelicht in de inleiding stellen we nadrukkelijk dat wij niet voorspellen dat die gepresenteerde potentiële ook gerealiseerd worden. De potentiële marktontwikkelingen laten echter zien aan dat er een groter potentieel is, dat volgens de KEV nog niet wordt benut.

Het deelrapport wordt afgesloten met een samenvatting van de inzichten uit beide onderdelen.

## Ontwikkelingen in de technologie

*Gecombineerde samenvatting van de interviews met Jan Verdonk (JAGA climate designers) en Andries van Wijhe (TNO) inclusief informatie uit de literatuur*

De warmteoverdracht met het afgiftesysteem kan principieel via twee verschillende mechanismes plaatsvinden, straling en convectie (warmteoverdracht door straling en thermische verplaatsing van opgewarmde lucht). Bij (moderne) paneelradiatoren zijn beide mechanismes actief. Bij convectoren wordt door een groot aantal dicht bij elkaar staande lamellen het mechanisme van convectie bevorderd en is daarom het dominante mechanisme. Vloer- en wand- (of plafondsysteem) zijn afgiftesystemen waarbij buizen in vloeren wanden en plafonds zijn verwerkt en waar de warmteoverdracht ook via beide mechanismes plaatsvindt. Principieel zijn al deze afgiftesystemen geschikt voor ruimteverwarming, waarbij het mogelijk een voordeel van convectoren is dat de warmteoverdracht (en hierdoor ook de regelbaarheid) sneller is dan voor de andere genoemde afgiftesystemen.

Om de warmteoverdracht van afgiftesystemen te versnellen en effectiever te maken, zijn er diverse ontwikkelingen zoals de optimalisatie van geometrische configuraties en onderzoek naar materialen. Verder is er sprake van een zekere trend, om aan de onderkant/bovenzijde van een radiator of convector ventilatoren aan te brengen, die het convectieproces nog sneller/effectiever maken. Het nut van de ventilatoren is echter sterk afhankelijk van de radiator-/convectortemperatuur, omdat bij hoge temperaturen (vanaf ongeveer 50 – 60°C) het convectieproces sowieso al zo goed is, dat de ventilatoren veel minder hebben. Hoe lager de temperatuur, hoe voordeliger het effect van de ventilatoren. En door de lagere temperatuur wordt dan op systeemniveau ook energiebesparing bereikt (vooral bij het gebruik van warmtepompen voor de warmteopwekking). Aangezien convectoren ontworpen zijn op het principe van het convectiemechanisme, zijn ventilatoren bij convectoren het meest effectief.

Effectieve convectie is ook een voordelige eigenschap als het afgiftesysteem naast verwarmen in de winter ook voor koeling in de zomer gebruikt zal worden. In combinatie met omkeerbare warmtepompen is condenserend koelen mogelijk waarbij water van rond 10 °C – actief afgekoeld door de warmtepomp - gecirculeerd wordt. Hiervoor is wel een in het afgiftesysteem geïntegreerde condenswaterafvoer nodig. Dit soort systemen zijn al reeds in de markt aanwezig. Moderate koeling (actief of passief) waarbij water op een lagere temperatuur van rond 20 °C gecirculeerd wordt, is ook een optie. Paneelradiatoren zijn voor koeling over het algemeen minder toepasbaar, omdat het stromingspatroon van koel water in een paneelradiator hiervoor niet geschikt is. Passief koelen via vloer-, wand- en plafondafgiftesystemen is wel mogelijk.



## Verlagen van aanschaf en installatiekosten

De investeringskosten bestaan deels uit materiaal- en deels uit installatiekosten (en/of bouwkundige kosten), waarbij voor vloer-, wand- en plafondverwarming de installatiekosten ingrijpende werkzaamheden met zich mee brengen en daarom dominant zijn. Het is sterk afhankelijk bij renovatie welk systeem er gekozen gaat worden. Het ene afgifte systeem kan meestal direct worden aangesloten op het bestaande leidingsysteem terwijl bij het andere ook bouwkundige werkzaamheden plaats moeten vinden. Dit kan de nodige kostprijsverhoging met zich meebrengen. De verwachting is dat er vanwege het vergroten van de aantallen en innovaties een kostprijs verlaging plaats kan gaan vinden.

## Verhogen van rendementen en optimaliseren van afgiftesystemen

Een effect dat vaak als voordelig voor de energieprestatie wordt verondersteld is de toepassing van nachtverlaging (s 'nachts lager zetten van de thermostaat). Echter hangt het sterk van de specifieke omstandigheden af (o.a. de warmtevraag van de woning en type en vermogen van het opweksysteem) of het daadwerkelijk voordelig is. Dit omdat het op tijd heropwarmen van de woning in de ochtend of na afwezigheid tijd vraagt. Bij "snellere systemen" zoals paneelradiatoren en of convectoren heeft dit een positief effect op de energieprestatie, terwijl (traditionele) vloerverwarming een continue vloertemperatuur vraagt. Het opwarmen van een (traditioneel) vloerverwarmingssysteem bij "nachtverlaging" kost veelal extra energie. Dit komt omdat eerst de vloer verwarmd moet worden naar een bepaalde temperatuur eer dat deze weer extra warmte zal gaan afgeven. Dit kan worden verholpen door een droogbouwsysteem toe te passen.

Voor optimaal gebruik van afgiftesystemen kan ook het apart regelen van verschillende ruimtes in een woning een interessant concept zijn (dit concept is onder het begrip zoneregeling of compartimentering bekend). Of het concept daadwerkelijk energiebesparing kan opleveren is afhankelijk van de specifieke situatie. Vooral bij gebruik van warmtepompen kan een zoneregeling namelijk ook leiden tot rendementsverliezen door een verhoogde frequentie van aan- en uitschakelen van de warmtepomp. Weliswaar kan de integratie van een buffervat in het verwarmingssysteem hiervoor een oplossing bieden, waarbij dan echter de voor buffervaten typische systeemverliezen optreden. Op dit moment zijn er systemen die deze verliezen erg klein houden en waarbij de buffer zeer klein is. Optimalisatie via zoneregelingen is daarom een complexe systeemvraag en niet altijd generiek toepasbaar.

Systeemconfiguraties, waarbij afgiftesystemen gecombineerd/gekoppeld worden met ventilatiesystemen (inclusief WTW) zijn ook in ontwikkeling. Deze systemen streven integrale, energiezuinige oplossingen voor de optimalisatie van het binnenklimaat van woningen na.

Een andere trend in verband met energieprestatie is de toepassing van vuilafscheiders in de waterkringloop (bij de cv-ketel of de warmtepomp). Een vuilafscheider verwijdert vuil (onder andere magnetiet), die in de loop van tijd in het rondgepompte water ontstaat en – naast andere problemen – ook het afgiftevermogen van afgiftesystemen kan verlagen. Zonder vuilafscheiders kan er in sommige gevallen een daling van rond 10% over 10 jaar optreden.

## Verbeteren van afgiftesysteemintegratie in (renovatieconcepten voor) de bestaande bouw

Als integraal onderdeel van het verwarmingssysteem (koelingssysteem) is de installatie van innovatieve (laagtemperatuur) afgiftesystemen gekoppeld met de installatie van laagtemperatuur verwarmingssystemen (warmtepompen, LT-warmtenetten).

Paneelradiatoren en convectoren (met en zonder ventilatoren) kunnen snel en vaak op al

bestaande leidingsystemen in woningen worden aangesloten en dan rechtstreeks worden geïnstalleerd bij de natuurlijke vervangmomenten, zoals verbouwing of renovatie.

Bij vloerverwarmingssystemen is er een ontwikkeling die onder de naam droogbouwsystemen bekend is. Hierbij kan het vloerverwarmingssysteem met behulp van platen met voorgevormde profielen (voor de verwarmingsbuizen) op bestaande vloeren worden geïnstalleerd en dan met een afdekvloer worden afgewerkt. Hierdoor kan het makkelijker en sneller in de renovatie worden toegepast en is ook installatie op houten verdiepingsvloeren mogelijk door het relatief lage gewicht. De potentiële markttoegang is daarom naar verwachting groter dan voor de meer traditionele systemen (die in beton gegoten worden). Een bijkomende belofte van droogbouwsystemen is een hogere opwarmingsnelheid, omdat die niet door grote thermische massa van het omgevende beton vertraagd wordt.

### Verlagen van geluidsproductie

Geluid vanuit afgiftesystemen, afkomstig van stromend water en/of ventilatoren kan als storend worden ervaren en er is daarom veel aandacht hiervoor in de verdere doorontwikkeling. De verwachting is dat er een nieuwe norm komt omtrent het geluidsniveau van afgiftesystemen.

### Verslimmen van afgiftesystemen

Behalve bij zeer grote functionaliteitsstoringen van een afgiftesysteem is voor gebruikers over het algemeen nauwelijks/niet achterhaalbaar, hoe goed of slecht het systeem presteert. Er zijn nu bij sommige ontwikkelaars monitoringsystemen in ontwikkeling, die informatie zoals bijvoorbeeld de efficiëntie van de afgifte en eventuele onderhoudsbehoefte zichtbaar/toegankelijk maken en elektronisch oproepbaar maken (bijvoorbeeld via een app). Daarnaast zijn er ook slimme radiatorknoppen in opkomst, die het actief sturen van kamertemperaturen via smartphones mogelijk maken. In het geval van geïntegreerde systemen voor verwarming en ventilatie omvat dit ook de sturing van de vocht- en CO<sub>2</sub>-gehalte van de lucht.

### Luchtkwaliteit

Vanuit paneelradiatoren en stof en schroei in de lucht terecht komen. Dit is met name het geval bij hoge afgiftetemperaturen omdat de hoge oppervlaktetemperatuur meer convectiestromen veroorzaakt dan een lagere temperatuur. Door de trend voor de toepassing van verwarmingssystemen op lagere temperatuur wordt daarom automatisch ook een verbetering van de luchtkwaliteit bereikt. Als er ventilatoren worden toegepast, is de uitdaging omtrent de luchtkwaliteit uiteraard weer groter. Er zijn wel filtersystemen die stof vangen en bijvoorbeeld aan de onderkant van de paneelradiator of convector kunnen worden aangebracht. Reiniging van radiatoren met een stofzuiger (eens per 2 jaar) is ook een optie.

### Randvoorwaarden voor opschaling

Er zijn een aantal ontwikkelingen van afgiftesystemen genoemd, zoals de optimalisatie van geometrische configuraties, het gebruik van materialen, verminderde geluidsproductie en condenswaterafvoer voor koeling, maar deze ontwikkelingen vormen geen belemmering voor de introductie van laagtemperatuurverwarming. Een cruciale randvoorwaarde voor de opschaling van geavanceerde afgiftesystemen is dan ook dat de groei van laagtemperatuurverwarmingssystemen van de grond komt. Aangezien de arbeidsintensiteit voor de installatie van afgiftesystemen relatief hoog is, zeker voor vloerverwarmingssystemen, is een verdere randvoorwaarde dat er voldoende

arbeidscapaciteit in de installatiesector beschikbaar is voor de uitvoering van de betreffende werkzaamheden.

## Potentiële marktontwikkelingen

### Beschrijving

Vanwege de trend naar laagtemperatuurverwarmingssystemen gaat dit deelrapport voor het marktaandeel uit van vergelijkbare aannames zoals die zijn gemaakt voor warmtenetten (die in een vergelijkbare orde van grootte liggen als voor warmtepompen). Het marktaandeel is op die basis het aantal bestaande woningen dat tussen 2020 en 2030 op een warmtenet wordt aangesloten. Daarbij gaan we ervan uit dat in deze woningen een LT-afgiftesysteem toegevoegd dient te worden.

### Basispad

De gehanteerde aanname voor de toename van het marktaandeel van woningen met LT-afgiftesystemen komt voor het Basispad tot 2030 uit op rond 36.000 meergezins- en 48.000 eengezinswoningen, dus in totaal 84.000 woningen.

### Verdubbeling

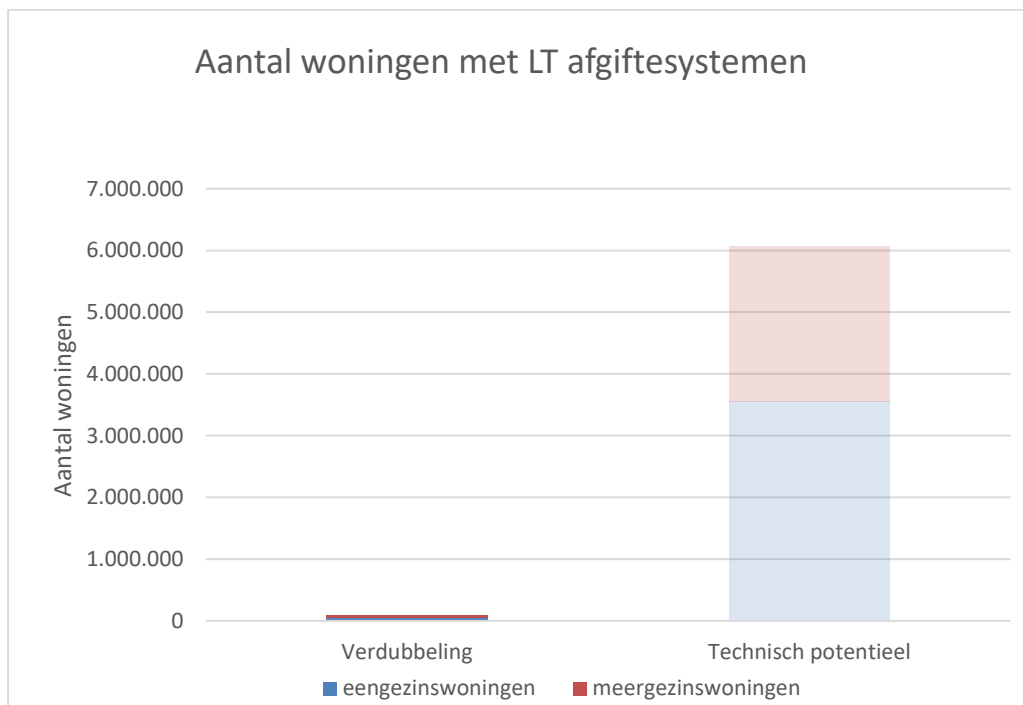
De verdubbeling ten opzichte van het Basispad komt overeen met een toename van nog eens 84.000 woningen (36.000 meergezins- en 48.000 eengezinswoningen).

### Technisch potentieel

Voor de aanname betreft het technisch potentieel gaan we ervan uit dat 100% van de bestaande woningen in een gebied dat is geclassificeerd met een bebouwingsdichtheid 'hoog' en 'midden' in 2030 is aangesloten op een warmtenet. Dat zijn ruim 6.000.000 woningen (2,5 miljoen meergezins- en 3,5 miljoen eengezinswoningen). Zoals eerder gezegd is dit niet bedoeld als een voorspelling, maar om een indicatie van het theoretische bereik te geven.

Tabel E 1 Beschrijving van de potentiële marktontwikkelingen van afgiftesystemen waarvan de impact in dit deelrapport is berekend.

| Potentiële marktontwikkelingen Afgiftesystemen |   |
|--|---|
| Beschrijving                                   |   |
| <b>Verdubbeling</b>                            | 84.000 woningen met LT-afgiftesystemen  |
| <b>Technisch potentieel</b>                    | 6 miljoen woningen met LT-afgiftesystemen.  |
| Randvoorwaarden                                |   |
| <b>Verdubbeling / Technisch potentieel</b>     | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Groei van LT-verwarmingssystemen (warmtepompen en (Z)LT-warmtenetten</li> <li>- Beschikbaarheid van voldoende arbeidscapaciteit</li> </ul> |



Figuur E 1 Aantal woningen ten opzichte van het Basispad waarbij in 2030 LT-afgiftesystemen zijn toegevoegd aan verwarmingssystemen van LT-warmtenetten.

## Benodigde innovaties

Op het gebied van afgiftesystemen zijn er diverse innovaties, die zich vooral richten op de toepasbaarheid in laagtemperatuurverwarmingssystemen. Er zijn ontwikkelingen ter verbetering van effectiviteit en snelheid van de warmteafgifte of voor de betere toepassing in renovatieconcepten. Een andere belangrijke ontwikkeling is dat innovatieve afgiftesystemen een dubbele functionaliteit krijgen, namelijk verwarming in de winter en koeling in de zomer. Bovendien is het versnellen van de installatietijd doormiddel van plug & play oplossingen van belang, bijvoorbeeld door leidingen/convectoren verwerkt in prefab gevels of systemen die eenvoudig op bestaande leidingen aangesloten kunnen worden.

De keuze tussen specifieke opties, zoals radiatoren, convectoren, vloer-, wand- (en eventueel plafond-) verwarming is een complexe afweging van gebruikers, waarbij niet alleen kosten, maar ook esthetiek en individuele comfortverwachtingen en –belevingen een rol spelen. Als “enablers” van laagtemperatuur verwarmingssystemen zijn geavanceerde afgiftesystemen van groot belang voor het realiseren van LT-warmtesystemen.

## Impact

In dit deel wordt de potentiële impact van een deelonderwerp berekend bij verschillende marktontwikkelingen. Dit onderdeel richt zich alleen op een kwantitatieve impactberekening van de CO<sub>2</sub>-emissiereductie en van de nationale kosten. Andere effecten van een hoger marktaandeel of een innovatie blijven daarmee buiten beschouwing.

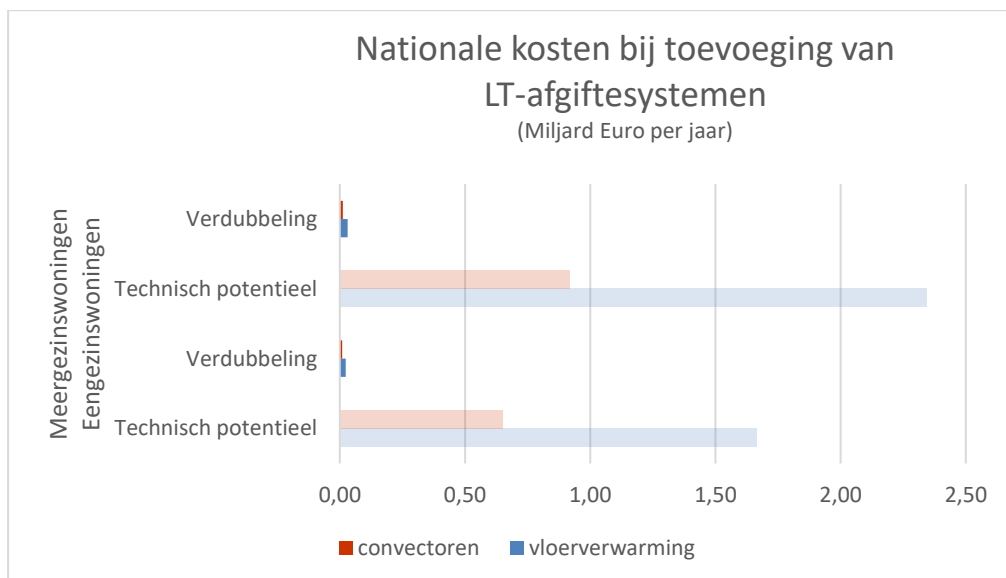
Afgiftesystemen zijn – zoals in de inleiding al aangegeven – een integraal onderdeel van het verwarmingssysteem en kunnen gezien worden als “enablers” voor lagere systeemtemperaturen. De CO<sub>2</sub> emissiereducties zijn dan ook gerelateerd aan het laagtemperatuurverwarmingssysteem en niet aan de afgiftesystemen. In dit kwantitatieve

deel zal daarom alleen naar de kosten worden gekeken, waar twee type afgiftesystemen zijn meegenomen, (ventilator-)convectoren en vloerverwarming. Daarbij is ervan uit gegaan dat het afgiftesysteem in de woning bij renovatie volledig vervangen moet worden, waarbij de kostenkengetallen van Arcadis 2020 per woning zijn aangehouden (Arcadis, 2020) Als slechts een deel van deze kosten gerealiseerd wordt (omdat oude radiatoren, bijvoorbeeld slaapkamers, niet vervangen worden) gaan ze naar rato omlaag.

### Nationale kosten

De nationale kosten zijn berekend voor twee type afgiftesystemen, vloerverwarming en hoog-efficiënte convectoren. De keuze voor deze systemen komt voort uit de focus op zeer lage watertemperaturen rond de 30°C waarvoor deze afgiftesystemen geschikt zijn (anders dan ventilatoren, die retro-fit aan bestaande radiatoren worden toegevoegd<sup>9</sup>). De resultaten voor de toevoeging van beide type afgiftesystemen bij de realisatie van LT-verwarmingssystemen staan in Figuur E 2. Voor vloerverwarming zijn de kosten hoger vanwege de (aanzienlijk) hogere investeringskosten (Arcadis, 2020). In het scenario “verdubbeling” komen de nationale kosten uit op enkele tientallen miljoen € en zijn dus beperkt (vanwege het kleine aantal woningen in dit scenario). Vanwege het veel grotere aantal woningen komen de nationale kosten voor het technisch potentieel uit op veel hogere waarden in de orde grootte van honderden miljoenen tot enkele miljard €.

Uit de hogere kosten voor vloerverwarming kan niet per se geconcludeerd worden, dat dit afgiftesysteem in mindere mate gerealiseerd gaat worden, omdat andere aspecten, zoals esthetiek en comfort bij de keuze van gebruikers – naast kosten – ook een belangrijke rol spelen.



Figuur E 2 Nationale kosten ten opzichte van het Basispad waarbij in 2030 LT-afgiftesystemen zijn toegevoegd aan verwarmingssystemen van LT-warmtenetten

<sup>9</sup> Retro-fit ventilatoren zijn wel gekenmerkt door veel lagere kosten en kunnen daarom in verwarmingssystemen, die op hogere watertemperatuur bedreven worden (bijvoorbeeld 50 °C) mogelijk een goede oplossing zijn.

## Samenvatting

LT-afgiftesystemen zijn een belangrijk en integraal onderdeel van LT-verwarmingssystemen. Er zijn diverse ontwikkelingen, die zich onder andere richten op de verbetering van de effectiviteit en snelheid van de warmteafgifte (bijvoorbeeld met ventilatoren) en op de betere toepassing in renovatieconcepten. Er is sprake van een trend naar dubbele functionaliteit, namelijk verwarming in de winter en koeling in de zomer. Actueel beschikbare afgiftesystemen zoals vloerverwarming en geavanceerde convectoren zijn nu al geschikt voor toepassing in verwarmingssystemen met zeer lage watertemperaturen van rond de 30°C. Wel zijn vooral vloerverwarmingssystemen gekenmerkt door hoge investeringskosten en zijn de perspectieven voor kostendaling beperkt (vanwege de relatief hoge arbeidsintensiteit van de installatiewerkzaamheden). Voor verwarmingssystemen, die op hogere watertemperaturen bedreven worden (bijvoorbeeld 50 °C), kunnen retro-fit ventilatoren mogelijk een goede oplossing bieden, die veel lagere kosten veroorzaakt. De doorontwikkeling van concepten zoals nachtverlaging en zoneregelingen is een complexe systeemvraag, waarvan de mogelijke voordelen afhangen van verschillende parameters van het verwarmingssysteem.

# F. Deelrapport Warmtapwater

## Inleiding

### Context

In de gebouwde omgeving speelt warmtapwater naar verwachting een steeds belangrijkere rol in de energievraag. De verdeling van de warmtevraag over ruimteverwarming en warmtapwater is nu 80% ruimteverwarming en 20% bereiding van warm tapwater (Segers, Niessink, van den Oever, & Menkveld, 2020). Er zal een zekere verschuiving richting warmtapwater ontstaan (Moerman, Blokker, van der Blom, & van Veelen, 2016) doordat de warmtevraag voor ruimteverwarming afneemt door toenemende uitrol van isolatiemaatregelen en door zachtere winters. Tegelijkertijd blijft de vraag naar warmtapwater, grotendeels voor douchen, min of meer constant (Van Petersen, 2021). Warmtapwater zal daarom op termijn een significant hoger aandeel van de totale warmtevraag van huishoudens uitmaken en in sommige gevallen zelf de dominante factor kunnen zijn. Het belang van warmtapwater is ook hoog doordat de trend naar laagtemperatuurverwarming (< 55 °C) betekent dat het warme tapwater niet zonder extra voorzieningen hierop aangesloten kan worden. Dat laatste heeft te maken met in de NEN-norm 1006 vastgelegde eisen betreffende drinkwaterkwaliteit en -veiligheid, die onder andere een minimumtemperatuur van warm tapwater aan het tappunt (voor functionele eisen) van 55 tot 60 °C omvatten.

TKI UE heeft voor dit deelprogramma (2.2 van MMIP4) een aantal aandachtspunten geformuleerd:

- Verhogen van het energetische rendement van warmtapwatersystemen binnen de geldende legionella-eisen
- Verbeteren van de integratie van warmtapwatersystemen in (renovatieconcepten voor) de bestaande bouw
- Verslimmen van warmtapwatersystemen en bieden van flexibiliteit
- Versnellen en opschalen van het installatieproces en circulariteit

### Scope

Aangezien de warmtevraag in woningen zowel ruimteverwarming als warmtapwater omvat, komt het onderwerp warmtapwater ook in de deelrapporten over warmtepompen en warmtenetten terug. Het deelrapport warmtapwater is een aanvulling hierop door nog dieper in te zoomen op specifieke innovaties op dat gebied, die in de andere genoemde deelrapporten niet zijn beschreven. De focus vanuit het MMIP ligt op technologieën voor onder andere douchewaterbesparing, douchewaterrecycling, warmteterugwinning, legionellapreventie en inpasbaarheid in woningen. Weliswaar is er ook raakvlak met technologieën voor de opwekking van duurzame warmte voor douchewater, bijvoorbeeld door (booster-) warmtepompen, thermische zonne-energie etc. Maar deze technologieën vallen – zoals gezegd - onder andere deelprogramma's<sup>10</sup> van MMIP4 en de innovaties hieromtrent worden daarom in dit deelrapport niet beschreven.

---

<sup>10</sup> De opwekking van duurzame warmte voor warm tapwater valt onder de volgende deelprogramma's van MMIP4:

- Deelprogramma 1 (Warmtepompen)
- Deelprogramma 4 (Duurzame warmte- en koudnetten)
- Deelprogramma 7 (Lage temperatuur warmtebronnen; zoals zonnewarmte)

## Leeswijzer

Het kwalitatieve deel van dit deelrapport bestaat uit de onderdelen 'ontwikkelingen in de technologie' en 'randvoorwaarden voor opschaling' en is gebaseerd op desk research en interviews met Frank Oesterholt (KWR) en Piet Jacobs (TNO). Het kwalitatieve deel is daarmee een selectie van wat volgens de geïnterviewden de belangrijkste knelpunten, ontwikkelingen en randvoorwaarden zijn om opschaling te realiseren.

Het kwantitatieve deel, bestaande uit de onderdelen 'potentiële marktontwikkelingen' en 'impact', is opgesteld door TNO. De aannames die hierbij gehanteerd zijn, zijn afgestemd met TKI UE en komen zoveel mogelijk voort uit de interviews en de Klimaat- en Energieverkenning 2021 (KEV) (PBL, 2021). Zoals toegelicht in de inleiding stellen we nadrukkelijk dat wij niet voorspellen dat die gepresenteerde potentiële ook gerealiseerd worden. De potentiële marktontwikkelingen laten echter zien aan dat er een groter potentieel is, dat volgens de KEV nog niet wordt benut.

Het deelrapport wordt afgesloten met een samenvatting van de inzichten uit beide onderdelen.

## Ontwikkelingen in de technologie

### Verhogen van het energetische rendement van warmtapwatersystemen binnen de geldende legionella-eisen

Een belangrijk algemeen aspect voor de energieprestatie van warmtapwatersystemen is de temperatuur aan het tappunt. Op dit moment wordt voor Nederlandse warmtapwatersystemen een minimumtemperatuur van  $\geq 55$  tot  $60$  °C gehanteerd, afhankelijk van de gebouwtype/-functie (Van Petersen, 2021). Aangezien de gemiddelde douchetemperatuur echter aanzienlijk lager ligt (rond de  $40$  °C), bestaat in principe de mogelijkheid om ter verbetering van de energieprestatie de warmwatertemperatuur aan het tappunt te verlagen naar  $40$  tot  $50$  °C. Voor gasketels en ketels op biobrandstof is de haalbare energiebesparing door temperatuurverlaging weliswaar gering, maximaal  $2,5\%$ , maar voor een individuele combiwarmtepomp met een elektrisch doorstroomtoestel kan de energiebesparing oplopen tot rond de  $20\%$  (Van Wolferen).

De verlaging van de temperatuur is in de praktijk echter alleen mogelijk als tegelijkertijd aan de veiligheidseisen omtrent legionellapreventie kan worden voldaan. Die eisen zijn namelijk de reden voor de minimumtemperatuur die vastgelegd is in de NEN1006 (Algemene voorschriften voor leidingwaterinstallaties). Op basis van onderzoek door Berenschot en KWR werd in een recente kamerbrief de overweging genoemd om de norm aan te scherpen, o.a. door erin op te nemen dat in woninginstallaties de warmwatertemperatuur in het warmwatertoestel op alle plekken minimaal  $60$  °C moet zijn. De gevolgen van deze adviezen voor het nationale energieverbruik en toepassingsmogelijkheden van aardgasvrije systemen worden door KWR in een vervolgonderzoek van TKI Urban Energy onderzocht.

Er zijn innovatieve methodieken voor legionellapreventie in ontwikkeling, waardoor een norm met lagere temperaturen in principe veilig kan zijn. Het gaat om diverse methoden zoals bijvoorbeeld het gebruik van UV-licht, fysieke filtratie of thermische pasteurisatie, die in (Van Petersen, 2021) uitgebreid zijn beschreven. De mogelijke toepassing van dit soort technieken is de praktijk echter afhankelijk van de betreffende aanpassingen in de NEN1006. Op dit moment kan daarom niet worden voorspeld of in 2030 drinkwatersystemen op lagere temperatuur in Nederland wettelijk mogelijk zullen zijn.



Andere ontwikkelingen ter verbetering van de energieprestatie, die niet afhankelijk zijn van de toepasbaarheid van het wel of niet verlagen van de warmwatertemperatuur, zijn systemen of componenten voor warmwaterbesparing, warmwaterrecycling en warmteterugwinning (WTW). Hiervoor zijn er diverse technieken en configuraties in ontwikkeling die deels ook al worden toegepast, maar (behalve warmwaterbesparing) nog in zeer beperkte mate. Wat betreft warmwaterbesparing zijn relatief eenvoudige waterbesparende douchekoppen al sinds jaren breed beschikbaar en zijn die ondertussen bij ongeveer de helft van de Nederlandse huishoudens in gebruik (Van Petersen, 2021). Er is op dat gebied dan ook geen sprake meer van noemenswaardige perspectieven voor verdere innovatie.

Systemen voor warmwaterrecycling en warmteterugwinning zijn ook sinds enige tijd beschikbaar en worden verder doorontwikkeld. In het geval van waterrecycling (recycledouche) wordt het warme douchewater direct hergebruikt (na reiniging door filtratie en UV-bestraling). De besparing op zowel de energie- als waterbehoefte in dit soort systeem is hoog, rond de 80%. In het geval van warmteterugwinning wordt via warmtewisselaars warmte vanuit het gebruikte douchewater benut voor de voorverwarming van de koude wateraansluiting naar de douche en/of de warmwaterbereider. De energieprestatie hangt af van de specifieke configuratie en warmteverliezen. Met de beste configuraties, bijvoorbeeld op basis van innovatieve helix-warmtewisselaars, kan op systeemniveau tot 60 à 70% van de warmte die uit de douchekop stroomt (respectievelijk 80% van de warmte die in de warmtewisselaar terecht komt) teruggewonnen worden, maar er zijn ook eenvoudiger en/of retrofitconfiguraties waarvan de systeemrendementen lager zijn, oplopend vanaf 20% (Jacobs, Vijlbrief, & Kemp, 2020).

Op systeemniveau zijn er nog aanvullende mogelijkheden voor de verbetering van de energieprestatie van warmtapwatersystemen, bijvoorbeeld door de beperking van warmteverliezen in waterleidingen en boilervaten, waarbij voor de laatste bijvoorbeeld vacuüm geïsoleerde vaten mogelijk een trend worden (zie het deelrapport 'Kleinschalige warmteopslag').

Alle hierboven beschreven ontwikkelingen in beschouwing nemende, kan gesteld worden dat er in vergelijking met het huidige dominante warmtapwatersysteem in Nederland (de HR combiketel) alleen al door WTW of warmwaterrecycling aanzienlijke verbeteringen van de energieprestatie mogelijk zijn. Zelfs met relatief eenvoudige (retrofit-) WTW-systemen zijn al energiebesparingen van tenminste 20% haalbaar. Met de meest geavanceerde systemen zijn door waterrecycling of efficiënte WTW energiebesparingen van 60 tot 80% haalbaar. Deze besparingen zijn additioneel op besparingen aan de kant van de warmwaterbereiding zelf, bijvoorbeeld door warmtepompen of warmtenetten (zie hiervoor de deelrapporten over warmtepompen en warmtenetten).

### Verslimmen van warmtapwatersystemen en bieden van flexibiliteit

Uit de grote variatie aan energieprestaties afhankelijk van configuraties en/of achteruitgang van de functionaliteit (bijvoorbeeld door vervuiling van de warmtewisselaar) blijkt dat er een behoefte is aan de ontwikkeling van monitoringsystemen die laten zien hoe goed een gegeven configuratie in de praktijk (energetisch) presteert. Voor de gebruiker is bij de huidige systemen nauwelijks te achterhalen of de beloofde/verwachte energieprestatie ook daadwerkelijk wordt gerealiseerd. Er zijn nu monitoringsystemen in ontwikkeling (elektronisch oproepbaar, bijvoorbeeld via een app) die aantonen hoe goed een gegeven configuratie in de praktijk presteert.

## Verbeteren van de integratie van warmtapwatersystemen in (renovatieconcepten voor) de bestaande bouw

De verduurzaming van warmtapwatersystemen kan gepaard gaan met een ingrijpende verbouwing en hierbij kunnen beperkingen ontstaan op het gebied van ruimtebeslag (bijvoorbeeld voor grotere boilerkasten of de plaatsing van meer dan 2 meter lange warmtewisselaars) en installatietijd/-kosten (bijvoorbeeld de aanleg van waterleidingen tussen de warmtewisselaar en de warmwaterbereider en de douchemengkraan). Bij renovatie van meergezinswoningen is het niet mogelijk om conventionele douche WTW toe te passen (onder het vloerniveau van de badkamer). Daarom worden de meeste innovatieve systemen tot nu toe in de nieuwbouw gerealiseerd en minder vaak in bestaande woningen. De ontwikkeling van compacte systemen, en concepten, waarbij minder ingrijpende verbouwing nodig is, is een ontwikkelingsrichting die deze drempels verlaagt.

Door de integratie/afstemming van componenten, zoals WTW, boilerkasten, waterleidingen met warmte opwekinstallaties en optimalisatie op systeemniveau kan niet alleen een grotere compactheid van warmtapwatersystemen bereikt worden, maar ook het rendement van het systeem als geheel verbeteren. Een voorbeeld hiervan is een innovatief douchesysteem, waarbij de warmwaterbereider in de douche zelf is geïntegreerd waardoor er bij renovatie geen aanpassingen van toevoerleidingen nodig is. Een uitvoering van dit systeem, waarbij de warmwaterbereiding met een warmtepomp die door een ZLT warmtenet (15 °C) wordt gevoed, is nog in ontwikkeling. Het ontwerp van dit systeem voorziet bovendien dat het ook gebruikt kan worden voor ruimteverwarming (weliswaar alleen voor zeer goed geïsoleerde woningen) en biedt zo een oplossing voor de totale warmtevraag van woningen.

## Verlagen van aanschaf- en installatiekosten en operatie

De investeringskosten voor eenvoudigere WTW-systemen liggen in de orde van €500 tot €1000 met beperkte perspectieven voor kostendalingen. Voor complexere systemen zoals de recyclingdouche of geïntegreerde warmtepomp/WTW-douche liggen de investeringskosten hoger, zo'n €4000 tot 6000. Deze complexere systemen worden vaak als geprefabriceerde oplossingen ontworpen, waardoor een meer gestandaardiseerd product ontstaat en kortere installatietijden (en –kosten) ontstaan.

## Randvoorwaarden voor opschaling

Een randvoorwaarde voor de opschaling van (meer) duurzame warmtapwatersystemen is dat er zowel bij gebruikers als bij installateurs meer aandacht komt voor de technologische mogelijkheden rond WTW. Op basis van de voor dit rapport verzamelde informatie is de kennis over WTW nog zeer beperkt bij zowel gebruikers als installateurs. Technologieën zoals WTW zouden standaard als optie in het portfolio van de installatiesector beschikbaar moeten zijn (wat nu nog niet het geval is). Dit zou ertoe kunnen leiden dat er - in ieder geval bij meer ingrijpende renovatiemomenten – meer van deze technieken geïmplementeerd worden. Verder zou een daling van de kosten van duurdere, maar ook meest effectieve systemen, de opschaling kunnen bevorderen. Dit vereist ook kortere installatietijden en waar mogelijk standaardisatie.

Voor uitsluitel of lagere temperaturen (dan de huidige gehanteerde 55 tot 60 °C) veilig toepasbaar zijn, zijn definitieve inzichten in effectiviteit en faalrisico's van legionellabeheerstechnieken anders dan thermisch nodig. Voor betere gebruikersvriendelijkheid is de ontwikkeling van monitoringsystemen wenselijk, die voor de gebruiker duidelijk maken of systemen zoals bijvoorbeeld WTW's naar verwachting presteren.

## Potentiële marktontwikkelingen

### Beschrijving

Dit deelrapport gaat voor het marktaandeel uit van vergelijkbare aannames zoals die zijn gemaakt voor (Z)LT warmtenetten, omdat woningen met laagtemperatuurverwarming een aparte voorziening voor warm tapwater nodig hebben. In het betreffende deelrapport bestaat het marktaandeel uit het aantal bestaande woningen dat tussen 2020 en 2030 op een warmtenet wordt aangesloten. Dit uitgangspunt voor de schatting van een marktaandeel betekent niet, dat de betreffende warmtapwatersystemen in de realiteit exclusief in woningen toegepast zullen worden, die op (Z)LT warmtenetten zijn aangesloten.

### Basispad

De gehanteerde aanname voor de toename van het marktaandeel van woningen met aparte warmtapwaterinstallaties komt voor het Basispad tot 2030 uit op rond 36.000 meergezins- en 48.000 eengezinswoningen, dus in totaal 84.000 woningen.

### Verdubbeling

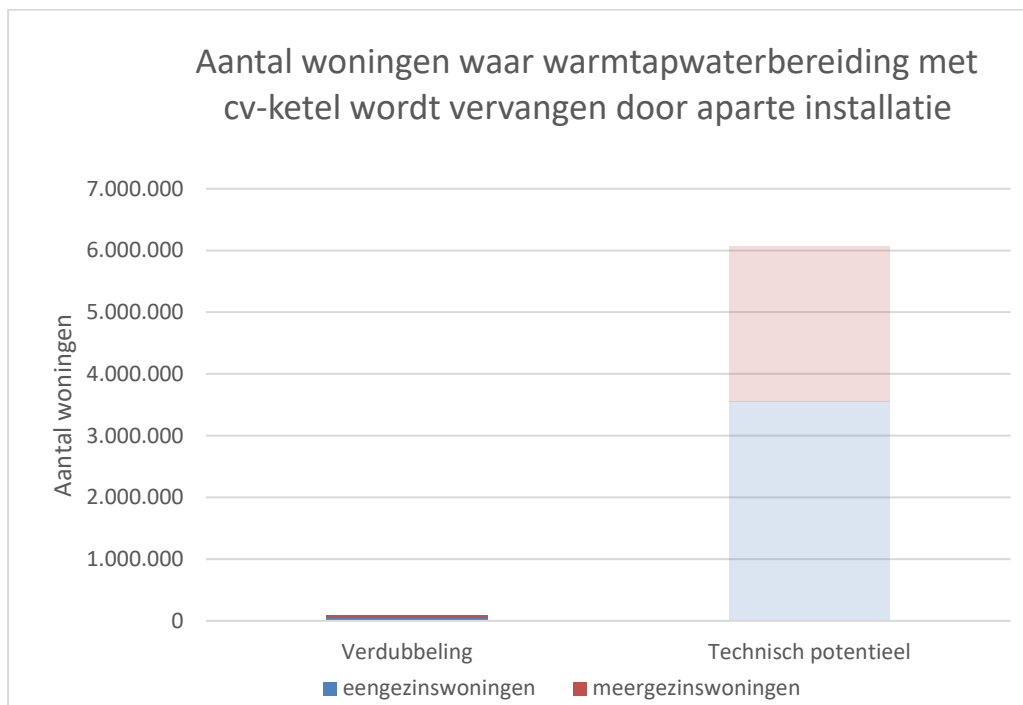
De verdubbeling ten opzichte van het Basispad komt overeen met een toename van nog eens 84.000 woningen met aparte warmtapwaterinstallaties (36.000 meergezins- en 48.000 eengezinswoningen).

### Technisch potentieel

Voor de aanname wat betreft het technisch potentieel gaan we ervan uit dat 100% van de bestaande woningen in gebieden zijn die geclassificeerd zijn met een bebouwingsdichtheid 'hoog' en 'midden' en in 2030 aangesloten zijn op een warmtenet. Dat zijn ruim 6.000.000 woningen (2,5 miljoen meergezins- en 3,5 miljoen eengezinswoningen). Zoals eerder gezegd is dit niet bedoeld als een voorspelling, maar om een indicatie van het theoretische bereik te geven.

Tabel F 2 Beschrijving van de potentiële marktontwikkelingen van warmtapwatersystemen waarvan de impact in dit deelrapport is berekend.

| Potentiële marktontwikkelingen Warmtapwatersystemen |   |
|---|---|
| Beschrijving  |   |
| <b>Verdubbeling</b>                                 | Verdubbeling ten opzichte van het Basispad van het aantal bestaande woningen dat in 2030 is aangesloten op een laagtemperatuur warmtenet  |
| <b>Technisch potentieel</b>                         | Alle bestaande woningen in een gebied met een warmtedichtheidsklasse 'hoog' en 'midden' is in 2030 aangesloten op een laagtemperatuur warmtenet   |
| Randvoorwaarden                                     |   |
| <b>Verdubbeling / Technisch potentieel</b>          | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Meer bekendheid met de technologie omtrent warmtapwatersystemen bij gebruikers en installateurs</li> <li>- Kortere installatietijden en lagere kosten</li> </ul> |



Figuur F 1 Aantal woningen ten opzichte van het Basispad waar de warmtapwaterbereiding met een cv-ketel in 2030 wordt vervangen door een aparte installatie.

## Benodigde innovaties

Idealiter wordt er een doorbraak bereikt voor de legionellaveilige warmtapwaterbereiding waarbij de temperatuur aan het tappunt verlaagd kan worden tot onder het huidige niveau van 55 à 60°C. Dan kan er namelijk met veel laagtemperatuur verwarmingssystemen direct warm tapwater geleverd worden en is er geen opschaling van losse systemen voor warm tapwater nodig. Daarnaast zijn er vooral innovaties nodig die de bestaande drempels voor de opschaling verlagen, dat wil zeggen de relatief hoge kosten, de als ingrijpend ervaren installatieprocessen, ruimtelijke beperkingen (vooral in kleinere woningen). Voor het realiseren van maximaal efficiënte systemen is ook de voortzetting van innovaties op het gebied van systeemoptimalisatie nodig, die bijvoorbeeld leiden tot de minimalisatie van stilstandsverliezen en de maximalisatie van het rendement van warmteopwekking.

## Impact

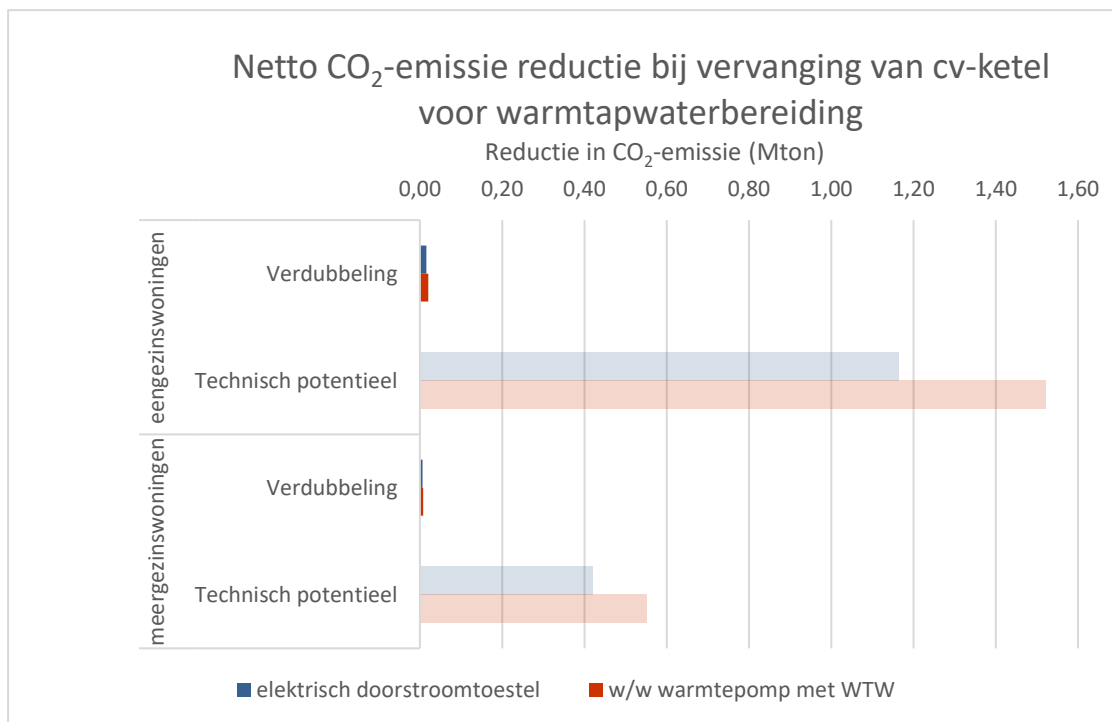
In dit deel wordt de potentiële impact van een deelonderwerp berekend bij verschillende marktontwikkelingen. Dit onderdeel richt zich alleen op een kwantitatieve impactberekening van de CO<sub>2</sub>-emissiereductie en van de nationale kosten. Andere effecten van een hoger marktaandeel of een innovatie blijven daarmee buiten beschouwing.

Hieronder worden de effecten voor twee specifieke technologieën weergegeven. De ene technologie is een elektrisch doorstroomtoestel, die als referentiepunt dient (deze wordt soms in huidige aparte warmtapwatersystemen toegepast). De andere (innovatieve en nog in ontwikkeling zijnde) technologie is het systeem waarbij warmwaterbereiding met een (w/w) warmtepomp en WTW in een systeem geïntegreerd zijn. De keuze voor dit voorbeeld komt voort uit het feit dat er in dit systeem veel van de in dit deelrapport beschreven innovaties zijn gerealiseerd, zoals hoog-rendement WTW. De systeem-geïntegreerde warmtepomp heeft

naar verwachting tot gevolg, dat het rendement van warmteopwekking zeer hoog is (SPF 8). De aannames en kentallen worden verder toegelicht in de bijlage.

### CO<sub>2</sub>-emissies

Door de vervanging van een cv-ketel met een elektrisch doorstroomtoestel of het innovatieve systeem (warmtepomp + WTW) voor de warmtapwaterbereiding wordt CO<sub>2</sub>-emissiereductie bereikt door vermijding van de directe CO<sub>2</sub>-emissies van de cv-ketel. Deze emissiereductie wordt wel verminderd door de (veel kleinere) indirecte emissies ten gevolge van het elektriciteitsverbruik van het vervangende systeem. De emissiereductie voor het warmtepompsysteem is groter omdat het elektriciteitsverbruik van dit systeem aanzienlijk lager is (dankzij de hoge SPF van 8). Toch is de totale emissiereductie in het scenario 'Verdubbeling' voor beide systemen in absolute zin beperkt (< 0,1 Mt CO<sub>2</sub>). Dit is het gevolg van de bescheiden veronderstelde marktgroei tot 2030. De emissiereductie voor het technisch potentieel is, gezien het veel grotere aantal woningen, uiteraard veel hoger, ongeveer 1,6 Mt voor het elektrisch doorstroomtoestel en 2,2 Mt voor de warmtepomp met WTW.

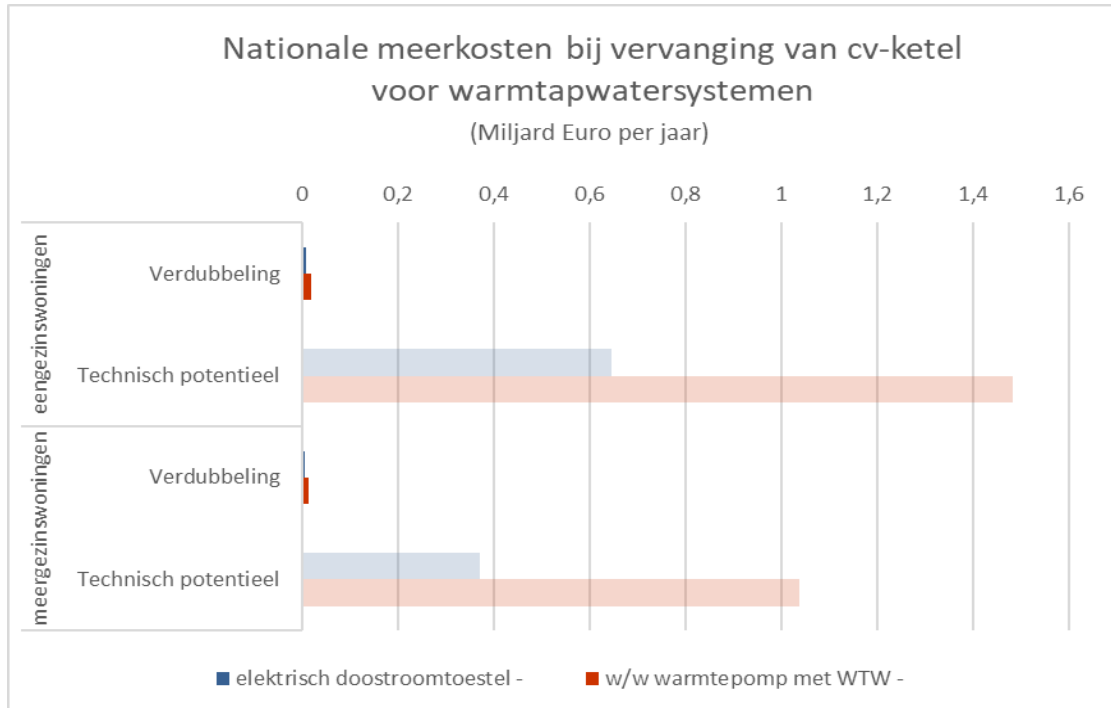


Figuur F 2 Netto CO<sub>2</sub>-emissiereductie in 2030 als gevolg van de warmtapwaterbereiding met een elektrisch doorstroomtoestel of w/w warmtepomp met WTW in plaats van met een cv-ketel

### Nationale meerkosten

Door de vervanging van een cv-ketel met een elektrisch doorstroomtoestel of het innovatieve systeem (warmtepomp + WTW) voor de warmtapwaterbereiding worden kosten voor de cv-ketel overbodig. We gaan hierbij uit van het overbodig worden van 20% van de totale kosten van de cv-ketel (investeringskosten en operationele kosten). Deze aanname is gebaseerd op de in 2030 nog typische verdeling van de warmtevraag (20% is voor tapwater en 80% voor ruimteverwarming). Voor het warmtepomp + WTW systeem wordt hierbij overigens genegeerd, dat die tegelijkertijd ook voor ruimteverwarming gebruikt kan worden (als hiermee wel rekening was gehouden, zouden de kosten aanzienlijk lager komen te liggen). De overbodige kosten voor de cv-ketel wegen niet op tegen de kosten voor de vervangende

systemen (elektrisch doorstroomtoestel of w/w warmtepomp met WTW). De kosten voor de w/w warmtepomp met WTW zijn hoger dan die voor het elektrische doorstroomtoestel. Dit komt doordat de investeringskosten hoger zijn en ondanks het lagere elektriciteitsverbruik. Door de bescheiden veronderstelde marktgroei tot 2030 zijn de nationale meerkosten voor het scenario 'verdubbeling' in absolute zin beperkt. Voor het technisch potentieel komen door de veel hogere aantallen daarbij betrokken woningen de nationale meerkosten hoger uit.



Figuur F 3 Nationale meerkosten in 2030 als gevolg van de warmtapwaterbereiding met een elektrisch doorstroomtoestel of w/w warmtepomp met WTW in plaats van met een cv-ketel

## Samenvatting

Een aandachtspunt op het gebied van warmtapwater is dat het aandeel van de warmtevraag voor warmtapwater in de toekomst naar verwachting toeneemt (omdat de warmtevraag voor ruimteverwarming door betere isolatie en zachtere winters daalt).

De trend naar laagtemperatuursystemen voor ruimteverwarming betekent voor warmtapwaterinstallaties bovendien dat er vaak in een aparte installatie voor tapwater moet worden voorzien. Op het gebied van warmtapwatersystemen zijn er veelbelovende innovaties waardoor de energieprestatie voor de warmtapwaterbereiding substantieel verbeterd en verduurzaamd kan worden. Zelfs met relatief eenvoudige retrofitsystemen voor warmteterugwinning (WTW) kan bijvoorbeeld tenminste 20% energiebesparing gerealiseerd worden, met geavanceerdere systemen voor douchewaterrecycling of douchewater WTW is dat 60 tot 80%. Er zijn diverse systemen in ontwikkeling, waarmee - bijvoorbeeld door integratie van warmtepompen voor de warmwaterbereiding en WTW voor energiebesparing - het warmtapwatersysteem nagenoeg emissievrij gemaakt kan worden. Om opschaling van dit soort systemen te bereiken is een betere bekendheid bij gebruikers en installateurs nodig, naast dalende kosten en laagdrempelige installatieprocessen en het opstarten van proefprojecten.

# G. Deelrapport Ventilatiesystemen

## Inleiding

### Context

Een groot deel van de woningen is afhankelijk van naden en kieren voor ventilatie. Door bij een renovatie van een woning naast isolatie ook kierdichting toe te passen vermindert de natuurlijke aanvoer van verse lucht en de afvoer van verontreinigde lucht. Dit heeft invloed op de luchtkwaliteit en kan daarmee een effect hebben op de gezondheid, ook al is het effect niet altijd direct merkbaar. De WHO adviseert sinds september 2021 voor fijnstof een gemiddelde van maximaal 5 microgram per kubieke meter, gemeten over een jaar. Dit is een aanscherping met een factor twee ten opzichte van de eerdere eis. Dit leidt tot de situatie dat in bijna 98% van de woningen de jaargemiddelde WHO-advieswaarde voor PM2.5 wordt overschreden (Jacobs, 2021). Behalve het afvoeren van luchtverontreinigende stoffen uit de woning kan een ventilatiesysteem met filters ook de lucht reinigen, zodat bijvoorbeeld virusdeeltjes van binnen bij recirculatie en pollen en fijnstof van buiten kunnen worden afgevangen.

TKI UE beschrijft in MMIP4 de volgende aandachtspunten voor ventilatiesystemen:

- Verlagen van aanschaf- en installatiekosten
- Verhogen van (systeem)rendementen en optimaliseren van ventilatiesystemen
- Verlagen van geluidsproductie
- Versimpelen en verslimmen van het onderhoudsproces
- Doorontwikkelen en verslimmen van ventilatiesystemen
- Integratie van ventilatieverbetering in totale renovatieconcepten.

### Scope

De focus van dit deelrapport ligt op het realiseren van voldoende ventilatie in bestaande woningen op de meest energiezuinige manier.

### Leeswijzer

Het kwalitatieve deel van dit deelrapport bestaat uit de onderdelen 'ontwikkelingen in de technologie' en 'randvoorwaarden voor opschaling' en is gebaseerd op desk research en interviews met Wouter Borsboom (TNO) en Sjoerd Kleijn Velderman (Endule). Het kwalitatieve deel is daarmee een selectie van wat volgens de geïnterviewden de belangrijkste knelpunten, ontwikkelingen en randvoorwaarden zijn om opschaling te realiseren.

Het kwantitatieve deel, bestaande uit de onderdelen 'potentiële marktontwikkelingen' en 'impact', is opgesteld door TNO. De aannames die hierbij gehanteerd zijn, zijn afgestemd met TKI UE en komen zoveel mogelijk voort uit de interviews en de Klimaat- en Energieverkenning 2021 (KEV) (PBL, 2021). Zoals toegelicht in de inleiding stellen we nadrukkelijk dat wij niet voorspellen dat die gepresenteerde potentiële ook gerealiseerd worden. De potentiële marktontwikkelingen laten echter zien aan dat er een groter potentieel is, dat volgens de KEV nog niet wordt benut.

Het deelrapport wordt afgesloten met een samenvatting van de inzichten uit beide onderdelen.

## Ontwikkelingen in de technologie

### Problematiek in de bestaande bouw

Na het dichten van kieren en naden van de woning om zodoende het warmteverlies terug te dringen, is het van belang dat voldoende ventilatie zorgt voor luchtverversing. Tegelijkertijd is het doel om zoveel mogelijk energie te besparen en is het belangrijk dat ventilatiesystemen zo zuinig mogelijk zijn. Wat betreft luchtkwaliteit meldt het Bouwbesluit 2012 hierover:

#### *Artikel 3.35 Verbouw*

*1. Op het gedeeltelijk vernieuwen of veranderen of het vergroten van een bouwwerk zijn de artikelen 3.29 tot en met 3.34 van overeenkomstige toepassing, waarbij in plaats van het in die artikelen aangegeven niveau van eisen wordt uitgegaan van het rechtens verkregen niveau.*

De NEN 8087:2001 definieert het 'rechtens verkregen niveau' als:

*“De luchtuitwisseling die tot stand komt via ondichtheden in de gebouwschil, zoals kieren en naden (infiltratie), wordt mede als luchtverversing in bovenstaande zin aangemerkt.”*

Dit betekent dat het niveau van (natuurlijke) ventilatie vóór de renovatie moet worden behouden na de renovatie. Deze eis wordt echter niet gehandhaafd<sup>11</sup>. Het is in principe ook mogelijk aan de 'woningstandaard' te voldoen zonder een ventilatiesysteem te hebben toegepast. De vermindering van luchttoevoer door kierdichting wordt daarom niet in alle gevallen voldoende gecompenseerd. Ook voldoen de ventilatiesystemen nog niet altijd aan de wensen op het gebied van energiegebruik en comfort, bijvoorbeeld omdat ze niet goed worden aangelegd. Er wordt door ontwikkelaars en woningeigenaren ook niet expliciet gestuurd op voldoende ventilatie in de praktijk, mede door gebrek aan kennis en inzicht over de werking van het systeem en over wat ventilatie kan betekenen voor gezondheid en energiebesparing. Informatie over de werking en actuele binnenluchtkwaliteit en energiegebruik van het gebouw en het ventilatiesysteem zou de gebruiker beter inzicht geven in de prestatie van het ventilatiesysteem. Dit gebrek aan inzicht maakt het gebruikers erg lastig om opdrachtgevende partijen aan te spreken op het leveren van een goed en deugdelijk werkend ventilatiesysteem. Onlangs is Programma van Eisen 'Gezonde woningen' ontwikkeld dat prestatie-eisen biedt voor lucht, klimaat, licht en geluid (Binnenklimaat Nederland, 2022). Deze richtlijn kan gebruikt worden om op drie kwaliteitsniveaus te ontwerpen.

Andere aandachtspunten rondom ventilatie in de bestaande bouw zijn:

1. Veel woningen (ook van na 2000) blijken nog een probleem te hebben met vocht en schimmel in de badkamer. Ook mechanische ventilatie blijkt vaak ontoereikend om het vocht af te voeren, wellicht doordat deze te kort in de hoogstand staat. Vraagsturing kan hierbij helpen door bijvoorbeeld een vochtsensor in de afvoer. In geval van plaatsing van een decentrale mechanische ventilatie unit treedt vaak een blokkade van het natuurlijke afvoerkanaal op, waardoor er juist minder wordt geventileerd.
2. De kookafzuiging is vaak onvoldoende om de concentratie van fijnstof door kookemissies tijdens bakken en braden af te voeren. Dit komt doordat de eisen

<sup>11</sup> Ook zijn de eisen in het Bouwbesluit (en straks het 'Besluit bouwwerken leefomgeving') bedoeld als een minimum vangnet om directe en ernstige ongelukken en gezondheidsschade te voorkomen, zoals instorting en brand. Vaak worden de minimale eisen in het Bouwbesluit betreft ventilatie als maximale prestatie toegepast, maar dit betekent daarmee nog niet dat de binnenlucht geen negatieve effecten op de gezondheid en zeker comfort kan hebben.



geformuleerd zijn op het afvoeren van vocht tijdens het koken. In de praktijk ontbreekt dit afzuigpunt soms zelfs na renovatie.

3. De werking en onderhoud van het ventilatiesysteem is niet bekend bij bewoners. Bewoners weten in veel gevallen niet hoe roosters, ventielen en kanalen moeten worden onderhouden en filters moeten worden vervangen, zodat het ook blijft functioneren zoals bedoeld.
4. Ook is voor veel bewoners de bediening van de mechanische ventilatievoorzieningen onduidelijk, bijvoorbeeld in welke stand een ventilatiesysteem moet staan en wat het effect van openen of sluiten van ventilatietoeverroosters is en het effect van het openen van ramen. Dit kan leiden tot te weinig ventilatie, maar soms komt het ook voor dat systemen onnodig lang in de hoogstand staan.
5. Nachtventilatie voor het verkoelen van de woning, door het openzetten van ramen en deuren, kan het beste 's nachts en in de vroege ochtend worden toegepast. Vanwege het risico op inbraak doen bewoners dit soms liever niet. Volgens het Bouwbesluit moet nachtventilatie inbraakwerend zijn als hij dicht staat, maar niet als hij open staat, wat juist gewenst is bij nachtelijke ventilatie. In de NTA8800 staat dat nachtventilatie inbraakwerend moet zijn, maar in de praktijk zijn deze niet beschikbaar of toetsbaar.
6. Als kieren en naden zijn gedicht en mechanische ventilatie is aangebracht, maar de woning niet is voorzien van een andere vorm van toevoer van lucht, dan kan er vochtige (ongezonde) lucht worden aangetrokken uit de kruipruimte, die in een aantal gebieden ook radon bevatten.

## Algemene ontwikkelingen

Voor de toepassing van een balansventilatiesysteem met warmteterugwinning (WTW) vormt de aanleg van toe- en afvoerkanalen in bestaande woningen een grote belemmering. Als er bij renovatie een nieuwe schil om de woning komt, dan kunnen de toevoerkanalen in deze schil worden meegenomen. Ook kan er bijvoorbeeld een verlaagd plafond worden toegepast. Deze opties zijn echter niet altijd mogelijk of wenselijk. Er zijn diverse partijen die oplossingen aanbieden voor balansventilatie met WTW in de bestaande bouw, zoals een andere luchtdistributie en decentrale systemen waarbij toe- en afvoer direct door de gevel van de verblijfsruimte gaat.

Er zijn partijen die centrale balansventilatie met WTW kunnen toepassen in een woning met een alternatieve luchtdistributie waarbij minder kanalen nodig zijn. De schone lucht wordt dan hoofdzakelijk via het trapgat of de hal ingeblazen en komt de kamers binnen via mengventilatoren onder de (ingekorte) binnendeuren. In één van de ontwikkelde methodes wordt de lucht alleen via de standaardkanalen (keuken, badkamer, toilet) afgevoerd, maar wordt actief lucht toegevoerd naar de slaapkamers die in een gemiddelde woning goed te bereiken zijn vanaf de zolder (waar het balansventilatiesysteem vervolgens staat). In een andere methode wordt de lucht naar de slaapkamers niet actief toegevoerd, maar actief afgevoerd. Een nadeel bij dergelijke ingrijpende veranderingen in het ventilatiesysteem is dat het werk vaak niet door één en dezelfde persoon/bedrijf kan worden uitgevoerd en er meerdere disciplines bij betrokken zijn.

Decentrale ventilatie (met warmterugwinning), waarbij elke ruimte apart wordt geventileerd, is met name voor hoogbouw een interessante oplossing. Decentrale ventilatie vergt wel nog doorontwikkeling. Er zijn bijvoorbeeld bij veel huidige systemen nog problemen met geluidsoverlast, zeker als het vraaggestuurde systeem aanspringt als je net ligt te slapen. Er zijn nieuwe systemen op de markt beschikbaar die voldoende stil zijn. Deze systemen zijn

makkelijker toe te passen waardoor een belemmering bij de aanleg van ventilatie zou worden weggenomen met dit systeem.

Het zou interessant zijn als er een integraal systeem wordt ontwikkeld waarbij verwarmen, koelen en ventileren als één oplossing kan worden toegepast, ook omdat je nu soms drie displays ziet voor thermostaat, gezoneerde thermostaat bij vloerverwarming en ventilatie. Deze systemen communiceren ook niet en maken ook geen gebruik van uniforme communicatieprotocollen. Hier is winst te behalen in comfort en energiegebruik.

## Verhogen van (systeem)rendementen en optimaliseren van ventilatiesystemen

Een ventilatiesysteem gebruikt energie, maar zuinige systemen kunnen energie besparen. Lucht die van buiten wordt aangevoerd moet in het stookseizoen worden opgewarmd en in de zomer gekoeld, wat energie kost. Bij vraaggestuurde mechanische ventilatie of balansventilatie met warmterugwinning kan dit energiegebruik met 60 tot 80% worden verminderd. Dit komt doordat, respectievelijk, de hoeveelheid en plaats van de aanvoer van lucht van buiten wordt geregeld met behulp van sensoren en actuatoren of doordat de aangevoerde lucht wordt voorverwarmd door warmterugwinning. Niet-vraaggestuurde systemen gebruiken meer energie, omdat ze ook ventileren als het niet nodig is. Deze systemen zijn vrij eenvoudig om te bouwen naar vraaggestuurde ventilatiesystemen.

In de praktijk blijkt het elektriciteitsgebruik van mechanische ventilatiesystemen vaker hoger uit te vallen dan uit de NTA8800 berekeningen komt. Dit komt vaak voornamelijk doordat de kanalen niet goed zijn aangelegd (en de weerstand te hoog wordt), maar ook zaken als dat de ventielen slecht zijn ingeregeld en eventuele filters niet op tijd worden vervangen. Hulpenergie kan dan een significant deel van het totale stroomgebruik uitmaken zowel voor natuurlijke toevoer en mechanische afvoer als centrale warmterugwinning (WTW) systemen. Ook als de WTW niet goed wordt ingeregeld kan het zijn dat de toe- en afvoer niet in balans is en daardoor minder efficiënt is. Het kan daardoor zelfs voorkomen dat de WTW uiteindelijk meer elektrische energie kost dan het oplevert door beperking van het warmteverlies en koelverlies ten opzichte van een systeem zonder WTW. Een goed ontwerp en juiste aanleg zijn daardoor cruciaal om te voorkomen dat het systeem meer energie gebruikt dan nodig is. Er wordt in veel gevallen ook niet gecontroleerd of het systeem correct is aangelegd en het naar behoren werkt.

Ventilatiesystemen kunnen ook helpen met koeling van de woning in de zomer<sup>12</sup>.

Mechanische ventilatiesystemen kunnen een luchtstroming op gang brengen die 's nachts koele lucht van buiten de woning inbrengt. De huidige balansventilatiesystemen hebben een bypass om te voorkomen dat de toegevoerde koellucht wordt voorverwarmd. Deze bypass moet de gebruiker in sommige gevallen wel zelf elke keer aan en uit zetten. Een van de systemen die op de markt zijn heeft een koelfunctie op het apparaat waardoor het debiet automatisch wordt opgevoerd als het buiten kouder is dan binnen.

Overigens bestaat het risico dat door de recente stijging van de energieprijzen gebruikers de ventilatiesystemen uitzetten en de ventilatiooster dichtplakken om energie en kosten te besparen.

---

<sup>12</sup> Door het gebruik van ramen of speciale voorzieningen voor nachtventilatie zijn wel veel grotere ventilatiestromen mogelijk, in het geval van dwarsventilatie een factor 10 tot 100, wat een groter koeleffect kan hebben. Nb Dwarsventilatie is het openzetten van ramen en deuren in twee verschillend georiënteerde gevels of verschillende hoogtes.

## Verlagen van aanschaf- en installatiekosten

Standaardafvoer zoals vochtafvoer uit badkamer met een sensor of kookafzuiging is niet ingewikkeld of duur<sup>13</sup>, maar na kierdichting is in veel bestaande woningen ook extra ventilatie nodig in de andere ruimtes om een goede luchtkwaliteit te behouden.

De kostprijs van het centraal balansventilatiesysteem met WTW zelf is maar zo'n 1.000 à 1.500 Euro, maar het ontwerp en de installatie in een bestaande woning is nu ingewikkeld, vergt soms verschillende disciplines en kost veel tijd om te installeren waardoor het systeem uiteindelijk toch 6 à 7.500 Euro<sup>14 15</sup> kost. Met plug & play-installatiemethode en herhaalde uitvoering zouden deze kosten flink omlaag kunnen, tot maximaal 1.500 Euro. Hier moet bij worden vermeld dat de prijzen momenteel snel stijgen. Een andere oplossing is om ventilatiesystemen aan te bieden als een service, bijvoorbeeld voor de levensduur van 10 tot 20 jaar. Op deze manier kan je de levensduur van de schil en installatie ook loskoppelen.

## Verlagen van de geluidsproductie

Er zijn geen geluidseisen voor ventilatiesystemen in de bestaande bouw<sup>16</sup>. Er zijn klachten bekend van bewoners over geluidsoverlast van ventilatie, wat ertoe kan leiden dat het ventilatiesysteem uit wordt gezet. Als een ventilatiesysteem goed is ontworpen en goed is geïnstalleerd hoef je de ventilatie echter niet te horen (zelfs 25 dB zou geen probleem moeten zijn, zoals bijvoorbeeld de eis in Zwitserland). Om geluidsoverlast te voorkomen is het daarom belangrijk dat de installateurs goed worden opgeleid, dat de systemen makkelijk kunnen worden aangelegd en dat de geluidsproductie wordt gecontroleerd. Nu wordt een geluidsmeting vaak alleen door een gespecialiseerd bureau gedaan. Recent zijn er methodes ontwikkeld samen met Binnenklimaat Nederland, TNO en Techniek NL zodat de installateur maar ook de aannemer zelf op geluid, luchtdichtheid en ventilatiedebieten kan testen.

## Randvoorwaarden voor opschaling

De ontwikkeling van systemen waarbij een foutloos werkend ventilatiesysteem eenvoudiger kan worden geïnstalleerd, zoals met een plug & play-installatiemethode, kan de toepassing van ventilatiesystemen in bestaande woningen versnellen. Het kan de installatietijd verkorten, de installatiekosten reduceren, de (energetische) prestaties van het systeem verbeteren en ervoor zorgen dat ventilatie als een serieuze optie wordt meegenomen bij renovaties.

Ook is het cruciaal dat men zich beter bewust is van het belang en de voordelen van goede ventilatie. Opschaling vindt namelijk voornamelijk plaats doordat mensen bekend zijn met de mogelijkheden. Monitoring en empowerment van gebruikers kan hier een belangrijke rol spelen. Als gebruikers de middelen zouden hebben om de luchtkwaliteit te meten en terugkoppeling zouden krijgen over het functioneren van het ventilatiesysteem zou dat kunnen helpen bij het vergroten van het bewustzijn en de mogelijkheid opdrachtgevers of installateurs aan te spreken op hun verantwoordelijkheid. De problemen met ventilatie en de oplossingen daarvoor zouden ook met een campagne onder de aandacht kunnen worden gebracht.

---

<sup>13</sup> Om aan het CE-keur te voldoen hebben veel ventilatiesystemen al een sensor.

<sup>14</sup> De eerdergenoemde luchtdistributiesystemen kosten ongeveer evenveel of zullen iets goedkoper zijn.

<sup>15</sup> Ter vergelijking: een ventilatiesysteem aanleggen in een nieuwbouwwoning kost zo'n 2.500 – 5.000 Euro. Hier speelt ook mee dat in de nieuwbouw veel kennis aanwezig is over ventilatie, maar in de bestaande bouw werken andere mensen die de kennis over ventilatiesystemen niet hebben.

<sup>16</sup> Als er voorheen een natuurlijk ventilatiesysteem in de woning zat zonder geluidsproductie dan bepaalt het volgens rechten verkregen niveau dat minimaal de geluidseisen comfort het Bouwbesluit nieuwbouw gelden. In dit geval is dit 30 dB in de verblijfsruimtes

Verder is het belangrijk dat er gestuurd wordt op daadwerkelijke prestaties van ventilatiesystemen, zoals binnenlucht met minimale gezondheidsimpact, een goed comfort met zo min mogelijk woonlasten en een laag energiegebruik van het ventilatiesysteem en niet op een theoretische prestatie volgens de minimale eisen van het Bouwbesluit. Het verdient dan ook aanbeveling om de eisen voor ventilatie aan te scherpen. Het PVE 'Gezonde woningen' biedt hier een richtlijn voor (Binnenklimaat Nederland, 2022). De kwaliteit van de binnenlucht zou ook onderdeel kunnen worden van het energielabel van de woning.

## Potentiële marktontwikkelingen

### Beschrijving

Voor de potentiële marktontwikkelingen van ventilatiesystemen is wat betreft het marktaandeel aangesloten bij de aannames voor de marktontwikkelingen voor industriële renovatie (zie het gelijknamige deelrapport), waar alleen woningen gebouwd voor 1995 worden gerenoveerd. In de KEV raming voor 2030 heeft respectievelijk 73% en 75% van het aantal meergezins- en eengezinswoningen (gebouwd voor 1995) nog natuurlijke ventilatie. Uitgangspunt in dit deelrapport is dat in dit aandeel van de gerenoveerde woningen een ventilatiesysteem wordt toegepast na het dichten van kieren en naden. De impacts zijn dan ook berekend ten opzichte van een woning verwarmd met een cv-ketel op aardgas met natuurlijke ventilatie.

Bij de berekening van de impacts wordt onderscheid gemaakt in de huidige en innovatieve techniek. De huidige standaard bij renovatie van woningen is dat er mechanische ventilatie wordt toegepast. Het aanbrengen van balansventilatie met warmteterugwinning (WTW) is bij bestaande woningen een complex proces vanwege de aanleg van toevoerkanalen, maar innovaties zoals beschreven onder 'Ontwikkelingen in de technologie' bieden hier oplossingen voor. Voor de berekeningen met de innovatieve techniek is er daarom van uitgegaan dat in eengezinswoningen balansventilatie met WTW wordt toegepast via luchtdistributie en in meergezinswoningen met decentrale ventilatiesystemen. Voor alleq ventilatiesystemen (huidig en innovatie techniek) is aangenomen dat dit ventilatiesysteem vraaggestuurd is, omdat dit gunstig is voor het energiegebruik.

### Basispad

In het Basispad in de KEV 2021 komen er in periode 2020-2030 35 duizend ventilatiesystemen bij in bestaande woningen die gebouwd zijn voor 1995. Het gaat om ca. 1% van de woningvoorraad voor 1995 die een ventilatiesysteem toepast.

### Verdubbeling

Niet meegenomen, omdat het effect conform het Basispad zo klein is.

### Natuurlijk moment

Zoals beschreven in het informatieblad 'Industrialisatie van renovatieconcepten' gaat deze ontwikkeling ervan uit dat tussen 2020 en 2030 10/50<sup>e</sup> van de woningvoorraad gerenoveerd zou worden, ruim één miljoen woningen.

Om ervoor te zorgen dat in deze woningen ventilatiesystemen wordt toegepast is het belangrijk dat alle betrokken partijen zich bewust zijn van het belang van voldoende ventilatie en het ventilatiesysteem wordt aangelegd aan de hand van passende prestatie-eisen. De aanleg van het systeem en het voldoen aan de prestatie-eisen moet kunnen worden

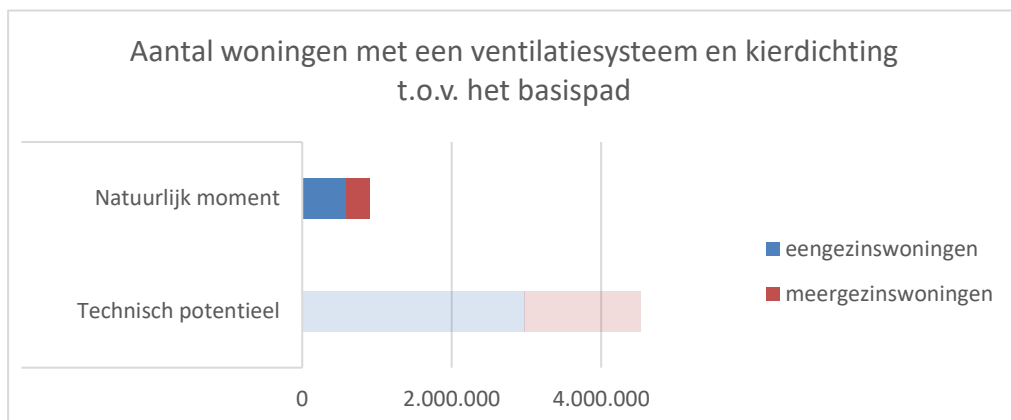
gecontroleerd en gehandhaafd. De aanleg kan worden vergemakkelijkt met plug 'n play systemen.

### Technisch potentieel

Zoals beschreven in het informatieblad 'Industrialisatie van renovatieconcepten' is het technisch potentieel het maximaal theoretisch haalbare potentieel waarbij verondersteld is dat alle woningen ouder dan 1995 in 2030 zijn gerenoveerd. Het aantal woningen dat in deze potentiële ontwikkelingen gerenoveerd wordt, is erg hoog. Het gaat er in deze verkenning dan ook vooral om de impact te laten zien van zoveel gerenoveerde woningen. Hier gelden dezelfde randvoorwaarden als bij 'Natuurlijk moment'.

Tabel G 1 Beschrijving van de potentiële marktontwikkelingen van ventilatiesystemen waarvan de impact in dit deelrapport is berekend.

| Potentiële marktontwikkelingen Ventilatiesystemen |  |
|---|--|
| Beschrijving                                      |  |
| <b>Natuurlijk moment</b>                          | Aangenomen dat de levensduur van isolatie 50 jaar is zal tussen 2020 en 2030 al 10/50e van de woningvoorraad (ouder dan 1995) gerenoveerd worden. Hiervan heeft respectievelijk 73% en 75% van het aantal meergezins- en eengezinswoningen nog natuurlijke ventilatie die vervangen wordt door of mechanische ventilatie of balansventilatie met wtw |
| <b>Technisch potentieel</b>                       | 100% van de woningen ouder dan 1995 zijn in 2030 gerenoveerd. Hiervan heeft respectievelijk 73% en 75% van het aantal meergezins- en eengezinswoningen nog natuurlijke ventilatie die vervangen wordt door of mechanische ventilatie of balansventilatie met wtw   |
| Randvoorwaarden                                   |  |
| <b>Natuurlijk moment / Technisch potentieel</b>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Bewustwording van het belang van goede ventilatie</li> <li>- Sturen op (aangescherpte) prestatie-eisen en goede monitoring</li> <li>- Plug 'n play installatiesystemen</li> </ul>   |



Figuur G 1 Het aantal bestaande woningen (met bouwjaar voor 1995) in 2030 ten opzichte van het Basispad dat in verschillende potentiële marktontwikkelingen een ventilatiesysteem en kierdichting toepast.

## Benodigde innovaties

Een belangrijke innovatie bij het toepassen van ventilatiesystemen is volgens experts het ontwikkelen van goede plug 'n play installatiesystemen voor alle denkbare situaties in woningen. Het kan de installatietijd verkorten, de installatiekosten reduceren, de prestaties van het systeem verbeteren en ervoor zorgen dat ventilatie als een serieuze optie wordt meegenomen bij renovaties. Daarbij is het belangrijk dat het functioneren van het ventilatiesysteem kan worden gemonitord.

## Impact

In dit deel wordt de potentiële impact van een deelonderwerp berekend bij verschillende marktontwikkelingen. Dit onderdeel richt zich alleen op een kwantitatieve impactberekening van de CO<sub>2</sub>-emissiereductie en van de nationale kosten. Andere effecten van een hoger marktaandeel of een innovatie, zoals een verbeterde gezondheid, blijven daarmee buiten beschouwing.

## CO<sub>2</sub>-emissiereductie

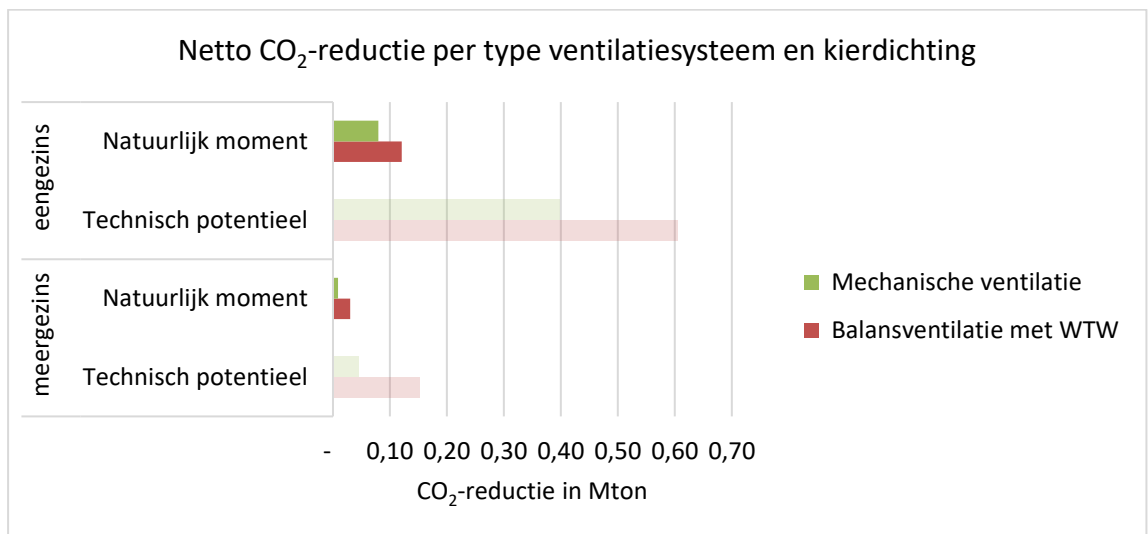
In de berekening van CO<sub>2</sub>-emissies van ventilatiesystemen zijn de volgende emissies meegenomen:

- de (indirecte) emissies door het elektriciteitsgebruik;
- (directe) emissie door aardgasgebruik voor voorverwarming van ingaande ventilatielucht;
- vermeden (directe) emissies door beperking van het warmteverlies met het dichten van naden en kieren.

Het warmteterugwinsysteem (WTW) bij balansventilatie voorkomt 70% van het warmteverlies van mechanische ventilatie en zorgt daarmee voor een reductie van de CO<sub>2</sub>-emissies, ook al gebruikt WTW meer elektriciteit. Er is verder aangenomen dat het balansventilatiesysteem in een- en meergezinswoningen (luchtdistributie en decentrale ventilatie) naar verhouding evenveel CO<sub>2</sub> bespaart. De aannames en gebruikte cijfers worden verder toegelicht in Bijlage F.

Het resultaat op een natuurlijk moment is 0,09 Mton CO<sub>2</sub>-reductie voor mechanische ventilatie ('huidige techniek') en kierdichting. Het resultaat voor dezelfde marktontwikkeling is 0,15 Mton reductie voor balansventilatie met WTW ('innovatieve techniek') en kierdichting.

De resultaten laten zien dat balansventilatie met WTW bij eengezinswoningen tot een 1,5 maal zo hoge jaarlijkse netto CO<sub>2</sub>-reductie leidt dan mechanische ventilatie (Figuur G 2). Voor een meergezinswoning is dat 3,4 maal zo hoog. De verhouding per woningtype anders, omdat bij meergezinswoningen, door de kleinere woning, minder besparing is door kierdichting, maar dezelfde toename van CO<sub>2</sub>-emissie door het ventilatiesysteem.



Figuur G 2 Netto CO<sub>2</sub>-emissiereductie (in Mton) in 2030 ten opzichte van natuurlijke ventilatie voor de potentiële marktontwikkelingen.

## Nationale meerkosten

De (meer)kosten voor mechanische en balansventilatie ten opzichte van natuurlijke ventilatie bestaan uit:

- Investeringskosten voor het ventilatiesysteem
- Jaarlijkse onderhoudskosten van het ventilatiesysteem
- De verandering in jaarlijkse energiekosten.

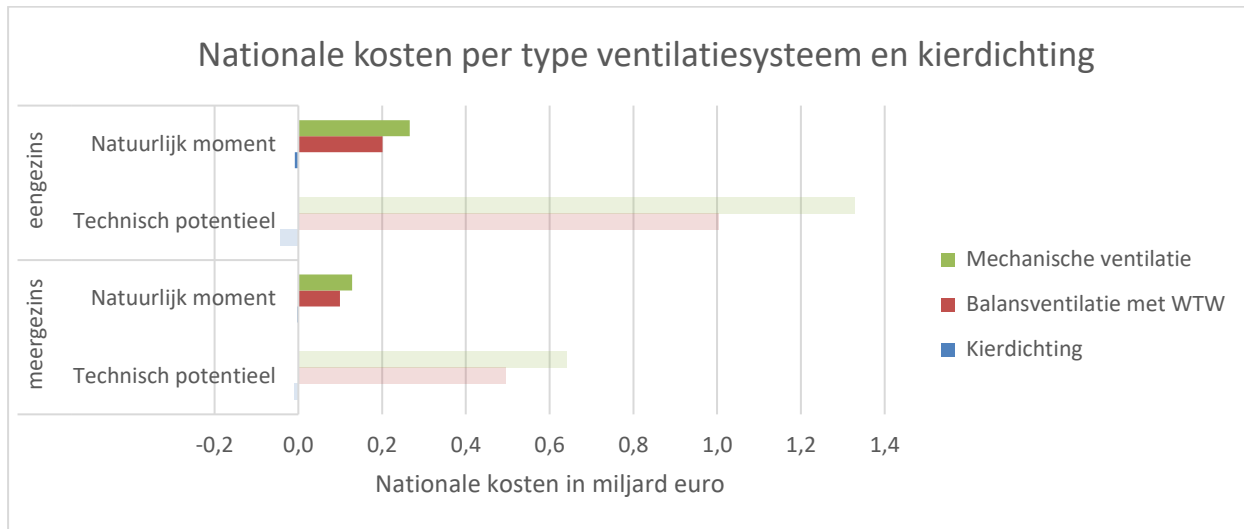
De verandering in energiekosten ten opzichte van natuurlijke ventilatie is een combinatie van:

- Afgenomen stookkosten door verminderd warmteverlies na kierdichting
- Toegenomen elektriciteitskosten door ventilatie
- Stookkosten voor het verwarmen van ingaande ventilatieluchtstroom minus de eventuele reductie hierop door warmteterugwinning.

De nationale kosten voor kierdichting bestaan uit de investeringskosten minus de besparing op de energiekosten door kierdichting. De investeringskosten van ventilatiesystemen en kierdichting zijn overgenomen van de Arcadis kostenkentallen (Arcadis, 2020) waarbij voor luchtdistributie is aangenomen dat de kosten gelijk zijn aan die voor een standaard balansventilatiesysteem met WTW, zoals werd aangegeven in de interviews met experts.

De resultaten laten zien dat mechanische ventilatie hogere nationale kosten heeft dan balansventilatie (Figuur G 3). Voor het natuurlijk moment zijn de nationale (meer)kosten voor de woningen 0,4 miljard euro per jaar voor mechanische ventilatie, 0,3 miljard euro per jaar voor balansventilatie met WTW en -0,01 miljard euro per jaar voor kierdichting.

Dit verschil ontstaat doordat balansventilatie duurder is, maar meer reductie in aardgasgebruik geeft door de WTW waardoor de nationale kosten uiteindelijk lager uitvallen dan bij mechanische ventilatie. Verder is te zien dat kierdichting op licht negatieve nationale kosten uitkomt. Kierdichting komt er gunstig uit aangezien de jaarlijkse investering heel beperkt is en de jaarlijkse besparing op stookkosten net iets meer is. Gemiddeld genomen voor woningen voor 1995 kan kierdichting een aanzienlijke besparing op de stookkosten opleveren.



Figuur G 3 Meerkosten (miljarden euro's per jaar) in 2030 ten opzichte van natuurlijke ventilatie bij de potentiële marktontwikkelingen.

## Samenvatting

Bij renovatie worden de naden en kieren van woningen vaak gedicht waardoor de natuurlijke aanvoer van verse lucht wordt beperkt en de luchtkwaliteit wordt beïnvloed.

Ventilatiesystemen met vraagsturing kunnen voorzien in de benodigde ventilatie en voorkomen dat onnodig (koude) lucht in huis wordt aangevoerd die in het stookseizoen moet worden opgewarmd. Indien volgens het technisch potentieel in alle gerenoveerde woningen kierdichting met vraaggestuurde mechanische ventilatie wordt toegepast kunnen de CO<sub>2</sub>-emissies met 0,09 Mt worden verminderd en met vraaggestuurde balansventilatie met warmteterugwinning (WTW) met 0,15 Mt. Daarbij is balansventilatie met WTW met 0,3 Miljard Euro aan nationale kosten iets goedkoper dan mechanische ventilatie met 0,4 Miljard Euro, omdat het WTW systeem zorgt voor meer energiebesparing.

Het belang en de voordelen van goede ventilatie zouden beter onder de aandacht moeten worden gebracht en er zou moeten worden gestuurd op prestatie-eisen, die verder aangescherpt mogen worden. Monitoring van de luchtkwaliteit en het functioneren van het ventilatiesysteem kan helpen om het bewustzijn te vergroten en inzicht te bieden in de prestaties.

Momenteel wordt in gerenoveerde woningen vaak (vraaggestuurde) mechanische ventilatie toegepast. Om ook balansventilatiesystemen met WTW makkelijker in bestaande woningen toe te kunnen passen is verdere doorontwikkeling nodig van plug & play installatiesystemen en van innovaties als decentrale ventilatiesystemen en luchtdistributiemethodes. Een plug & play methode kan ook de prestaties van het systeem verbeteren doordat er minder fouten kunnen worden gemaakt bij de aanleg.



# H. Deelrapport Kleinschalige warmteopslag

## Inleiding

### Context

Warmteopslag kan potentieel een grote bijdrage leveren aan de energietransitie. Door in tijden van overvloed energie (in de vorm van warmte of elektriciteit) op te slaan als warmte voor later gebruik, kunnen duurzame bronnen beter benut worden, kan congestie op het elektriciteitsnet voorkomen worden en kunnen extra (fossiele) centrales voor de piekvraag vermeden worden. In 2016 is de Roadmap Compacte Conversie en Opslag (CCO) opgesteld ontstaan uit het MJP CCO consortium met als doel het verder uitontwikkelen van de opslagtechnologie.

Er kunnen verschillende technieken voor warmteopslag worden onderscheiden:

- Voelbare warmteopslag (Thermal Energy Storage (TES)) in water (meestal temperaturen tussen de 0-100 °C)
- Voelbare warmteopslag in vloeibaar zout, olie, zand, steen, keramiek (meestal temperaturen tussen de 100 en 1000 °C)
- Latente warmteopslag in phase-changing materials (PCM's)
- Warmteopslag in thermochemische materialen (TCM's)
- Warmteopslag door redox principes.

Alleen voelbare warmteopslag in water wordt voor vooralsnog op grote schaal (groter dan gebouwniveau) toegepast, bijvoorbeeld in (on)diepe aquifers, mijnen, putten en watertanks. TKI UE heeft de trend gedefinieerd: 'Grootschalige (warmte)opslag komt moeilijk tot implementatie'. In het MMIP beschrijft TKI UE de volgende aandachtspunten voor de opschaling van warmteopslag:

- Verlagen van aanschaf- en installatiekosten en operatie
- Verhogen van (systeem)rendementen en optimaliseren van warmteopslagsysteem
- Verbeteren van integratie van warmteopslagsystemen in (renovatieconcepten voor) de bestaande bouw
- Doorontwikkelen van regelsystemen voor kleinschalige warmteopslagsystemen en kunnen bieden van flex naar het elektriciteits- of warmtenet
- Doorontwikkelen van circulaire concepten voor kleinschalige opslagsystemen
- Specifieke aandachtspunten voor het doorontwikkelen van TCM-concepten.

### Scope

In het kwalitatieve onderdeel van dit deelrapport maken we onderscheid tussen kleinschalige (op woningniveau) en grootschalige (meerdere woningen) warmteopslag en beschrijven deze ook apart. Bij de potentiële marktontwikkelingen nemen we alleen grootschalige opslag mee in de impactberekeningen.

### Leeswijzer

Dit deelrapport heeft alleen een kwalitatief deel wat bestaat uit de onderdelen 'ontwikkelingen in de technologie' en 'randvoorwaarden voor opschaling' en is gebaseerd op desk research en een interview met Ruud Cuypers (TNO). Het kwalitatieve deel is daarmee een selectie van wat volgens de geïnterviewde de belangrijkste knelpunten, ontwikkelingen en

randvoorwaarden zijn om opschaling te realiseren. Dit deelrapport bevat geen kwantitatieve impactberekening. Het deelrapport wordt afgesloten met een samenvatting van de inzichten.

## Ontwikkelingen in de technologie

*Samenvatting van het interview met Ruud Cuypers (TNO)*

### Algemeen

#### *Voelbare warmte*

Voelbare warmteopslag in water (met of zonder vacuümisolatietechnologie) is op zich uitontwikkeld en op de markt, ook voor bestaande bouw, indien de benodigde ruimte aanwezig is (voor zo'n 200 liter). Deze technologie is geschikt voor dagelijkse opslag, hooguit tot 2 dagen, omdat het snel warmte verliest.

Daarnaast heeft Borg een systeem ontwikkeld waarbij warmte onder de tuin kan worden opgeslagen in plaats van in huis, wat voor de ruimtelijke inpassing aantrekkelijk kan zijn. NES heeft een boiler ontwikkeld met heel weinig verliezen, wat betekent dat warmte langer vastgehouden kan worden of dat het interessant is om warmte op een hogere temperatuur op te slaan. Beide technologieën bevinden zich in de pilotfase.

#### *PCM*

Phase-changing materials (PCM) is een interessante technologie die ook in bouwmaterialen zou kunnen worden toegepast. Nadat het PCM vloeibaar is geworden moet het alleen actief worden afgekoeld om weer te stollen wat hoge eisen stelt aan de praktische toepasbaarheid. Ook is er een combinatie op de markt van voelbare warmteopslag in water en zout als PCM.

#### *TCM*

Een interessant aspect van opslag in thermochemische materialen (TCM) is dat het warmte verliesvrij kan opslaan door gebruik te maken van een chemische reactie tussen een zout en water. Er is wel een minimumtemperatuur nodig om reactie te laten verlopen, momenteel 80 °C voor de gebruikte zoutreactie. Bij lagetemperatuurverwarming van de woning is deze temperatuur niet direct voorhanden. Dit zou direct met elektriciteit kunnen worden bereikt, met zonnecollectoren of met een hoge temperatuur warmtepomp. Er zou ook kunnen worden uitgekeken naar een ander materiaal waarbij de reactie op een lagere temperatuur zou werken, maar deze hebben het nadeel van een lagere opslagdichtheid.

Er is ook een ontwikkeling van een TCM-apparaat op basis van kaliumcarbonaat onder atmosferische druk wat zich momenteel in de TRL<sup>17</sup> fase 5-6 bevindt. De huidige pilotfase richt zich op het aantonen dat de energie die erin is gestopt er ook weer uit komt en dat de benodigde temperaturen behaald worden.

TNO werkt aan een TCM vacuümsysteem met natriumsulfide dat in het laboratorium en in een gecontroleerde testomgeving op de gewenste schaalgrootte al bewezen is. Om deze technologie verder te brengen moeten er met name 3 stappen worden genomen:

1. De technologie moet in de praktijk bij early adopters worden getest (pilot).
2. De productie van apparaten moet seriematig worden opgezet i.p.v. per stuk, om de kosten omlaag te brengen.

---

<sup>17</sup> De Technology Readiness Level (TRL) is een maat om aan te geven in welke fase van ontwikkeling een nieuwe technologie zich bevindt. Fase 1 is het meest basale niveau en in fase 9 is de technologie bewezen in een praktijkomgeving.

3. Er moet worden aangetoond dat het veilig gebruikt kan worden (bijvoorbeeld met certificaten), omdat het een vacuümsysteem is en omdat het werkt met de giftige stof natriumsulfide.

### Verhogen van (systeem)rendementen en optimaliseren van warmteopslagsysteem

Warmteopslag zorgt voor een additionele benutting van duurzame energie die anders niet nuttig zou kunnen worden gebruikt (*curtailment*). Wel zijn er warmteverliezen tijdens opslag en/of bij laten/ontladen. Bij voelbare opslag en PCM is het verlies afhankelijk van de grootte, temperatuur, regeling en gebruik. Een TCM systeem verliest geen warmte tijdens de opslag, maar wel tijdens het laden/ontladen.

***Warmteopslag in water kan goed worden toegepast voor de opvang van dagelijkse fluctuaties, TCM is geschikter voor opslag van enkele dagen tot weken.***

### Verlagen van aanschaf- en installatiekosten en operatie

Voelbare opslag in water is vrij simpel en relatief goedkoop, maar er zijn wel veel warmteverliezen.

TCM is relatief duurder omdat het een ingewikkelder apparaat is dan voelbare warmteopslag en omdat de warmtewisselaar vooralsnog van koper is. Een warmtewisselaar van aluminium en seriematig productie zouden de kosten kunnen drukken.

Een andere manier om ernaar te kijken is om de kosten voor netverzwaring als uitgangspunt te nemen, die zijn geraamd op 12.500 euro per huishouden tot 2050 (CE Delft). Als deze verzwaring deels voorkomen kan worden met warmteopslag creëert dit financiële baten die meegenomen zouden moeten worden in de businesscase voor de toepassing ervan. Echter de terugverdienmogelijkheid moet dan wel gelegd worden bij de partijen die de investering moeten doen (met name woningeigenaren, woningbouwverenigingen, verhuurders), en niet slechts bij de partijen die er baat bij hebben (bijvoorbeeld netwerkbedrijf). Om dit mogelijk te maken, is het nodig dat de regelgeving hieromtrent wordt aangepast.

***Kleinschalige warmteopslag kan duur zijn en is nu niet gangbaar. De noodzaak voor opslag biedt daarom nauwelijks een financiële incentive, terwijl het op andere plekken kosten kan besparen doordat de piekbelasting op het warmtenet of elektriciteitsnet afneemt en daarmee kosten voor verzwaring kunnen worden voorkomen.***

### Ruimtegebruik: Inpassing van warmteopslagsystemen in woningen

Een warmwaterboiler heeft een opslagcapaciteit van 0,07 GJ/m<sup>3</sup>. Het TCM heeft momenteel een capaciteit van 0,35 GJ/m<sup>3</sup> (met uitzicht op nog 1,5 keer verbetering) (beide incl. isolatiemateriaal). Tot voor kort was het verhogen van de opslagdichtheid voor warmteopslag en daarmee het reduceren van het ruimtegebruik het hoofddoel. In verband met congestiemanagement is de aandacht nu aan het verschuiven van ruimtegebruik naar de snelheid waarmee je de batterij kan (ont)laden. Dit is afhankelijk van het vermogen. Een nieuwe bijkomende KPI zou daarmee het vermogen van de warmtebatterij kunnen zijn.

***Innovatie technologieën als PCM en TCM hebben een hogere energiedichtheid en kunnen ruimte besparen ten opzichte van een opslag met gelijke warmtehoeveelheid in een waterbuffer.***

## Randvoorwaarden voor opschaling

Randvoorwaarden voor verdere opschaling van warmteopslagtechnologie in het algemeen zijn gerelateerd aan technologieontwikkeling en de vraag naar warmteopslag. Zoals hierboven beschreven is een aantal technologieën nog niet ver genoeg ontwikkeld om op de markt te kunnen brengen. Investerings- of subsidies zijn nodig om deze ontwikkelingen verder te kunnen brengen. Er zijn steeds minder subsidieregelingen om de noodzakelijke activiteiten van een laag TRL<sup>17</sup> niveau uit te voeren voor verdere ontwikkeling. Rond TCM is de intentie om een nieuwe roadmap Compacte Conversie en Opslag te ontwikkelen.

Voor verdere ontwikkeling is het cruciaal dat gebruikers bekend raken met en interesse krijgen in warmteopslag. Het moet voor hen duidelijk zijn dat het naast energetisch ook economisch interessant gaat worden, bijvoorbeeld door het overschot van eigen PV opwek te benutten. Voornamelijk ontbreekt de urgentie om warmte op te slaan, onder andere omdat de leveringszekerheid van het elektriciteitsnet hoog is en veel alternatieve energietechnologieën duurder zijn.

## Samenvatting

Warmteopslag kan een bijdrage leveren aan de energietransitie door duurzame energiebronnen beter te benutten waardoor aardgasgebruik in hulpketels bij de piekvraag voorkomen kan worden en het elektriciteitsnet ontlast kan worden. Deze voordelen van warmteopslag worden echter nog niet altijd erkend en gewaardeerd waardoor de kosten en baten niet altijd bij dezelfde partij liggen en de business case ontbreekt.

Behalve een betere incentive om warmte op te slaan, zijn volgens de geïnterviewde experts consistentie in de beleidsregels en vergunningsvoorwaarden en standaard toetsingskaders randvoorwaarden voor opschaling. Daarnaast kunnen innovatieve opslagtechnologieën zoals hoge temperatuuropslag (HTO), thermochemische materialen (TCM) en phase-changing materials (PCM), nieuwe mogelijkheden bieden om warmte efficiënter, compacter en, op termijn, goedkoper op te kunnen slaan. PCM's komen net op de markt, maar HTO en TCM's moeten nog verder doorontwikkeld worden.

# I. Deelrapport Warmtenetten

## Inleiding

### Context

In het Klimaatakkoord is afgesproken dat 750.000 bestaande woningen in 2030 moeten zijn aangesloten op een warmtenet. Dit informatieblad richt zich op lagetemperatuurnetten (LT), omdat deze verschillende voordelen bieden ten opzichte van midden- (MT) en hogetemperatuurnetten (HT):

- De mogelijkheid om meer duurzame bronnen te ontsluiten
- Betere energie-efficiëntie door minder warmteverlies en een betere COP van de warmtepomp (wat ook het elektriciteitsnet ontlast)
- Het biedt meer kansen voor de combinatie met grootschalige warmteopslag en daarmee voor flexibiliteit aan het elektriciteitsnet
- Optie tot koeling naast verwarming

De trend die TKI UE heeft gedefinieerd rond (Z)LT-netten is: 'Het aandeel van warmtenetten met lagere temperaturen en vijfde generatie principes blijft laag'. In het MMIP beschrijft TKI UE de volgende aandachtspunten voor (alle typen) warmtenetten:

- Doorontwikkelen van burgerparticipatie en (open) governance modellen
- Doorontwikkelen van warmtenetten die ook koude leveren
- Optimaliseren en goedkoper maken van aanlegmethoden en verminderen van overlast in de wijk bij het aanleggen van warmtenetten
- Verminderen van ruimtegebruik en verbeteren van het aanzicht van bovengrondse en ondergrondse onderdelen
- Verhogen van (systeem)rendementen door:
  - het ontwikkelen van efficiëntere infrastructuur en onderhoud
  - het optimaliseren van configuraties voor warmte- en koudenetten
- Doorontwikkelen van warmtenetsystemen met meer flexibiliteitspotentieel
- Doorontwikkelen van keuzetools, ontwerpprocessen en uitrolmodellen voor warmte- en koudenetten
- Doorontwikkelen van specifieke strategieën voor het mitigeren van het vollooprisico
- Doorontwikkelen van circulaire concepten voor warmtenetsystemen.

### Leeswijzer

Het kwalitatieve deel van dit deelrapport bestaat uit de onderdelen 'ontwikkelingen in de technologie' en 'randvoorwaarden voor opschaling' en zijn gebaseerd op deskresearch en interviews met Louis Hiddes (2RC, voorheen oprichter Mijwater BV), Martijn Clarijs (TNO) en Ivo Pothof (Deltares). Het kwalitatieve deel is daarmee een selectie van wat volgens de geïnterviewden de belangrijkste knelpunten, ontwikkelingen en randvoorwaarden zijn om opschaling te realiseren.

Het kwantitatieve deel, bestaande uit de onderdelen 'potentiële marktontwikkelingen' en de 'impact', is opgesteld door TNO. De aannames die hierbij gehanteerd zijn, zijn afgestemd met TKI UE en komen zoveel mogelijk voort uit de interviews en de Klimaat- en Energieverkenning (KEV) (PBL, 2021). Zoals toegelicht in de inleiding stellen we nadrukkelijk dat wij niet voorspellen dat die gepresenteerde potentiëlen ook gerealiseerd worden. De potentiële marktontwikkelingen laten echter zien aan dat er een groter potentieel is, dat volgens de KEV nog niet wordt benut. Het deelrapport wordt afgesloten met een samenvatting van de inzichten uit beide onderdelen.

## Ontwikkelingen in de technologie

*Gecombineerde samenvatting van de interviews met Louis Hiddes (2RC, voorheen oprichter Mijwater BV), Martijn Clarijs (TNO) en Ivo Pothof (Deltares)*

De traditionele warmtenetten die momenteel zijn aangelegd in Nederland zijn voornamelijk hoge- (>75 °C) en midden temperatuurnetten (55-75 °C) op aardgas, restwarmte, geothermie en biomassa. Bij deze typen netten is er een constant aanbod van warmte, waardoor naast distributieverliezen ook warmte wordt verloren als er geen vraag is. Hiernaast zijn er zogenaamde bronnetten of zeer lage temperatuurnetten (<30 °C) die gebruik maken van lagetemperatuurwarmte (LT-warmte)(zoals WKO, aquathermie en (bodem)warmtewisselaars). Deze LT-warmte wordt met een centrale warmtepomp opgewaardeerd tot 70 °C of met individuele warmtepompen tot 45 – 60 °C. Er wordt momenteel veel gesproken over lage temperatuur (LT) (30 - 55 °C) netten, maar ze zijn op dit moment nog bijna niet aangelegd en vooral gericht op nieuwbouw.

De nieuwe generatie (de 5<sup>e</sup>) in warmtenetten zijn uitwisselingsnetten voor warmte en koude waarbij de klantvraag het systeem activeert, er meerdere energiebronnen kunnen worden gebruikt, thermische buffers worden ingezet, er ook koeling kan worden aangeboden en er variabele stooklijnen toegepast kunnen worden. Voor deze 5e generatie netten wordt ook de connectie met het elektriciteitsnet voorzien en het leveren van flexibiliteit aan het net.

Een belangrijke stap is echter om meer ervaring op te doen met de aanleg van lagetemperatuurnetten. Dit deelrapport richt zich dan ook op de voordelen van lage temperatuurnetten en de knelpunten voor opschaling. In plaats van LT-netten ontstaat er juist een trend om naar warmtenetten van tenminste 70 graden te gaan. Vanuit het oogpunt van een warmtebedrijf is dit de meest praktische oplossing, omdat met deze temperatuur ook warmtapwater kan worden geleverd en het vaak niet nodig is om aanpassingen aan de woning te doen. Door onervarenheid en onbekendheid met lage temperatuurverwarming vrezende warmtebedrijven ook voor comfortverlies in bestaande woningen. Recent onderzoek in het WarmingUP programma heeft echter aangetoond dat 60% van de woningen nu al LT-ready is en zonder aanpassingen met lage temperatuur verwarmd kan worden (Pothof, Vreeken, & Meerkerk, 2022)<sup>18</sup>. Bovendien loopt er nu een aantal initiatieven<sup>19</sup> om woningen naar de Standaard te renoveren waarmee ze ruimschoots LT-ready worden. Het voorzien in warmtapwater met een aparte installatie blijft wel een aandachtspunt bij lage temperatuurverwarming.

Door LT-netten wel als volwaardige optie mee te nemen in de afwegingen voor verwarmingsstrategieën ontstaat ook een kans om de voordelen van lage temperatuurverwarming te benutten, zoals een betere energie-efficiëntie, een betere exploitatie van duurzame LT-bronnen, stabiliteit door gebruik van meerdere bronnen en de mogelijkheid tot koeling. Een LT-net vereist een integrale blik die niet de warmtebron als uitgangspunt neemt en stopt bij warmtelevering aan de voordeur, maar die comfort en lage energielasten als uitgangspunt neemt, geïntegreerd is met het elektriciteitsnet en warmte en koude van gebouwen met elkaar verbindt. Dit vergt ook een visie op de toekomst waar bijvoorbeeld koeling noodzakelijk wordt bij toenemende opwarming van woningen en alle

<sup>18</sup> Uit deze studie blijkt ook dat 95% van de woningen MT ready is.

<sup>19</sup> In Nederland is al afgesproken dat in 2050 alle huurwoningen moeten voldoen aan de Standaard wat betekent dat ze goed genoeg zijn geïsoleerd om van het gas af te kunnen gaan<sup>19</sup>, maar ook op Europees niveau wordt er gesproken over eisen aan gebouwen. Op het TKI UE congres 'Klaar voor lager' is een manifest ondertekend voor 'LT-ready als integrale eis voor gebouwverduurzaming'.

woningen de komende decennia LT-ready worden. Het omvat ook een goede gebouwanalyse in het betreffende gebied waarbij vragen worden onderzocht als:

- Wat is de huidige energievraag van de gebouwen en welk ontwerpvermogen voor verwarming is voldoende?
- In hoeverre kan de energievraag nog gereduceerd worden/kan een gebouw geoptimaliseerd worden? Voor bedrijfspanden zijn bijvoorbeeld adviseurs nodig die ook voor de specifieke bedrijfsprocessen aanbevelingen kunnen doen op het gebied van energiebesparing en -benutting die verder gaan dan algemene adviezen als LED verlichting en zonnepanelen.
- Is er dan (nog) een energie-overschot, zoals restwarmte, en waar zou je deze energie kunnen gebruiken? Er gaat nu nog veel energie verloren, omdat een goede analyse van LT-bronnen in het gebied (op bedrijfsniveau) nog vaak ontbreekt.

## Doorontwikkelen van burgerparticipatie en (open) governance modellen & Doorontwikkelen van keuzetools, ontwerpprocessen en uitrolmodellen voor warmte- en koudenetten

Het is cruciaal dat gemeenten een regierol nemen bij het uitrollen van warmtenetten. Zij kunnen meerdere belangen behartigen en kunnen onzekerheden wegnemen of reduceren<sup>20</sup>. Er worden echter grote verschillen in het kennisniveau waargenomen bij gemeenten. Ook woningcorporaties weten vaak onvoldoende over warmtenetten en hebben als gevolg angst voor comfortverlies. Er zijn voorbeelden waarbij zij om die reden een aanvoertemperatuur van 90 graden eisen bij de aanleg van een warmtenet. Demonstraties van goed functionerende lage temperatuurnetten in de bestaande bouw en het verspreiden van bestaande kennis kunnen het benodigde vertrouwen bieden. Verder zou een gedegen aanpak om warmtevarianten bij toepassing van lage temperaturen door te rekenen en om tot besluitvorming te komen gemeentes en woningcorporaties kunnen ondersteunen.

Daarnaast is nog kennis nodig over wat de beste strategie is voor de aanleg van LT-warmtenetten. Is het bijvoorbeeld verstandig om te starten met kleinschalige warmtenetten en deze steeds verder uit te breiden of veel kleine warmtenetten naast elkaar laten bestaan? En wat zijn voor- en nadelen van een strategie om eerst midden temperatuur in een warmtenet aan te bieden en later over te stappen op lage temperatuur?

***Er is een gebrek aan vertrouwen in het comfort van lagetemperatuurwarmte en de partijen die de regierol zouden moeten nemen hebben niet altijd het benodigde kennisniveau. Demonstratieprojecten, informatievoorziening en een gedegen tool om warmtevarianten bij lage(re) temperaturen door te rekenen kan het besluitvormingsproces ondersteunen om tot lagetemperatuur warmtelevering te komen.***

## Verminderen van ruimtegebruik en verbeteren van het aanzicht van bovengrondse en ondergrondse onderdelen

Natuurkundig gezien is een grotere diameter van de pijpleidingen nodig om bij een kleiner temperatuurverschil evenveel calorische inhoud te transporteren. Als echter andere uitgangspunten gehanteerd worden dan bij MT-netten is een grotere diameter voor LT-netten niet noodzakelijk. De huidige warmtenetten worden nu bijvoorbeeld gedimensioneerd op de piekvraag, bijvoorbeeld tussen 7 en 9 uur 's ochtends. Door *peak shaving*, zoals minder nachtverlaging toepassen, zou bijvoorbeeld 20% van de piekbelasting af gehaald kunnen

<sup>20</sup> Het kabinet kondigde in het najaar van 2022 aan dat warmtenetten grotendeels in publieke handen zullen komen.

worden. Warmtebedrijven zijn echter terughoudend om dit uitgangspunt te hanteren, omdat hiervoor gedragsverandering nodig is bij de gebruikers. Zij zijn nu gewend om de thermostaat 's nachts lager te zetten wat bij een LT-net niet gewenst is. Ook hebben LT-netten ongeveer 40% minder warmteverlies dan MT-netten wat ook betekent dat de diameter minder groot hoeft te worden. Tot slot hoeft de afstand tot drinkwaterleidingen bij lage temperatuurleidingen minder groot te zijn dan bij MT- of HT-netten wat gunstig is voor het ruimtegebruik in de ondergrond.

Tot slot is de toepassing van thermische buffers op meerdere plaatsen in een LT-warmtenet een belangrijke sleutel om de piekvraag te reduceren. Met een intelligente aansturing van het systeem is een warmtevoorraad al aanwezig dicht bij het punt waar, in de meest voorkomende situaties, warmte wordt gevraagd. Door hiermee rekening te houden worden de diameters in een net verder beperkt.

***Bij het hanteren van toekomstige uitgangspunten die passen bij LT-netten is het niet nodig dat de leidingen van een LT-net groter zijn dan bij een MT-net.***

### Verhogen van (systeem)rendementen door het ontwikkelen van efficiëntere infrastructuur en onderhoud

Het rendement van een warmtenet wordt onder andere bepaald door het warmteverlies in de leidingen, de pompenergie en door additionele energie die aan het net moet worden toegevoegd voor opwaardering van de warmte of voor het kunnen voldoen aan de piekvraag.

Hoe dichter de temperatuur in de leiding bij de bodemtemperatuur komt, hoe minder warmteverlies er tijdens transport en distributie plaatsvindt. Een kengetal voor warmteverlies in een MT net is 25% van de warmteproductie en in een LT-net 15%, dus 40% minder dan een MT net. In een MT net wordt een grotere warmtevraag getransporteerd vanwege de levering van warmtapwater. Ongeveer de helft van het jaar is er een substantiële warmtevraag voor ruimteverwarming. Als met het HT of MT warmtenet ook warmtapwater wordt geleverd dan moet het hele jaar door warm water (minimaal 70 °C op het uiterste puntje van het warmtenet) door de leidingen stromen waar maar 3-4% van de tijd warmtapwater wordt afgenomen (85-90% daarvan tussen 7 en 9 uur 's ochtends). Dit betekent veel warmteverlies in de leidingen en een continu gebruik van pompenergie.

Opwaardering van de warmte is in een LT-net niet altijd nodig. In veel omstandigheden kan de warmte (of koude) uit het net direct worden toegepast bij afnemers. Als opwaarderen wel noodzakelijk is dan kan het beste gebruik worden gemaakt van een collectieve (industriële) warmtepomp voor appartementencomplexen en van individuele warmtepompen voor eengezinswoningen.

***In een LT-net gaat minder warmte verloren bij transport dan in een MT-net doordat het temperatuurverschil met de bodem kleiner is en omdat niet het hele jaar door warmte hoeft te worden geleverd voor de warmtapwatervraag. Opwaardering van de warmte met een warmtepomp voor ruimteverwarming is in een LT-net niet altijd nodig.***

### Optimaliseren en goedkoper maken van aanlegmethoden en verminderen van overlast in de wijk bij het aanleggen van warmtenetten

Dimensionering van het warmtenet op de piekvraag zorgt voor meer kosten (zowel CAPEX als OPEX) en een verminderde energie-efficiëntie. Naast het toepassen van het eerdergenoemde *peak shaving* kan de resterende piekvraag (voor een deel) worden ingevuld



via buffering (opgeslagen warmte) in plaats van opwekking met fossiele energie (zie ook het deelrapport 'Grootschalige warmteopslag'). Met een vlakker leveringsprofiel kunnen de kosten met tientallen procenten verminderen doordat de pijpleidingen dunner kunnen worden, transportpompen minder hard hoeven te werken en er een voorspelbaarder leveringsprofiel is. Een voorbeeld waarbij een ander uitgangspunt wordt gehanteerd is te vinden in het WarmingUP project over 'Verlaagde aanvoertemperaturen' waarbij op de ontwerpdag de gevraagde warmte voor ruimteverwarming in 18 uur geleverd moet kunnen worden. Dan blijft er nog ruim voldoende tijd over op een dag om warmte in een buffertank op te slaan wat leidt tot een aanmerkelijk lagere piekvraag dan met conventionele uitgangspunten.

Bij een gelijke diameter van de leidingen is het verschil in kosten voor de infrastructuur tussen een net op 50 of 70 °C minimaal. Leidingen in een LT-net kunnen van kunststof gemaakt worden in plaats van staal dat in MT- en HT-netten wordt gebruikt. De materiaalkosten voor kunststof zijn dan hoger, maar de aanlegkosten zijn lager, omdat de lasverbindingen in kunststof veel goedkoper zijn. Voor stalen leidingen zijn de kwaliteitseisen goed omschreven, voor kunststofleidingen zijn deze nog in ontwikkeling.

Als er nog aanpassingen in de woning nodig zijn om met LT-warmte de woning te kunnen verwarmen dan komen daar investeringen bij kijken. Het streven naar het verlagen van de energievraag van de woning en het verbeteren van comfort en binnenklimaat kan echter ook gezien worden als een gewenste ontwikkeling die los staat van lagetemperatuurverwarming.

Wat betreft de operationele kosten (OPEX) kunnen er bij lagetemperatuurwarmte (eventueel) additionele kosten zijn voor het opwaarderen van de warmte met een warmtepomp (centraal of decentraal) die bij een MT net niet nodig zijn. Daarentegen heeft een LT-net minder warmteverlies waardoor de OPEX kosten lager kunnen uitvallen dan bij een MT-net.

Behalve de CAPEX en OPEX is ook de rente en afschrijvingstermijn van belang voor de financiering. Als met een langere levensduur<sup>21</sup> kan worden gerekend of partijen kunnen met langere afschrijvingstermijnen of met lagere rentes lenen dan kan dat de financieringsopties beïnvloeden. Ook het rendement dat de exploitant wil bereiken is hier een factor in.

Verder wordt in de business case van een warmtebedrijf nu vaak alleen rekening gehouden met warmtelevering, maar hier zou ook koudelevering in moeten worden opgenomen. Woningen krijgen steeds meer te maken met te hoge binnentemperaturen door klimaatverandering waardoor koeling een belangrijke rol gaat spelen naast verwarming. Koeling in woningen is in Nederland vooralsnog niet standaard en wordt daarom als extra comfort gezien waardoor er nog geen geldelijke waarde aan koeling wordt gegeven. LT-netten komen gunstiger uit in de afweging tussen warmtestrategieën wanneer koudelevering als een toegevoegde waarde wordt beschouwd en de aanschaf van een airco als het alternatief in de business case wordt meegenomen bij de eindgebruikerslasten. Door koudelevering worden niet alleen de kosten van een airco uitgespaard, maar mogelijk ook de kosten van verzwaring van het elektriciteitsnet.

Kortom, voor een goede business case van een warmtenet is het van belang dat alle kosten en baten van de betrokken partijen, nu en in de toekomst, worden meegenomen. Verder gaat het er niet alleen om om warmte zo goedkoop mogelijk te leveren, maar ook om (rest)warmte en koude in de gebouwde omgeving op verschillende punten te oogsten en te kunnen

---

<sup>21</sup> De levensduur wordt berekend als de (gewogen) gemiddelde levensduur van alle assets in het systeem.

benutten. Tot slot is een goede service naar de klant en leveringszekerheid belangrijk, want een ontevreden klant kost ook geld.

***De LCOE kosten voor een LT-net hoeven niet hoger te zijn dan voor een MT-net. Belangrijke aspecten die een rol spelen in de kosten en financiering zijn:***

- ***Voorkomen van dimensionering op de piekvraag door peak shaving en buffering.***
- ***De mate waarin woningen geschikt moeten worden gemaakt voor lage temperatuurverwarming. Veel woningen zijn al LT-ready waardoor het met name kosten voor de installatie voor warmtapwater betreft.***
- ***In hoeverre een additionele collectieve of decentrale warmtepomp nodig is om de warmte op te waarden voor ruimteverwarming.***
- ***Of koudelevering wordt meegenomen in de scope van de business case naast warmtelevering.***
- ***Met welke rentepercentages, afschrijvingstermijnen en rendementen wordt gerekend in de business case.***

## Randvoorwaarden voor opschaling

Ten eerste is het belangrijk om kennis over LT-netten te verspreiden en succesvolle demonstraties te laten zien in bestaande wijken, zodat het vertrouwen in lage temperatuurverwarming groeit.

Verder is het cruciaal dat gemeenten een regierol op zich nemen voor het opschalen van LT-warmtenetten en daarbij een toekomstvisie formuleren voor warmte én koude. Daarbij is het belangrijk dat ze een integrale blik innemen met de leefkwaliteit/comfort van bewoners als uitgangspunt, de context van de toekomst als startpunt en een gedegen analyse van het gebied als basis. Een goed afwegingskader en een rekenmodel voor warmtestrategieën waarbij warmte en koude geogost en geleverd kunnen worden zouden gemeenten kunnen ondersteunen in het nemen van de regie.

Om de businesscase rond te krijgen is het belangrijk om de nationale kosten mee te nemen en andere, toekomstbestendige uitgangspunten te hanteren dan bij MT-netten, bijvoorbeeld door niet meer te dimensioneren op de traditionele piekvraag met veel nachtverlaging. Ook moet naast warmtelevering koudelevering worden meegenomen in de businesscase, omdat koeling een belangrijke rol gaat spelen in de toekomst en LT-netten hier een toegevoegde waarde kunnen bieden.

Tot slot is de warmtapwatervoorziening een belangrijk aandachtspunt. Ontwikkelingen van praktische oplossingen hiervoor zijn dan ook een belangrijke voorwaarde voor de opschaling van LT-netten (zie hiervoor het deelrapport 'Tapwatersystemen').

## Potentiële marktontwikkelingen

De potentiële marktontwikkelingen worden in dit geval uitgedrukt in het aantal woningen dat in 2030 op een warmtenet is aangesloten, onder de voorwaarde dat de woning in 2020 nog niet was aangesloten. We kijken daarbij dus alleen naar woningen die in 2020 al gebouwd waren (de 'bestaande' woningen). Daarbij gaan we ervan uit dat woningen in dichtbebouwd gebied eerder op een warmtenet worden aangesloten dan woningen in gebieden met een lage bebouwingsdichtheid. We hanteren daarbij 3 bebouwingsdichtheidsklassen. Hiervoor is

per buurt de warmtevraagdichtheid (voor ruimteverwarming en tapwater) per hectare (GJ/ha/jaar) gebruikt op basis van de gegevens uit de Startanalyse van PBL. We definiëren op basis van de range drie warmtevraagdichtheidsklassen, waarbij “Laag” <500 GJ/ha/jaar, “Midden” 500-1000 GJ/ha/jaar en “Hoog” >1500 GJ/ha/jaar. Vervolgens hebben we het aantal woningen dat binnen deze klassengrenzen valt bepaald (zie Figuur I 1 en Bijlage D). Hieronder volgt een beschrijving van de potentiële marktontwikkelingen voor warmtenetten met bijbehorende randvoorwaarden en een samenvatting in onderstaande tabel. Deze ontwikkelingen zijn niet bedoeld als reële scenario's, maar om een idee te geven van de impacts bij verschillende bandbreedtes.

## Beschrijving

### Basispad

Voor het Basispad is uitgegaan van het aantal woningen dat in de KEV2021 verondersteld wordt in 2030 aangesloten te zijn op een warmtenet onder het vastgesteld en voorgenomen beleid. In 2020 waren er 426.000 woningen aangesloten op een warmtenet (alle temperatuurniveaus) en in de KEV raming groeit dit naar 694.000 woningen in 2030. Er komen dus in 10 jaar 269.000 woningen bij. Hier zit echter ook nieuwbouw bij die op een warmtenet wordt aangesloten. Voor de bestaande bouw gaat het om een groei van 84.000 woningen tussen 2020 en 2030. Dat is lang niet voldoende om de doelstelling in het Klimaatakkoord van een groei van 750.000 nieuwe aansluitingen in de bestaande bouw in 2030 te halen.

### Verdubbeling

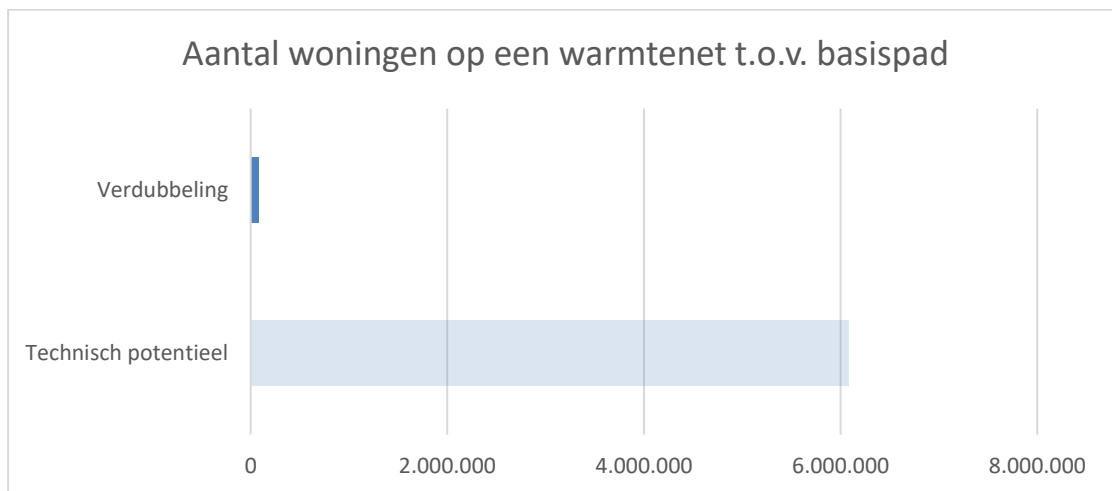
In deze potentiële ontwikkeling gaan we uit van een verdubbeling van de toename in het Basispad voor de bestaande bouw. Met een verdubbeling, oftewel een extra 84 duizend woningen op een warmtenet erbij, zou het totaal aangesloten bestaande woningen uitkomen op 510 duizend in 2030.

### Technisch potentieel

Voor de aanneme betreft het technisch potentieel gaan we ervan uit dat 100% van de bestaande woningen in een gebied dat is geclassificeerd met een bebouwingsdichtheid 'hoog' en 'midden' in 2030 is aangesloten op een warmtenet. Dat zijn ruim 6.000.000 woningen. Zoals eerder gezegd is dit niet bedoeld als een voorspelling, maar om een indicatie van het theoretische bereik te geven.

Tabel I 1 Beschrijving van de potentiële marktontwikkelingen van warmtenetten

| Potentiële marktontwikkelingen Warmtenetten   |  |
|---|--|
| Beschrijving                                  |  |
| <b>Verdubbeling</b>                           | Verdubbeling ten opzichte van het Basispad van het aantal bestaande woningen dat in 2030 is aangesloten op een warmtenet   |
| <b>Technisch potentieel</b>                   | Alle bestaande woningen in een gebied met een warmtedichtheidsklasse 'hoog' en 'midden' is in 2030 aangesloten op een warmtenet  |
| Randvoorwaarden                               |  |
| <b>Verdubbeling/<br/>Technisch potentieel</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Er is vertrouwen in comfortlevering door LT-warmtenetten</li> <li>- Gemeenten en woningcorporaties pakken hun regierol en kijken vanuit een integrale en toekomstgerichte visie</li> <li>- Partijen kunnen gebruik maken van een goed afwegingskader</li> <li>- Er is sprake van een incentive en een gunstige business case</li> </ul> |



Figuur I 1 Het aantal extra bestaande woningen in 2030 ten opzichte van het Basispad dat in verschillende potentiële marktontwikkelingen op een warmtenet is aangesloten.

### Benodigde innovaties

Volgens de geïnterviewde experts ligt het belangrijkste knelpunt voor opschaling van LT-netten bij het gebrek aan vertrouwen in comfortlevering en het ontbreken van kennis bij een deel van de partijen die initiatief zouden moeten nemen. Een innovatie die deze partijen hierin zou kunnen ondersteunen is de ontwikkeling van een tool waarmee die verschillende warmtestrategieën kunnen worden berekend voor een lokale situatie. Ook zouden ze gebaat zijn bij een gedegen aanpak om tot besluitvorming te komen.

Om de business case gunstiger uit te laten komen zouden de kosten voor LT-netten kunnen worden gereduceerd door het voorkomen de piekvraag, bijvoorbeeld door warmteopslag waar nog ontwikkelingen nodig zijn (zie het gelijknamige deelrapport).

### Impact

In dit deel wordt de potentiële impact van een deelonderwerp berekend bij verschillende marktontwikkelingen. Dit onderdeel richt zich alleen op een kwantitatieve impactberekening van de CO<sub>2</sub>-emissiereductie en van de nationale kosten. Andere effecten van een hoger marktaandeel of een innovatie, zoals meer potentie voor het aansluiten van verschillende warmtebronnen en de mogelijkheid tot koelen, blijven daarmee buiten beschouwing.

In de impactberekeningen maken we onderscheid in de impact van een verhoogd marktaandeel met de zogenaamde 'huidige' technologie en met de 'innovatieve' technologie. Het type warmtenet waar momenteel de meeste bestaande woningen op zijn aangesloten betreft een MT- of HT-net. Onder de huidige technologie verstaan we daarom de aansluiting op een MT-net. Met de innovatieve technologie bedoelen we in dit deelrapport dat bestaande woningen worden aangesloten op een LT-net, wat nu nog niet gebruikelijk is (zie ook 'Ontwikkelingen in de technologie'). In de vergelijking houden we hetzelfde aantal woningen aan dat worden aangesloten op een MT- danwel LT-net en is de referentiesituatie de hr-ketel. De kosten en baten van koudelevering zijn niet meegenomen in de berekening.

### CO<sub>2</sub>-emissies

Voor de netto CO<sub>2</sub>-reductie bij een MT-net ten opzichte van hr-ketels is ten eerste rekening gehouden met de directe CO<sub>2</sub>-reductie door overschakeling van aardgas naar de primaire

MT-warmtebron. Uitgangspunt is een restwarmtebron op middentemperatuur. Aangenomen is dat de warmteproductie door de restwarmtebron niet CO<sub>2</sub> vrij is, gerekend is met 8,8 kgCO<sub>2</sub>/GJ warmte (CO<sub>2</sub>-emissiefactoren, 2022). Meer toelichting over CO<sub>2</sub>-reducties van verschillende warmtebronnen is te vinden in Bijlage D.

Er is verder rekening gehouden met de extra CO<sub>2</sub>-uitstoot die veroorzaakt wordt door de inzet van hulpketels (12 kgCO<sub>2</sub>/GJ warmte). Aangezien er bij MT-bronnen en hulpketels sprake is van niet CO<sub>2</sub> vrije warmtebronnen is de CO<sub>2</sub>-uitstoot per GJ bepaald die gepaard gaat met de warmteproductie. Daarvoor is aangenomen o.b.v. de interviews dat het totale leidingverlies in het net 25% bedraagt.

In de MT-net variant is verder verondersteld dat het tapwater direct wordt voorzien met warmte uit de hoofdwarmtebron of de hulpketels. De temperatuur van de warmte hoeft daarom niet eerst opgewaardeerd te worden. Dat betekent dat er geen warmtepomp nodig is. Dat is mogelijk indien de aanlevertemperatuur minimaal 60 graden °C bedraagt. Voorbeelden van warmtebronnen die daaraan kunnen voldoen zijn restwarmte en biomassa.

Voor de netto CO<sub>2</sub>-reductie bij een LT-net ten opzichte van hr-ketels is rekening gehouden met de CO<sub>2</sub>-reductie door overschakeling van aardgas naar de primaire LT-warmtebron. Aangenomen is dat de warmteproductie door de LT-bron geheel CO<sub>2</sub> vrij is. Dit kan bijvoorbeeld aquathermie of lage temperatuur restwarmte zijn. In dit warmtesysteem zijn geen hulpketels aanwezig.

Het leidingverlies is lager dan bij MT-netten: het uitgangspunt hiervoor is 15% warmteverlies o.b.v. de interviews. Bij LT-netten heeft het leidingverlies echter geen effect op de CO<sub>2</sub>-reductie aangezien er geen CO<sub>2</sub>-emissies zijn van de hoofdwarmtebron en geen hulpketels aanwezig zijn.

Uitgangspunt is verder dat bij LT-netten een individuele installatie voor warmtapwater gebruikt wordt. Warmtapwater kan bijvoorbeeld worden bereid middels een boosterwarmtepomp, een doorstroomtoestel (in feite een elektrische geiser) of met een elektrische boiler. Uit de interviews blijkt dat in de praktijk vaak voor het doorstroomtoestel zal worden gekozen, onder meer omdat deze lagere investeringskosten heeft in vergelijking met een boosterwarmtepomp, maar wel een hoger rendement heeft dan een elektrische boiler. In het LT-net is daarom als het uitgangspunt genomen dat warmtapwater wordt bereid met een doorstroomtoestel. Deze installatie zorgt wel voor indirecte CO<sub>2</sub>-emissies, maar het verbruik van deze installatie kan tot 40%<sup>22</sup> lager zijn dan voor een elektrische boiler (welke gemiddeld 95% rendement heeft op basis van (CE Delft, 2021)). De indirecte emissie van de elektriciteitsvraag voor het tapwater is berekend uitgaande van de emissiekengetallen voor elektriciteitsproductie in 2030 op basis van de Klimaat- en Energieverkenning 2021 (Zie bijlage D).

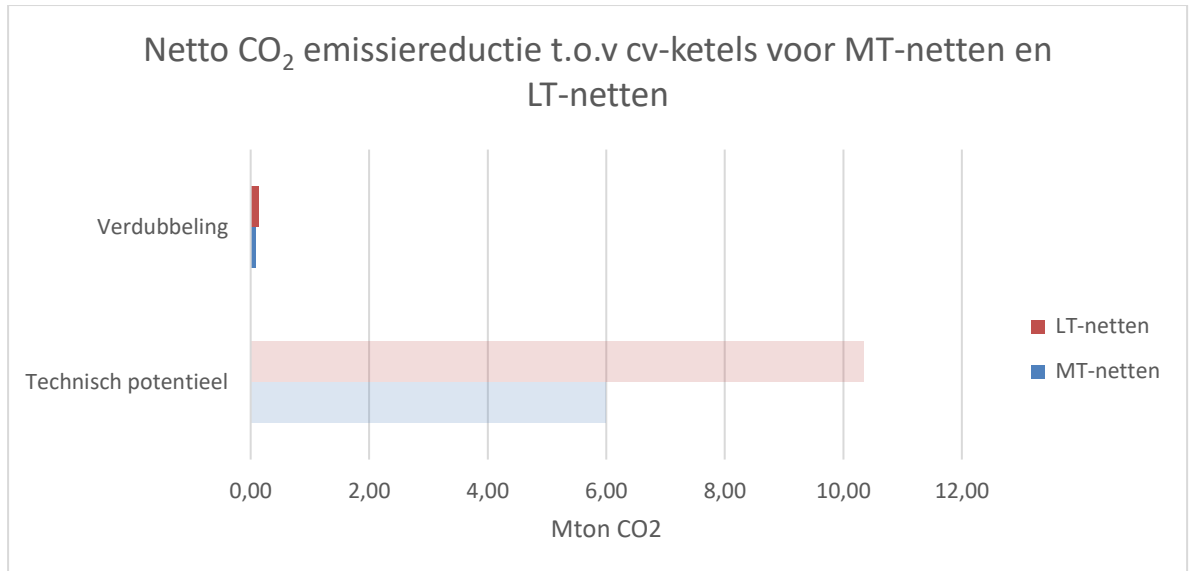
Figuur I 3 visualiseert de resultaten voor de CO<sub>2</sub>-emissiereductie van warmtenetten. Een verdubbeling van het aantal bestaande woningen dat op een warmtenet wordt aangesloten levert niet veel CO<sub>2</sub>-emissiereductie, omdat in de KEV ervan uit wordt gegaan dat vooral nieuwbouwwoningen op een warmtenet worden aangesloten.

Het technisch potentieel geeft een totale netto CO<sub>2</sub>-reductie voor MT-netten van 6,0 Mton. Voor LT-netten ligt dat hoger, namelijk 10,3 Mton. De extra CO<sub>2</sub>-reductie bij LT-netten is toe te schrijven aan de extra uitstoot van de MT-bron ten opzichte van de LT-bron (+1,7 Mton),

---

<sup>22</sup> <https://www.duurzaambouwloket.nl/maatregel/doorstroomboiler>

de extra uitstoot door hulpketels (+2,3 Mton), extra uitstoot door leidingverlies bij MT-netten (+1,0 Mton) en indirecte CO<sub>2</sub>-uitstoot voor warmtapwater bij LT-netten (-0,6 Mton). Het resultaat bij MT-netten is een overall CO<sub>2</sub>-reductie ten opzichte van cv-ketels van 55%. Bij LT-netten zou dat zelfs 94% CO<sub>2</sub>-reductie zijn.



Figuur I 2 Netto CO<sub>2</sub>-emissiereductie (in Mton) in 2030 ten opzichte van cv-ketels voor MT-netten en LT-netten bij twee potentiële marktontwikkelingen.

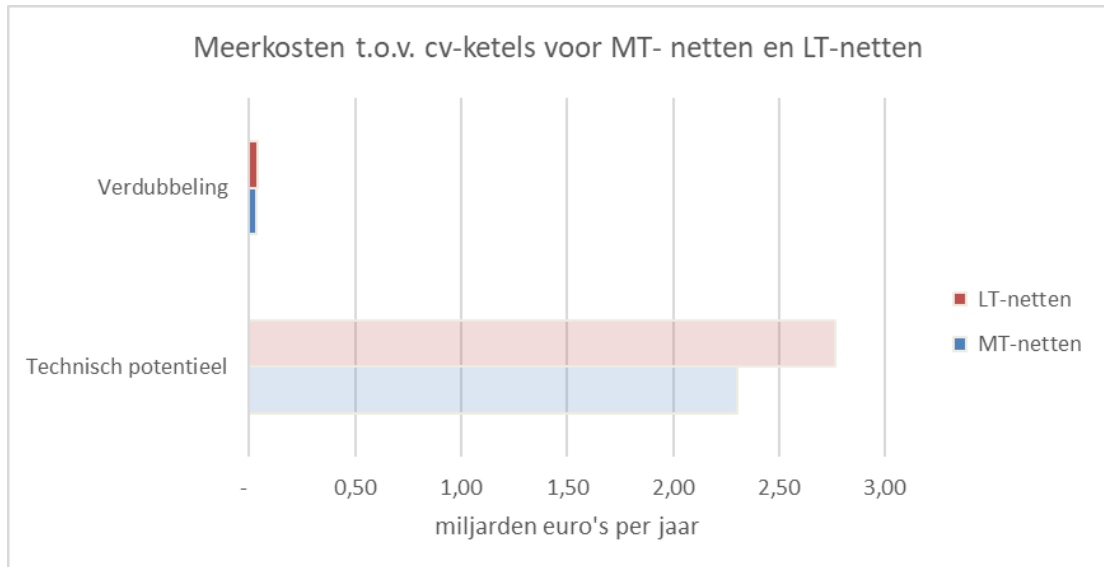
## Nationale meerkosten

Voor de bepaling van de nationale kosten van MT- en LT-warmtenetten moeten eerst de systeemgrenzen worden vastgesteld. We baseren ons op de kostenposten voor MT-warmtenetten die zijn opgenomen in de Startanalyse van PBL. De systeemkosten - vanaf de warmtebron tot aan de aansluiting in de woning - zijn verdeeld over het aantal aangesloten woningen om zo de gemiddelde kosten per woning te bepalen. Alleen de systeemkosten voor het warmtenet en voor de aangesloten woningen worden hierin meegenomen (NB: dit is dus exclusief de systeemkosten voor de aangesloten utiliteit). Er zijn geen isolatiekosten meegenomen in deze systeemvergelijking. Er is vanuit gegaan dat de woningen LT-ready zijn op het moment dat deze worden aangesloten of dat ze autonoom worden gerenoveerd naar het isolatieniveau conform Standaard en Streefwaarden (RVO, 2022). Dit is een isolatiestandaard die aangeeft wanneer een woning goed genoeg is geïsoleerd om van het aardgas af te kunnen gaan.

Voor iedere buurt zijn op basis van de resultaten van de Startanalyse de gemiddelde investeringskosten voor warmtenetten per aangesloten woningequivalent berekend. Zo is een kostencurve opgesteld voor de gemiddelde warmtenetsysteemkosten in euro/woningequivalent afhankelijk van de warmtevragedichtheid (bebouwingsdichtheid) in deze buurten (zie Bijlage). Zoals uitgelegd bij de potentiële marktontwikkelingen voor warmtenetten is hierbij onderscheid gemaakt naar drie bebouwingsdichtheid klassen. Op basis van de kostencurve gelden lagere investeringskosten per aansluiting voor buurten met een hogere bebouwingsdichtheid.

Voor LT-netten is gerekend met dezelfde warmtenetsysteemkosten als bij MT-netten, behalve dat hulpketels afwezig zijn in LT-netten. Uit de interviews blijkt dat LT-netten bij de juiste uitgangspunten namelijk niet meer hoeven te kosten dan MT-netten. Er is geen centrale

warmtepomp aanwezig voor ruimteverwarming (zie de bijlage). Bij het LT-net is wel een individueel elektrisch doorstroomtoestel voor de bereiding van warmtapwater meegenomen in de investeringskosten per woning. Meer achtergrond bij de kostenaanname is te vinden in de bijlage.



Figuur I 3 Meerkosten ten opzichte van cv-ketels (miljarden euro's per jaar) voor MT- netten en LT-netten in 2030.

Het resultaat op basis van de aannames vertaalt zich in hogere jaarlijkse meerkosten voor LT-netten ten opzichte van MT-netten. De meerkosten voor LT-netten zijn 20% hoger dan voor MT-netten. Dat verschil komt door de hogere jaarlijkse investeringskosten per woning vanwege het tapwatertoestel wat resulteert in ongeveer 1.000 euro/woning extra investeringskosten voor LT-netten ten opzichte van MT-netten. Dat vertaalt zich door in 17% hogere jaarlijkse investeringskosten. De operationele kosten van het distributienet per jaar zijn berekend als een percentage van de investeringskosten per jaar. Die veranderen naar verhouding mee en zijn daarmee eveneens 17% hoger. De energiekosten zijn voor LT-netten 2% hoger, omdat het tapwater met het elektrische toestel wordt geproduceerd, maar dit wel op een efficiënte manier gebeurt (de kosten per GJ warmte zijn hoger voor elektriciteit dan voor warmte of gas bij eenzelfde rendement). Bij MT-netten komt alle warmte uit de warmtebronnen. Een breakdown van de nationale kosten is weergegeven in de bijlage.

## Samenvatting

LT-netten bieden diverse voordelen ten opzichte van MT- en HT-netten door een betere energie-efficiëntie, een betere exploitatie van duurzame LT-bronnen, hogere stabiliteit door gebruik van meerdere bronnen, betere mogelijkheden voor warmteopslag en de mogelijkheid tot koeling. Ze kunnen daarmee ook tot een additionele CO<sub>2</sub>-emissiereductie leiden ten opzichte van MT-netten. Uit de berekeningen blijkt dat indien alle woningen, waar dat mogelijk is, op een LT-net worden aangesloten dan kan er jaarlijks 2 Megaton extra CO<sub>2</sub> bespaard worden ten opzichte van een MT-net.

Uit de interviews is gebleken dat LT-netten bij de juiste uitgangspunten niet duurder hoeven te zijn in de aanleg dan MT-netten. Warmteopslag zou bijvoorbeeld de piekvraag kunnen reduceren waardoor de dimensionering van de leidingen kan worden verkleind (zie het deelrapport 'Warmteopslag'). Ook is een groot aandeel van de woningen nu al LT-ready

waardoor er in de woning geen extra kosten hoeven te worden gemaakt, behalve de tapwatervoorziening. Ook is het belangrijk om de koudevraag mee te nemen in de business case, aangezien koeling een belangrijke rol gaat spelen in de toekomst.

Om het gebrek aan vertrouwen in comfort van LT-warmte weg te nemen kunnen ervaringen met succesvolle project beter worden gedeeld met de sector. Voor de opschaling is het van belang dat gemeenten de regierol nemen waarbij zij met een integrale blik en een toekomstvisie naar de warmte- én koudevoorziening kunnen kijken. Zij kunnen worden ondersteund met een tool die lokale warmtestrategieën kan doorrekenen en meteen gedegen aanpak om tot besluitvorming te komen.



# J. Deelrapport Grootschalige warmteopslag

## Inleiding

### Context

Warmteopslag kan potentieel een grote bijdrage leveren aan de energietransitie. Door in tijden van overvloed energie (in de vorm van warmte of elektriciteit) op te slaan als warmte voor later gebruik, kunnen duurzame bronnen beter benut worden, kan congestie op het elektriciteitsnet voorkomen worden en kunnen extra (fossiele) centrales voor de piekvraag vermeden worden.

Er kunnen verschillende technieken voor warmteopslag worden onderscheiden:

- Voelbare warmteopslag (Thermal Energy Storage (TES)) in water (meestal temperaturen tussen de 0-100 °C)
- Voelbare warmteopslag in vloeibaar zout, olie, zand, steen, keramiek (meestal temperaturen tussen de 100 en 1000 °C)
- Latente warmteopslag in phase-changing materials (PCM's)
- Warmteopslag in thermochemische materialen (TCM's)
- Warmteopslag door redox principes

Voornamelijk voelbare warmteopslag in water wordt voor vooralsnog op grote schaal (groter dan gebouwniveau) toegepast, bijvoorbeeld in (on)diepe aquifers, mijnen, putten en watertanks. TKI UE heeft de trend gedefinieerd: 'Grootschalige (warmte)opslag komt moeilijk tot implementatie'. In het MMIP beschrijft TKI UE de volgende aandachtspunten voor de opschaling van warmteopslag:

- Verlagen van aanschaf- en installatiekosten en operatie
- Verhogen van (systeem)rendementen
- Verder verbeteren, demonstreren en integreren van grootschalige warmteopslagsystemen in collectieve warmtesystemen
- Verminderen van ruimtegebruik en verbeteren van het aanzicht van bovengrondse en ondergrondse onderdelen
- Doorontwikkelen van nieuwe grootschalige thermische opslagmethodes
- Doorontwikkelen van concepten om langere afstand tussen warmteaanbod en -vraag te overbruggen

### Leeswijzer

Het kwalitatieve deel van dit deelrapport bestaat uit de onderdelen 'ontwikkelingen in de technologie' en 'randvoorwaarden voor opschaling' en is gebaseerd op desk research en de interviews met Murette Zwamborn (KWR Water) voor grootschalige opslag in een ondergrondse watervoerende laag (met name bodemenergie en hoge temperatuur opslag (HTO)) en met Ruud van den Bosch (Groene Warmte) voor grootschalige opslag in tanks en 'pits'. Het kwalitatieve deel is daarmee een selectie van wat volgens de geïnterviewden de belangrijkste knelpunten, ontwikkelingen en randvoorwaarden zijn om opschaling te realiseren.

Het kwantitatieve deel, bestaande uit de onderdelen 'potentiële marktontwikkelingen' en de 'impact' daarvan, is opgesteld door TNO. De aannames die hierbij gehanteerd zijn, zijn

afgestemd met TKI UE en komen zoveel mogelijk voort uit de interviews en de Klimaat- en Energieverkenning (KEV) (PBL, 2021). Zoals toegelicht in de inleiding stellen we nadrukkelijk dat wij niet voorspellen dat die gepresenteerde potentiëlen ook gerealiseerd worden. De potentiële marktontwikkelingen laten echter zien aan dat er een groter potentieel is, dat volgens de KEV nog niet wordt benut.

Het deelrapport wordt afgesloten met een samenvatting van de inzichten uit beide onderdelen.

## Ontwikkelingen in de technologie

*Samenvatting van het interview met Marette Zwamborn over WKO en HTO (KWR Water) en met Ruud van den Bosch over tanks en pits (GroeneWarmte)*

### Algemeen

De interviews betreffen grootschalige opslag hebben zich geconcentreerd op lage en hoge temperatuur bodemenergie (aquifer thermal energy storage) en opslag in een tank (tank thermal energy storage) of pit (pit thermal energy storage).

Bij bodemenergie (ATES) wordt voelbare warmte opgeslagen in een ondergrondse waterlaag. Het is een mix van opwekking en opslag (maximaal 25 graden laadtemperatuur bij open systemen (=WKO) en 30 graden bij gesloten systemen) en heeft het voordeel dat het ook koude kan leveren, wat vaak vergeten wordt. Nederland is koploper in de wereld in de toepassing van bodemenergie vanwege de geschikte bodemgesteldheid en het gunstige klimaat voor seizoensopslag. Het is goed toepasbaar bij een lagere-temperatuurvraag zoals in de nieuwbouw, evenals bij gebouwen met een koudevraag. Bodemenergie is sinds 2000 opgekomen en de groei loopt redelijk parallel met de nieuwbouw (zie ook bodemenergie.nl).

Hoge temperatuuropslag (HTO-ATES) is warmteopslag vanaf zo'n 50 graden. In diverse pilots wordt nu gericht op dieptes van minstens 150 meter onder de grond. De opslag is bedoeld op de schaal van een wijk. Een HTO kent enkele voordelen ten opzichte van een WKO, omdat de opslag een hogere energiedichtheid heeft en netcongestie kan voorkomen doordat bij levering van de warmte geen warmtepomp nodig is. HTO-opslag is nog in de ontwikkelfase voor onderzoek naar aspecten als:

- Kennis van de ondergrond, specifiek op de dieptes van HTO
- Ruimtelijk beleid en een beleidskader voor HTO, gebaseerd op kennis van randvoorwaarden waaronder HTO duurzaam kan worden toegepast in de bodem.
- Technologische ontwikkelingen met onderzoeksvragen als:
  - Hoe koppel je het systeem in?
  - Op welke momenten benut je de warmte?
  - Welke materialen gebruik je?
  - Hoeveel warmte kun je terugleveren uit de opslag?
  - Wat gebeurt er met de warmte in de ondergrond?
- Inzicht in de businesscase van HTO

Een andere manier van voelbare warmteopslag is opslag van water in een tank (TTES) of pit (PTES), waarvoor een opslagsysteem moet worden gebouwd. Dit betekent dat er hoge investeringskosten zijn en er ruimte moet zijn voor de tank of pit, maar het voordeel is het lagere warmteverlies van 10-20% ten opzichte van 30-40% voor een ATES systeem (CE Delft, 2020). Deze vorm van opslag is in Nederland nog niet veel toegepast. Door de hoge

grondwaterstand is pit storage in Nederland ook niet altijd mogelijk<sup>23</sup>. Enkele technologische ontwikkelingen voor tank en pit storage zijn:

- Ontwikkelen van hydraulische en thermodynamische simulaties om te kunnen bepalen hoe het warmtesysteem gaat werken wat vrij complex is door onder andere de stratificatie en turbulentie. Hiermee kan het ontwerp worden verbeterd.
- En nieuwe 'liner'-technologie voor met name pit storage die een langere levensduur hebben, beter bestand zijn tegen hogere temperaturen of tegen bepaalde bestanddelen in het water
- Op het gebied van drijvende deksels wordt onderzoek gedaan naar hoe deze beter of goedkoper kunnen, zoals een ronde drijvende deksel in plaats van vierkante deksel
- Onderzoek naar polymere beton wat een lagere CO<sub>2</sub> footprint heeft en beter bestand is tegen bepaalde stoffen en ontkalkt water (de warmtewisselaar kan niet goed tegen kalk, maar ontkalkt water trekt weer kalk uit het beton in de wand van de opslag)
- Experimenten met drijvende deksels in oppervlaktewater, zoals grindgaten, en half verzonken stalen tanks

### Verlagen van aanschaf- en installatiekosten en operatie

De aanleg van een bodemenergiesysteem vergt een relatief hoge investering. Het ligt niet in de verwachting dat de CAPEX kosten veel verder omlaag kunnen vanwege de onvermijdelijke kosten van het werken in de bodem en het feit dat dit zorgvuldig moet gebeuren. Wellicht kan op termijn door de leercurve die ontstaat bij frequentere toepassing nog een kostenreductie gerealiseerd worden. Ten aanzien van HTO zijn er nog veel onduidelijkheden over de kosten en baten die eerst opgelost moeten worden om een beeld te krijgen van de business case.

Tank en pit opslag vergen hogere investeringskosten dan een bodemenergiesysteem. Vanwege de leercurve en opschaling kunnen de investeringskosten nog wel omlaag voor pit storage. In Nederland kost pit storage nu naar schatting 70 Euro/m<sup>3</sup>. In Denemarken is het 30 Euro/m<sup>3</sup>, wellicht kunnen we daar in Nederland ook naartoe. Wat betreft tank storage kost Ecovat nu 160 Euro/m<sup>3</sup> voor de grootste opslag. Als de capaciteit nog groter wordt dan moet aan een andere bouwmethode worden gedacht. De betonnen wand van het Ecovat principe gaat wel 100 jaar mee, maar dat heeft vaak nauwelijks netto contante waarde in de business case.

Een hoge CAPEX hoeft niet te betekenen dat er geen business case voor is. De business case is alleen erg complex voor warmteopslag, ook omdat het gelaagd is. Warmteopslag heeft bijvoorbeeld niet alleen baten voor het warmtebedrijf, maar kan met power-to-heat ook overproductie van elektriciteit beter benutten en netcongestie voorkomen (en daarmee kosten voor verzwaring). Op dit moment hebben deze baten echter nog geen waarde. Verder zijn energieprijzen (en de volatiliteit daarvan) ook belangrijke factoren die de business case voor een opslagsysteem dat voor 30-40 jaar wordt aangelegd uitdagend maakt. Onzekerheid over de energieprijzen maakt de financiering bij een bank ook lastig.

***De geïnterviewde experts verwachten niet dat de CAPEX kosten voor een bodemenergiesysteem of tank storage veel af zullen nemen op de korte termijn, voor pit storage zijn er nog wel mogelijkheden bij schaalvergroting.***

---

<sup>23</sup> Er wordt onderzocht of grote pits toch mogelijk zijn bij een hoge grondwaterstand.

## Proces

Het ontwerp van een bodemenergiesysteem is op elke locatie anders. De ondergrond is specifiek voor de locatie en vergt elke keer een vooronderzoek naar bijvoorbeeld vervuiling en het effect op omliggende systemen. Verder is het beheer van de ondergrond versnipperd. Beleidsregels en vergunningsvoorwaarden kunnen ook bij elke provincie of gemeente anders zijn. Bij gemeenten is weinig capaciteit en kennis op dit gebied.

Voor HTO geldt juridisch dat er nog geen generiek beleid is rond HTO en er alleen vergunningen zijn afgegeven voor pilotprojecten.

Met warmteopslag in tanks en pits is nog weinig ervaring waardoor er bij warmtebedrijven en gemeenten nog veel vragen en onzekerheden zijn. Initiatieven en besluitvorming hierover blijken daardoor lastig en de trajecten duren lang.

***Zowel de aanleg van een bodemenergiesysteem als opslag in tanks en pits is een langdurig proces. Bij een bodemenergiesysteem komt dit vooral door (omgaan met) verschillen in de lokale ondergrond, regels en vergunningsvoorwaarden. Bij tanks en pits leven er door de onbekendheid met het opslagsysteem nog veel vragen bij de betrokken partijen.***

## Randvoorwaarden voor opschaling

Om WKO op te schalen zou het helpen als de beleidsregels en vergunningsvoorwaarden consistent zijn. Er gaat nu veel tijd zitten in het uitzoeken van het lokale beleid en de lokale verantwoordelijkheden. Ook is het collectieve belang (betere benutting van duurzame bronnen) en het voordeel van buffering (efficiëntie en kosten) niet altijd duidelijk bij de betrokken partijen. Om HTO door te ontwikkelen zijn pilot- en demonstratieprojecten nodig om technische, financiële en juridische aspecten te onderzoeken en knelpunten weg te nemen.

Voor tanks en pit zou een standaard toetsingskader warmtebedrijven en gemeenten kunnen ondersteunen bij het besluitvormingsproces. Ook simulatiemodellen en prestatiecertificeringen van warmteopslagsystemen (zoals energetische efficiëntie en levensduur) kunnen warmtebedrijven helpen bij het ontwerp en duidelijkheid bieden over wat ze kunnen verwachten van het systeem en hoe ze ervan kunnen profiteren. Verder kunnen pilots bijdragen aan nieuwe inzichten, praktijkervaringen en het wegnemen van onzekerheden. Een subsidieregeling voor warmteopslag zou ook de waarde voor de energietransitie onderstrepen en de toepassing stimuleren.

Tot slot is er weinig incentive om warmte op te slaan via power-to-heat op moment dat er overproductie is. De duurzame inzet van stroom voor warmteopslag wordt bijvoorbeeld niet gewaardeerd. (Warmte)bedrijven hebben wel een duurzaamheidstarget, maar voor warmteopslag wordt geen onderscheid gemaakt in de bron van elektriciteit bij de toepassing van power-to-heat. Of nu reguliere stroom wordt gebruikt of dat de elektriciteit van wind- en zonneparken tijdens overproductie wordt gebruikt maakt geen verschil, elke kWh krijgt dezelfde duurzaamheidsbeoordeling en de warmtebedrijven krijgen één duurzaamheidscertificaat voor het hele jaar. Daarnaast telt de duurzaamheid van het warmtenet ook niet mee in de BENG-norm voor nieuwbouwwoningen, er wordt met een standaardwaarde voor duurzaamheid van een warmtenet gerekend.

## Potentiële marktontwikkelingen

Voor de potentiële marktontwikkelingen van warmteopslag berekenen we de impact van grootschalige warmteopslag in een ondergrondse watervoerende laag (bodemenergie of aquifer thermal energy storage (ATES)) en opslag in een tank (tank storage). Het uitgangspunt bij warmteopslag is het aantal woningen dat in 2030 is aangesloten op een LT-warmtenet, waardoor deze potentiëlen gekoppeld zijn aan die van 'Warmtenetten'. Het aantal woningen waar collectieve warmteopslag wordt toegepast is weergegeven in Figuur J 1. In dit deelonderwerp bekijken we het verschil in impact tussen een lagetemperatuurwarmtenet mét en zonder warmteopslag. Onderstaande tabel geeft een beschrijving van de potentiële marktontwikkelingen en de randvoorwaarden die daarbij horen.

### Basispad

Voor het Basispad is uitgegaan van het aantal woningen dat in de KEV2021 verondersteld wordt in 2030 aangesloten te zijn op een warmtenet onder het vastgesteld en voorgenomen beleid. In 2020 waren er 426.000 woningen aangesloten op een warmtenet (alle temperaturniveaus) en in de KEV raming groeit dit naar 694.000 woningen in 2030. Er komen dus in 10 jaar 269.000 woningen bij. Hier zit echter ook nieuwbouw bij die op een warmtenet wordt aangesloten. Voor de bestaande bouw gaat het om een groei van 84.000 woningen tussen 2020 en 2030. Dat is lang niet voldoende om de doelstelling in het Klimaatakkoord van een groei van 750.000 nieuwe aansluitingen in de bestaande bouw in 2030 te halen.

### Verdubbeling

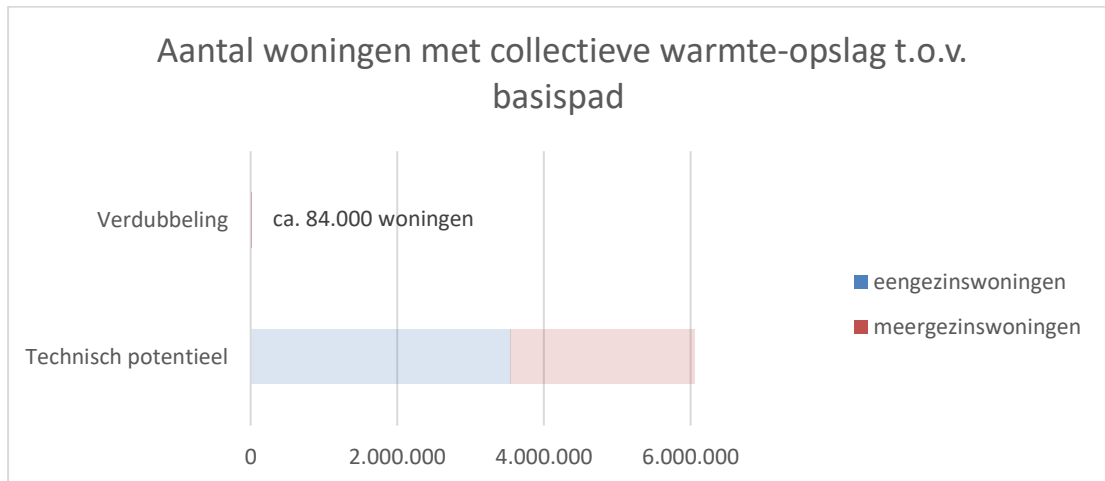
In deze potentiële ontwikkeling gaan we uit van een verdubbeling van de toename in het Basispad (de KEV) voor de bestaande bouw. Met een verdubbeling, oftewel een extra 84 duizend woningen op een warmtenet erbij, zou het totaal aangesloten bestaande woningen uitkomen op 510 duizend in 2030.

### Technisch potentieel

Voor de aannahme betreft het technisch potentieel gaan we ervan uit dat 100% van de bestaande woningen in een gebied dat is geclassificeerd met een bebouwingsdichtheid 'hoog' en 'midden' in 2030 is aangesloten op een warmtenet. Dat zijn ruim 6.000.000 woningen. Zoals eerder gezegd is dit niet bedoeld als een realistisch scenario, maar om een indicatie van het theoretische bereik te geven.

Tabel J 1 Beschrijving van de potentiële marktontwikkelingen van grootschalige warmteopslag

| Potentiële marktontwikkelingen warmteopslag |   |
|---|---|
| Beschrijving                                |   |
| <b>Verdubbeling</b>                         | Verdubbeling ten opzichte van het Basispad van het aantal bestaande woningen dat in 2030 is aangesloten op een warmtenet  |
| <b>Technische potentieel</b>                | Alle woningen die in deze marktontwikkeling bij 'Warmtenetten' zijn aangesloten op een LT-net hebben warmteopslag   |
| Randvoorwaarden                             |   |
| <b>Verdubbeling / Technisch potentieel</b>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- de baten worden erkend en gewaardeerd waardoor een gunstige business case ontstaat</li> <li>- er is consistentie in de beleidsregels en vergunningsvoorwaarden en er zijn standaard toetsingskaders</li> </ul> |



Figuur J 1 Het aantal extra woningen in 2030 ten opzichte van het Basispad met een collectief warmteopslagsysteem per potentiële marktontwikkeling en met onderscheid naar een- en meergezinswoningen.

## Benodigde innovaties

Voor de opschaling van bodemenergie of tankopslag zijn volgens de geïnterviewde experts geen fundamentele innovaties nodig, maar met name consistentie in de regels, vergunningsvoorwaarden en toetsingskaders. Ook worden de baten nog niet altijd gewaardeerd of komen deze nog niet terecht bij de partij die ook de kosten maakt, waardoor er geen gunstige business case is. Wel kunnen innovatieve opslagtechnologieën als hoge temperatuuropslag (HTO), thermochemische materialen (TCM) en phase-changing materials (PCM), nieuwe mogelijkheden bieden om warmte efficiënter, compacter en, op termijn, goedkoper op te kunnen slaan. PCM's komen net op de markt, maar HTO en TCM's zitten nog in de ontwikkelfase en vergen subsidies of investeringen om door te ontwikkelen.

## Impact

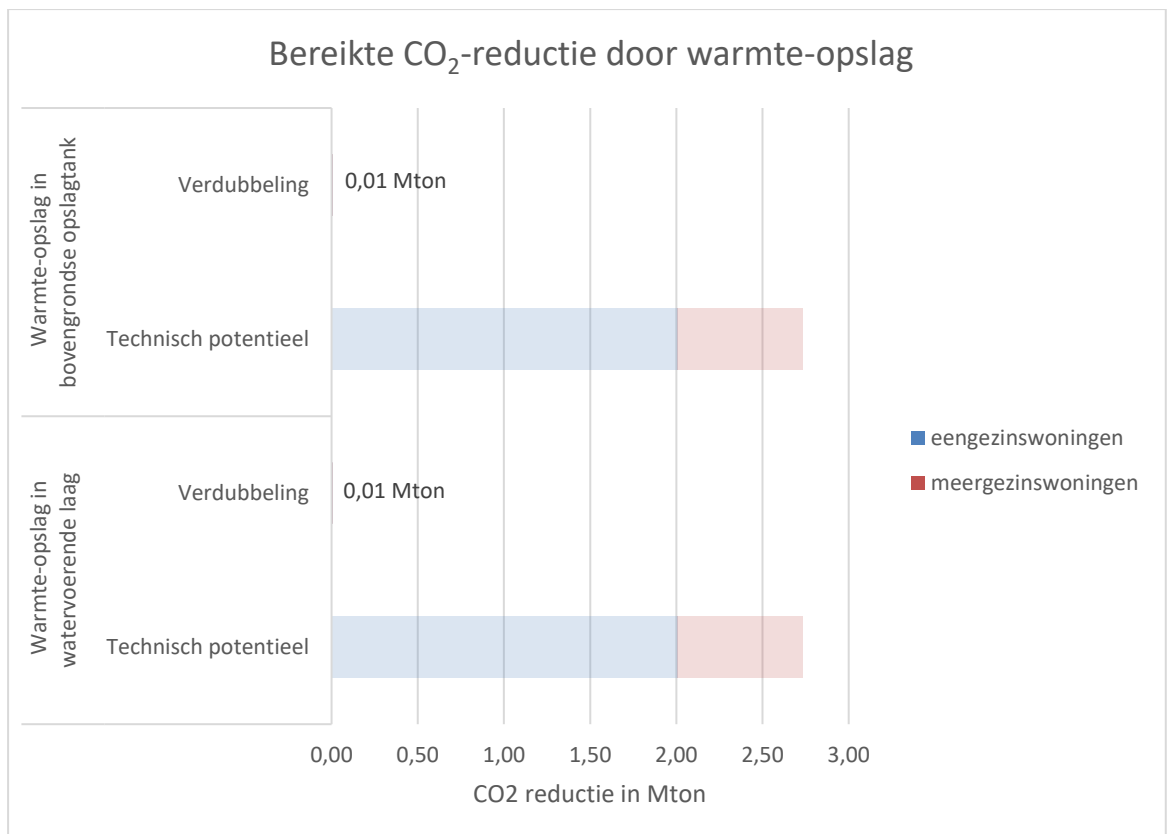
In dit deel wordt de potentiële impact van een deelonderwerp berekend bij verschillende marktontwikkelingen door een LT-net zonder en met warmteopslag met elkaar te vergelijken. Dit onderdeel richt zich alleen op een kwantitatieve impactberekening van de CO<sub>2</sub>-emissiereductie en van de nationale kosten. Andere effecten van een hoger marktaandeel of een innovatie, zoals meer potentie voor flexibiliteit met het elektriciteitsnet, blijven daarmee buiten beschouwing.

## CO<sub>2</sub>-emissies

Warmteopslag kan een besparing in het aardgasgebruik betekenen, omdat duurzame bronnen beter benut kunnen worden en de hulpketel minder hoeft te worden ingezet bij een piekvraag. We hebben bij de berekening een aanname gedaan over het percentage warmteopslag welke niet getoetst is aan de praktijk. We baseren ons op het gegeven dat in warmtenetten de typische verdeling in warmteproductie tussen primaire warmtebron en hulpketels op jaarbasis is van circa 80%:20% is (PBL, 2021). We gaan ervan uit dat de warmte die nog wordt geleverd met hulpketels op aardgas deels of geheel vervangen kan worden door warmte uit de opslag. Daarnaast kan seizoensopslag van warmte worden toegepast wat zorgt voor meer benutting van hernieuwbare warmte. In (De Groot, 2021) wordt in de vergelijking voor diverse warmteopslag technologieën uitgegaan dat op jaarbasis 25% van de totale warmtevraag uit de opslag komt. Dat percentage is hier gebruikt als

uitgangspunt voor de additionele benutting van hernieuwbare warmteopslag in zowel een watervoerende laag als in tankopslag.

Vanwege deze aanname is de behaalde CO<sub>2</sub>-emissiereductie gelijk voor deze opslagtechnologieën. In Figuur J 2 is de bereikte CO<sub>2</sub>-emissiereductie weergegeven. Indien de LT-netten in het marktpotentieel 'Verdubbeling' gebruik zouden maken van warmteopslag dan zou dit tot een additionele jaarlijkse CO<sub>2</sub>-emissiereductie van 0,01 Mton leiden ten opzichte van de situatie zonder warmteopslag. Indien de LT-warmtenetten in het technisch potentieel ook warmteopslag zouden gebruiken met de bovengenoemde aannames dan zou het additionele bereik van CO<sub>2</sub>-emissiereductie ongeveer 2,7 Mton bedragen.



Figuur J 2 CO<sub>2</sub>-emissiereductie voor warmteopslag in 2030 voor 2 opslagtechnologieën met onderscheid tussen één- en meergezinswoningen.

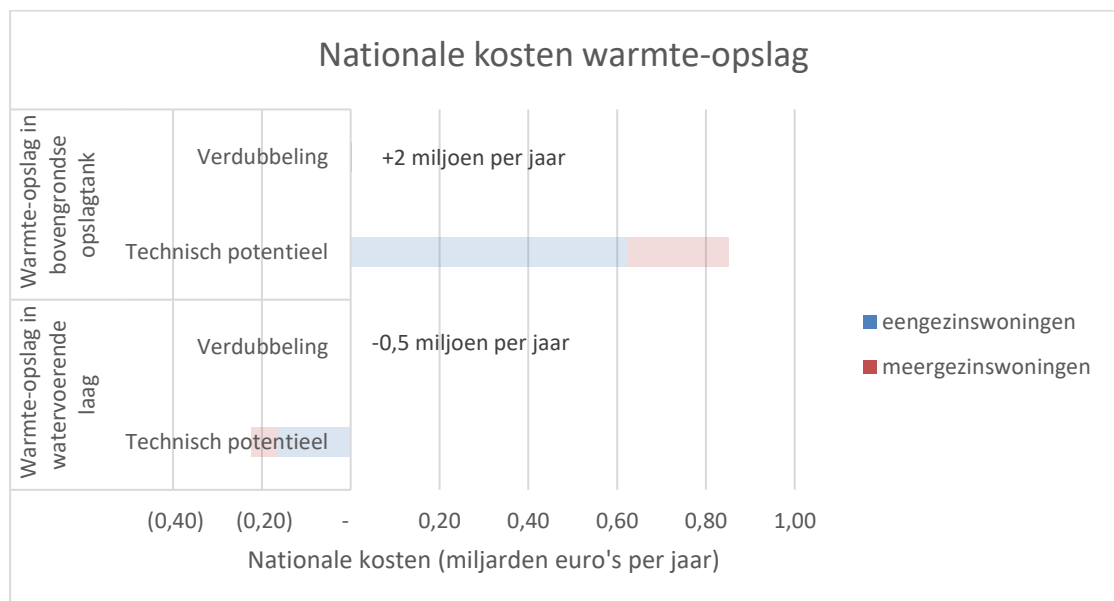
## Nationale kosten

In een studie over warmteopslag in Nederland (De Groot, 2020) is een technisch-economische vergelijking gemaakt van diverse grootschalige energieopslag technologieën voor warmte bij woningen. De informatie uit deze bron gebruiken we voor de berekening van de nationale kosten. Uit de studie blijkt dat bij tankopslag een factor 10 hogere specifieke investering (euro per m<sup>3</sup> opslag) hoort dan bij ondergrondse opslag in een watervoerende laag.

Om het benodigde opslagvolume per meergezins- en eengezinswoning te bepalen is uitgegaan van een efficiency voor warmteopslag van 75% bij opslag in een watervoerende laag en van 90% bij tankopslag. Dit zijn gemiddelden voor de efficiency afkomstig uit een studie over warmteopslag van CE Delft (Schepers & Dehens, 2020). De bepaling van hoeveel opslagvolume per woning nodig is wordt verder in meer detail toegelicht in Bijlage C.

Via het benodigde opslagvolume in m<sup>3</sup> per woning om het aandeel van de warmtevraag op jaarbasis op te slaan zijn de investeringskosten per woningequivalent berekend. Verder is op basis van (De Groot, 2020) 0,75% van de investeringskosten per jaar gehanteerd als onderhoudskosten voor tankopslag bovengronds en zijn op basis van dezelfde studie geen onderhoudskosten gerekend voor opslag in een watervoerende laag. Dat er geen onderhoudskosten zijn geldt voor de aquifer zelf, maar niet voor de waterpompen die vervangen moeten worden om de paar jaar. Pompenergie voor het oppompen en rondpompen van warmte uit de opslag en de investeringskosten van de pompen zijn echter niet meegenomen als onderdeel van de vergelijking (er zijn geen gegevens gevonden om hier een goede onderbouwing voor te geven). Bij een watervoerende laag is wel significant meer pompenergie nodig dan voor tankopslag, dit omdat in het laatste geval bewegingsenergie uit de vrije val benut wordt. De mogelijke vermeden kosten voor netverzwaring door warmteopslag zijn in deze berekeningen niet meegenomen.

Het resultaat (zie Figuur J 3) toont aan dat de investering van opslag in een watervoerende laag zo beperkt is dat de besparing op energiekosten voor aardgas (door de extra hernieuwbare warmtebenutting) zorgt voor negatieve nationale kosten, oftewel een besparing. Dit is dus een aantrekkelijke optie vanuit nationale kosten oogpunt. Daarentegen liggen de investeringen voor tankopslag vele malen hoger en brengt dit significante nationale kosten met zich mee van 0,85 miljard per jaar.



Figuur J 3 Nationale kosten voor warmteopslag in 2030 voor 2 opslagtechnologieën met onderscheid tussen één- en meergezinswoningen



## Samenvatting

Warmteopslag kan een bijdrage leveren aan de energietransitie door duurzame energiebronnen beter te benutten waardoor aardgasgebruik in hulpketels bij de piekvraag voorkomen kan worden en er flexibiliteit met het elektriciteitsnet kan worden gerealiseerd. Deze voordelen van warmteopslag worden echter nog niet altijd erkend en gewaardeerd waardoor de kosten en baten niet altijd bij dezelfde partij liggen en de business case ontbreekt.

De impactberekeningen met de aannames in deze studie komen door de besparing in het gasgebruik uit op een kostenbesparing voor wateropslag in een watervoerende laag (bodemenergie). Opslag in een tank is 10x zo duur en vergt daarmee wel additionele jaarlijkse kosten. Bij een verdubbeling van het aantal woningen dat op een LT-warmtenet mét warmteopslag is aangesloten (ten opzichte van de KEV) kan jaarlijks 0,1 Mton CO<sub>2</sub>-emissie worden vermeden ten opzichte van een warmtenet zonder warmteopslag.

Behalve een betere incentive om warmte op te slaan, zijn volgens de geïnterviewde experts consistentie in de beleidsregels en vergunningsvoorwaarden en standaard toetsingskaders randvoorwaarden voor opschaling.

# K. Deelrapport Energiecollectieven

## Inleiding

### Context

Energiecollectieven spelen al langer een rol op energiemarkten. Volgens de Lokale Energiemonitor van 'Hieropgewekt' had Nederland in 2021 meer dan 650 energiecollectieven met naar schatting rond de 110.000 leden. Het aantal energiecollectieven neemt nog altijd toe en de groei van de huidige collectieven in ledenaantal zet door.<sup>24</sup> Het overgrote deel van de collectieven werken aan zonne-energieprojecten. Daarnaast zijn er collectieven die investeren in wind en steeds meer collectieven die zich richten op warmte en de ontwikkeling van warmtenetten. Een andere activiteit waar veel collectieven op inzetten is energiebesparing.

Er bestaan veel verschillende namen voor energiecollectieven, denk aan microgrid, community Virtual Power Plant (cVPP), peer-to-peer energiegemeenschap of energie hub. De naam wordt vaak ontleend aan een activiteit die ze ontwikkelen of een geografisch kenmerk van het collectief. Deze archetypes hebben geen juridische betekenis en zijn lastig af te bakenen, ze geven slechts aan wat 'typisch' is voor energiecollectieven van deze vorm.

De TKI Urban Energy beschrijft de ontwikkeling van energiecollectieven als volgt: *'Het collectief en lokaal organiseren van energielevering en vraagsturing vanuit bottom-up initiatieven wordt steeds vaker een onderdeel van innovatieprojecten.'* De trendbeschrijving sluit aan bij de ontwikkeling die collectieven doormaken en de behoefte om te innoveren en meer 'zelfstandig' te kunnen opereren op bijvoorbeeld energiemarkten.

De Europese wetgever hoopt dat energiecollectieven een bijdrage kunnen leveren aan de toename en integratie van duurzame bronnen en daarbij ook zullen bijdrage aan de empowerment van de energieconsument. De gemeenschap moet eerlijk behandeld worden en op gelijke wijze kunnen opereren. De Europese wetgever wil daarom consumenten de mogelijkheid bieden om actiever een bijdrage te leveren aan het energiesysteem. Zij moeten indirect of rechtstreeks deel kunnen nemen aan de markt door duurzame energie te produceren, op te slaan en te verhandelen en zo profiteren van lagere prijzen.<sup>25</sup> Dit kunnen zij individueel doen, als actieve afnemer, maar ook als groep actieve afnemers in de vorm van een energiegemeenschap.<sup>26</sup> De gemeenschap is een inclusieve optie waardoor alle consumenten de mogelijkheid moeten krijgen deel te nemen in gemeenschappelijke productie, het verbruik en het delen van energie.

Met de komst van het nieuwe Europese wetgevingspakket 'the Clean Energy Package (CEP)', een pakket aan Europese richtlijnen en verordeningen, is het energiecollectief ook wettelijk verankerd. In de Elektriciteitsrichtlijn en de Hernieuwbare energierichtlijn staan twee definities van *Energiegemeenschappen*; de *energiegemeenschap van burgers* en de *hernieuwbare energiegemeenschap*. De definities zeggen iets over hoe gemeenschappen georganiseerd moeten zijn, met welk doel ze zijn opgericht en welke activiteiten ze moeten kunnen ontwikkelen (Florence School of Regulation, 2021). Beide definities bevatten een,

---

<sup>24</sup> De lokale energiemonitor 2021, hieropgewekt

<sup>25</sup> Richtlijn 2019/944 overwegingen 37, 42

<sup>26</sup> Richtlijn 2019/944 overwegingen 43 en 44

niet-uitputtende, activiteitenlijst.<sup>27</sup> Hieronder worden de kernelementen uit de definities verder toegelicht.

### Wat is een energiegemeenschap?

De Europese wetgever stelt dat energiegemeenschappen zich onderscheiden van andere marktpartijen doordat zij een ander doel dienen. De gemeenschap heeft in de eerste plaats tot doel het bieden van milieu-, economische of sociale gemeenschapsvoordelen aan haar leden of aandeelhouders. Het najagen van winst is niet de eerste drijfveer, wat overigens niet betekent dat gemeenschappen geen winst mogen maken.

Naast de doelen die de gemeenschap dienen, zijn ook de organisatie- en zeggenschapsvereisten kenmerkend voor de energiegemeenschap. De zeggenschap binnen de gemeenschap ligt bij de leden of aandeelhouders, en dan specifiek bij de leden die natuurlijke personen zijn, lokale autoriteiten of kleine ondernemingen. De gemeenschap is een juridische entiteit en het lidmaatschap is open en vrijwillig. Aandeelhouders en leden hebben het recht de gemeenschap te verlaten. De definitie zegt ook iets over wie onderdeel mag zijn van de energiegemeenschap; dat zijn in de eerste plaats huishoudelijke afnemers.<sup>28</sup> De inspraak en zeggenschap die leden/ aandeelhouders hebben in de gemeenschap is ook een belangrijk kenmerk waarin de gemeenschap onderscheiden kan worden van andere marktpartijen, zoals een 'gewone' energieleverancier.

Tot slot zeggen de definities iets over de activiteiten die energiegemeenschappen kunnen ontwikkelen. Zo noemen de richtlijnen dat energiegemeenschappen onder andere moeten kunnen produceren, opslaan, verbruiken, aggregeren, delen. Maar het zijn niet de activiteiten die een energiegemeenschap onderneemt die een energiegemeenschap onderscheidt van een andere marktpartij, het is de *manier* waarop ze *georganiseerd* zijn, *wie zeggenschap heeft* en met *welk doel* ze de *activiteit onderneemt*.

### Leeswijzer

Dit deelrapport heeft alleen een kwalitatief deel wat bestaat uit de onderdelen 'Ontwikkelingen' en 'Randvoorwaarden voor opschaling'. Het deelrapport wordt afgesloten met een samenvatting van de inzichten.

## Ontwikkelingen

De energiegemeenschap of het energiecollectief is dus een groep aangeslotenen (vooral huishoudelijke afnemers) die met elkaar activiteiten ontwikkelt. De professionaliteit bij energiecollectieven neemt toe en dit vertaalt zich ook naar het type activiteiten die collectieven willen ontwikkelen. Steeds meer collectieven richten zich op innovatie. Zo zijn er energiecollectieven die niet alleen duurzame energie produceren, maar ook gezamenlijk investeren in een batterij en samen energie opslaan, deelauto's, slimme laadinfrastructuur. Ook wordt er geëxperimenteerd met activiteiten die een bijdrage kunnen leveren aan het ontlasten van het net en zijn er collectieven die graag zelf willen leveren aan hun leden en energieleverancier willen worden.

---

<sup>27</sup> In de praktijk zijn er heel veel verschillende soorten energiecollectieven. Niet alle energiecollectieven vallen onder deze twee definities.

<sup>28</sup> En lokale overheden en kleine ondernemingen. De beschrijving van de energiegemeenschap van burgers staat het ook toe dat andere entiteiten onderdeel zijn van de gemeenschap, maar eist wel dat de beslissingsbevoegdheid binnen de gemeenschap niet ligt bij partijen met grootschalige commerciële activiteiten. Overweging 44 bij Richtlijn 2019/944

De behoefte om actiever te kunnen worden op energiemarkten, vertaalt zich nu ook naar nieuwe Europese wet- en regelgeving, 'the Clean Energy Package (CEP). Sommige van de activiteiten in het CEP moeten Lidstaten mogelijk maken, andere activiteiten, zoals *het beheren van distributienetten*, mogen Lidstaten mogelijk maken. De opsomming van wat de energiegemeenschap allemaal moet kunnen doen, is een opdracht aan de Lidstaten om dit mogelijk te maken. De definities uit de Elektriciteitsrichtlijn en de Hernieuwbare energierichtlijn worden nu ook geïmplementeerd in de nieuwe (concept) Energiewet.<sup>29</sup>

Het opnemen van een officiële definitie alleen in de Energiewet is niet voldoende voor het opschalen van de energiegemeenschap. Het is in de eerste plaats de erkenning van een gewenste ontwikkeling. De Europese wetgever wil graag dat huishoudens en kleine bedrijven en overheden zich gezamenlijk actief inzetten en dat dit milieu-, economische of sociale gemeenschapsvoordelen oplevert. Om dit vervolgens ook mogelijk te maken zal onderzocht moeten worden hoe de realisatie van energiegemeenschappen het beste ondersteund kan worden en zal ook per activiteit die gemeenschappen willen ontwikkelen, onderzocht moeten worden of zij die, en onder welke voorwaarden, kunnen ontwikkelen.

## Randvoorwaarden voor opschaling

Voor het opschalen van energiegemeenschappen als nieuwe speler op de markt moet er aan verschillende knelpunten en randvoorwaarden gewerkt worden. Net als voor iedere andere marktpartij, geldt voor de energiegemeenschap dat het ondernemen van de activiteit technisch, juridisch en financieel mogelijk moet zijn. De randvoorwaarden die nodig zijn voor het opschalen van energiegemeenschappen als nieuwe actor in de energiemarkt, hangt dan ook grotendeels samen met de activiteiten die zij willen ontwikkelen.

Hieronder worden een aantal aandachtspunten beschreven om energiegemeenschappen te kunnen opschalen. De lijst is niet uitputtend, maar het resultaat van een eerste verkenning op basis van deskresearch en interviews.

### Kader en ondersteuning

In de eerste plaats moet er een duidelijk beeld komen van waar de energiegemeenschappen een bijdrage aan kunnen leveren: Hoe moeten gemeenschappen een rol spelen in de empowerment van de energieconsument en welke rol mogen zij vervullen op de energiemarkt? Vervolgens zal gekeken moeten worden naar **welke activiteiten** daarbij passen en onder welke voorwaarden zij die kunnen ontwikkelen.

Een belangrijke randvoorwaarden voor het opschalen van energiegemeenschappen is een **helder juridisch kader**. Dit betekent onder andere dat de activiteiten die energiegemeenschappen zouden moeten kunnen ontwikkelen, denk aan leveren, produceren, aggregeren, voldoende worden ondersteund. Daarbij moet worden onderzocht of er niet onevenredige barrières zijn die deze activiteiten belemmeren. Dit kunnen zowel juridische belemmeringen zijn als **economische belemmeringen**. In het tekstkader worden hier twee voorbeelden van geschetst.

---

<sup>29</sup> Conceptvoorstel van wet houdende regels over energiemarkten en energiesystemen (Energiewet), juli 2022, Versie Raad van State

**Twee voorbeelden van juridische en economische ondersteuning**

Stel een energiegemeenschap wil graag 1) zelf geproduceerde elektriciteit leveren aan de leden en wil 2) sturen op zoveel mogelijk lokaal en duurzaam verbruiken.

1) Om te mogen leveren aan huishoudens heeft de energiegemeenschap momenteel een leveranciersvergunning nodig. Via de vergunning worden eisen gesteld aan de leverancier om zo de eindafnemer te beschermen. De eisen kunnen voor kleinere partijen, zoals een energiegemeenschap, onevenredig belemmerend zijn. Daarom heeft de wetgever in Nederland ervoor gekozen bij de implementatie van de energiegemeenschap in de nieuwe Energiewet een ontheffing van deze verplichting tot het hebben van een leveringsvergunning voor energiegemeenschappen (en actieve afnemers) op te nemen.

2) De energiegemeenschap wil graag zoveel mogelijk lokaal en duurzaam verbruiken. Deze activiteit zou gestimuleerd kunnen worden door een tariefprikkel, denk aan een lager transporttarief als de geproduceerde energie in de directe omgeving wordt gebruikt. Door een korting te geven op de transportkosten kunnen de gemeenschapsleden worden gestimuleerd zoveel mogelijk lokaal opgewekte energie te verbruiken.

In de uitvoering van activiteiten speelt de **uitwisseling van data** een belangrijke rol. Het is van belang dat data kan worden ontsloten en worden gedeeld op een veilige en betrouwbare manier. Hierin zouden energiegemeenschappen ondersteund kunnen worden.

Ook **technische innovaties** kunnen een bijdragen leveren aan het mogelijk maken en vergemakkelijken van bepaalde activiteiten. Activiteiten zoals het lokaal bij elkaar brengen van vraag en aanbod vraagt om nieuwe manieren van communicatie en datadelen. Zo kan blockchain technology of een distributed ledger ingezet worden om een handels platform voor de gemeenschap op te zetten (Andoni, et al., 2019). Het beschikbaar maken van dergelijke innovaties kan gemeenschappen de mogelijkheid bieden meer inzicht te verwerven in hun eigen energiestromen en flexibiliteitsopties. Het kan gemeenschappen ook ondersteunen in het uitvoeren van de wettelijke taken die horen bij het uitvoeren van een activiteit, denk aan het versturen van rekeningen en het maken van een goede forecast ten aanzien van hun verbruiks- en opwekprofiel.

**De ontwikkelfase**

De energiegemeenschap is niet alleen een speler op een energiemarkt, maar is in de eerste plaats een samenwerking tussen burgers en andere lokale actoren. Collectieven ontstaan vaak bottom-up. Het opzetten van een energiegemeenschap is uitdagend en vereist veel kennis, tijd en middelen. Ook is een juiste mix van kennis, competenties en samenwerkingen binnen het lokale netwerk nodig. Er is daarom behoefte aan **goede voorbeelden** van collectieven die inzicht bieden in **de organisatie en governance** structuur van andere initiatieven en in afspraken die er gemaakt zijn tussen de gemeenschap en andere marktpartijen. Ook hebben bewoners kennis en tools nodig om een **waardepropositie** te ontwikkelen en is er behoefte aan aanpakken voor hoe je de omgeving betreft bij een nieuw initiatief.

Tot slot is een belangrijke knelpunt de **financiering** van een initiatief. De **schaalgrootte** en de **kredietwaardigheid** van de individuele initiatieven zijn twee van de belangrijkste obstakels in de toegang tot financiering. Er moet onderzocht worden hoe initiatieven gebundeld kunnen worden om zo schaal te creëren. Daarnaast moet er gewerkt worden aan

manieren om de kredietwaardigheid van initiatieven te verbeteren. Ook dit kan onder andere door schaal te creëren of door de financiering via een koepelorganisatie of andere lokale organisatie te laten lopen. Sociale woningcorporaties kunnen hier wellicht ook een rol in vervullen. Verder moeten gemeenschappen ook toegankelijk zijn voor huishoudens met een laag inkomen. Publieke en private financieringsinstrumenten die daar een rol in kunnen spelen, kunnen worden verkend.

## Samenvatting

In Nederland is er al veel ervaring met energiecollectieven rond duurzame energieproductie. De afgelopen jaren zijn er steeds meer collectieven die nieuwe activiteiten willen ontwikkelen zoals het opslaan en verhandelen van energie. Hier is nog maar beperkt ervaring mee. De Europese en Nederlandse wetgever stimuleren deze ontwikkeling en willen dat energiegemeenschappen als gelijkwaardige speler onder anders mee kunnen doen op energiemarkten, zodat zij kunnen bijdragen aan de toename en integratie van duurzame bronnen en aan de empowerment van de energieconsument.

De energiegemeenschap wordt nu verankerd in de nieuwe concept Energiewet. Vervolgens moet er worden onderzocht welke rol de gemeenschappen moeten gaan spelen op de markt en onder welke voorwaarden zij activiteiten moeten kunnen ontwikkelen. Om energiegemeenschappen op te kunnen schalen is het nodig om per activiteit te onderzoeken welke technische, juridische en economische knelpunten verholpen moeten worden om zo gunstige randvoorwaarde te creëren voor opschaling.

De opstartfase van initiatieven kent ook uitdagingen, met name op het gebied van het betrekken van bewoners en het bieden van voldoende kennis en competenties. Daarnaast is de toegang tot financiering een knelpunt en moeten nieuwe financieringsinstrumenten worden onderzocht. Daarbij moet gekeken worden naar opschalingsmogelijkheden en de verbetering van de kredietwaardigheid van collectieven.

# L. Deelrapport Human capital en arbeidsproductiviteit

## Inleiding

### Context

De arbeidsmarkt voor verduurzaming van de gebouwde omgeving kent op dit moment tekorten aan technici en ander personeel om de opgave in de gebouwde omgeving te behalen.<sup>30</sup> TKI UE ziet hierbij de volgende trend:

*‘Bouw-, installatie- en onderhoudssectoren zetten in op verhoging van de arbeidsproductiviteit en het geschikt maken van taken voor zij-instromers’*

Dit deelrapport analyseert het effect van twee innovaties op vraag en aanbod van arbeid en beschrijft de dynamiek van de arbeidsmarkt in de bouwsector. Dit onderwerp heeft daarmee een andere opzet dan andere deelrapporten.

### Leeswijzer

Dit deelrapport heeft alleen een kwalitatief deel wat bestaat uit de onderdelen ‘ontwikkelingen’ en ‘randvoorwaarden’. Onder ‘Ontwikkelingen’ zullen twee innovatiecasussen worden behandeld op basis van twee expertinterviews: 1) Geïntegreerde (prefab) installatie van warmtepomp-, ventilatie, en tapwatersysteem met Wilfried Jonker (Factory Zero), en 2) industrialisatie van gevel- en dakrenovatie voor de bestaande bouw met Berri de Jonge (Plegt-Vos). Hierbij wordt gekeken naar de innovatie zelf, het effect op de inzet van personeel en de knelpunten voor verdere ontwikkeling. Dit deelrapport geeft daarmee geen volledige beschrijving van de ontwikkelingen in de praktijk. Vervolgens zal onder ‘Randvoorwaarden’ gekeken worden hoe vraag en aanbod in de arbeidsmarkt voor verduurzaming samenhangen en welke dynamieken er op kunnen treden als deze uit balans raken. Het deelrapport wordt afgesloten met een samenvatting van de inzichten.

## Ontwikkelingen

### Innovatiecasus Factory Zero

Factory Zero maakt een integrated Climate Energy Module (iCEM) die een woning kan voorzien van ventilatie, ruimteverwarming en warmtapwater (middels een lucht-water warmtepomp). Optioneel kunnen zon-PV of koeling worden toegevoegd. Het productieproces van Factory Zero is grotendeels verplaatst van de bouwplaats naar een fabriek waar de module in elkaar wordt gezet om vervolgens alleen nog geplaatst te hoeven worden in de woning. Factory Zero plaatst op dit moment ongeveer 1.000 iCEMs per jaar.

---

<sup>30</sup> PBL-ROA (2022) Inzicht in arbeidsmarktknelpunten voor de uitvoering van het klimaatbeleid; UWV (2022) Klimaatbanen in de gebouwde omgeving; EIB (2022) Notitie analyse bouwcapaciteit; SER (2018) Energietransitie en werkgelegenheid; Techniek Nederland (2022) Economische vooruitzichten 2023 en verder; FME (2020) Techniek voor een toekomstbestendige gebouwde omgeving.

### Het effect van de innovatie

Het doel van de aanpassingen in dit proces is het terugbrengen van de inzet van specialistische installateurs bij de installatie. Door de productie naar de fabriek te verplaatsen kunnen veel taken worden gedaan door personeel zonder specialistische opleiding en certificering. Specialististen kunnen zich vervolgens op de werkvloer bezighouden met specialistische taken zoals het toevoegen van F-gassen en inregelen van het apparaat. Deze specialisten hoeven niet meer naar de bouwplaats toe. De iCEM-modules zijn plug-n-play wat betekent dat de installateurs op de bouwplaats binnen een paar uur (dagdeel) de gehele installatie geïnstalleerd kunnen krijgen. Door deze taakspecialisatie is de totale arbeidsinzet per module teruggebracht van 40 uur naar 8 uur en de inzet van specialistische installateurs van 10 uur naar 4 uur.

Het arbeidspotentieel is hiermee ook vergroot door specialistische installateurs ook op hogere leeftijd inzetbaar te houden. Dit levert grofweg 10 jaar verlenging van inzetbaarheid op tot zij met pensioen gaan. Daarnaast kunnen taken nu worden uitgevoerd door personeel dat van buiten de sector wordt aangetrokken. Deze mensen zouden niet op een bouwplaats willen werken, maar wel in de fabriek. Ook is dit werk makkelijker toegankelijk voor mensen met een afstand tot de arbeidsmarkt.

### Potentieel en verdere ontwikkeling

Uitgaande van de eerdergenoemde cijfers kan een eenvoudige berekening van het potentieel van deze manier van werken worden gemaakt. Uitgaande van het kabinetsdoel van 100.000 nieuwbouwwoningen per jaar plus de grofweg 450.000 cv-installaties die jaarlijks vervangen worden, is de totale markt voor dit type installatie 550.000 installaties per jaar. Hiervan schat Factory Zero dat mogelijk 80% in aanmerking komen voor standaardisatie en de manier van fabrieksmatig produceren. In 20% van de gevallen zal dit te ingewikkeld zijn en zal maatwerk nodig blijven.

Het potentieel dat dan overblijft zijn 440.000 installaties per jaar. Uitgaande dat dezelfde besparing als bij Factory Zero gerealiseerd kan worden zou dit betekenen dat er 13,2 miljoen arbeidsuren te besparen valt waarvan 2,64 miljoen specialistische arbeidsuren. Bij een standaard 40-urige werkweek komt dit uit op respectievelijk ongeveer 80.000 en 16.000 arbeidsjaren. Tegelijkertijd kan het arbeidspotentieel vergroot worden door mensen buiten de bouwsector aan te trekken voor het werk in de fabriek. Dit laatste is op dit moment nog lastig te kwantificeren.

Verdere ontwikkeling van het concept ziet Factory Zero met name op het gebied van integratie met andere bouwdeelen die nodig zijn voor verduurzaming. Een combinatie met het renoveren van bijvoorbeeld de gevel van een woning en modulairdere onderdelen ziet Factory Zero als kansrijke richtingen. Verdere optimalisatie van het productieproces met bijvoorbeeld robotisering komt pas als er echt schaalvergroting heeft plaatsgevonden.

### Innovatiecasus Plegt-Vos

Plegt-Vos heeft in juni 2022 een Slimme Huizenfabriek geopend in Almelo. De aanleiding hiervoor was de bouwcrisis tussen 2008 en 2013. De terugval in personeel was moeilijk te herstellen en Plegt-Vos zag aankomen dat zij meer moesten doen met minder mensen. Om deze reden zijn zij overgeschakeld voor een deel van hun productie (nu grofweg 40%) naar een andere manier van produceren door middel van een verregaande standaardisatie en automatisering om meer prefab te kunnen bouwen.



Het gaat hierbij ook om het standaardiseren van processen op meerdere locaties en de input en output uniform maken. Dit vergroot ook de uitwisselbaarheid van personeel tussen locaties. Zo kunnen de werkvoorbereiders de capaciteit tussen kantoren verdelen en van elkaar overnemen als dat nodig is.

### Het effect van de innovatie

Plegt-Vos zit nog midden in het transformatieproces. Hierdoor zijn nog niet concrete cijfers te geven over de verwachte winst in arbeidsproductiviteit die daadwerkelijk bereikt is. Nog niet alle potentie die deze manier van werken met zich meebrengt is reeds gerealiseerd. Wel kan gesteld worden dat de automatisering en robotisering groot potentieel heeft. Zo kunnen metsel- en nagelrobots de taak van meer dan 100 arbeidskrachten overnemen. Er kan op dit moment al meer werk verzet worden met minder vaklieden in de fabriek.

Het standaardiseren en de uitwisseling van personeel tussen locaties zorgt voor een betere inzetbaarheid en waarschijnlijk hogere productiviteit. Daarnaast zorgt het dat innovaties en verbeteringen in processen sneller gedeeld kunnen worden tussen locaties.

De fabrieksmedewerkers vallen ook onder de timmer-cao waardoor Plegt-Vos aantrekkelijker is voor personeel dan ander fabriekswerk op de arbeidsmarkt, maar ze ook gebonden zijn aan relatief hoge lonen. Dit helpt op dit moment wel bij het aantrekken van personeel van buiten de bouw die normaal niet zoekt naar dit type werk.

Een belangrijk voordeel dat Plegt-Vos al wel ziet is toegenomen arbeidssatisfactie. Personeel op de bouwplaats is tevreden dat de producten uit de fabriek goed passen en er minder tijd verloren gaat met op locatie oplossingen bedenken. Personeel in de fabriek hoeft minder fysiek werk te doen en kan afwisselender werk in de fabriek oppakken. Vakmensen die wel graag op maat gemaakte projecten doen, kunnen zich hierdoor meer specialiseren op dit type klussen. De fabriek trekt in die zin meer personeel aan dat procesverbeteringen leuk vindt en minder degene die probleemoplossend denken.

### Potentieel en verdere ontwikkeling

De potentie van deze manier van produceren is nog niet geheel bereikt. Het proces is al goed toe te passen in de nieuwbouw, maar sluit nog niet helemaal aan op de vraag in de renovatiemarkt. Waar het voor personeel in de fabriek niet meer nodig is om een bouwkundige tekening te kunnen lezen, loopt Plegt-Vos wel aan tegen een bottleneck in de engineering van hun producten voor renovatie. Het aantal ontwerpers dat nu nodig is om de capaciteit van de fabriek te vullen is nu niet beschikbaar.

Het toepassen van gestandaardiseerde producten voor renovatie hangt nu sterk op het goed opnemen van werken. Hoewel er met contingenten gewerkt kan worden bij het bepalen van de omvang van de totale markt, blijft het checken van de specifieke situatie wel nodig om de producten die Plegt-Vos gestandaardiseerd kan maken, goed te laten passen.

Met het clusteren van de vraag van vergelijkbare woningen zou een grote stap gezet kunnen worden om het potentieel van industrialisatie verder te kunnen ontsluiten voor de renovatiemarkt. Daarmee kan een groot deel van de engineering van producten gestandaardiseerd worden dit zou een efficiëntieslag betekenen. Het anders aanbesteden door corporaties zou hieraan een bijdrage kunnen leveren.

## Randvoorwaarden

De versnelling die nodig is voor de verduurzaming voor de gebouwde omgeving en overheidsinstrumenten die hierop gericht zijn, zorgt ervoor dat extra verduurzaming (bovenop wat vanzelf zou gebeuren) nodig is. Dit zorgt voor krapte op de arbeidsmarkt. Deze krapte is echter niet evenredig verdeeld en zal voor sommige beroepen groter zijn dan voor anderen. Hieronder beschrijven we de effecten op de vraag naar arbeidskrachten en het aanbod eerst apart en vervolgens kijken we naar de dynamiek tussen beide.

### Vraag

Door de klimaatdoelstellingen en overheidsinstrumenten gericht op de gebouwde omgeving zal de productie in de bouwsector toenemen en daarmee neemt ook de vraag naar bepaalde beroepen toe. Dit kan leiden tot tekorten. Zowel generiek als voor specifieke beroepsgroepen. De toename van de vraag door overheidsinstrumenten is boven op een verondersteld basispad. Zonder doelstelling is er geen sprake van knelpunten.

Tegelijkertijd neemt de vraag naar bepaalde andere beroepen af. Zo kan het zijn dat door een normering van warmtepompen de vraag naar warmtepompinstallateurs toeneemt, maar de vraag naar CV-installateurs afneemt.

Als niet kan worden voldaan aan de toegenomen vraag, stijgt de prijs van arbeid. Hierdoor kan het zijn dat een deel van de vraag weer wegvalt (en dus de doelstelling niet wordt behaald).

### Aanbod

Het aanbod van arbeid kan op grofweg twee manieren uitbreiden om te voldoen aan de vraag: een stijging van de arbeidsproductiviteit of een toename in het aantal mensen in beroepsgroepen.

Ten eerste kan arbeidsproductiviteit toenemen. Hiermee wordt de productie per arbeidsjaar bedoeld. Zo kan een tijdelijke drukte na een periode van relatieve rust zorgen dat professionals meer werk verzetten. Daarnaast kan arbeidsproductiviteit toenemen door taakspecialisatie (i.e. een deel van de taken van specialisten over te dragen naar hulpkrachten) waardoor de specialisten kunnen focussen op de complexere taken waarvoor een opleiding of ervaring nodig is. Daarmee kan de vraag naar specialisten vervangen worden door vraag naar hulpkrachten. Hierdoor kan krapte voor specifieke beroepen afnemen en het arbeidspotentieel groeien door mensen van buiten de sector aan te trekken voor een deel van de taken.

Taken kunnen ook verschuiven in de keten. Als meer plug-and-play installaties worden ontwikkeld, kan werk verschuiven van de installatieplek naar een fabriek. Dit verhoogt over het algemeen de productiviteit en mogelijkheden voor taakspecialisatie en automatisering. Het opent tevens de deur voor groepen op de arbeidsmarkt die niet op een bouwplaats kunnen of willen werken. Dat kan gaan om installateurs die minder fysiek werk willen doen, maar ook nieuwe groepen die hiervoor niet in de sector werkten. Het kan ook de reistijd voor de hoogst betaalde specialisten beperken door hun werk vooral in de fabriek te concentreren. Ook betekent het dat dezelfde installateur meer installaties kan plaatsen omdat deze op locatie minder tijd per installatie kwijt is.

Ten slotte is het zo dat als er krapte ontstaat in een beroepsgroep, druk komt te staan op de lonen. In dat geval kan het voor bedrijven interessant zijn om te investeren in

arbeidsbesparende technieken. Hiermee verhoogt de arbeidsproductiviteit door automatisering of robotisering.

Ten tweede kan het aantal mensen in specifiek knellende beroepsgroepen toenemen. In elke sector is een natuurlijk verloop (in- en uitstroom) van personeel. Instroom van personeel vindt plaats vanuit opleidingen, zijinstroom of buitenland. Uitstroom van personeel vindt plaats naar pensioen, zijuitstroom of buitenland. Door instroom te vergroten of uitstroom te beperken, groeit het aanbod van personeel in een bepaalde beroepsgroep. Arbeidsvoorwaarden kunnen verbeteren om mensen in de sector te houden of meer aan te trekken. Dit kan bijvoorbeeld salaris zijn, maar ook aantrekkelijke arbeidstijden, uitdagend werk, minder fysiek zwaar werk, goede secundaire arbeidsvoorwaarden, een goed pensioen, etc.

Daarbij moet wel worden opgemerkt dat de krapte zich niet alleen bevindt in de gebouwde omgeving. In theorie zijn er meer dan genoeg geschoolde mensen om (met een korte cursus voor techniek-specifieke kennis) de opgave in de gebouwde omgeving te voldoen. Deze mensen zijn echter ook hard nodig in andere sectoren. Via de arbeidsmarkt concurreren de verschillende sectoren om hetzelfde personeel. De sector waar de beste arbeidsvoorwaarden kunnen worden geboden zal het meeste personeel aantrekken. Hoe groter het verschil tussen sectoren hoe groter de prikkel voor personeel om zich om te laten scholen en van baan te wisselen.

### Samenspel tussen vraag en aanbod

De interactie tussen vraag en aanbod zal plaatsvinden via de prijs van arbeid (salaris plus kosten voor secundaire arbeidsvoorwaarden). Die bepaalt vervolgens de prijs van productie. Voorspelling over tekorten in specifieke sectoren zijn op korte termijn te maken, maar op langere termijn ontstaat een ingewikkelde dynamiek tussen vraag en aanbod die lastig te voorspellen is. Een evenwicht tussen vraag en aanbod van arbeid zal zich vertalen in een prijs van arbeid die in lijn ligt met de ontwikkeling in de gehele economie. De snelheid van het bereiken van dit evenwicht verschilt per specialisme en de algemene staat van de sector.

De verwachte recessie kan een katalysator zijn voor een verschuiving op de arbeidsmarkt naar beroepen waar veel vraag naar is. Het is te verwachten dat de minst productieve banen, die tijdens de corona-epidemie door steunmaatregelen of lage rentes zijn blijven bestaan, plaats maken voor banen in sectoren waar een groot tekort is.

## Samenvatting

De klimaatopgave in de gebouwde omgeving loopt op dit moment aan tegen knelpunten in de arbeidsmarkt. Op de middellange termijn kunnen deze knelpunten zich door marktwerking mogelijk vanzelf oplossen, maar het kan de energietransitie vertragen waar juist versnelling gewenst is. Om te kunnen voldoen aan de vraag kan het aanbod worden uitgebreid door het verhogen van de arbeidsproductiviteit en door het aantrekken van meer arbeidskrachten.

Automatisering en robotisering kunnen bijvoorbeeld gestandaardiseerde taken overnemen. Ook kunnen via taakspecialisatie de meest schaarse arbeidskrachten worden ontlast en meer taken worden overgenomen door hulpkrachten.

Deze twee trends verhogen de arbeidsproductiviteit en verlagen de vraag naar arbeid die nodig is om de opgaven te realiseren. Ten slotte kan het verplaatsen van werk van de bouwplaats naar een fabriek het arbeidsaanbod uitbreiden met mensen van buiten de bouwsector. Hierdoor neemt het arbeidsaanbod in de bouw toe.

## Bibliografie

- Andoni, M., Robu, V., Flynn, D., Abram, S., Geach, D., Jenkins, D., . . . Peacock, A. (2019). Blockchain technology in the energy sector: a systematic review of challenges and opportunities. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 100, 143-174.
- Arcadis. (2020). Kostenkengetallen Energiebesparende maatregelen bestaande woningbouw. Arcadis.
- Binnenklimaat Nederland. (2022). *Programma van Eisen 'Gezonde woningen'*.
- CBS. (2022). *CBS statline - Woningen; hoofdverwarmingsinstallaties, regio*.
- CE Delft. (2020). *Kansen voor thermische opslagsystemen*.
- CE Delft. (2021). *Factsheet Warmwaterboilers*. Delft: CE Delft. Opgehaald van [https://ce.nl/wp-content/uploads/2021/04/21\\_Factsheet-Warmwaterboilers\\_DEF.pdf](https://ce.nl/wp-content/uploads/2021/04/21_Factsheet-Warmwaterboilers_DEF.pdf)
- CO2-emissiefactoren. (2022). *Lijst emissiefactoren - Warmtelevering*. Opgehaald van <https://www.co2emissiefactoren.nl/lijst-emissiefactoren/>
- De Groot, S. (2020). *Economic and thermal performance of Ecovat and comparable thermal energy storage systems*. Veghel: Ecovat. Opgehaald van [https://www.ecovat.eu/wp-content/uploads/2020/06/20200609-Ecovat\\_comparison\\_Final\\_ENG-gecomprimeerd.pdf](https://www.ecovat.eu/wp-content/uploads/2020/06/20200609-Ecovat_comparison_Final_ENG-gecomprimeerd.pdf)
- De Heer, H., Fiorini, L. v., & Winters, E. (2022). *Collectieve zelfconsumptie: een bouwsteen om het maatschappelijk draagvlak voor de energietransitie te vergroten?* TKI Uerban Energy.
- de Koning, N., Kooger, R., Hermans, L., & Tigchelaar, C. (2019). *Aardgasvrij wonen: drijfveren en barrières van bewoners*. TNO 2019 P12006.
- Dinkelmann, D., & Menkveld, M. (2021). *Berekening duurzaamheid van warmtebronnen*. Utrecht: TNO. Opgehaald van <https://repository.tno.nl/islandora/object/uuid%3A52295d38-8688-493b-a571-ef5ccfb4a59f>
- DNE Research. (2021). *Nationaal Warmtenet Trendrapport 2021*. Dutch New Energy. Opgehaald van <https://www.dutchnewenergy.nl/trendrapporten/nationaal-warmtenet-trendrapport-2021/>
- ETIP. (2020). *etip-pv.eu*. Opgehaald van <https://etip-pv.eu/publications/fact-sheets/>
- Florence School of Regulation. (2021). *Peer-to-Peer, Energy Communities, Legal Definitions and Access to Markets*.
- Fortes. (2018). *Aquaheat stations prijslijst - Warmte units en toebehoren*. Opgeroepen op September 2022, van <https://fortes-es.nl/wp-content/uploads/2018/08/aquaheat-stations-prijslijst-2018.pdf>
- Goldschmidt, G., Wagner, L., Pietzecker, R., & Friedrich, L. (2021). Technological learning for resource efficient terawatt scale photovoltaics. *Energy & Environmental Science*, 14, 5147.
- Hermans, L., van Lidth, M., Klösters, M., Tigchelaar, C., & Kooger, R. (2020). *Subsidie is een suikeroom. En lening een lange man in een zwarte jas. Onderzoek naar perceptie van financieringsconstructen voor verduurzaming woning*. TNO 2020 P12193.
- Hooff, W. v., Kuijers, T., Quax, R., & Witte, J. (2021). *Ruimtelijk potentieel van zonnestroom in Nederland*.
- Jacobs, P. (2021). *Bijna geen enkele woning voldoet aan nieuwe WHO fijnstofnorm*. TVVL.
- Jacobs, P., Vijlbrief, O., & Kemp, R. (2020). *Openbaar eindrapport MEED: Multifunctionele Energie Efficiënte Douche cabine*. TNO.
- Kort, J., de Koning, N., & Kooger, R. (2020). *Onderzoek Enpuls: hoe krijg je bewoners warm voor een warmtenet?* TNO 2020 P11460.
- Lensink, S., & Schoots, K. (2021). *Eindadvies basisbedragen SDE++2022*. PBL.

- Lenzmann, F., Kester, J., Lindfors, S., Lampinen, V., Radavicius, T., & Regrettier, T. (2021). *Intermediate Environmental Evaluation (Deliverable report D8.2, EU Project HighLite)*.
- Moerman, A., Blokker, M., van der Blom, E., & van Veelen, I. (2016). *Inzicht in efficiëntie van warmtapwaterbereiding voor diversiteit aan huishoudens*. KWR.
- Mulder, G., Nauta, J., Klerks, S., & Donkervoort, R. (2021). *In de volgende versnelling naar een klimaatneutrale gebouwde omgeving – Slimmer, goedkoper en efficiënter aan de hand van contingents*.
- PBL. (2021). *Functioneel ontwerp Vesta Mais 5.0*. Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving. Opgehaald van <https://www.pbl.nl/sites/default/files/downloads/pbl-2021-functioneel-ontwerp-vesta-mais-5.0-4583.pdf>
- PBL. (2021). *Klimaat- en energieverkenning 2021*. PBL-publicatienummer: 4681.
- Pothof, I., Vreeken, T., & Meerkerk, M. v. (2022). *Field measurements on lower radiator temperatures in existing buildings*. Manuscript for Energy and Buildings.
- Rooijers, F., & Jongasma, C. (2020). *Verkenning ontwikkeling CO2-vrije flexibele energietechnieken*. CE Delft.
- RVO. (2022). *Standaard en streefwaarden voor woningisolatie*. Opgeroepen op September 2022, van <https://www.rvo.nl/onderwerpen/wetten-en-regels-gebouwen/standaard-streefwaarden-woningisolatie>
- Schepers, B., & Dehens, J. (2020). *Kansen voor thermische opslagsystemen*. Delft: CE Delft.
- Segers, R., Niessink, R., van den Oever, R., & Menkveld, M. (2020). *Warmtemonitor 2019*. RVO.
- Sinke, W., Folkerts, W., & Weeber, A. (2021). *Zonpositief: Zonne-energie op weg naar impact*. TNO.
- Theelen, M., Kester, J., Hauck, M., Spaeth, M., Kuypers, A., & Sinke, W. (2021). *Tijd voor duurzame zonne-energie*. TNO.
- Topsector Energie-systeemintegratie. (2021). *Energy Hubs - Vitale knooppunten in een energiesysteem*.
- Van Capellen, L., Wielders, L., & Scholten, T. (2021). *Emissiefactor elektriciteit uit fossiele bronnen*. CE Delft.
- Van Hooff, W., Kuijers, C., Quax, R., & Witte, J. (2021). *Ruimtelijk potentieel van zonnestroom in Nederland*. TKI Urban Energy.
- Van Petersen, D. (2021). *Kennisdossier legionella in de energietransitie*. TKI Urban Energy.
- Wirth, H. (2022). *Aktuelle Fakten zur Fotovoltaik in Deutschland*. Fraunhofer ISE.

## Bijlage Algemene kentallen

In dit deel lichten we de generieke kentallen toe die zijn gebruikt voor de berekeningen van de woningvoorraad, de nationale kosten en de CO<sub>2</sub>-emissies. Meer specifieke kentallen en aannames voor een deelrapport worden in de aparte bijlages vermeld.

### Woningvoorraad

Er is een databestand van de woningvoorraad gemaakt onderverdeeld naar type woning (eengezins en meergezins), type eigendom (particuliere koop, particuliere huur en sociale huur) en bouwjaarklasse. De woningvoorraad en de gemiddelde warmtevraag voor deze verschillende woningtypologieën is ontleend aan de (referentiewoningen in de) Klimaat en Energieverkenning (KEV 2021).

Door woningaantallen en gemiddelde warmtevraag met elkaar te vermenigvuldigen is de totale warmtevraag berekend. Vervolgens is deze vergeleken met de warmtevraag op basis van de energiestatistiek in de Monitor Energiebesparing Gebouwde Omgeving (voor alle energiedragers voor warmte). Er is voor ieder zichtjaar een correctiefactor bepaald op de warmtevraag per woning zodat de totale warmtevraag uitkomt op de statistiek (warmtevraag voor alle energiedragers).

Een inschatting van het aandeel ruimteverwarming op het warmteverbruik van huishoudens is afkomstig uit de Monitor Energiebesparing Gebouwde Omgeving. Deze ligt rond de 80% en is in deze berekening constant verondersteld. In de monitor ligt het aandeel warmtapwater op 18% en het aandeel koken op 2%.

### Nationale kosten

Er is een berekening gemaakt van de nationale kosten: het saldo van de kosten en baten voor Nederland als geheel, exclusief de transacties tussen partijen onderling. De nationale kosten zijn opgebouwd uit:

- Investeringskosten per jaar (annuïteit). De initiële investeringskosten zijn omgerekend naar een jaarlijkse afschrijving uitgaande met een discontovoet van 3%
- Operationele kosten
- Energiekosten (welke lager worden bij energiebesparing).

Specifiek zijn de nationale meerkosten berekend, de additionele kosten ten opzichte van de kosten volgens de aannames in de KEV.

Om nationale kosten te berekenen, moet gekeken worden naar groothandelsprijzen (Tabel 3). Dit zijn de prijzen exclusief energiebelasting, ODE-opslag en BTW. Deze extra opslagen verhogen de tarieven voor eindgebruikers. Omdat nationaal gezien die belasting ook opbrengsten met zich meebrengt voor de overheid, worden die opslagen niet meegerekend als nationale kosten. Ook zijn eventuele subsidies niet meegenomen.

De jaarlijkse energiekosten voor aardgas en elektriciteit zijn berekend met het scenario voor de groothandelsprijzen in de Klimaat- en Energieverkenning 2021 voor 2030.

Tabel 3 Groothandelsprijzen per energiedrager uit de KEV2021

| Groothandelsprijs energiedrager | Eenheid                     | 2020  | 2030  |
|---------------------------------|-----------------------------|-------|-------|
| Aardgas                         | Euro2020 per m <sup>3</sup> | 0,13  | 0,22  |
| Elektriciteit                   | Euro2020 per kWh            | 0,037 | 0,050 |

### CO<sub>2</sub>-emissies

Een afnemende vraag naar aardgas en/of een toenemende elektriciteitsvraag leidt tot een verandering in de uitstoot van CO<sub>2</sub>. Hierbij bekijken we zowel de directe als indirecte emissies:

- Directe CO<sub>2</sub>-emissies: de emissies direct vanuit de gebouwde omgeving
- Indirecte CO<sub>2</sub>-emissies: emissies buiten de sector gebouwde omgeving, zoals emissie in de elektriciteitsopwekking of door warmteopwek voor warmtenetten

Voor de emissiefactor van aardgas is RVO als bron aangehouden: 56,4 kg/GJ aardgas. In de omrekening van het gasverbruik in m<sup>3</sup> naar GJ is de calorische onderwaarde (LHV) van aardgas (31,65 MJ/m<sup>3</sup>) gebruikt.

Voor de emissiefactor van elektriciteit is de CBS statistiek t/m 2019 bekend. Voor de toekomst zijn de projecties gebruikt in de KEV2021 Integrale methode. In 2020 is deze 0,25 kgCO<sub>2</sub>/kWh o.b.v. de KEV 2021 raming. In 2030 is deze 0,09 kgCO<sub>2</sub>/kWh o.b.v. de KEV 2021 raming.

## Bijlage A Zon PV

### Kentallen

Voor de berekeningen in dit rapport zijn de volgende kentallen omtrent de technologie en marktomvang van PV beschreven in Tabel 4 en Tabel 5. Voor de berekening van de nationale (meer-) kosten is het gemiddelde genomen van de LCOE's 2020 en 2030 om rekening te houden met het feit, dat de PV-installaties, die in 2030 elektriciteit produceren over de periode 2020 tot 2030 geïnstalleerd gaan worden. Voor STEG-centrales in 2030 is een LCOE van 0,069 €/kWh aangenomen (Rooijers & Jongma, 2020).

Voor de berekening van de netto emissiereductie is ervan uitgegaan, dat de CO<sub>2</sub>-emissies van PV nihil zijn (er is dus geen rekening gehouden met levenscyclusemissies). De voor STEG centrales gebruikte emissiefactor is 0,357 g CO<sub>2</sub>/kWh (Van Capellen, Wielders, & Scholten, 2021).

Tabel 4 Kentallen omtrent PV technologie (ETIP, 2020)

|                        | Zichtjaar | LCOE (€/kWh) |
|------------------------|-----------|--------------|
| PV op woningen         | 2020      | 0,07         |
|                        | 2030      | 0,042        |
| PV op utiliteiten      | 2020      | 0,052        |
|                        | 2030      | 0,035        |
| PV in het buitengebied | 2020      | 0,042        |
|                        | 2030      | 0,026        |

Tabel 5 Kentallen omtrent marktomvang bij verschillende potentiële marktontwikkelingen in 2030. Het Basispad is het potentieel dat in de KEV wordt benut (PBL, 2021).

|                        | Potentiële marktontwikkeling | Elektriciteitsproductie (TWh) | Extra elektriciteitsproductie t.o.v. KEV raming (TWh) |
|------------------------|------------------------------|-------------------------------|---|
| PV op woningen         | Basispad                     | 8,5                           | -   |
|                        | Verdubbeling                 | 17                            | 8,5   |
|                        | Technisch potentieel         | 82                            | 73,5  |
| PV op utiliteiten      | Basispad                     | 9,5                           | -   |
|                        | Verdubbeling                 | 19                            | 9,5   |
|                        | Technisch potentieel         | 98                            | 88,5  |
| PV in het buitengebied | Basispad                     | 5                             | -   |
|                        | Verdubbeling                 | 10                            | 5   |
|                        | Technisch potentieel         | 40                            | 35  |



## Bijlage B Industrialisatie van renovatieconcepten

### Kentallen

De kentallen voor de gasbesparing en de investeringskosten van renovaties zijn afgeleid van berekeningen die voor Standaard en Streefwaarden (RVO, 2022) zijn gedaan. Daarbij is onderscheid gemaakt in niveau 3 en 4 conform Standaard en Streefwaarden (Tabel 6 en Tabel 7). Voor de kosten van isolatieniveau 4 met industrialisatie is 30% van de investeringskosten van niveau 4 afgetrokken vanwege de inschatting van de geïnterviewde experts dat een industriële aanpak, in ieder geval door dakrenovatie, 20-40% goedkoper kan dan de traditionele manier. De jaarlijkse investeringskosten (annuity) van renovaties is berekend uitgaande van een afschrijfperiode van 50 jaar en discontovoet van 3%.

Tabel 6 Het aantal woningen en kentallen voor isolatieniveau 3 van S&S

| Doelgroep               | Aantal gerenoveerde woningen | Besparing (m <sup>3</sup> /woning/jaar) | Kosten (euro/woning) |
|-------------------------|------------------------------|---|----------------------|
| meergezins huurwoningen | 1.487.214                    | 381                                     | 5.241                |
| meergezins koopwoningen | 637.984                      | 418                                     | 6.085                |
| eengezins huurwoningen  | 1.053.044                    | 640                                     | 10.508               |
| eengezins koopwoningen  | 2.915.152                    | 789                                     | 13.763               |

Tabel 7 De intensiteiten en kentallen voor isolatieniveau 4 van S&S met 30% kostenreductie door industrialisatie

| Doelgroep               | Aantal gerenoveerde woningen | Besparing (m <sup>3</sup> /woning/jaar) | Kosten (euro/woning) |
|-------------------------|------------------------------|---|----------------------|
| meergezins huurwoningen | 1.487.214                    | 672                                     | 13.911               |
| meergezins koopwoningen | 637.984                      | 757                                     | 16.663               |
| eengezins huurwoningen  | 1.053.044                    | 1.049                                   | 21.007               |
| eengezins koopwoningen  | 2.915.152                    | 1.362                                   | 30.046               |

### Impact

#### Huidige techniek

Voor de huidige techniek gaan we ervan uit dat de woningen op de klassieke manier worden verbeterd naar isolatieniveau 3 van 'Standaard en Streefwaarden'. Tabel 8 laat voor de potentiële marktontwikkelingen zien hoeveel woningen worden gerenoveerd, wat de CO<sub>2</sub> reductie is door energiebesparing en wat de nationale kosten zijn.

Tabel 8 Impact van de potentiële marktontwikkelingen van woningrenovaties op de klassieke manier naar isolatieniveau 3 van Standaard en Streefwaarden.

| Marktontwikkeling                                  | Eengezinswoningen |           | Meergezinswoningen |           |
|--|-------------------|-----------|--------------------|-----------|
|  | Koop              | Huur      | Koop               | Huur      |
| <b>Aantal woningen</b>                             |                   |           |                    |           |
| Natuurlijk moment                                  | 583.030           | 210.609   | 127.597            | 297.443   |
| Technisch potentieel                               | 2.915.152         | 1.053.044 | 637.984            | 1.487.214 |
| <b>Besparing gas PJ</b>                            |                   |           |                    |           |
| Natuurlijk moment                                  | 15                | 4         | 2                  | 4         |
| Technisch potentieel                               | 73                | 21        | 8                  | 18        |
| <b>CO2 reductie Mton</b>                           |                   |           |                    |           |
| Natuurlijk moment                                  | 0,8               | 0,2       | 0,1                | 0,2       |
| Technisch potentieel                               | 4,1               | 1,2       | 0,5                | 1,0       |
| <b>Besparing op energiekosten gas miljard euro</b> |                   |           |                    |           |
| Natuurlijk moment                                  | 0,10              | 0,03      | 0,01               | 0,03      |
| Technisch potentieel                               | 0,52              | 0,15      | 0,06               | 0,13      |
| <b>Nationale kosten in miljard euro per jaar</b>   |                   |           |                    |           |
| Natuurlijk moment                                  | 0,4               | 0,1       | 0,0                | 0,1       |
| Technisch potentieel                               | 2,2               | 0,7       | 0,2                | 0,5       |

### Innovatieve techniek

Voor de berekeningen van de innovatieve techniek worden de woningen op de industriële manier gerenoveerd en daar hoort isolatieniveau 4 van Standaard en Streefwaarden bij. Ook hier zijn de meerkosten afgeleid van S&S, maar de kosten zijn vervolgens met 30% verminderd zoals dat uit de interviews naar voren komt. Tabel 9 laat dus zien wat het effect is als er behalve meer, ook beter wordt gerenoveerd. Ter vergelijking worden ook de nationale kosten weergegeven voor renovatie naar niveau 4 op de traditionele manier zonder 30% kostenreductie.

Tabel 9 Impact van de potentiële marktontwikkelingen voor verschillende doelgroepen met een industriële aanpak naar isolatieniveau 4 van Standaard en Streefwaarden.

| Marktontwikkeling  | eengezinswoningen |           | meergezinswoningen |           |
|--|-------------------|-----------|--------------------|-----------|
|  | Koop              | Huur      | Koop               | Huur      |
| <b>Aantal woningen</b>   |                   |           |                    |           |
| Natuurlijk moment  | 583.030           | 210.609   | 127.597            | 297.443   |
| Technisch potentieel   | 2.915.152         | 1.053.044 | 637.984            | 1.487.214 |
| <b>Besparing gas PJ</b>  |                   |           |                    |           |
| Natuurlijk moment  | 25                | 7         | 3                  | 6         |
| Technisch potentieel   | 126               | 35        | 15                 | 32        |
| <b>Directe CO2 reductie Mton</b>                               |                   |           |                    |           |
| Natuurlijk moment  | 1,4               | 0,4       | 0,2                | 0,4       |
| Technisch potentieel   | 7,1               | 2,0       | 0,9                | 1,8       |
| <b>Besparing op energiekosten gas miljard euro</b>             |                   |           |                    |           |
| Natuurlijk moment  | 0,2               | 0,0       | 0,0                | 0,0       |
| Technisch potentieel   | 0,9               | 0,2       | 0,1                | 0,2       |
| <b>Nationale kosten in miljard euro per jaar</b>               |                   |           |                    |           |
| Natuurlijk moment  | 1,0               | 0,3       | 0,1                | 0,2       |
| Technisch potentieel   | 5,1               | 1,4       | 0,6                | 1,2       |
| <b>Nationale kosten met innovatie in miljard euro per jaar</b> |                   |           |                    |           |
| Natuurlijk moment  | 0,7               | 0,2       | 0,1                | 0,2       |
| Technisch potentieel   | 3,6               | 1,0       | 0,4                | 0,9       |

## Bijlage D Warmtepompen

### Kentallen

Er is onderscheid gemaakt naar All-electric lucht-waterwarmtepompen, All-electric bodemgekoppelde warmtepompsystemen en hybride systemen bestaande uit een luchtwarmtepomp en gasketel. De gehanteerde kentallen voor de investeringskosten, onderhoudskosten en gemiddelde rendement over een stookseizoen (de SPF, Seasonal Performance Factor) zijn afkomstig uit de TNO Technology factsheets<sup>31</sup>. Dit is een gemiddelde gebaseerd op meerdere literatuurbronnen. Aannames voor de “huidige technologie” zijn uiteengezet Tabel 10. De tabel geeft ook de kosten van de cv-ketel die als referentie is gebruikt in de berekening van de meerkosten. De kosten van de cv-ketel zijn ontleend aan het TNO dashboard “Eindgebruikerskosten voor woningen”<sup>32</sup>.

Tabel 10 In de impactberekening gebruikte kentallen (SPF: Seasonal Performance Factor)

| Technologie  | Parameter              | Eenheid              | Waarde |
|--|------------------------|----------------------|--------|
| <b>All-electric luchtwarmtepomp</b>                    | Gemiddelde investering | Euro2020/woning      | 8.349  |
|  | Onderhoudskosten       | Euro2020/woning/jaar | 141    |
|  | SPF ruimteverwarming   | -                    | 3,1    |
|  | SPF warmtapwater       | -                    | 2,0    |
| <b>Hybride systeem met cv-ketel en luchtwarmtepomp</b> | Gemiddelde investering | Euro2020/woning      | 5.150  |
|  | Onderhoudskosten       | Euro2020/woning/jaar | 193    |
|  | SPF ruimteverwarming   | -                    | 3,5    |
|  | SPF warmtapwater       | -                    | 2,0    |
| <b>All-electric bodemwarmtepomp</b>                    | Gemiddelde investering | Euro2020/woning      | 13.873 |
|  | Onderhoudskosten       | Euro2020/woning/jaar | 107    |
|  | SPF ruimteverwarming   | -                    | 4,0    |
|  | SPF warmtapwater       | -                    | 2,5    |
| <b>cv-ketel</b>  | Gemiddelde investering | Euro2020/woning      | 1.776  |
|  | Onderhoudskosten       | Euro2020/woning/jaar | 50     |

<sup>31</sup> <https://energy.nl/datasheets/>

<sup>32</sup> <https://energy.nl/tools/dashboard-eindgebruikerskosten/>

Uitgangspunt is dat toepassing van een all-electric warmtepomp de woning aardgasvrij maakt, dat wil zeggen een 100% besparing op aardgas voor ruimteverwarming en tapwater. Daarvoor is wel elektriciteit nodig. Die elektriciteitsvraag is als volgt berekend:

$$Elektriciteitsvraag = \left( \frac{\text{warmtevraagruimteverwarming}}{SPF_{\text{ruimteverwarming}}} \right) + \left( \frac{\text{warmtevraagtapwater}}{SPF_{\text{tapwater}}} \right)$$

Voor een hybride verwarmingssysteem is aangenomen dat het aandeel van de warmtevraag voor ruimteverwarming en tapwater dat wordt ingevuld met de warmtepomp 50% is. Er zijn verschillende configuraties mogelijk bij hybride systemen; afhankelijk van het geïnstalleerde thermisch vermogen van de warmtepomp en de betreffende woning kan het aandeel van de warmtepomp hoger of lager zijn. Hier verondersteld is dat de warmtepomp in een gemiddelde hybride opstelling in bestaande woningen een aandeel van 50% in de warmtevraag voorziet.

De indirecte CO<sub>2</sub>-emissies in de elektriciteitssector zijn berekend met behulp van de nationale emissiefactor van elektriciteitsproductie in 2030 in de Klimaat- en Energieverkenning. De CO<sub>2</sub>-reductie door aardgas besparing is berekend met de emissiefactor van aardgas (emissiefactoren worden gegeven in Bijlage. Algemene kentallen).

De jaarlijkse investeringskosten (annuity) voor warmtepompen is berekend uitgaande van een afschrijfperiode van 20 jaar en discontovoet van 3%.

## Impact

### Huidige techniek

De berekende impacts van de vervanging van cv-ketels door warmtepompen staat in Tabel 11. De tabel start met het aantal woningen per potentiële marktontwikkeling. Het Basispad is het aantal woningen waarvan in de KEV wordt aangenomen dat de huidige cv-ketel vervangen wordt door een warmtepomp in 2030. De marktontwikkelingen laten het additionele aantal woningen zien ten opzichte van de KEV waar een cv-ketel vervangen wordt. Het totale aantal woningen waar een all-electric warmtepomp wordt geplaatst is daarmee een optelsom van het aantal woningen onder het Basispad en de betreffende marktontwikkeling.

Vervolgens geeft de tabel de uitkomsten van deze vervanging voor de directe en indirecte CO<sub>2</sub>-emissiereductie voor de nationale kosten en nationale meerkosten. De kosten zijn de additionele kosten ten opzichte van vervanging van de cv-ketel. Per marktontwikkeling is alleen het aantal geïnstalleerde warmtepompen anders. Ook hier zijn de resultaten van de marktontwikkelingen weergegeven als de additionele impact ten opzichte van de KEV, dus extra emissiereductie en nationale meerkosten.

Tabel 11 De impact van de vervanging van cv-ketels door warmtepompen in 2030 bij verschillende potentiële marktontwikkelingen. Het aantal woningen en de impact in de potentiële marktontwikkelingen is het aantal additionele woningen/impact ten opzichte van het basispad.

| Marktontwikkeling                                 | All-electric eengezins woningen | L/W WP meergezin swoningen | All-electric eengezins woningen | bodem WP meergezin swoningen | Hybride WP eengezins woningen | meergezin swoningen |
|---|---------------------------------|----------------------------|---------------------------------|------------------------------|-------------------------------|---------------------|
| <b>Aantal woningen</b>                            |                                 |                            |                                 |                              |                               |                     |
| Verdubbeling                                      | 26.242                          | 4.500                      | 26.242                          | 4.500                        | 26.242                        | 4.500               |
| Natuurlijk moment                                 | 3.100.519                       | 1.587.285                  | 3.100.519                       | 1.587.285                    | 3.100.519                     | 1.587.285           |
| Technisch potentieel                              | 4.650.778                       | 2.380.927                  | 4.650.778                       | 2.380.927                    | 4.650.778                     | 2.380.927           |
| <b>Directe CO<sub>2</sub>-reductie in Mton</b>    |                                 |                            |                                 |                              |                               |                     |
| Verdubbeling                                      | 0,1                             | 0,0                        | 0,1                             | 0,0                          | 0,0                           | 0,0                 |
| Natuurlijk moment                                 | 7,0                             | 1,8                        | 7,0                             | 1,8                          | 3,5                           | 0,9                 |
| Technisch potentieel                              | 10,5                            | 2,7                        | 10,5                            | 2,7                          | 5,3                           | 1,4                 |
| <b>Indirecte CO<sub>2</sub> uitstoot in Mton</b>  |                                 |                            |                                 |                              |                               |                     |
| Verdubbeling                                      | 0,0                             | 0,0                        | 0,0                             | 0,0                          | 0,0                           | 0,0                 |
| Natuurlijk moment                                 | -1,1                            | -0,3                       | -0,9                            | -0,2                         | -0,5                          | -0,1                |
| Technisch potentieel                              | -1,7                            | -0,4                       | -1,3                            | -0,3                         | -0,8                          | -0,2                |
| <b>Nationale kosten miljard euro per jaar</b>     |                                 |                            |                                 |                              |                               |                     |
| Verdubbeling                                      | 0,0                             | 0,0                        | 0,0                             | 0,0                          | 0,0                           | 0,0                 |
| Natuurlijk moment                                 | 2,8                             | 1,3                        | 3,7                             | 1,8                          | 2,4                           | 1,0                 |
| Technisch potentieel                              | 4,2                             | 1,9                        | 5,6                             | 2,7                          | 3,6                           | 1,6                 |
| <b>Nationale meerkosten miljard euro per jaar</b> |                                 |                            |                                 |                              |                               |                     |
| Verdubbeling                                      | 0,0                             | 0,0                        | 0,0                             | 0,0                          | 0,0                           | 0,0                 |
| Natuurlijk moment                                 | 1,6                             | 0,8                        | 2,5                             | 1,3                          | 1,2                           | 0,6                 |
| Technisch potentieel                              | 2,3                             | 1,2                        | 3,7                             | 2,0                          | 1,7                           | 0,9                 |

### Innovatieve techniek

Tabel 12 laat zien welke additionele effecten worden gerealiseerd ten opzichte van de KEV bij een verbeterd rendement van luchtwarmtepompen met 7,5% en verlaagde investeringskosten (met 15%). Dit is zichtbaar in de effecten 'met innovatie'. De aantallen warmtepompen binnen de marktontwikkelingen zijn verder hetzelfde.

Tabel 12 De impact van de vervanging van cv-ketels door innovatieve all electric warmtepompen bij verschillende potentiële marktontwikkelingen. Het aantal woningen in de potentiële marktontwikkelingen zijn het aantal additionele woningen ten opzichte van het basispad.

| Marktontwikkeling  | All-electric L/W WP |                     | All-electric bodem WP |                     | Hybride WP         |                     |
|--|---------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|--------------------|---------------------|
|  | eengezinsw oningen  | meergezins woningen | eengezinsw oningen    | meergezins woningen | eengezinsw oningen | meergezins woningen |
| Aantal woningen  |                     |                     |                       |                     |                    |                     |
| Verdubbeling   | 26.242              | 4.500               | 26.242                | 4.500               | 26.242             | 4.500               |
| Natuurlijk moment  | 3.100.519           | 1.587.285           | 3.100.519             | 1.587.285           | 3.100.519          | 1.587.285           |
| Technisch potentieel                                     | 4.650.778           | 2.380.927           | 4.650.778             | 2.380.927           | 4.650.778          | 2.380.927           |
| Directe CO <sub>2</sub> -reductie in Mton                |                     |                     |                       |                     |                    |                     |
| Verdubbeling   | 0,1                 | 0,0                 | 0,1                   | 0,0                 | 0,0                | 0,0                 |
| Natuurlijk moment  | 7,0                 | 1,8                 | 7,0                   | 1,8                 | 3,5                | 0,9                 |
| Technisch potentieel                                     | 10,5                | 2,7                 | 10,5                  | 2,7                 | 5,3                | 1,4                 |
| Indirecte CO <sub>2</sub> uitstoot met innovatie in Mton |                     |                     |                       |                     |                    |                     |
| Verdubbeling   | 0,0                 | 0,0                 | 0,0                   | 0,0                 | 0,0                | 0,0                 |
| Natuurlijk moment  | -1,0                | -0,3                | -0,8                  | -0,2                | -0,5               | -0,1                |
| Technisch potentieel                                     | -1,5                | -0,4                | -1,2                  | -0,3                | -0,7               | -0,2                |
| Nationale kosten met innovatie miljard euro per jaar     |                     |                     |                       |                     |                    |                     |
| Verdubbeling   | 0,0                 | 0,0                 | 0,0                   | 0,0                 | 0,0                | 0,0                 |
| Natuurlijk moment  | 2,5                 | 1,1                 | 3,2                   | 1,5                 | 2,2                | 1,0                 |
| Technisch potentieel                                     | 3,7                 | 1,7                 | 4,9                   | 2,3                 | 3,3                | 1,4                 |
| Nationale meerkosten met innovatie miljard euro per jaar |                     |                     |                       |                     |                    |                     |
| Verdubbeling   | 0,0                 | 0,0                 | 0,0                   | 0,0                 | 0,0                | 0,0                 |
| Natuurlijk moment  | 1,3                 | 0,7                 | 2,0                   | 1,1                 | 1,0                | 0,5                 |
| Technisch potentieel                                     | 1,9                 | 1,0                 | 3,0                   | 1,6                 | 1,5                | 0,8                 |

## Bijlage E Afgiftesystemen

Voor de berekeningen in dit deelrapport zijn de kentallen in Tabel 13 gebruikt voor de investeringskosten. Aangezien (LT) afgiftesystemen een integraal onderdeel zijn van (LT) verwarmingssystemen, wordt voor de marktomvang hetzelfde aantal woningen aangenomen als voor LT-warmtenetten (Tabel 14).

Tabel 13 Kentallen omtrent de technologie (ontnomen en afgerond uit (Arcadis, 2020))

|                 | CAPEX (€) |
|-----------------|-----------|
| Convactor       | 4,500     |
| Vloerverwarming | 11,500    |

Tabel 14 Kentallen omtrent de marktomvang van verschillende potentiële marktontwikkelingen in 2030, afgeleid van het deelrapport 'Warmtenetten'.

| Doelgroep          | Potentiële marktontwikkeling | Extra aantal woningen t.o.v. KEV raming |
|--------------------|------------------------------|---|
| Eengezinswoningen  | Verdubbeling                 | 47.700                                  |
|                    | Technisch potentieel         | 3.553.870                               |
| Meergezinswoningen | Verdubbeling                 | 36.495                                  |
|                    | Technisch potentieel         | 2.524.824                               |



## Bijlage F Tapwatersystemen

Voor de berekeningen in dit rapport zijn de kentallen in Tabel 15 omtrent de technologie gebruikt. Vanwege het uitgangspunt dat onze analyse uitgaat van een apart tapwatersysteem (zoals benodigd in woningen, die aangesloten zijn op LT-warmtenetten), wordt voor de marktomvang hetzelfde aantal woningen aangenomen als voor LT-warmtenetten (Tabel 16).

Tabel 15 Kentallen omtrent de technologie

|                              | CAPEX (€) | OPEX (%) | Elektriciteitsverbruik (kWh per GJ warmte) |
|------------------------------|-----------|----------|--|
| Elektrisch doorstroomtoestel | 1,500     | 3        | 173  |
| w/w warmtepomp met WTW       | 4500      | 3        | 35   |

Tabel 16 Kentallen omtrent de marktomvang van verschillende potentiële marktontwikkelingen in 2030, afgeleid van het deelrapport 'Warmtenetten'.

| Doelgroep          | Potentiële marktontwikkeling | Extra aantal woningen t.o.v. KEV raming |
|--------------------|------------------------------|---|
| Eengezinswoningen  | Verdubbeling                 | 47.700                                  |
|                    | Technisch potentieel         | 3.553.870                               |
| Meergezinswoningen | Verdubbeling                 | 36.495                                  |
|                    | Technisch potentieel         | 2.524.824                               |

## Bijlage G Ventilatiesystemen

Tijdens een renovatiemoment worden vaak de kieren en naden van de woning gedicht waardoor het warmteverlies af neemt wat leidt tot energiebesparing. Om toch voor voldoende frisse lucht te zorgen kan een ventilatiesysteem worden toegepast. Een ventilatiesysteem leidt tot een ingaande luchtstroom in de woning die in het stookseizoen moet worden opgewarmd. In dit deelrapport zijn de impacts van twee technologieën zijn doorgerekend:

- Huidige techniek: Vraaggestuurde mechanische ventilatie
- Innovatieve techniek: Vraaggestuurde balansventilatie met WTW via luchtdistributie (eengezinswoning) of decentrale ventilatie (meergezinswoning).

De referentiesituatie is een woning met een aardgasgestookte cv-ketel met natuurlijke ventilatie.

### CO<sub>2</sub>-emissies

Uit een door TNO ontwikkeld warmtebalansmodel voor woningen volgt dat kierdichting voor reductie in het warmteverlies zorgt van 0,03 GJ/m<sup>2</sup> vloeroppervlak<sup>33</sup>. Hetzelfde model gaat voor een vraaggestuurd mechanisch ventilatiesysteem uit van een warmteverlies van 1,84 GJth/jaar. Bij balansventilatie met warmteterugwinning wordt warmte uit de uitgaande ventilatielucht gebruikt om de ingaande lucht voor te verwarmen waardoor het warmteverlies met 70% afneemt en het uitkomt op 0,55 GJth/jaar. Bij 100% ketel rendement is de aardgas besparing gelijk aan de vermindering van het warmteverlies. Er geldt:

Besparing totaal = Warmteverlies vermindering door kierdichting - Warmteverlies door ventilatiesysteem

Het elektriciteitsgebruik van het ventilatiesysteem is berekend uitgaande van het vermogen (berekend met de aannames uit de NTA8800, Tabel 17) en het aantal draaiuren in de uitstand, laagstand, middenstand, en hoogstand. Op basis van gegevens uit het Woononderzoek 2018 zijn drie gebruikersprofielen opgesteld voor gebruik van het ventilatiesysteem. Daaruit is het gemiddelde aantal draaiuren per ventilatiestand afgeleid, Tabel 18. Door toepassing van vraagsturing draait het ventilatiesysteem alleen wanneer nodig, bijvoorbeeld wanneer het CO<sub>2</sub>-gehalte in de ruimte te hoog is. Daardoor worden de draaiuren gereduceerd wat zorgt voor elektriciteitsbesparing. Volgens deze berekening komt vraaggestuurde mechanische ventilatie uit op 31 kWh/jaar en vraaggestuurde balansventilatie op 70 kWh/jaar.

Tabel 19 geeft een overzicht van de positieve en negatieve energiekosten.

Tabel 17 Ventilatievermogen (W) (gelijkstroom)

| Ventilatievermogen         | Uitstand | Laagstand | Middenstand | Hoogstand |
|----------------------------|----------|-----------|-------------|-----------|
| Mechanische ventilatie (W) | 0        | 6,3       | 12,5        | 18,8      |
| Balans met WTW (W)         | 0        | 14,1      | 28,1        | 42,2      |

<sup>33</sup> Voor het onderscheid in het gemiddelde oppervlak per woningtype is gebruikt gemaakt van gemiddelden uit de CBS woningvoorraadstatistiek.

Tabel 18 Draaiuren ventilatiesysteem

| Stand systeem: | Uren per jaar zonder vraagsturing | Uren per jaar met vraagsturing |
|----------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| Uit            | 2011                              | 5222                           |
| Laagstand      | 5368                              | 2684                           |
| middenstand    | 528                               | 264                            |
| Hoogstand      | 854                               | 590                            |
| Totaal         | 8760                              | 8760                           |

Tabel 19 Energiekosten (positief) en bespaarde energiekosten (negatief) voor ventilatie en kierdichting

| Type kosten                  | Technologie                             | Resultaat voor 2030 |
|------------------------------|---|---------------------|
| <b>Natuurlijk moment</b>     |   |                     |
| <b>Eengezinswoning</b>       |   |                     |
| Energiekosten aardgas mldEUR | Mechanische ventilatie met vraagsturing | 0,008               |
|                              | Balansventilatie met WTW                | 0,002               |
|                              | Kierdichting                            | -0,018              |
| Energiekosten mldEUR         | Mechanische ventilatie met vraagsturing | 0,001               |
|                              | Balansventilatie met WTW                | 0,002               |
| <b>Meergezinswoning</b>      |   |                     |
| Energiekosten aardgas mldEUR | Mechanische ventilatie met vraagsturing | 0,004               |
|                              | Balansventilatie met WTW                | 0,001               |
|                              | Kierdichting                            | -0,005              |
| Energiekosten mldEUR         | Mechanische ventilatie met vraagsturing | 0,0005              |
|                              | Balansventilatie met WTW                | 0,001               |
| <b>Technisch potentieel</b>  |   |                     |
| <b>Eengezinswoning</b>       |   |                     |
| Energiekosten aardgas mldEUR | Mechanische ventilatie met vraagsturing | 0,039               |
|                              | Balansventilatie met WTW                | 0,012               |
|                              | Kierdichting                            | -0,090              |
| Energiekosten mldEUR         | Mechanische ventilatie met vraagsturing | 0,005               |
|                              | Balansventilatie met WTW                | 0,010               |
| <b>Meergezinswoning</b>      |   |                     |
| Energiekosten aardgas mldEUR | Mechanische ventilatie met vraagsturing | 0,020               |
|                              | Balansventilatie met WTW                | 0,006               |
|                              | Kierdichting                            | -0,026              |
| Energiekosten mldEUR         | Mechanische ventilatie met vraagsturing | 0,002               |
|                              | Balansventilatie met WTW                | 0,005               |

## Nationale kosten

De uitgangspunten voor de kosten van ventilatiesystemen zijn weergegeven in Tabel 20. De in de tabel getoonde kosten zijn investeringen op natuurlijk moment exclusief BTW. De kosten van vraagsturing zijn opgenomen als onderdeel van de investering.

De investeringskosten van mechanische ventilatie met vraagsturing voor een eengezins- en meergezinswoning zijn afkomstig van de Arcadis kosten kentallen (Arcadis, 2020). De gemiddelde investering voor balansventilatie met WTW en vraagsturing ligt rond de 4-4,5 duizend euro per woning exclusief BTW (Arcadis, 2020). Bij een eengezinswoning is aangenomen dat balansventilatie is aangelegd via luchtdistributie. Naar aanleiding van interviews met experts is daarbij vanuit gegaan dat de kosten gelijk zijn aan die voor een

standaard balansventilatiesysteem met WTW. Voor een meergezinswoning is aangenomen dat balansventilatie is gerealiseerd via decentrale ventilatiesystemen.

De (eenmalige) onderhoudskosten per jaar voor ventilatiesystemen zijn berekend uitgaande van 3% van de investeringskosten per jaar. De jaarlijkse investeringskosten (annuïteit) voor ventilatiesystemen zijn berekend uitgaande van een afschrijfperiode van 20 jaar en discontovoet van 3%.

De kosten voor kierdichting zijn gebaseerd op de Arcadis kosten kengetallen (Arcadis, 2020) waarbij de gemiddelde kosten van vier kostencodes zijn opgeteld. Tabel 21 geeft de gebruikte kentallen voor kierdichting weer.

Tabel 22 tot slot geeft de nationale kosten voor ventilatie en kierdichting.

Tabel 20 Investeringskosten en operationele kosten ventilatie

| Technologie   | Woningtype       | Parameter              | eenheid           | Waarde | Kostencode Arcadis |
|---|------------------|------------------------|-------------------|--------|--------------------|
| Mechanische ventilatie met vraagsturing                     | Meergezinswoning | Gemiddelde investering | euro/woning       | 3.137  | 171                |
| Mechanische ventilatie met vraagsturing                     | Eengezinswoning  | Gemiddelde investering | euro/woning       | 3.320  | 171                |
| Balansventilatie met WTW en vraagsturing - Decentraal       | Meergezinswoning | Gemiddelde investering | euro/woning       | 4.174  | 156                |
| Balansventilatie met WTW en vraagsturing - Luchtdistributie | Eengezinswoning  | Gemiddelde investering | euro/woning       | 4.512  | 110                |
| Mechanische ventilatie met vraagsturing                     | Meergezinswoning | Operationele kosten    | euro/woning /jaar | 94     | -                  |
| Mechanische ventilatie met vraagsturing                     | Eengezinswoning  | Operationele kosten    | euro/woning /jaar | 100    | -                  |
| Balansventilatie met WTW en vraagsturing                    | Meergezinswoning | Operationele kosten    | euro/woning /jaar | 125    | -                  |
| Balansventilatie met WTW en vraagsturing                    | Eengezinswoning  | Operationele kosten    | euro/woning /jaar | 135    | -                  |

Tabel 21 Investeringskosten en besparing door kierdichting

| Woningtype       | Parameter              | eenheid                | Waarde | Kostencode Arcadis |
|------------------|------------------------|------------------------|--------|--------------------|
| Meergezinswoning | Gemiddelde investering | euro/woning            | 268    | 92, 93, 94 en 95   |
| Eengezinswoning  | Gemiddelde investering | euro/woning            | 405    | 92, 93, 94 en 95   |
| Meergezinswoning | Besparing op aardgas   | GJ aardgas/woning/jaar | 2,4    | 92, 93, 94 en 95   |
| Eengezinswoning  | Besparing op aardgas   | GJ aardgas/woning/jaar | 4,3    | 92, 93, 94 en 95   |

Tabel 22 Investeringskosten en operationele kosten ventilatie en kierdichting

| Type kosten                         | Technologie                             | Resultaat voor 2030 |
|-------------------------------------|---|---------------------|
| <b>Natuurlijk moment</b>            |   |                     |
| <b>Eengezinswoning</b>              |   |                     |
| Annuiteit mldEur per jaar           | Mechanische ventilatie met vraagsturing | 0,13                |
|                                     | Balansventilatie met WTW                | 0,18                |
|                                     | Kierdichting                            | 0,01                |
| Operationele kosten mldEUR per jaar | Mechanische ventilatie met vraagsturing | 0,06                |
|                                     | Balansventilatie met WTW                | 0,08                |
| <b>Meergezinswoning</b>             |   |                     |
| Annuiteit mldEur per jaar           | Mechanische ventilatie met vraagsturing | 0,07                |
|                                     | Balansventilatie met WTW                | 0,09                |
|                                     | Kierdichting                            | 0,00                |
| Operationele kosten mldEUR per jaar | Mechanische ventilatie met vraagsturing | 0,03                |
|                                     | Balansventilatie met WTW                | 0,04                |
| <b>Technisch potentieel</b>         |   |                     |
| <b>Eengezinswoning</b>              |   |                     |
| Annuiteit mldEur per jaar           | Mechanische ventilatie met vraagsturing | 0,66                |
|                                     | Balansventilatie met WTW                | 0,90                |
|                                     | Kierdichting                            | 0,05                |
| Operationele kosten mldEUR per jaar | Mechanische ventilatie met vraagsturing | 0,30                |
|                                     | Balansventilatie met WTW                | 0,40                |
| <b>Meergezinswoning</b>             |   |                     |
| Annuiteit mldEur per jaar           | Mechanische ventilatie met vraagsturing | 0,33                |
|                                     | Balansventilatie met WTW                | 0,44                |
|                                     | Kierdichting                            | 0,02                |
| Operationele kosten mldEUR per jaar | Mechanische ventilatie met vraagsturing | 0,15                |
|                                     | Balansventilatie met WTW                | 0,19                |

## Bijlage I Warmtenetten

### Marktaandeel

Om het aantal woningen van de potentiële marktontwikkelingen te bepalen is gebruik gemaakt van buurtgegevens voor de warmtevraagdichtheid uit de Startanalyse van PBL. We definiëren op basis van de range drie warmtevraagdichtheidsklassen: “Laag” <500 GJ/ha/jaar, “Midden” 500-1000 GJ/ha/jaar en “Hoog” >1500 GJ/ha/jaar. Vervolgens is het aantal woningen dat in 2020 binnen deze klassengrenzen valt bepaald (Tabel 23). Het potentieel van “Hoog” en “Midden” is genomen voor het technisch potentieel. Verder is het aantal eengezinswoningen (EGW) en meergezinswoningen (MGW) aangegeven.

Tabel 23 Aantal woningen naar warmtevraagdichtheidsklasse gebruikt voor potentieelbepaling warmtenetten

| Bebouwingsdichtheid | Aantal woningen (bestaande voorraad in 2020) | Percentage aantal woningen | Aantal EGW | Aantal MGW |
|---------------------|--|----------------------------|------------|------------|
| <b>Hoog</b>         | 1.791.541                                    | 23%                        | 483.109    | 1.308.432  |
| <b>Midden</b>       | 4.371.358                                    | 56%                        | 3.118.461  | 1.252.897  |
| <b>Laag</b>         | 1.598.936                                    | 21%                        | 1.390.137  | 208.799    |
| <b>Totaal</b>       | <b>7.761.835</b>                             | <b>100%</b>                | 4.991.707  | 2.770.128  |

### CO<sub>2</sub>-emissiereductie

Voor de netto CO<sub>2</sub>-reductie bij een MT-net ('huidige techniek') ten opzichte van hr-ketels is rekening gehouden met de directe CO<sub>2</sub>-reductie door overschakeling van aardgas naar de primaire MT-warmtebron (Tabel 24). Aangenomen is dat de warmteproductie door de MT-bron niet CO<sub>2</sub>-vrij is, gerekend is met de emissiefactor van een restwarmtebron 8,8 kgCO<sub>2</sub>/GJ geleverde warmte<sup>34</sup>.

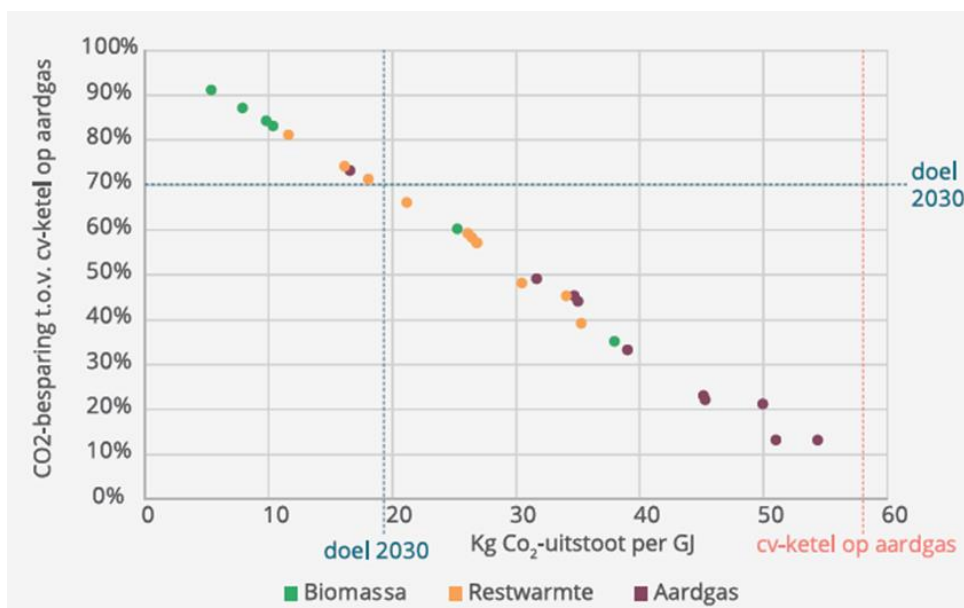
Er is ook rekening gehouden met de extra CO<sub>2</sub>-uitstoot die veroorzaakt wordt door de inzet van hulpketels (12 kgCO<sub>2</sub>/GJ). De CO<sub>2</sub>-uitstoot van de hulpketels is bepaald ervan uitgaande dat 20% van de warmtevraag op jaarbasis wordt ingevuld met hulpketels op aardgas (i.e. hulpketels leveren op piekvraag- en onderhoudsmomenten). Deze 20% is gebaseerd op het Functioneel ontwerp VESTA (PBL, 2021).

Aangezien er zowel bij MT-bronnen en hulpketels sprake is van niet CO<sub>2</sub>-vrije warmtebronnen is de CO<sub>2</sub>-uitstoot per GJ berekend die gepaard is met de warmteproductie. Daarvoor is aangenomen dat het totale leidingverlies in het net 25% bedraagt o.b.v. de interviews.

<sup>34</sup> <https://www.co2emissiefactoren.nl/lijt-emissiefactoren/>

**Ter referentie: CO<sub>2</sub>-besparing warmtenet t.o.v. cv-ketel op aardgas**

Figuur I 4 laat zien dat de CO<sub>2</sub>-besparing van warmtenetten t.o.v. een cv-ketel op aardgas sterk varieert afhankelijk van het net (DNE Research, 2021). Gemiddeld is de uitstoot 28,7 kg CO<sub>2</sub>/GJ (gemiddelde van 27 grote netten), dat is een besparing van gemiddeld circa 50% ten opzichte van een cv-ketel op aardgas. Ter vergelijking: De gevonden besparing voor MT-netten in dit rapport is 55%. Belangrijke bepalende factoren voor de emissiereductie zijn 1. Of de warmte wordt opgeweekt met warmtekrachtcentrales waardoor primaire brandstof wordt bespaard omdat men gelijktijdig elektriciteit produceert, en 2. Het aandeel van de warmtelevering dat een aardgasgestookte hulpketel voor zijn rekening neemt. Hoe hoger het aandeel aardgasgestookte (“heat-only”) boilers in de warmteproductie hoe lager de emissiereductie t.o.v. de cv-ketel. Warmte uit biomassawarmtecentrales telt mee als hernieuwbare warmte en heeft geen emissiefactor. Voor restwarmtebronnen is een emissiefactor. Deze moet namelijk worden uitgekoppeld uit centrales of industrie waarvoor elektriciteit nodig is dat wel zorgt voor indirecte CO<sub>2</sub>-emissies.



Figuur I 4 CO<sub>2</sub>-besparing warmtenet t.o.v. cv-ketel op aardgas (DNE Research, 2021). Dit is o.b.v. de warmte-etiketten van de warmtebedrijven. Gemiddeld is de uitstoot 28,7 kg CO<sub>2</sub>/GJ (gemiddelde van 27 grote netten), dat is een besparing van gemiddeld circa 50% ten opzichte van een cv-ketel op aardgas.

In de MT-net variant is verder verondersteld dat het tapwater direct wordt voorzien met warmte uit de hoofdwarmtebron of hulpketels. De temperatuur van de warmte hoeft niet eerst opgewaardeerd te worden (er is geen centrale warmtepomp) indien de aanlevertemperatuur minimaal 60 graden °C bedraagt.

Voor de netto CO<sub>2</sub>-reductie bij een LT-net (‘innovatieve techniek’) ten opzichte van hr-ketels is rekening gehouden met de CO<sub>2</sub>-reductie door overschakeling van aardgas naar de primaire LT-warmtebron. Aangenomen is dat de warmteproductie door de LT-bron geheel CO<sub>2</sub>-vrij is. Dit kan bijvoorbeeld aquathermie of restwarmte zijn. In dit warmtesysteem zijn geen hulpketels aanwezig. Het leidingverlies is lager dan bij MT-netten: uitgangspunt hiervoor is 15% warmteverlies o.b.v. de interviews. Bij LT-netten heeft het leidingverlies echter geen effect op de CO<sub>2</sub>-reductie aangezien er geen CO<sub>2</sub>-emissies zijn voor de hoofdwarmtebron en er geen hulpketels zijn.

Warmtapwater in een LT-net kan worden bereid middels een individuele installatie, bijvoorbeeld met een boosterwarmtepomp, een doorstroomtoestel (een soort geiser) of een elektrische boiler. Uit de interviews blijkt dat in de praktijk vaak het doorstroomtoestel zal worden gekozen, onder meer omdat deze lagere investeringskosten heeft in vergelijking met een boosterwarmtepomp, maar wel een hoger rendement heeft dan een elektrische boiler. In het LT-net is daarom het uitgangspunt genomen dat warmtapwater wordt bereid met een doorstroomtoestel. Deze installatie zorgt wel voor indirecte CO<sub>2</sub>-emissies, maar het verbruik van deze installatie kan tot 40%<sup>35</sup> lager zijn dan voor een elektrische boiler (welke gemiddeld 95% rendement heeft (CE Delft, 2021)).

Tabel 24 Technisch potentieel CO<sub>2</sub>-reductie door warmtenetten en cv-ketels

| Technisch potentieel voor CO <sub>2</sub> reductie        | MT-netten  | LT-netten   |
|---|------------|-------------|
| <b>Netto CO<sub>2</sub>-reductie</b>                      | <b>6,0</b> | <b>10,3</b> |
| CO <sub>2</sub> -reductie hoofdwarmtebron t.o.v. hr-ketel | 9,3        | 11,0        |
| CO <sub>2</sub> -uitstoot hulpketel aardgas               | -2,3       | -           |
| CO <sub>2</sub> -uitstoot leidingverlies                  | -1,0       | -           |
| Indirecte CO <sub>2</sub> -uitstoot warmtapwater          | -          | -0,6        |

### Kosten kentallen

Op basis van de gegevens per buurt uit de Startanalyse van PBL over de investeringskosten van MT-warmtenetten zijn de gemiddelde kosten per woningequivalent (euro/WEQ) berekend. In de kosten van MT-warmtenetten hebben we de volgende kostenposten meegenomen:

- Kosten primaire net en zijleidingen naar het secundaire distributienet
- Kosten secundaire distributienet
- Kosten warmteoverdrachtstations (WOS)
- Kosten onderstations (OS)
- Kosten hulpketels op aardgas.

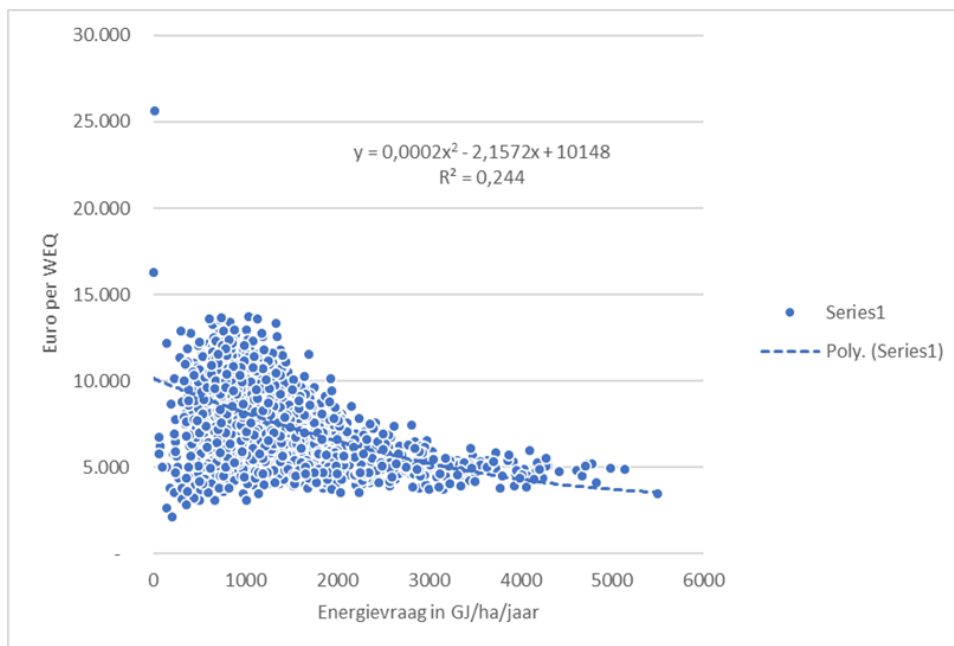
Deze zijn weergegeven als functie van de totale energievraag voor warmte (GJ/ha/jaar) in Figuur I 5.

Er zijn 2 verschillen met de kosten van LT-netten. Ten eerste zijn geen hulpketels in het LT-net. Ten tweede zijn er extra kosten per woning voor warmtapwatervoorziening.

Bij het LT-net is een doorstroomtoestel voor de bereiding van warmtapwater meegenomen in de investeringskosten. Om een gemiddeld kosten kental hiervoor te bepalen is gebruik gemaakt van de kosten van elektronische afleveringssystemen die toepasbaar zijn voor collectieve warmtesystemen. In dit soort systeem is een elektrische doorstroomboiler geïntegreerd met de afleverset voor stadsverwarming. De kosten hiervan variëren tussen de 1.100 en 1.900 euro per stuk (Fortes, 2018). De gemiddelde investeringskosten hiervoor bedragen ongeveer 1500 euro. Deze kosten zijn opgeteld bij de kosten per woningequivalent.

<sup>35</sup> <https://www.duurzaambouwloket.nl/maatregel/doorstroomboiler>





Figuur I 5 Nationale investeringskosten MT-warmtenetsystemen uitgedrukt in euro/woningequivalent o.b.v. gegevens per buurt uit de Startanalyse van PBL.

De jaarlijkse afschrijving (annuity) voor het warmtenet is berekend uitgaande van een afschrijfperiode van 50 jaar en discontovoet van 3%. De onderhoudskosten zijn berekend uitgaande dat dit 3% van de investeringskosten per jaar is. Voor warmte is uitgegaan van de productiekosten van warmte uitgaande van een referentie aardgas boiler met 87% efficiency (Dinkelman & Menkveld, 2021). Tabel 25 geeft een overzicht van al deze kosten.

Tabel 25 Cost-breakdown warmtenetten en cv-ketels

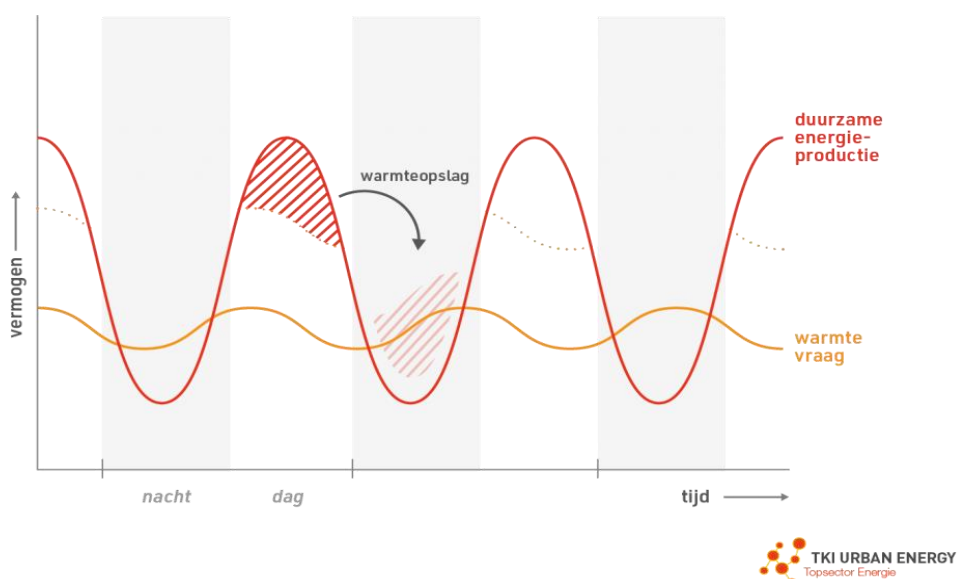
| Cost Breakdown                                 | MT- netten<br>miljarden euro's<br>per jaar | LT- netten<br>miljarden euro's<br>per jaar |
|--|--|--|
| <b>Nationale kosten warmtenet</b>              | <b>4,12</b>                                | <b>4,59</b>                                |
| Annuïteit warmtenet                            | 1,44                                       | 1,68                                       |
| Operationele kosten warmtenet                  | 1,11                                       | 1,30                                       |
| Energiekosten warmtenet                        | 1,58                                       | 1,60                                       |
| <b>Nationale kosten cv-ketels (referentie)</b> | <b>1,82</b>                                | <b>1,82</b>                                |
| Annuïteit cv-ketels                            | 0,42                                       | 0,42                                       |
| Operationele kosten cv-ketels                  | 0,30                                       | 0,30                                       |
| Energiekosten cv-ketels                        | 1,10                                       | 1,10                                       |

## Bijlage J Grootschalige Warmteopslag

### Kentallen

Met warmteopslag kan de piekvraag worden ingevuld in plaats van door aardgasgestookte hulpketels, en daarnaast kan ook tijdelijke opslag (dag/nacht) en seizoensopslag worden toegepast. Daardoor kan meer hernieuwbare warmte wordt benut en dus aardgas worden bespaard. Onderstaande figuur laat het principe voor het opslaan van hernieuwbare energie om deze te gebruiken wanneer de productie afneemt en de vraag hoog is schematisch zien<sup>36</sup>.

### Dempende werking warmteopslag



Om 25% van de jaarlijkse warmtevraag op te slaan (een aanname op basis van (De Groot, 2020)) en daarmee extra hernieuwbare warmte benutting te realiseren is nagegaan hoeveel opslagvolume nodig is, uitgedrukt in m<sup>3</sup> per woning. De energiedichtheid voor warmteopslag in water bij een temperatuurverschil met de omgeving van 50°C is 0,21 GJ/(m<sup>3</sup> K), aangezien de soortelijke warmte van water 4,2 kJ/(kg K) is.

Een meergezinswoning heeft een warmtevraag (voor ruimteverwarming en warmtapwater) van 20,4 GJ per jaar. Hiervoor is het gemiddelde aangehouden uit de KEV energie-statistieken voor huishoudens. Een eengezinswoning daarentegen heeft een hogere warmtevraag van 40,2 GJ per jaar (voor ruimteverwarming en warmtapwater).

Uitgangspunt is een efficiency voor warmteopslag van 75% bij opslag in een watervoerende laag en van 90% bij tankopslag (Schepers & Dehens, 2020). De rest van de warmte gaat verloren tijdens opslag. Onder deze aannames is het benodigde opslagvolume voor een meergezins- en eengezinswoningen berekend (zie Tabel 26).

<sup>36</sup> <https://www.topsectorenergie.nl/tki-urban-energy/kennisdossiers/warmteopslag>

Met de procentuele reductie in de warmtevraag per aardgasgestookte woning en de emissiefactor van aardgas is berekend hoeveel m<sup>3</sup> aardgas bespaard wordt en hoeveel CO<sub>2</sub>-reductie bereikt wordt.

In de studie van (De Groot, 2020) is gekeken naar de specifieke investeringskosten (CAPEX) van het opslagdeel van het systeem. Deze kosten zijn uitgedrukt in specifieke investeringskosten in euro per m<sup>3</sup> opslag. Deze kosten zijn via de benodigde opslagvolumes per woning omgerekend naar de kosten per woning. Aannames staan in Tabel 26.

Tabel 26 Aannames kostenberekening per woning voor warmteopslag voor 2 opslagtechnologieën met onderscheid tussen één- en meergezinswoning

| Technologie   | Watervoerende laag | Opslagtank bovengronds |
|---|--------------------|------------------------|
| Specifieke investeringskosten (CAPEX) opslag (euro/m <sup>3</sup> ) | 10                 | 100                    |
| Gemiddelde Warmtevraag eengezinswoning (GJ/jaar)                    | 40,2               | 40,2                   |
| Gemiddelde Warmtevraag meergezinswoning (GJ/jaar)                   | 20,4               | 20,4                   |
| Efficiency warmteopslag   | 75%                | 90%                    |
| Opslagvolume nodig per eengezinswoning (m <sup>3</sup> )            | 64                 | 53                     |
| Opslagvolume per meergezinswoning (m <sup>3</sup> )                 | 33                 | 27                     |
| CAPEX investment per eengezinswoning (duizend euro/woning)          | 0,6                | 5,3                    |
| CAPEX investment per meergezinswoning (duizend euro/woning)         | 0,3                | 2,7                    |

De jaarlijkse investeringskosten (annuity) voor warmteopslag is berekend uitgaande van een afschrijffperiode van 50 jaar en discontovoet van 3%.

De onderhoudskosten zijn berekend uitgaande dat dit 0,75% van de investeringskosten per jaar is voor tanksopslag (De Groot, 2020). Voor opslag in een watervoerende laag zijn op basis van dezelfde studie geen onderhoudskosten gerekend.

Een overzicht van de nationale kosten staat in Tabel 27.

Tabel 27 Cost-breakdown voor het technisch potentieel van warmteopslag

| Cost Breakdown                  | Opslag in watervoerende laag | Tankopslag                |
|---------------------------------|------------------------------|---------------------------|
|                                 | miljarden euro's per jaar    | miljarden euro's per jaar |
| <b>Nationale kosten</b>         | <b>-0,2</b>                  | <b>0,9</b>                |
| Annuïteit                       | 0,1                          | 1,0                       |
| Operationele kosten             | 0                            | 0,2                       |
| Bespaarde energiekosten aardgas | -0,3                         | -0,3                      |