

TenneT  
E-Top

## Flexibiliteit en Warmte in de Gebouwde Omgeving

Analyse van kansen en randvoorwaarden voor systeem-  
integratie van duurzame warmte in de gebouwde omgeving

Analyserapport

Energiesysteem

Samen

Duurzaam

Dialogoog

Betaalbaar

Betrouwbaar

In actie

Toekomst

# Inhoud

	Pagina
In aanvulling op dit Analyserapport is een zelfstandige Management Samenvatting beschikbaar.	
<b>Samenvatting</b> <b>Bij keuzes in de warmtetransitie moeten kansen voor flexibiliteit in het elektriciteitssysteem meewegen</b>	3
<b>Aanleiding</b> <b>Warmtetransitie met een duurzaam elektriciteitssysteem</b>	7
1. Keuzes in de warmtetransitie zijn belangrijk voor een efficiënt en betrouwbaar energiesysteem in de toekomst	8
2. Warmte in de gebouwde omgeving vraagt bij koud weer veel energie en hoge vermogens	9
3. Het afstemmen van vraag en aanbod van elektriciteit uit zon en wind vraagt om veel flexibiliteit	10
<b>Uitdagingen</b> <b>Netwerkcapaciteit, korte-duur flexibiliteit en back-up opwek</b>	11
4. Elektrificeren van warmte leidt tot nieuwe piekbelasting in het netwerk dat daar nog niet voor ontworpen was	12
5. Inflexibele warmtepompen kunnen nieuwe back-up opwek nodig maken en de energierekening opdrijven	14
6. Lokale keuzes in de Transitievisie Warmte tellen op tot een groot verschil in het energiesysteem	15
<b>Oplossingen</b> <b>Keuzes die aansluiten bij een duurzaam elektriciteitssysteem</b>	16
7. Keuzes warmtetransitie kunnen piekvraag elektriciteit verlagen: isolatie, bodemwarmtepomp en slimme aansturing	17
8. Hybride warmtepompen passen in een CO <sub>2</sub> -vrij energiesysteem met groengas en waterstof	19
9. Warmtenetten bieden nieuwe kansen voor het elektriciteitssysteem door warmte-opslag en E-boilers	22
<b>Aanbevelingen</b> <b>Meetellen flexibiliteit in keuzes warmtetransitie en creëren randvoorwaarden veilige flexibele sturing</b>	25
10. Meetellen van voordelen van flexibele elektriciteitsvraag in modellen en afwegingen voor de warmtetransitie	26
11. Stimuleren van meest flexibele warmte-opties: stuurbare warmtepompen, hybride warmtepompen en warmtenetten	27
12. Samenwerken aan randvoorwaarden voor inzet van flexibiliteit: veilig, kosteneffectief en zonder zorgen voor bewoners	28
<b>Bijlagen</b>	29
A. Wat zijn de uitgangspunten van deze analyse over flexibiliteit en warmte?	30
B. Wat kun je bereiken met het slim aansturen van warmtepompen?	39
C. Welke rol kunnen warmtenetten en warmtebuffers spelen in een geïntegreerd energiesysteem?	47
D. Hoe telt deze (in)flexibiliteit op in het landelijke energiesysteem?	52
E. Waarom lost het elektriciteitssysteem met flexibiliteit en opslag dit niet op?	61
F. Hoe is deze analyse tot stand gekomen?	63

## Colofon

### Schrijfteam

Tjerk den Boer  
Frank Wiersma  
Faruk Dervis  
Bart Kaas

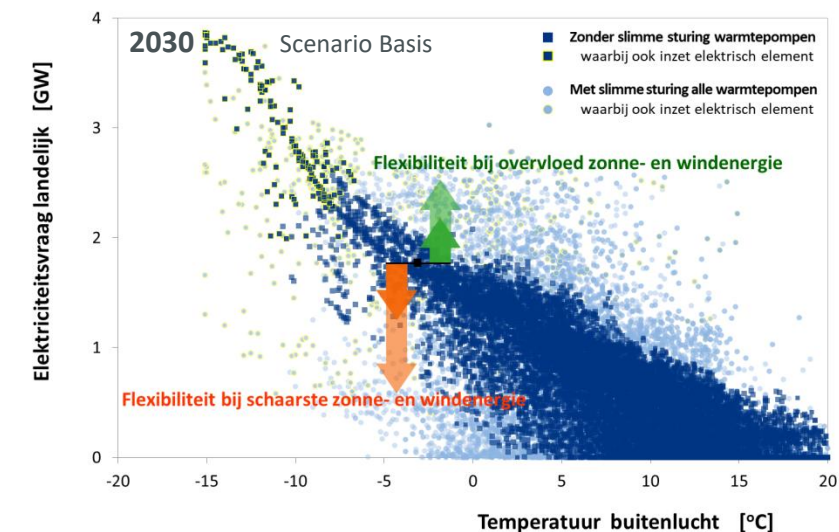
Met inbreng van  
E-TOP expertgroep  
Flexibiliteit en Warmte  
zie deelnemerslijst  
in Bijlage F.

# Bij keuzes in de warmtetransitie moeten kansen voor flexibiliteit in het elektriciteitssysteem meewegen

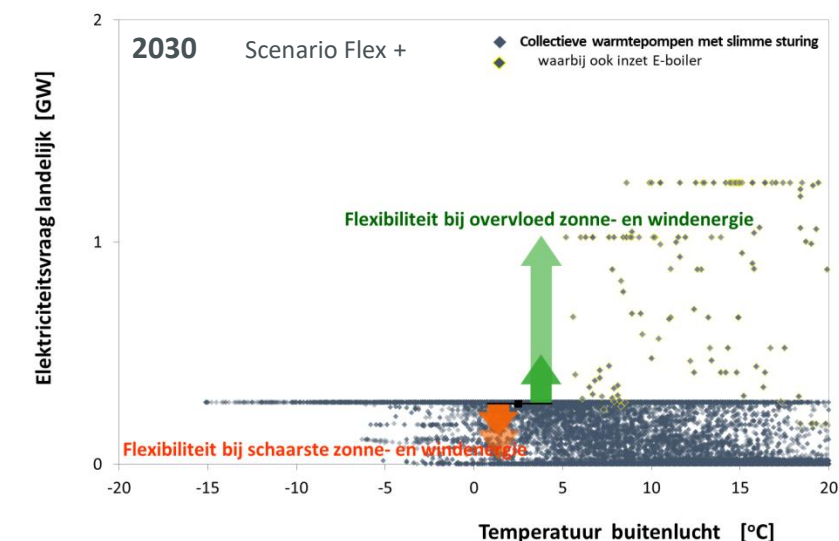
In aanvulling op dit Analyserapport is een zelfstandige Management Samenvatting beschikbaar.

1. Warmte voor de gebouwde omgeving is een groot deel van ons energieverbruik. Op koude dagen vraagt deze hoge vermogens. Elektrische opties kunnen bijdragen aan het verduurzamen maar dit heeft gevolgen voor het elektriciteitsnetwerk en –systeem.
2. Tegelijkertijd heeft het elektriciteitssysteem met variabele opwek uit zon en wind behoefte aan veel nieuwe flexibiliteitsmiddelen, zoals vraagsturing en opslag. Een transitie tegen de laagste maatschappelijke kosten vraagt er om dat over sectoren heen de meest kosteneffectieve flexibiliteitsopties worden ontsloten.
3. Deze studie beschrijft de potentie van flexibiliteit uit warmte in de gebouwde omgeving en wat ervoor nodig is om deze mogelijk te maken. Deze inzichten moeten meewegen in de Transitievisie Warmte en beleid voor de warmtetransitie.
4. Keuzes van gemeentes en bewoners kunnen optellen tot hoge elektrische vermogens per wijk en landelijk. Ten eerste kan dit (naast zon-op-dak en elektrisch laden) vragen om verzwaring van het elektriciteitsnet. Ten tweede kan extra back-up opwek nodig zijn voor de niet-flexibele nieuwe elektriciteitsvraag op koude dagen zonder wind of zon.
5. Aan de hand van PBL Startanalyse en 30% woningen duurzaam in 2030 is een scenario theoretisch geanalyseerd: 7% *all-electric*, 6% hybride warmtepomp, 17% warmtenet. Hieruit blijkt een substantieel theoretisch potentieel voor flexibiliteit, meest in de winter:
  - Piekvraag warmtepompen tot 4 GW, waarvan bij koude tot 1.5 GW E-element.
  - Niet altijd, maar vaak 0.5 tot 2 GW vraagreductie en 0 tot 1 GW -verhoging mogelijk.
  - Flexibiliteit warmtenetten vaak 0 tot 0.3 GW warmtepompen en 0 tot 1 GW E-boilers.
6. Om een indruk te krijgen van de situatie richting 2050, als 100% van de woningen verduurzaamd zijn, moeten deze vermogens met een factor 3 tot 4 worden vergroot.

Figuur s1: Warmtepompen: elektriciteitsvraag en potentiële flexibiliteit



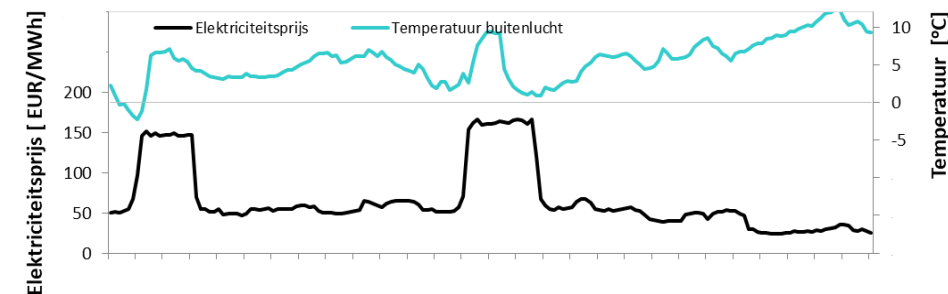
Figuur s2: Warmtenetten met potentiële flexibiliteit warmtepomp en E-boiler



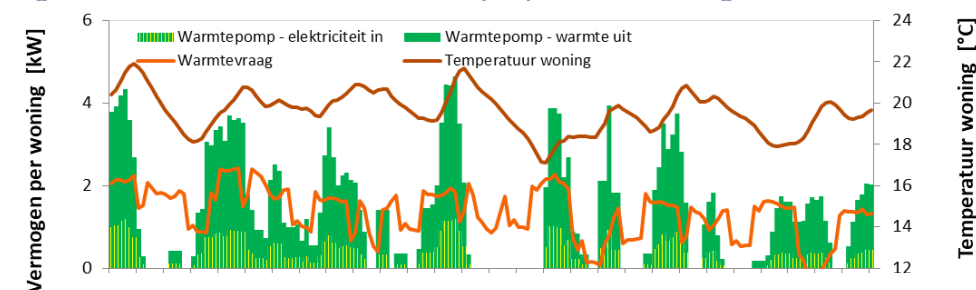
# Bij keuzes in de warmtetransitie moeten kansen voor flexibiliteit in het elektriciteitssysteem meewegen

8. De praktische en economische haalbaarheid moeten nader onderzocht worden en vergeleken met alternatieven voor flexibiliteit en opslag in andere sectoren.
9. Noodzakelijke voorwaarden voor flexibiliteit uit warmte zijn technische aanstuurbaarheid, marktafspraken en bewonersacceptatie.
10. Andere scenario's bereiken nog meer potentiële flexibiliteit en lagere piekvraag door:
  - Meer woningisolatie;
  - Meer hybride warmtepompen en meer bodem- in plaats van luchtwarmtepompen;
  - Warmtepompen met wat groter pompvermogen, maar klein elektrisch element;
  - Meer warmtenetten met -buffers en E-boilers, om overvloedige groene elektriciteit te benutten.
11. Met een variabele elektriciteitsprijs kunnen slim gestuurde warmtepompen de energierekening verlagen. Tot 2030 lijkt dit beperkt: enkele tientallen Euro's per jaar. Maar na 2030 loopt dit waarschijnlijk op, door meer volatiele elektriciteitsprijzen.
12. De extra elektriciteitsvraag van *all-electric* warmtepompen kan al voor 2030 om extra gascentrales vragen. De nationale systeemkosten van deze back-up voor koude periodes zonder zon en wind bedragen 125 - 200 Euro per woning per jaar.
13. Hybride warmtepompen met een kleiner elektrisch vermogen zijn sneller inpasbaar in een bestaand elektriciteitsnet. Ze vragen geen extra back-up opwek door de inzet van gas tijdens uren met een tekort aan groene elektriciteit. Met biogas of waterstof past dit op lange termijn in een CO<sub>2</sub>-vrij energiesysteem. Tegenover deze besparing in back-up opwek staan echter meerkosten voor het gasnetwerk.

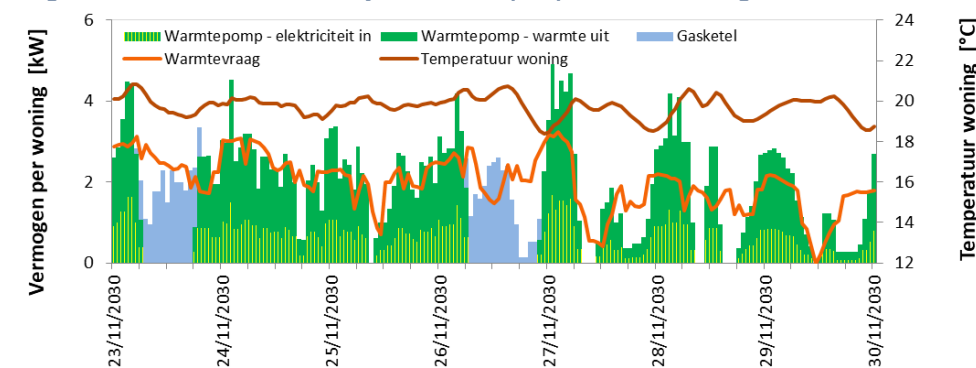
Figuur s3a: Elektriciteitsprijs en buitentemperatuur tijdens winterweek 2030 (weerjaar 2015)



Figuur s3b: Flexibele inzet *all-electric* warmtepomp in label A+ woning



Figuur s3c: Zeer flexibele inzet hybride warmtepomp in label B woning

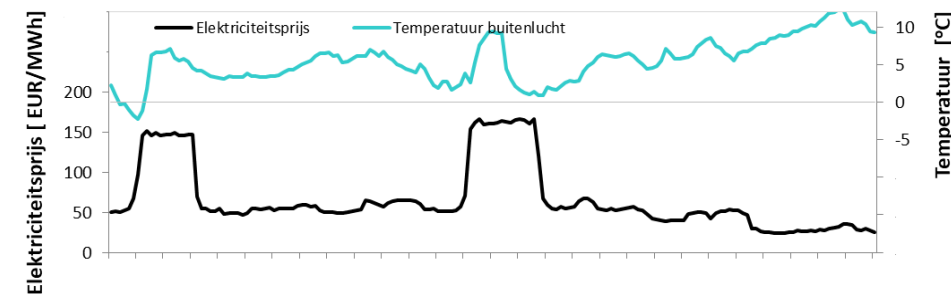


# Bij keuzes in de warmtetransitie moeten kansen voor flexibiliteit in het elektriciteitssysteem meewegen

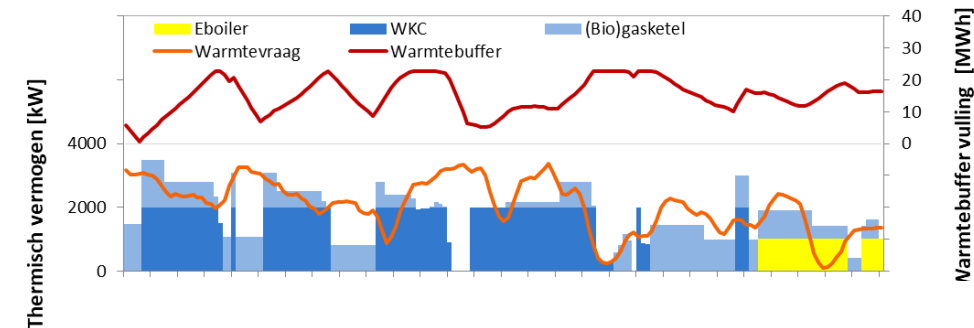
## Aanbevelingen voor volgende stappen in de warmtetransitie:

- Maatschappelijke kosten en baten van flexibele elektriciteitsvraag in warmtesystemen moet nader gekwantificeerd worden, en vergeleken met alternatieve bronnen van flexibiliteit in andere sectoren of delen van het elektriciteitssysteem.
- Rekenmethodes en modellen voor keuzes in de warmtetransitie moeten kosten en baten van flexibiliteit in elektriciteitssysteem eerlijk meetellen (samen met warmtesysteem, energie, woning, energie-infrastructuur), bijvoorbeeld door een differentiatie in elektriciteitsprijs (schaduwprijs) afhankelijk van flexibiliteit.
- Sub-opties zoals warmteopslag en een E-boiler bij warmtenetten moeten ook in deze modellen worden meegeteld.
- Verfijn de regelgeving voor het Equivalent Opwek Rendement van warmtenetten, zodat flexibel elektriciteitsverbruik tijdens uren met overvloedige opwek uit wind en zon kan tellen als CO<sub>2</sub> vrije energie.
- Introduceer standaardeisen voor de aanstuurbaarheid van warmtepompen (*all-electric* en hybride) als *no-regret*, zodat deze - nu, of in de toekomst - tegen lage kosten aangestuurd kunnen worden, terwijl consumenten kunnen worden ontzorgd.
- Eventuele subsidies moeten vooral de meest flexibele types warmtesystemen stimuleren en in ieder geval ook de bovenstaande standaardeisen voor de aanstuurbaarheid van warmtepompen als voorwaarde stellen.
- Bredere proefprojecten met woningcorporaties, installatiebranche, en de energie-sector voor beter inzicht in praktische haalbaarheid van inzetten van flexibiliteit op basis van de elektriciteitsprijs en netwerkcapaciteit, randvoorwaarden en kosten opschaling, en onder welke voorwaarden bewoners mee willen doen.
- De energiesector en de installatiebranche moeten samenwerken aan kennisontwikkeling en opleiding in de installatiebranche over keuzes in warmtesystemen die aansluiten bij het toekomstige elektriciteitssysteem.
- Binnen de energiesector moeten nadere afspraken worden gemaakt zodat flexibiliteit veilig kan worden gebruikt zonder dat dit problemen oplevert in het netwerk, en zodat de flexibiliteit kan worden ingezet voor meerdere doeleinden.
- De netbeheerders moeten de invloed van en gewenste prikkels voor de slimme sturing van warmtepompen meenemen in nieuwe voorstellen voor de netwerkstariefstructuur voor kleinverbruikers.

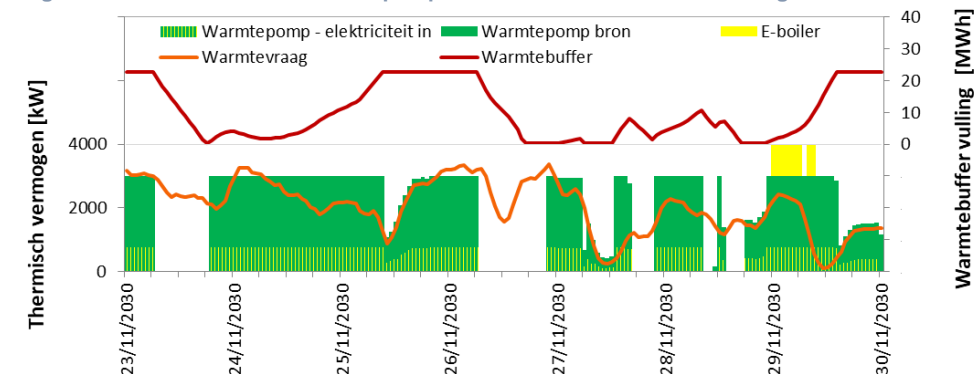
Figuur s4a: Elektriciteitsprijs en buitentemperatuur tijdens winterweek 2030 (weerjaar 2015)



Figuur s4b: Inzet warmtekracht (WKC), E-boiler en (bio)gasketel in warmtenet met dag-buffer



Figuur s4c: Flexibele inzet warmtepomp en E-boiler in warmtenet met dag-buffer



# Bij keuzes in de warmtetransitie moeten kansen voor flexibiliteit voor het elektriciteitssysteem meewegen

Overzicht van keuzes in de warmtetransitie die systeemintegratie bevorderen en **flexibiliteit vergroten**:

<b>1. Isolatie niveau woning</b>	<b>Betere isolatie</b> zorgt voor lagere piekvraag elektriciteit en trage afkoeling, zodat meer kansen voor flexibele elektriciteitsvraag ontstaan.
<b>2. Warmtetechnologie</b>	Keuze op investeringsmoment
<b>Collectief warmtenet</b>	Kansen systeemintegratie door koppelen verschillende warmtebronnen en grootschalige energieopslag in de vorm van warmte
Zonder elektrische voeding	
Met warmtepomp voeding	Efficiënt inzet van groene elektriciteit, vooral flexibel als in combinatie met andere (back-up) warmtebronnen en -buffers.
<b>Met warmtebuffer</b>	Grotere flexibiliteit inzet warmtepomp en kansen voor E <sup>+</sup> -boiler (* E-boiler = Elektrische boiler )
Zonder E-boiler	
<b>Met E-boiler</b>	Maximaal voeden met groene en goedkope elektriciteit in uren van overvloed elektriciteit uit wind en zon
<b>Individuele warmtepomp</b>	
All-electric warmtepomp	Relatief inflexibel, vooral op de koudste dagen. Daarom alleen toepassen in zeer goed geïsoleerde woningen.
Luchtwarmtepomp	Relatief inflexibel, met op de koudste dagen een lage efficiëntie en daardoor extra hoge piekvraag naar elektriciteit.
<b>Bodemwarmtepomp</b>	Lagere piekbelasting elektriciteitsnet, doordat efficiëntie op peil blijft op de koudste dagen
Groot E-element	Extra verhoging van piekbelasting elektriciteitsnet op de koudste dagen en grotere noodzaak back-up opwek
<b>Geen/klein E-element</b>	Vraagt om iets sterkere warmtepomp, met als voordeel een aanzienlijk lagere piekvraag naar elektriciteit op de koudste dagen.
<b>Hybride warmtepomp</b>	Elektrisch vermogen kleiner, sneller inpasbaar in bestaand elektriciteitsnet. Verlaagt de noodzaak voor extra back-up opwek.
<b>3. Aansturing van warmtesysteem</b>	Vereist aanstuurbaarheid van warmtetechnologie, en vervolgens afspraken met bewoners en technisch inregelen van aansturing.
Zonder slimme aansturing	Inflexibele elektriciteitsvraag, vraagt extra back-up opwek.
<b>Met slimme aansturing</b>	Potentiële flexibiliteit kan worden ontsloten. Daarmee is in de toekomst de mogelijkheid om elektriciteitsrekening te verlagen door in te spelen op elektriciteit uit zon/wind, en/of beperkingen in de netwerkcapaciteit.



# Aanleiding

## Warmtetransitie met een duurzaam elektriciteitssysteem

1. Keuzes in de warmtetransitie zijn belangrijk voor een efficiënt en betrouwbaar energiesysteem in de toekomst
2. Warmte in de gebouwde omgeving vraagt bij koud weer veel energie en hoge vermogens
3. Het afstemmen van vraag en aanbod van elektriciteit uit zon en wind vraagt om veel flexibiliteit

# Keuzes in de warmtetransitie zijn belangrijk voor een efficiënt en betrouwbaar energiesysteem in de toekomst

Het Klimaatakkoord uit 2019 stelt heldere doelen voor het verduurzamen van de gebouwde omgeving tot 2030. Gemeentes, de nationale overheid, eigenaren en bewoners moeten daarvoor de komende jaren keuzes maken. Maar het kiezen van de beste route is complex. Een groot aantal factoren speelt een rol, zoals betaalbaarheid, acceptatie, ruimtelijke inpassing en technische beperkingen.

De keuzes in de warmtetransitie hebben grote invloed op het energiesysteem en de energie-infrastructuur, in 2030 en voor de lange termijn. Dit systeemperspectief drijft de maatschappelijke kosten van de transitie en het werkt door in de energierekening van bewoners. Daarom moet dit worden meegewogen in beleidsinstrumenten en de transitiekeuzes in elke gemeente.

De PBL Startanalyse en het Expertisecentrum Warmte bieden handvatten voor het onderbouwen van keuzes in de warmtetransitie. Deze analyse sluit daarop aan. Het geeft antwoord op de vragen:

1. Hoe werken keuzes in de warmtetransitie door in het energiesysteem en in de energierekening van bewoners?
2. Waarom is flexibele aansturing van warmtesystemen belangrijk in de energietransitie?
3. Hoe moet dit worden meegewogen in beleidsinstrumenten en in de warmte-strategieën van de Transitievisies Warmte?

## Route naar Duurzame Gebouwde Omgeving

2019	Expertisecentrum Warmte opgezet Startanalyse PBL, eerste versie	
2020	Transitievise Warmte sommige gemeentes Startanalyse PBL, verfijnde versie	
2021	Transitievies Warmte klaar	
2022	Uitvoeringsplannen per wijk	
	↓	
2030	30% verduurzaamd	
	↓	
2050	100% verduurzaamd	

# Warmte in de gebouwde omgeving vraagt bij koud weer veel energie en hoge vermogens

## Warmte in de gebouwde omgeving gaat om veel energie.

Bijna 20% van het Nederlandse energieverbruik is voor verwarming van woningen en gebouwen. Dit wordt nu nog grotendeels met aardgas opgewekt (en enige restwarmte). Dit moet echter duurzaam worden.

Elektrificatie door bijvoorbeeld warmtepompen is daarvoor een mogelijkheid. Maar daarbij is van belang dat een groot deel van onze elektriciteit in de toekomst uit zon en wind zal worden opgewekt. Ook op koude dagen zonder zon en wind moet er genoeg elektriciteit zijn voor alle verbruikers.

Dit vraagt om back-up vermogen. En elke inflexibele nieuwe elektriciteitsvraag op die momenten vraagt om extra back-up vermogen. Tot 2030 zal dit grotendeels nog bestaan uit gascentrales. Daarna moet ook dit geleidelijk CO<sub>2</sub>-vrij worden gerealiseerd.

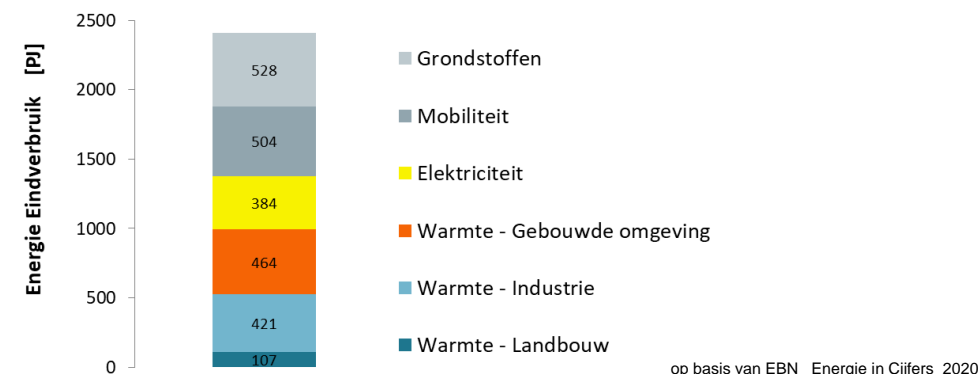
## Warmte in woningen vraagt op koude dagen om grote vermogens. Het elektriciteitsnet in bestaande wijken is daar vaak nog niet klaar voor.

De vraag naar warmte is geconcentreerd op koude dagen. Tot nu toe is het gasnet ontworpen om dan in de piekvraag te kunnen voorzien. Met de warmtetransitie verschuift dit deels naar het elektriciteitsnet.

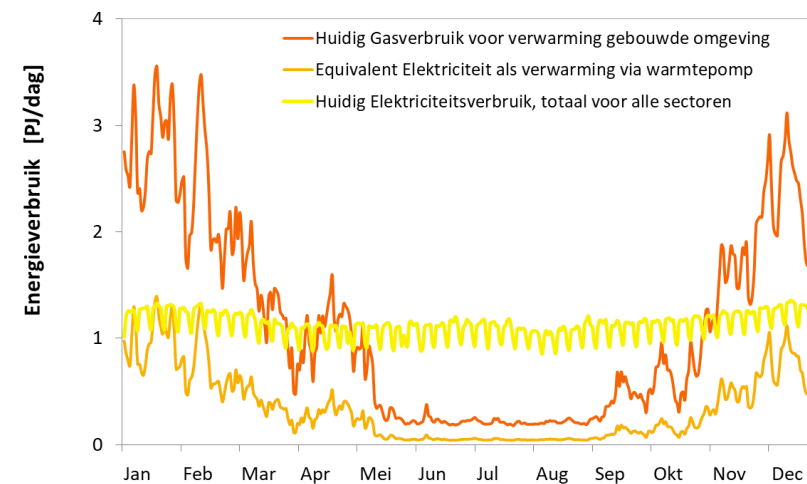
Als in een bestaande woonwijk veel warmtepompen worden geïnstalleerd en het elektriciteitsnet is wat ouder, dan kan de netwerkcapaciteit worden overschreden. Het net in de wijk moet dan eerst verzwakt worden.

Ook zonnepanelen en elektrische auto's in de wijk kunnen dat nodig maken.

Figuur 1 Huidig eindverbruik van energie, circa 2400 PJ



Figuur 2 Vergelijking energieverbruik warmte en elektriciteit



op basis van NEDU profielen 2017 en Gasunie Gasbalans, met aanname luchtwarmtepomp met temperatuur afhankelijke CoP tussen 2.5 en 4

# Het afstemmen van vraag en aanbod van elektriciteit uit zon en wind vraagt om veel flexibiliteit, door alle vraagsectoren

## Gelijktijdig met de warmtetransitie verandert het elektriciteitssysteem snel: van vraag-gestuurd naar duurzaam aanbod-gedreven

Rond 2030 wordt circa 70% van de elektriciteit met variabele bronnen uit zon en wind opgewekt. Er zijn dan veel flexibiliteitsmiddelen nodig om afwisselende periodes van overvloedige en schaarse duurzame elektriciteit te overbruggen. Opslag zal een rol spelen, maar tegen aanzienlijke kosten.

Als eerste stap is het daarom nuttig om de elektriciteitsvraag zo goed mogelijk bij het aanbod te laten aansluiten. Daarbij kan flexibel elektriciteitsverbruik een grote rol spelen. Een transitie tegen de laagste maatschappelijke kosten vraagt er om dat over sectoren heen de meest kosteneffectieve van deze flexibiliteitsopties worden ontsloten.

## Doel studie: op de kaart zetten van kansen voor flexibiliteit bij warmte in de gebouwde omgeving en de voorwaarden voor realisatie hiervan.

Mogelijke kansen voor flexibiliteit in warmte:

- Sturing warmtepompen op basis van elektriciteitsprijs en netwerkcapaciteit.
- Hybride warmtepompen die terugschakelen naar gas op uren zonder wind.
- Elektrische boilers in plaats van *curtailment* overvloedige duurzame opwek.
- Warmtebuffers in warmtenetten om dagen met schaarste te overbruggen.

## Maar tegenover deze kansen staan ook beperkingen:

- Randvoorwaarden capaciteit en spanningskwaliteit in het elektriciteitsnet.
- Kosten-baten afweging en acceptatie door eigenaren en bewoners.

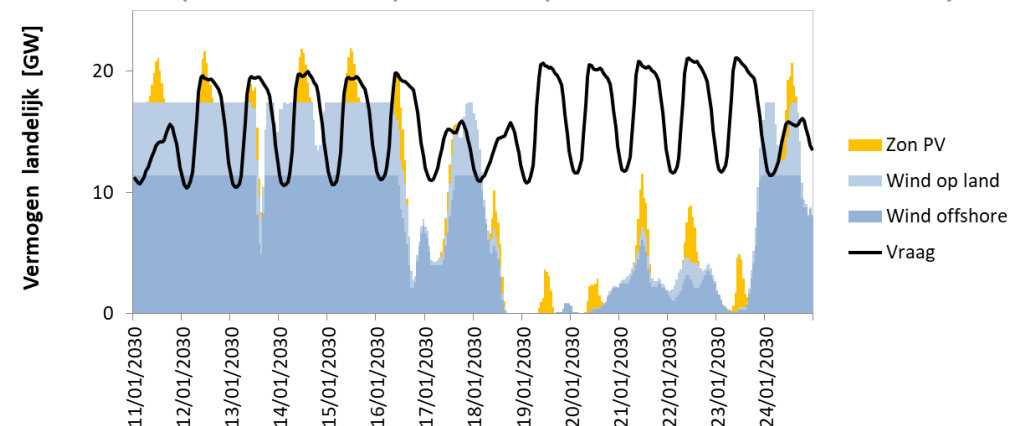
## Uitleg Flexibiliteit voor elektriciteitsnet en elektriciteitssysteem

Met zonnepanelen en nieuwe elektriciteitsvraag voor elektrische auto's en warmtepompen neemt de piekbelasting van het elektriciteitsnet toe. Flexibele sturing kan bijdragen aan het **afvlakken van korte pieken als de netwerk-capaciteit dreigt te worden overschreden**. Maar ook het gebruik van flexibele hybride warmtepompen met een kleiner elektrisch vermogen draagt hieraan bij.

De tweede toepassing voor flexibiliteit is het **opvangen van korte en lange pieken en dalen in opwek uit zon en wind**. In 2030 zijn landelijk Gigawatts aan nieuwe flexibiliteit nodig. Daarmee kan de CO<sub>2</sub> uitstoot van gascentrales verder reduceren en kan overvloedige zon en wind nuttig worden ingezet in plaats van *curtailment*.

Van belang is de keuze van warmtesystemen die flexibel kunnen worden gestuurd. Maar ook moeten voorwaarden worden ingeregeld, zodat dit aantrekkelijk kan zijn voor eigenaren en bewoners en veilig voor het elektriciteitsnet.

Figuur 3 Voorbeeld elektriciteitsvraag en -aanbod uit wind en zon in 2030: week 1 (korte fluctuaties) en week 2 (aanhoudende schaarste wind opwek).



# Uitdagingen

## Netwerkcapaciteit, korte-duur flexibiliteit en back-up opwek

4. Elektrificeren van warmte leidt tot nieuwe piekbelasting in het netwerk dat daar nog niet voor ontworpen was
5. Inflexibele warmtepompen kunnen nieuwe *back-up* opwek nodig maken en de energierekening opdrijven
6. Lokale keuzes in de Transitievisie Warmte tellen op tot een enorm verschil in het elektriciteitssysteem



# Op de meeste plaatsen is het elektriciteitsnet in bestaande woonwijken nog niet geschikt voor *all-electric* warmtepompen in alle woningen

**Het elektriciteitsnet in bestaande wijken werd niet ontworpen voor warmtepompen, omdat verwarming op gas de norm was.**

Het bestaande elektriciteitsnet in woonwijken van voor 2010 is vaak ontworpen op een gelijktijdige verbruik van circa 1,5 kW<sub>e</sub>. Meerdere ontwikkelingen kunnen ervoor zorgen dat dit verzaamd moet worden: zonnepanelen op dak, laden van elektrische auto's, en warmtepompen.

**Warmtepompen vragen een groot vermogen en op koude dagen ook voor alle woningen tegelijkertijd. Typisch vermogen voor een tussenwoning:**

- Luchtwarmtepomp 2 tot 4 kW<sub>e</sub> vaak met enkele kW<sub>e</sub> weerstandselement.
- Bodemwarmtepomp 1.5 tot 2 kW<sub>e</sub> ook vaak met weerstandselement.
- Hybride warmtepomp 1 tot 2 kW<sub>e</sub> + 10 tot 20 kW<sub>gas</sub>

Als veel woningen in een bestaande wijk een *all-electric* (dus niet hybride) warmtepomp installeren, dan zal dit vaak vragen om netverzwaring.

**Daarom wordt in nieuwbouwwijken en bij vervanging een zwaarder netwerk aangelegd. Maar verzwaren kost tijd, geld en ruimte.**

Dit is een enorme opgave die gefaseerd over vele jaren uitgevoerd moet worden. Een goede afstemming met de Transitievisie Warmte is daarom cruciaal. In de tussentijd kunnen warmtepompen met een lagere piek netbelasting op veel plaatsen al wel worden geïnstalleerd: bijvoorbeeld bodemwarmtepompen in zeer goed geïsoleerde woningen en hybride warmtepompen.

### Toelichting CoP en het elektrisch vermogen van een warmtepomp

Warmtepompen combineren elektriciteit met warmte uit een bron, zoals de buitenlucht, bodem of water:  $kW_{\text{elektriciteit}} \times \text{CoP} = kW_{\text{warmte}}$

warmte uit buitenlucht,  
bodem, of water

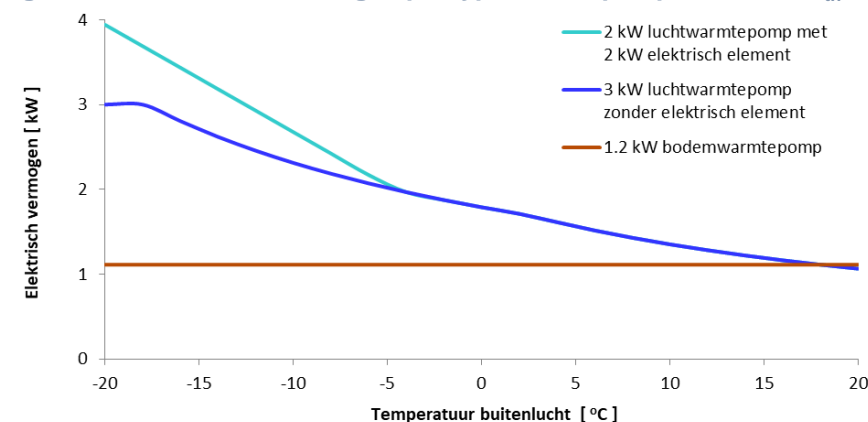


**Coefficient of Performance (CoP)** is de verhouding tussen de geleverde warmte en elektriciteit die daarvoor nodig is. Deze is afhankelijk van type warmtepomp, bron-temperatuur, en afgiftemtemperatuur in de woning. Hoe groter het temperatuurverschil tussen bron en afgifte, hoe minder efficiënt de warmtepomp. Bijvoorbeeld:

- Bodemwarmtepomp CoP 4 gemiddeld tot 5 bij lage afgiftemtemperatuur.
- Luchtwarmtepomp CoP 4 gemiddeld, maar 1.5 bij extreme koude.
- Hybride warmtepomp kan deze momenten met lage CoP vermijden.

All-electric warmtepompen hebben vaak een **aanvullend elektrisch weerstandselement (met CoP 1)** voor extra warmte bij vorst. Maar een groot weerstandselement zorgt dan voor een extra hoge elektriciteitsvraag.

Figuur 8 Elektrisch vermogen per type warmtepompen voor 5kW<sub>th</sub> warmtevraag



# Variabiliteit wordt niet zomaar ergens anders door “het systeem” opgelost. Flexibele vraag is een cruciaal onderdeel van het systeem.

**De groei van zon en wind leidt tot meer en meer uren met een overvloed aan duurzame opwek. Extra vraag op die uren voorkomt *curtailment*.**

Opslag is relatief kostbaar en kan niet alle pieken van opwek uit wind en zon opvangen. De kosten zakken voor batterij-opslag of conversie naar waterstof. Maar deze blijven altijd hoger dan het direct verbruik van deze duurzame elektriciteit. Extra elektriciteitsvraag in die uren, bijvoorbeeld door het voorverwarmen van woningen, draagt bij aan het zoveel mogelijk nuttig inzetten van deze CO<sub>2</sub>-vrije energie die anders verloren gaat.

**Maar er blijven kortere en langere periodes met weinig of geen zon en wind opwek. Inflexibele vraag in die uren verhoogt CO<sub>2</sub> uitstoot. En elke inflexibele vraag extra, kan vragen om meer opgesteld back-up vermogen.**

Gascentrales blijven nog vele jaren een rol spelen bij het overbruggen van periodes van schaarse zon en wind opwek. Korte-duur opslag kan in 2030 een rol hierin spelen, maar lang niet volledig. Dit betekent dat elke extra elektriciteitsvraag in die uren leidt tot meer CO<sub>2</sub> uitstoot.

Na 2030 moeten ook deze steeds meer CO<sub>2</sub>-vrij overbrugd worden. Daar zijn dan relatief kostbare oplossingen voor nodig zoals waterstof. Flexibele vraag die juist deze uren kan vermijden kan daarom een rol van belang spelen.

**Variabele elektriciteitsprijzen worden relevanter, ook voor huishoudens.**

Steeds vaker wordt de elektriciteitsprijs relatief laag in uren met veel opwek uit zon en wind en hoog in de uren zonder. Een vaste prijs en constant verbruik van elektriciteit wordt dan relatief duur. Aan de andere kant kan een totale rekening lager worden door elektriciteit vooral te gebruiken in de goedkoopste uren. Een variabel prijscontract wordt dan voor huishoudens steeds aantrekkelijker, als dit ook makkelijk en zonder verlies aan comfort kan.

## Toelichting Voorbeelden van andere flexibiliteitsopties.

**Vraagsturing:** de behoefte aan flexibiliteit wordt zo groot, dat in alle sectoren gezocht moet worden naar de kansen: waar is dit het meest betaalbaar en praktisch. Sommige industrieën doen al aan vraagsturing. Slim laden van elektrische auto's.

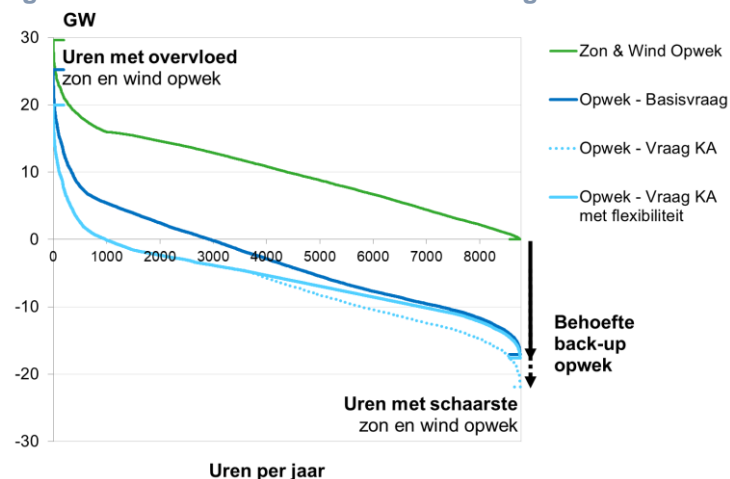
**Batterijopslag** wordt langzaam goedkoper, maar blijft relatief kostbaar voor grote hoeveelheden energie voor verwarming tijdens een paar koude winterweken. Er zijn 4 tot 8 Tesla thuisbatterijen nodig per woning met warmtepomp voor 1 dag.

**Waterstof** kan in grote hoeveelheden opslagen worden. Maar de productie is relatief kostbaar en bij conversie (E naar H<sub>2</sub> en terug) gaat circa 50% energie verloren.

**Uitwisseling elektriciteit met buurlanden** helpt vaak, maar lang niet altijd. Periodes van schaarste en overvloed kunnen samenvallen.

**Back-up/piekcentrales** gaan met meer zon- en wind energie steeds minder uren draaien. Elke kWh elektriciteit uit deze back-up centrales wordt daarom erg kostbaar.

**Figuur 9 Rol flexibele elektriciteitsvraag en relevantie voor back-up opwek**



# Inflexibiliteit of flexibiliteit in warmteoplossing kunnen doortellen in de energierekening

**Vandaag de dag zijn inflexibele vraag en een vaste elektriciteitsprijs de norm voor huishoudens. In de toekomst kan flexibel verbruik aantrekkelijker worden.**

De energierekening van woningen is een optelling:

- Leveringskosten energie door de energieleverancier: voor kleinverbruikers nu vrijwel altijd een vast bedrag per kWh. Maar met zon en wind opwek wordt het moment van verbruik steeds belangrijker. Voor leveranciers en huishoudens kan een variabele prijs dan aantrekkelijk worden. Dit kan ook in de vorm van een totaalpakket: een slimme thermostaat die zoveel mogelijk goedkope uren benut en de dure vermijdt, terwijl bewoners daar weinig of niets van merken.
- Energiebelasting en heffingen die de keuze voor flexibiliteit beïnvloeden.
- Nettarieven voor het elektriciteitsnet. De landelijke kosten voor netverzwaring tellen hierin door. Tot nu toe zijn de netwerktarieven voor de meeste huishoudens uniform. Maar er wordt nagedacht over een gedifferentieerd tarief afhankelijk van de piekbelasting.

**Flexibele warmtesystemen kunnen bijdragen aan het verlagen van piekbelasting in het elektriciteitsnet. Maar gelijktijdigheid van sturing kan ook pieken verergeren of spanningsproblemen veroorzaken.**

De energiesector moet daarom nader uitwerken welke randvoorwaarden en systemen nodig zijn om flexibiliteit veilig te kunnen ontsluiten, en negatieve consequenties of inefficiënte netwerkinvesteringen te voorkomen.

**In de warmtetransitie moet daarom de totale kosten worden beschouwd: woningmaatregelen, elektriciteitsnet, middelen voor betrouwbare elektriciteitslevering en eventueel ontsluiten van flexibiliteit.**

## Toelichting

Potentiële besparing door slimme sturing van *all-electric* warmtepomp of toepassing hybride warmtepomp.

De eerste vergelijking is de potentiële besparing in leveringskosten door slimme sturing van een flexibele *all-electric* warmtepomp die inspeelt op een variabele elektriciteitsprijs. Hierbij is gebruik gemaakt van een gemodelleerde elektriciteitsprijs voor 2030 door Berenschot. Uitgangspunt is een flexibel prijscontract voor het huishouden met een leveringsbedrag dat bestaat uit de marktprijs + 0,15 Euro/kWh belastingen en heffingen. Hieruit volgt een beperkte besparing 15 tot 20 €/jaar op leveringskosten. Dit houdt verband met beperkte prijsverschillen in 2030. Maar dit zal in latere jaren oplopen en daarmee ook de besparing door slimme sturing. In schaarste situaties kan deze besparing binnen enkele dagen gerealiseerd worden.

Een tweede benadering vergelijkt de vaste systeemkosten van een *all-electric* warmtepomp (met bijbehorende back-up opwekcapaciteit) met die van een hybride warmtepomp (met daarbij benodigde gasaansluiting). Het geschatte verschil in jaarlijkse kosten is circa 20 tot 200 €/jaar. Daarbovenop komt nog een mogelijke besparing op netverzwaring (welke ook om andere redenen nodig kan zijn).

(Nadere details en onderbouwing in Bijlage B)	1. Verschil in Leveringskosten <i>all-electric</i> warmtepomp met en zonder slimme sturing	2. Verschil in vaste kosten <i>all-electric</i> warmtepomp en hybride warmtepomp
Tussenwoning woningsschil Label B	<i>All-electric</i> warmtepomp 2,5 kW jaarverbruik 2740 kWh	<i>All-electric</i> warmtepomp 2,5 kW Kosten back-up opwek gascentrale 120 tot 200 €/jaar verzwaring elektriciteitsnet PM
Warmtevraag 31 GJ	Eenvoudig bedrijf 565 tot 570 €/jaar Slim gestuurd 550 tot 550 €/jaar	<b>Hybride warmtepomp</b> 1,0 kW Meerkosten gasketel afschrijving 70 tot 140 €/jaar gasnet instandhouding 100 tot 200 €/jaar Minder-kosten kleinere warmtepomp <u>150 tot 300 €/jaar</u> Netto meerkosten 0 tot 170 €/jaar
Netcapaciteit niet beperkend	<b>Besparing slimme sturing</b> <b>15 tot 20 €/jaar</b>	<b>Besparing door hybride warmtepomp</b> <b>0 tot 200 €/jaar</b> + eventuele besparing netverzwaring PM
	Gebaseerd op prijsprofiel 2030, met piekprijzen door gascentrales. In latere jaren neemt dit waarschijnlijk toe: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Meer uren met lage E-prijs bij overvloed zon en wind.</li> <li>• Hogere pieken E-prijs door meer-kosten CO<sub>2</sub>-vrij regelbaar vermogen.</li> </ul>	

# All-electric warmtepompen, grote elektrische elementen en matige woningisolatie versterken inflexibele piekvraag bij strenge vorst

**Landelijke som voor inflexibel en potentieel flexibel vermogen in warmte is bepaald voor meer of minder flexibiliteit en elektrificatie:**

**Basis** 40% *all-electric* warmtepomp (WP), 6% hybride WP, 45% warmtenet, 10% gas.

**Flex –** meer *all-electric* WP (60%) en minder warmtenetten.

**Flex +** grotere WP, meer bodem WP, meer hybride WP (17%), en warmtenetten met E-boilers en buffers.

**Flex ++** meer woningisolatie, meer hybride WP (21%), en warmtenetten met E-boilers, grote buffers en Warmte Kracht Combinatie.

Het gedrag van warmtesystemen is vervolgens doorgerekend voor situatie 2030 (30% verduurzaamd) en eindbeeld (100% verduurzaamd). Warmte systemen worden gestuurd op basis van netwerkcapaciteit (zonder of met netverzwaring) en op elektriciteitsprijs.

De figuren tonen landelijke vermogens voor warmtepompen in 2030 voor de twee uiterste scenario's. Naar het eindbeeld (~2050) groeien deze vermogens met een factor 3 tot 4.

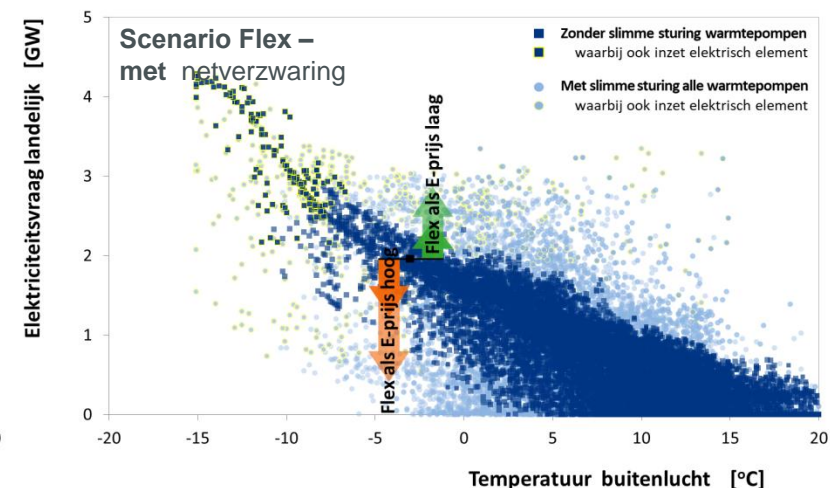
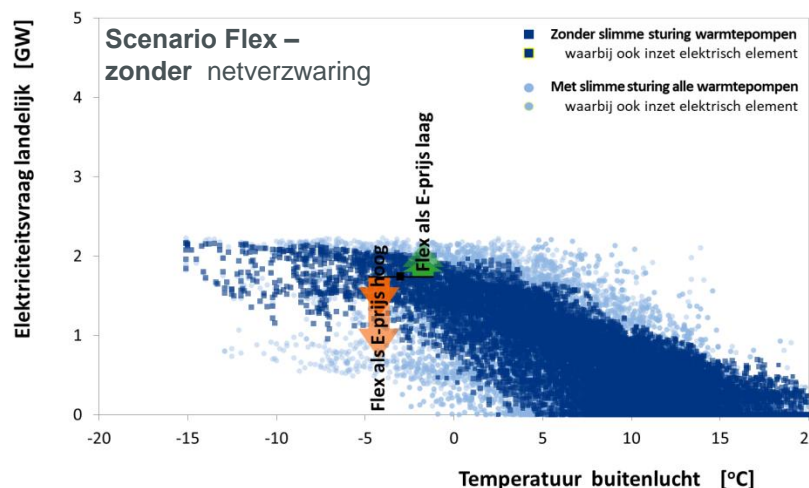
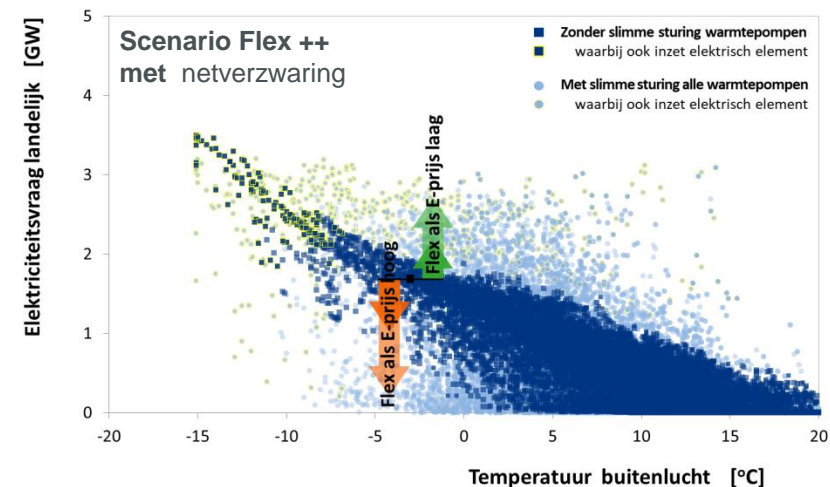
## Als netwerkcapaciteit niet beperkend is:

- Piekvraag ruim 3 tot 4 GW, waarvan 0.5 tot 1.5 GW door weerstandselementen.
- Flexibiliteit vaak 0.5 tot 1 GW maar kleiner bij extreme koude.

## Als netwerkcapaciteit zeer beperkend is:

- Piekvraag afgekapt op 2 GW, rol weerstandselementen afgekapt.
- Flexibiliteit minder beschikbaar.
- Afkoeling woningen bij strenge vorst.

Figuur 10 Warmtepompen 2030: landelijke elektriciteitsvraag en potentiële flexibiliteit voor de twee uiterste scenario's



# Oplossingen

## Keuzes die aansluiten bij een duurzaam elektriciteitssysteem

7. Keuzes warmtetransitie kunnen piekvraag elektriciteit verlagen: isolatie, bodemwarmtepomp en slimme aansturing
8. Hybride warmtepompen passen in een CO<sub>2</sub>-vrij energiesysteem met groengas en waterstof
9. Warmtenetten bieden nieuwe kansen voor het elektriciteitssysteem door warmte-opslag en E-boilers



# Isolatie niveau en geïnstalleerde warmtetechnologie hebben de grootste impact op het beperken van de piekvraag

De transitie naar een duurzame warmtevoorziening bestaat uit keuzes tussen verschillende strategieën. Drie factoren hebben daarbij een grote invloed op de piek en potentiële flexibiliteit in de elektriciteitsvraag:

1. **Woningisolatie** verlaagt piekvraag sterk en vergroot flexibiliteit.
2. **Warmtetechnologie**, al dan niet elektrisch, meer of minder flexibel.
3. **Aansturing** van warmtesysteem, eventueel met -opslag, waarmee potentiële flexibiliteit nuttig kan worden ingezet.

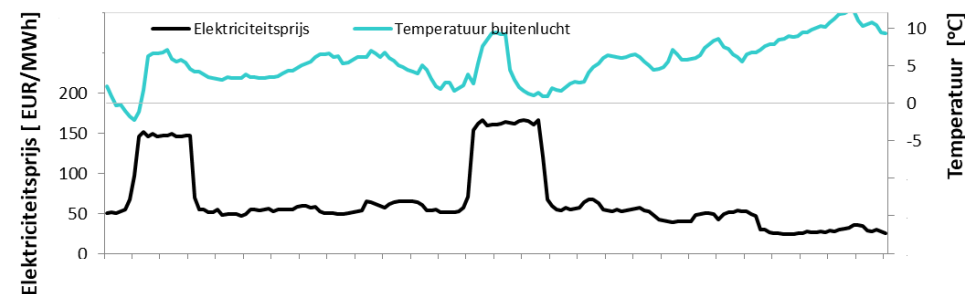
De invloed op piekvraag en flexibiliteit moet worden meegewogen in de maatschappelijke kosten- batenafweging, zoals in de PBL Startanalyse.

Op de volgende pagina's wordt de invloed van elke factor beschreven en geïllustreerd aan de hand van vergelijkende figuren van warmtevraag per woning voor een matige winterweek in 2030. De bovenste figuur toont het verloop van temperatuur en elektriciteitsprijs. Daaronder de warmtevraag, de invulling van deze warmtevraag en de corresponderende elektriciteitsvraag. Ook worden eventuele schommelingen in de temperatuur in de woning weergegeven. Bijlage A beschrijft de achterliggende modelberekeningen. Bijlage B toont de flexibiliteit en inflexibiliteit van deze elektriciteitsvraag.

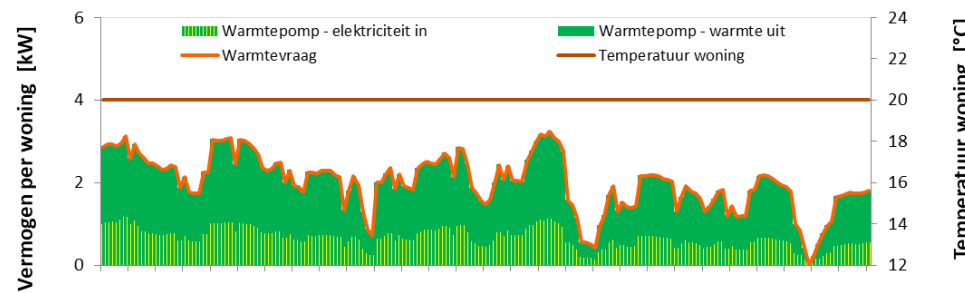
## Isolatie dempt pieken warmtevraag en pieken elektriciteitsvraag van *all-electric* warmtepompen

Betere isolatie verlaagt de warmtevraag: vergelijk Figuren 11b en 11c. Daarmee kan een warmtepomp met een kleiner vermogen worden geïnstalleerd met een minder hoge piekvraag naar elektriciteit.

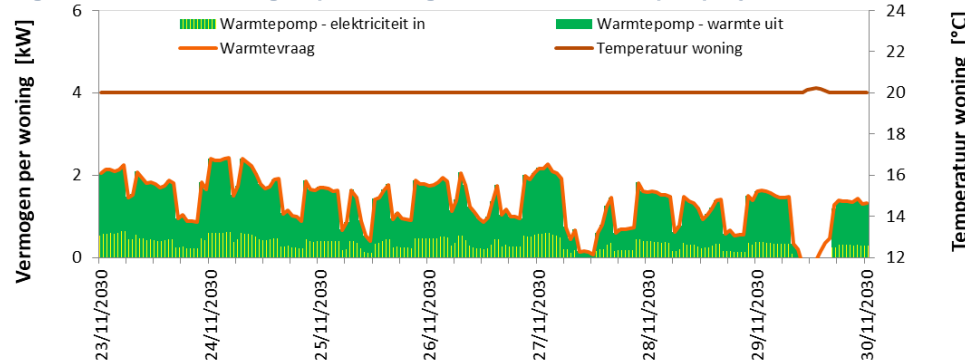
Figuur 11a Elektriciteitsprijs en buitentemperatuur tijdens winterweek 2030 (weerjaar 2015)



Figuur 11b Warmtevraag en piekvermogen *all-electric* warmtepomp bij label B isolatie schil



Figuur 11c Warmtevraag en piekvermogen *all-electric* warmtepomp bij label A+ isolatie schil



# Beter geïsoleerde woningen maken meer flexibele sturing mogelijk

## Warmtepompen gebruiken dan vooral goedkope en groene elektriciteit

### Isolatie maakt bovendien meer flexibele sturing van warmtepompen mogelijk.

Door slimme aansturing van warmtepompen kunnen deze inspelen op uren met de meest goedkope en/of groene elektriciteit. En aan de andere kant kunnen deze de uren met de duurste en/of de meest CO<sub>2</sub> intensieve elektriciteit vermijden.

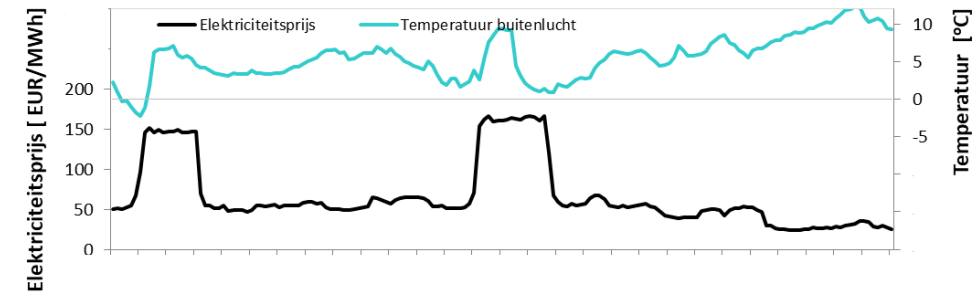
Daarmee ontstaan betere mogelijkheden om een woning eerder voor te verwarmen. Een beter geïsoleerde woning houdt deze warmte immers langer vast. Daarna kunnen warmtepompen dan pauzeren, bijvoorbeeld om een aantal uren met een hoge elektriciteitsprijs te vermijden.

Het gezamenlijke effect van isolatie en stuurbaarheid betekent dat er over meer uren achtereen gebruik gemaakt kan worden van de van thermische massa van de woning, zodat de warmtepomp alleen tijdens de gunstigste momenten draait.

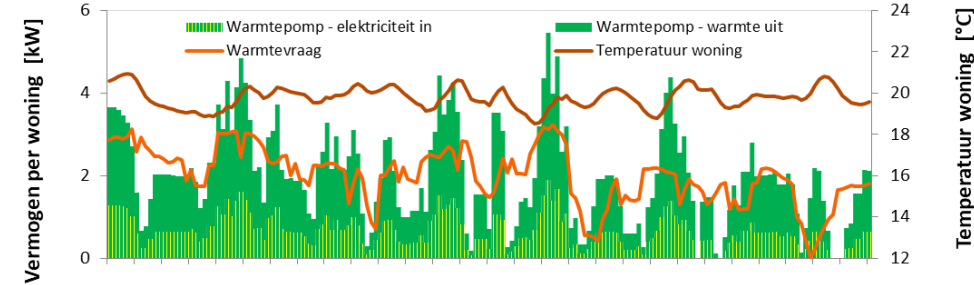
De temperatuur in een woning zal dan wat fluctueren, binnen comfortgrenzen die bewoners kunnen instellen. Het staat echter een financieel voordeel tegenover: een besparing op de elektriciteitsrekening van bewoners, op basis van een flexibele prijscontract met hun leverancier.

Tijdens meerdaagse koude periodes moeten ook in goed geïsoleerde woningen warmtepompen draaien. Het positieve effect is vooral merkbaar in korte periodes met hoge prijsspieken in de elektriciteitsmarkt. De figuren tonen hiervan twee voorbeelden.

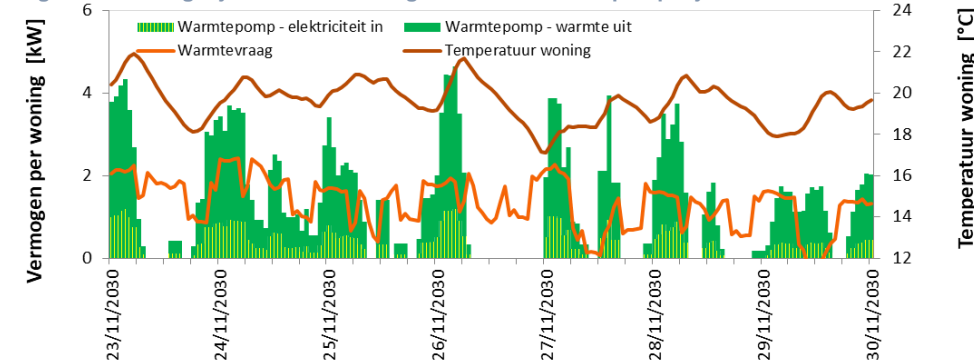
Figuur 12a Elektriciteitsprijs en buitentemperatuur tijdens winterweek 2030 (weerjaar 2015)



Figuur 12b Mogelijke flexibele sturing all-electric warmtepomp bij label B isolatie schil



Figuur 12c Mogelijke flexibele sturing all-electric warmtepomp bij label A+ isolatie schil



# Lagere piekbelasting bij bodemwarmtepompen dan bij luchtwarmtepompen

## Hybride warmtepompen zijn zeer flexibel

**All-electric warmtepompen** (met lucht of bodem als bron) worden gedimensioneerd om tijdens de koudste dagen de woning nog net warm te kunnen houden. Bij aanhoudende strenge vorst moet de WP dan continu aan staan, ook als de elektriciteitsprijs hoog is. Tijdens minder koude dagen, of voor kortere periodes is de hoogte van de elektriciteitsvraag wel te dempen door deze uit te smeren over de tijd, vooral in goed geïsoleerde woningen.

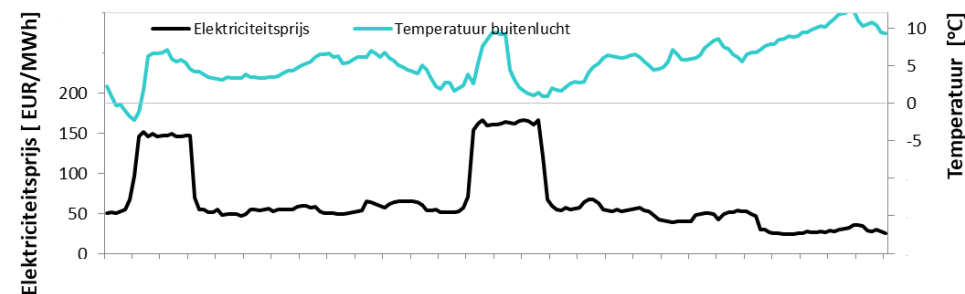
Door de hoge gelijktijdige elektriciteitsvraag kunnen *all-electric* warmtepompen alleen op grote schaal worden geïnstalleerd als het elektriciteitsnet in de wijk dat aan kan. In veel bestaande wijken is dit nog niet het geval.

**Lucht- versus bodemwarmtepompen** (of met bron water, of LT warmtenet):

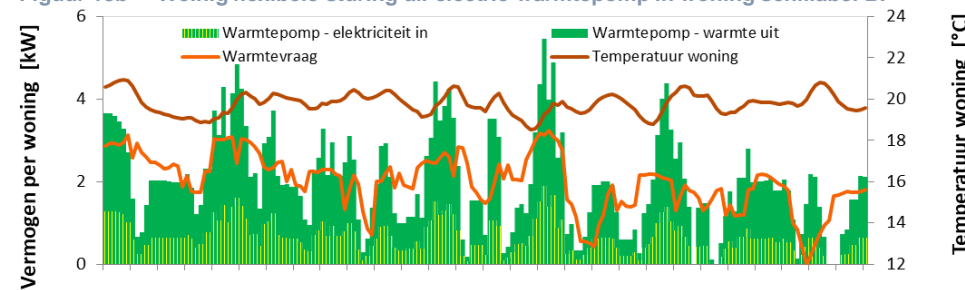
- Hoe kouder de warmtebron, hoe lager de efficiëntie van een warmtepomp (CoP, zie pagina 12). Vooral luchtwarmtepompen hebben bij koude buitenlucht een sterk oplopende elektriciteitsvraag: CoP zakt van (gemiddeld) 4 naar 1.5 tijdens strenge vorst. Voor dezelfde hoeveelheid warmte is dan een 2.7x hoger elektrisch vermogen nodig.
- Dit effect wordt versterkt doordat veel warmtepompen een elektrisch weerstandselement hebben voor de koudste dagen (efficiëntie van 1.0).
- Bij bodemwarmtepompen daarentegen zakt de CoP niet bij vorst, waardoor deze met een kleiner elektrisch vermogen kan volstaan.

**Hybride warmtepompen zijn uiterst flexibel** doordat deze tussen elektriciteit en gas kunnen schakelen. Een hybride warmtepomp bestaat uit een combinatie van een luchtwarmtepomp en een HR ketel. De warmtepomp kan een groot deel van de warmtevraag duurzaam elektrisch invullen. De resterende piek-warmtevraag wordt door de HR ketel geleverd. Hiermee kan 70-90% bespaard worden in het gasverbruik. Bovendien kan de resterende 10-30% worden verduurzaamd door een overstap naar biogas of waterstof.

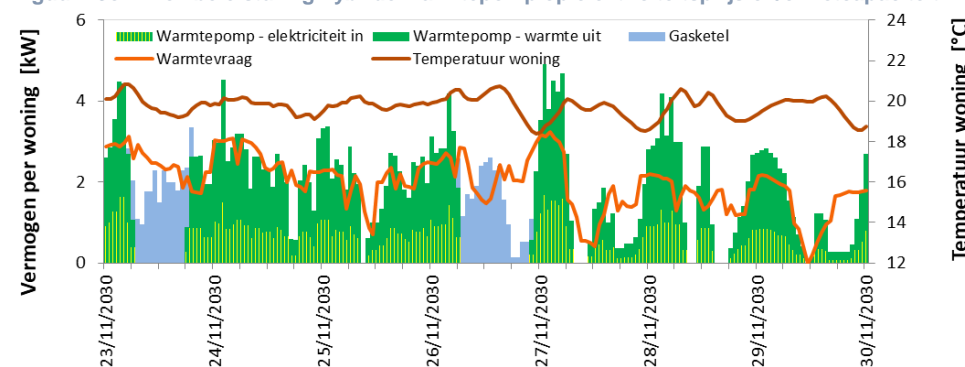
Figuur 13a Elektriciteitsprijs en buitentemperatuur tijdens winterweek 2030 (weerjaar 2015)



Figuur 13b Weinig flexibele sturing all-electric warmtepomp in woning schillabel B.



Figuur 13c Flexibele sturing hybride warmtepomp op elektriciteitsprijs en/of netcapaciteit



# Slim aansturen van warmtepompen zorgt voor lagere CO2 emissies en voorkomt onnodige kosten in systeem en energierekening

## vervolg Hybride warmtepompsystemen

Deze resterende hoeveelheid warmte uit gas is beperkt. Daarom zijn ook het beslag op en de uitgaven aan dit groengas of deze waterstof beperkt. Ten tweede heeft een hybride warmtepomp een kleiner elektrisch vermogen. Daarom zijn deze makkelijker in te passen in het bestaande elektriciteitsnet.

Terwijl hybride warmtepompen in concept zeer flexibel kunnen reageren op de elektriciteitsprijs of een beperkte netwerkcapaciteit, is de aansturing vandaag de dag meestal nog niet slim, maar gericht op een vast omschakelpunt afhankelijk van de buitentemperatuur en de WP efficiëntie.

## Slim aansturen warmtepompen op basis van elektriciteitsprijs en/of beschikbare capaciteit van het elektriciteitsnet in de wijk.

Door slimme sturing kunnen warmtepompen optimaal worden ingezet:

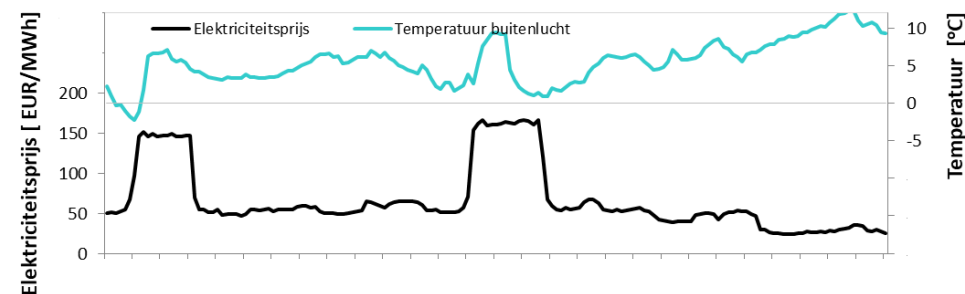
- Vooral elektriciteit verbruiken op uren met een lage elektriciteitsprijs en overvloedige elektriciteit uit wind of zon, en minder in uren dat elektriciteit vooral door gascentrales wordt opgewekt en de elektriciteitsprijs hoger.
- Goed benutten van de beschikbare capaciteit in het elektriciteitsnet, en waar nodig voorkomen dat deze wordt overschreden,

Vandaag zijn er nog geen standaardeisen aan de aanstuurbaarheid van warmtepompen (*“smart-grid ready”*). Meestal is dit alsnog in te regelen met een slimme thermostaat of stuur-box, maar dan tegen hogere kosten.

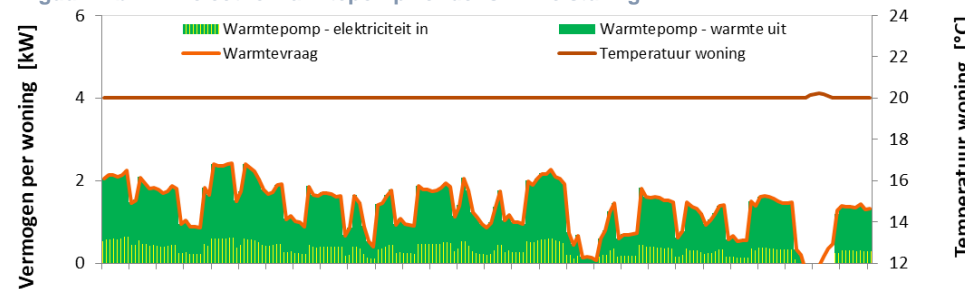
## Dit vraagt om het inrichten van systemen voor afspraken met klanten en stuursignalen door netbeheerders, leveranciers en aggregators.

Vanwege het bescheiden kostenvoordeel (zie pagina 14) is het van belang om deze slimme aansturing tegen lage kosten te organiseren.

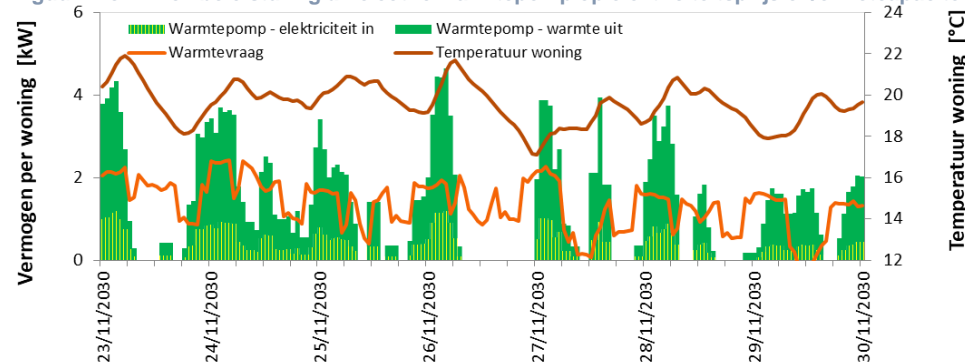
Figuur 14a Elektriciteitsprijs en buitentemperatuur tijdens winterweek 2030 (weerjaar 2015)



Figuur 14b All-electric warmtepomp zonder slimme sturing

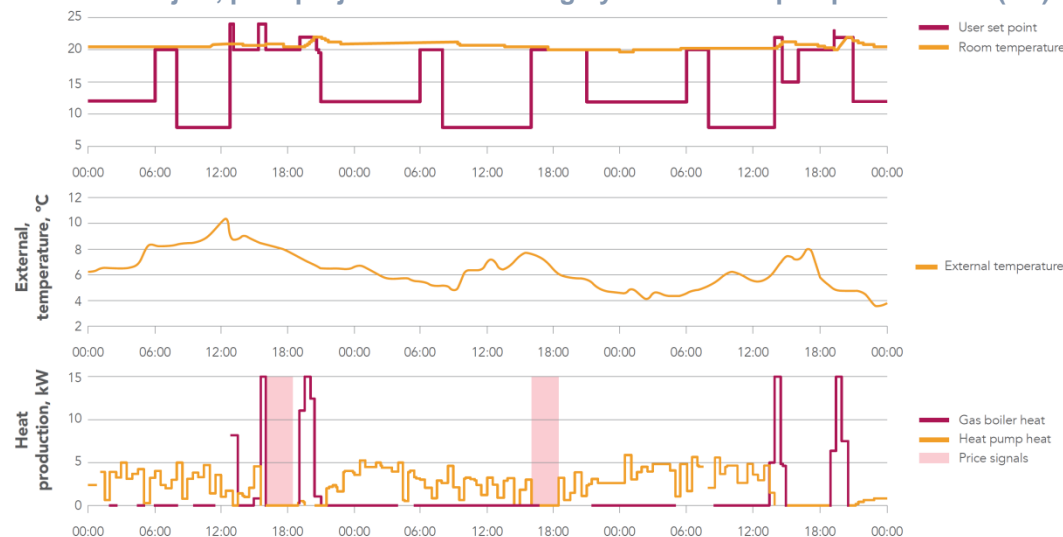


Figuur 14c Flexibele sturing all-electric warmtepomp op elektriciteitsprijs en/of netcapaciteit



# Praktijkvoorbeelden slimme sturing en hybride warmtepompen

## Freedom Project, proefproject met aansturing hybride warmtepompen in Leeds (VK)

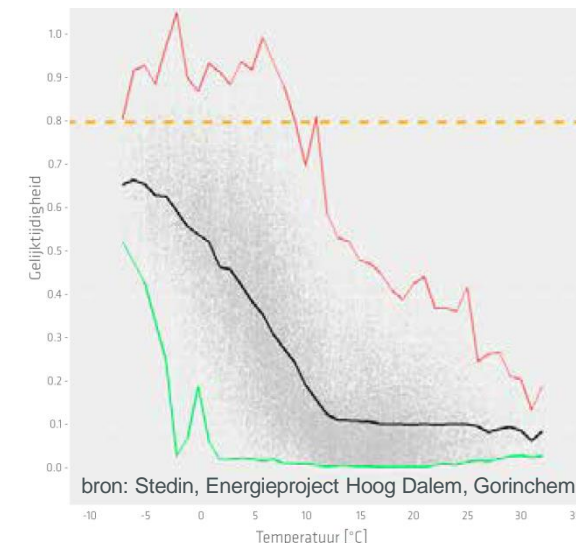


In het Freedom project in Leeds (VK) door Western Power Distribution, Wales & West Utilities en PassivSystems zijn in 75 woningen hybride luchtwarmtepompen toegepast. Het project heeft aangetoond dat hybride warmtepompen in diverse woningtypes en bij verschillende isolatieniveaus toegepast kan worden en het comfort kan waarborgen. Circa 80% van de warmtevraag werd hierbij elektrisch ingevuld.

De hybride systemen zijn hierbij aangestuurd op basis van verschillende signalen: elektriciteitsprijs, buitentemperatuur, en beschikbare netwerkcapaciteit. Voorverwarming was onderdeel van deze stuurstrategieën. De studie doet voorstellen om de incentives te verbeteren voor slimme sturing van warmtepompen.

bron en meer informatie: <https://www.westernpower.co.uk/projects/freedom>

## Voorbeelden proefprojecten met elektriciteitsvraag uit warmtepompen in Nederland



bron: Stedin, Energieproject Hoog Dalem, Gorinchem

In verschillende Nederlandse proefprojecten is zijn warmtepompen getest, al dan niet gestuurd op basis van netcapaciteit, bijvoorbeeld:

- EnergieKoplopers 2 door Liander (foto links), waarin het sturen op elektriciteitsvraag door een aggregator is getest. <https://www.liander.nl/partners/energietransitie/dynamo-flexmarktontwikkeling/energiekoplopers>
- Energieproject Hoog Dalem door Stedin, waarin onder andere de gelijktijdigheid van de elektriciteitsvraag is gemeten (figuur rechts) bij woningen waarin ook zonnepanelen en batterij-opslag zijn toegepast. <https://www.stedin.net/over-stedin/pers-en-media/persberichten/proef-met-energienet-van-de-toekomst-in-gorinchem-succesvol-afgerond>

# Warmtenetten kunnen flexibiliteit leveren, door integratie van meerdere warmtebronnen en buffering van warmte

**Hoewel het startpunt van warmtenetten meestal een andere warmtebron is, ontstaan zo kansen voor het inpassen van warmtepompen en E-boilers.**

Maar bij een warmtenet kan ook elektrische voeding worden ingepast, bijvoorbeeld door grootschalige / collectieve warmtepompen. Dit kan bijdragen aan het nuttig inzetten van overvloedige elektriciteit uit zon en wind.

In aanvulling daarop kunnen elektrische boilers (E-boilers op industriële schaal, met 10MW+ vermogen) gebruikt worden om energie in uren met overvloedige duurzame energie uit zon en wind nuttig aan te wenden. De combinatie met een warmtebuffer is hierbij effectief (zie pagina 24 en Bijlage C).

Natuurlijk vraagt een warmtenet steeds om een afweging ten aanzien van rentabiliteit. Belangrijke factoren daarin zijn de beschikbaarheid van duurzame warmtebronnen, de nabijheid en dichtheid van de bebouwing.

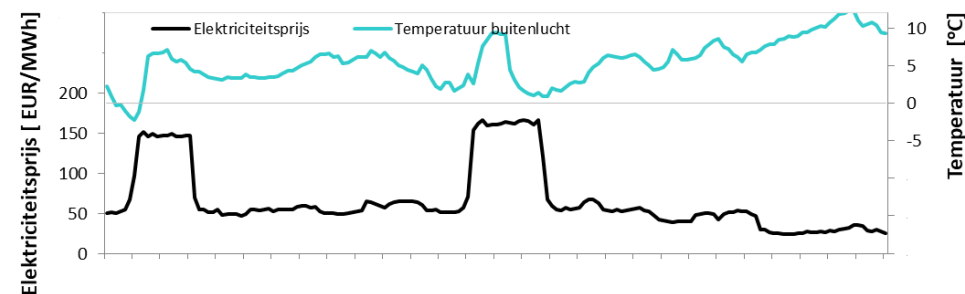
**Collectieve warmtesystemen maken systeemintegratie mogelijk en daarmee hybride warmtesystemen en flexibele elektriciteitsvraag.**

Ook in bestaande warmtenetten is er naast een (rest)warmtebron vrijwel altijd sprake van gasketels om piek warmtevraag te kunnen leveren. Met elektrische voeding kunnen deze warmtenetten zeer flexibel elektriciteit gebruiken, analoog aan hybride warmtepompen.

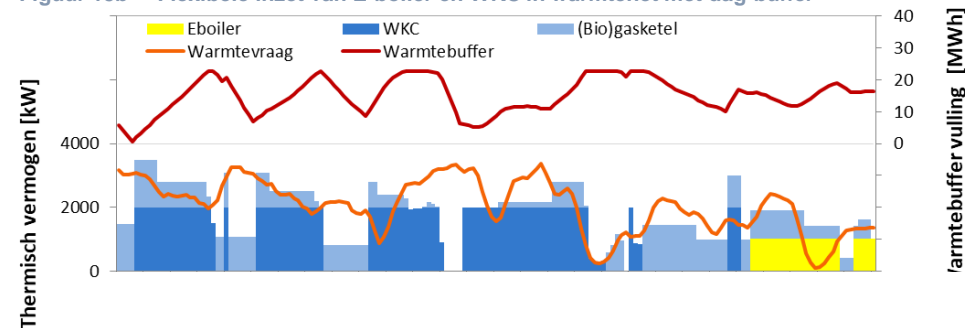
In warmtenetten wordt ook Warmte-Kracht Combinatie (WKC) toegepast, bijvoorbeeld in de vorm van gasmotoren. In combinatie met een buffer zijn deze zeer flexibel en leveren warmte en elektriciteit in uren met een hoge prijs.

Met een collectieve warmtepomp kan een warmtenet gevoed worden vanuit een lage temperatuur warmtebron zoals een Warmte-Koude Opslag (WKO), datacenter, afvalwater of oppervlaktewater.

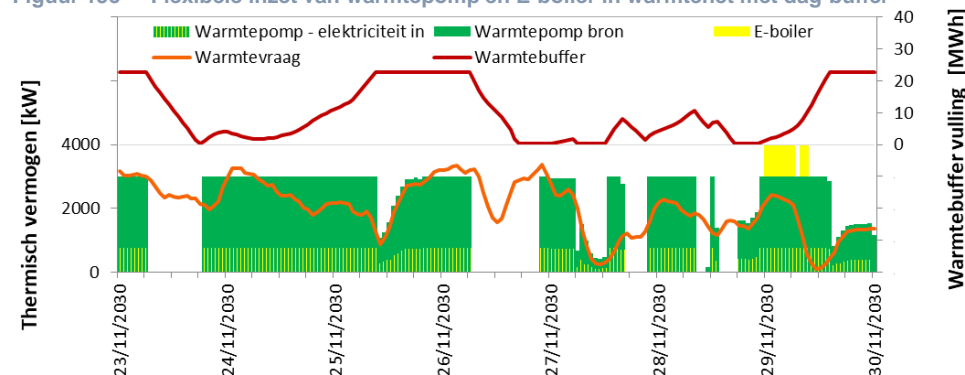
Figuur 15a Elektriciteitsprijs en buitentemperatuur tijdens winterweek 2030 (weerjaar 2015)



Figuur 15b Flexibele inzet van E-boiler en WKC in warmtenet met dag-buffer



Figuur 15c Flexibele inzet van warmtepomp en E-boiler in warmtenet met dag-buffer



# Uren met een overschot aan duurzame elektriciteit kunnen beter worden benut dankzij grootschalige warmte-opslag in warmtenetten

## Warmtebuffers zijn een van de meest kosteneffectieve mogelijkheden voor grootschalige energieopslag.

Warmtebuffers worden al vaak toegepast in warmtenetten voor twee doelen:

- Opvangen van piek warmtevraag, bijvoorbeeld 's ochtends op een koude dag, en reduceren van inzet gas piekketels op dit momenten.
- Ontkoppelen tijdstip warmteproductie en -vraag. In combinatie met een WKC kan dan warmte worden geproduceerd op momenten dat de vraag naar elektriciteit het hoogste is.

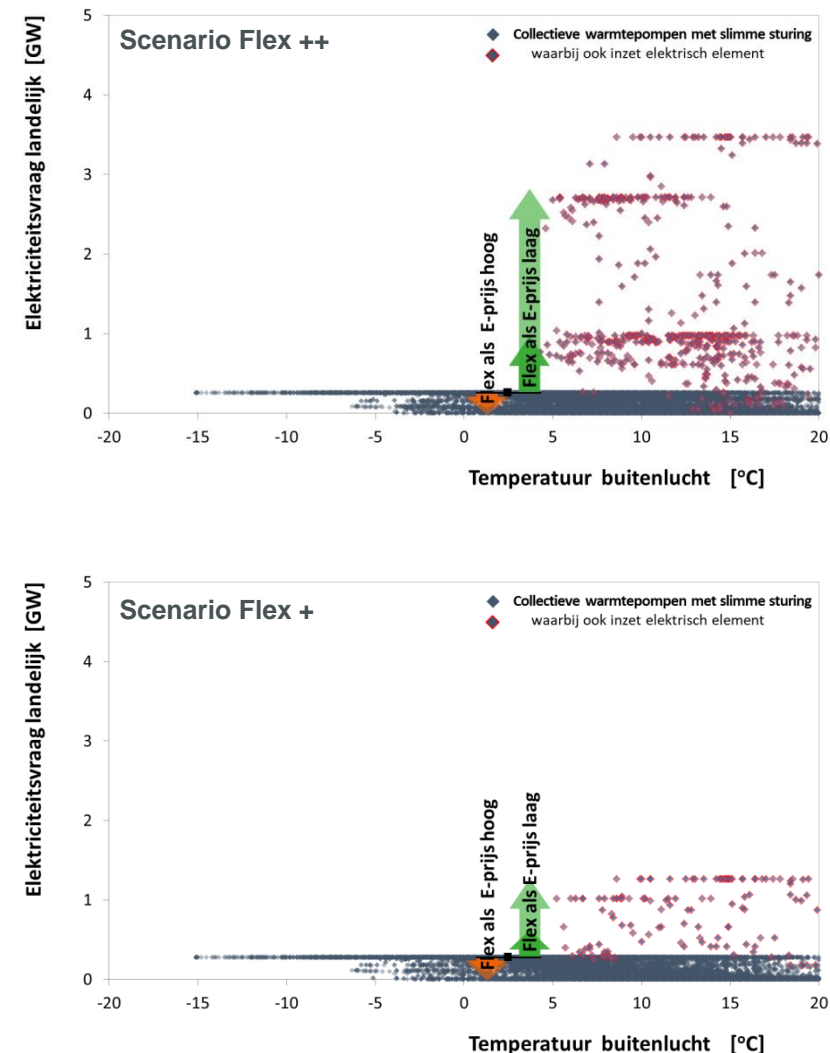
Het toevoegen van een E-boiler bij een warmtebuffer kan bijdragen aan het nuttig inzetten van elektriciteit uit zon- en wind uit uren van overvloed. Het zijn relatief goedkope systemen waarvan de business case positief kan worden bij een beperkt aantal draaiuren per jaar. Na 2030 zal dit aantal uren en de beschikbare vermogens oplopen. Ook zullen overschotten dan meer en meer ook door windenergie gedreven worden en zich in de wintermaanden voordoen.

De figuren laten de extra elektriciteitsvraag zien die hiermee kan ontstaan in uren met overvloedige elektriciteit uit zon en wind in Nederland: 1 GW of meer. In Denemarken, waar warmtenetten een grote rol spelen en dat voorloopt met duurzame elektriciteit, gebeurt dit al volop (zie pagina 24).

## Erkennen flexibele duurzame elektriciteitsvraag in rekenmethode voor het equivalent opwekendement (EOR) van warmtenetten

Dergelijk gebruik van duurzame elektriciteit uit uren met een overvloed zou positief moeten tellen in het equivalent opwekendement (EOR) van het warmtenet. Vooral nog wordt daarin de jaargemiddelde CO<sub>2</sub> intensiteit van de Nederlandse elektriciteitsmix aangenomen voor alle elektriciteitsverbruik.

Figuur 10 Potentiële elektriciteitsvraag en flexibiliteit in warmtenetten 2030: met E-boilers bij dag- (scenario Flex+) en week-buffers (scenario Flex++).



# Praktijkvoorbeelden flexibele elektrische voeding van warmtenet

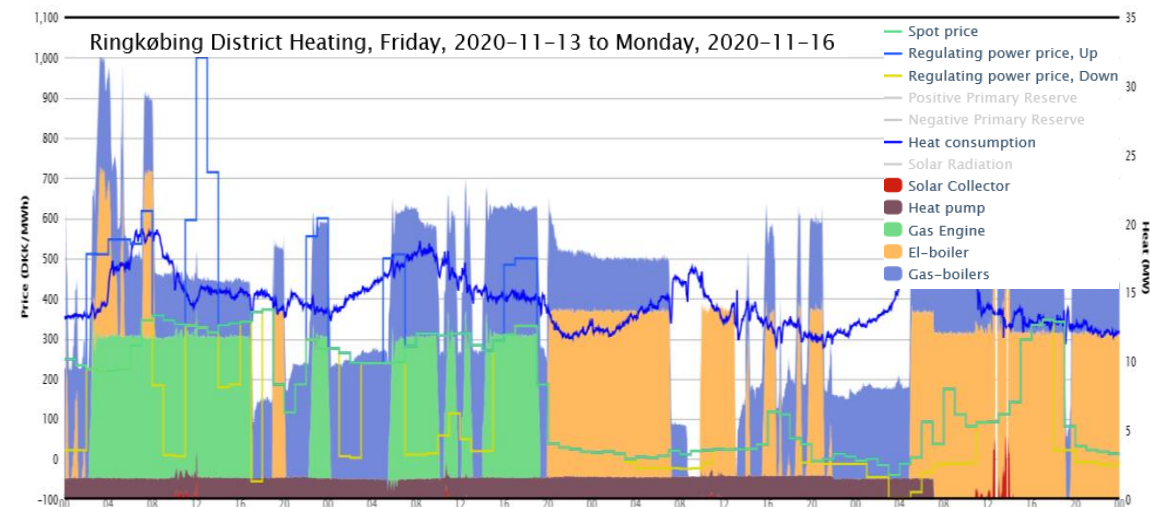
## Bestaande warmtebuffers en nieuwe E-boilers in Nederland



Bovenstaande foto (links) toont de warmtebuffer bij de warmtekrachtcentrale in Diemen. De buffer heeft een inhoud van 22.000 m<sup>3</sup> en kan daarmee zo'n 800 MWh warmte opslaan. Hiermee kan in de winter voor zo'n 8 uur aan warmte worden geleverd voor 75.000 woningen. De buffer was primair gebouwd om de inzet van de naastgelegen Warmtekracht Centrale te optimaliseren. Deze kan elektriciteit leveren op de uren van de dag met de hoogste prijs in de elektriciteitsmarkt, terwijl op andere uren de hoogste warmtevraag bediend kan worden. Er zijn plannen om hierbij twee grote E-boilers (twee eenheden van 100 MW) te installeren.

De foto rechts toont het inhijzen van een nieuwe 12 MW E-boiler bij de Warmte-Kracht Centrale Ypenburg van Eneco. Deze staat naast een bestaande warmtebuffer.

## Voorbeeld inzet E-boilers in warmtenetten in Denemarken en Duitsland



In Denemarken spelen warmtenetten al jaren een grote rol. Tegenwoordig worden deze ook gevoed door warmtepompen, elektrische boilers en zonnewarmte. Landelijk draagt dit 20% bij, mogelijk groeiend tot 40% in 2035. (Restwarmte en veel biomassa spelen nog de hoofdrol in het voeden van warmtenetten in Denemarken). De grafiek toont de warmtevoeding over enkele dagen in het warmtenet van Ringkøbing. Dit warmtenet bedient ongeveer 5.000 huishoudens en benut verder een gasketel en gasmotor als warmtebron. Het beschikt over een 400 MWh warmtebuffer. Bij lage elektriciteitsprijzen maakt het gebruik van de E-boiler (12MW) en bij hoge prijzen wordt er elektriciteit opgewekt door de gasmotor (10MW).

Bron en meer informatie: <http://www.energyweb.dk/rfvv/>

Ook in Duitsland staan inmiddels diverse E-boilers, zoals bij de warmtenetten van Flensburg (30MW), Kiel (35MW), Nürnberg (50MW) en Berlijn (120MW).

# Aanbevelingen

**Meetellen flexibiliteit in keuzes warmtetransitie en creëren randvoorwaarden veilige flexibele sturing.**

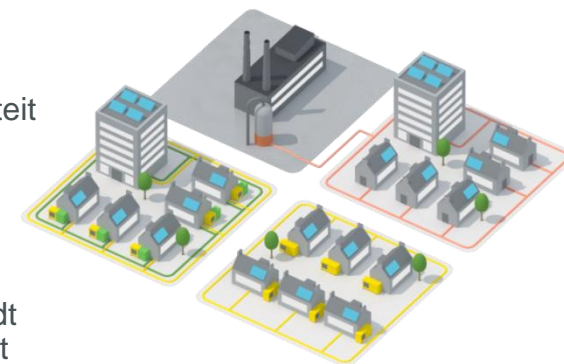
10. Meetellen van voordelen van flexibele elektriciteitsvraag in modellen en afwegingen voor de warmtetransitie
11. Stimuleren van meest flexibele warmte-opties: stuurbare warmtepompen, hybride warmtepompen en warmtenetten
12. Samenwerken aan randvoorwaarden voor inzet van flexibiliteit: veilig, kosteneffectief en zonder zorgen voor bewoners



# Meetellen van de voordelen van flexibele elektriciteitsvraag in de modellen en afwegingen voor de warmtetransitie

### Aandachtspunten

- De warmtetransitie gaat een grote invloed hebben op het elektriciteitssysteem. Het is een aanzienlijk deel van het landelijk energieverbruik en het vraagt om hoge vermogens op koude dagen. Daarom maakt het veel uit welk deel hiervan elektrisch wordt en hoe flexibel deze nieuwe elektriciteitsvraag is.
- Door het toepassen van warmtesystemen met flexibel gestuurde elektriciteitsvraag kan de warmtetransitie optimaal bijdragen aan CO<sub>2</sub> emissiereductie en kan worden voorkomen dat bewoners teveel gaan betalen. Zo kunnen deze inspelen op de beschikbaarheid van betaalbare elektriciteit uit zonne- en windenergie, terwijl uren met dure elektriciteit worden vermeden.
- Daar staat tegenover dat een keuze voor inflexibele elektriciteitsvraag of warmtesystemen met een hoog piekvermogen juist kan leiden tot additionele kosten voor netverzwaring en back-up vermogen voor koude winterweken zonder zon of wind.
- In de modellen waarmee alternatieve verduurzamingsroutes worden afgewogen voor de Transitievisie Warmte, wordt het verschil in systeemkosten van meer of minder flexibele elektriciteitsvraag echter nog niet meegeteld. Dit heeft tot gevolg, dat (i) het thema flexibiliteit onvoldoende in beeld is in de warmtetransitie, en (ii) warmtesystemen met een inflexibele elektriciteits-vraag relatief rooskleurig uit de analyse komen, terwijl dit later tot hogere systeemkosten en energierekeningen kan leiden.



### Aanbevelingen

- a. De maatschappelijke kosten en baten van flexibele elektriciteitsvraag in warmtesystemen voor de gebouwde omgeving moeten nader gekwantificeerd worden en vergeleken met de alternatieve bronnen van flexibiliteit in andere sectoren of delen van het elektriciteitssysteem.
- b. Rekenmethodes en modellen voor keuzes in de warmtetransitie moeten de kosten en baten van flexibiliteit in elektriciteits-systeem eerlijk meetellen, samen met alle andere componenten (warmtesysteem, energie, woning, energie-infrastructuur). Dit kan bijvoorbeeld door een differentiatie in gemiddelde elektriciteitsprijs (schaduwprijs) afhankelijk van de mate van flexibiliteit.
- c. Sub-opties zoals warmteopslag en een E-boiler bij warmtenetten moeten ook in deze modellen worden meegeteld.

# Instrumenten moeten de meest flexibele warmte-opties stimuleren: stuurbare warmtepompen, hybride warmtepompen en warmtenetten

### Aandachtspunten

- Flexibele elektriciteitsvraag voor warmte, kan meer bijdragen aan CO<sub>2</sub> emissiereductie door in te spelen op de beschikbare energie uit zon en wind en uren met gasgestookte elektriciteit zoveel mogelijk te vermijden. Daarbij kunnen consumenten in de toekomst een voordeel op hun energierekening bereiken, door een contract met flexibele prijzen met hun leverancier of door een korting bij het ter beschikking stellen van flexibiliteit aan de leverancier.
- Deze voordelen zijn de eerstkomende jaren nog nauwelijks merkbaar, maar groeien richting 2030 en blijven dan nog decennia doorgroeien met het oplopend geïnstalleerde vermogen duurzame opwek en CO<sub>2</sub> prijs. Omdat warmtesystemen voor vele jaren vooruit worden gekozen, loont het om de meest flexibele opties vooruit te stimuleren.
- Woningisolatie dempt niet alleen de warmtevraag, maar kan zorgen voor meer flexibel verbruik van groene elektriciteit.
- Door *all-electric* warmtepompen alleen toe te passen in goed geïsoleerde woningen en met slimme sturing kan de piekvraag worden gedempt. Ook de keuze voor bodem- in plaats van luchtwarmtepompen en warmtepompen zonder een groot elektrisch weerstandselement hebben een lagere inflexibele elektriciteitsvraag.
- Hybride warmtepompen zijn relatief eenvoudig en snel inpasbaar, en zeer flexibel. Met de juiste aansturing kunnen ze bij hoge elektriciteitsprijzen of piekverbruik overschakelen op gas. Dit vraagt ook om minder back-up vermogen in het elektriciteitssysteem. Op termijn kan het gas-deel (10-50%) volledig CO<sub>2</sub>-vrij ingevuld worden met groen gas of H<sub>2</sub>.
- Warmtenetten maken naast het ontsluiten van restwarmte en geothermie ook mogelijk om meer van goedkope en groene elektriciteit nuttig te gebruiken door toepassing van elektrische boilers (E-boilers) bij warmtebuffers.



### Aanbevelingen

- d. Verfijn de methodiek voor het Equivalent Opwek Rendement van warmtenetten, zodat flexibel elektriciteitsverbruik tijdens uren met overvloedige opwek uit wind en zon kan meetellen als CO<sub>2</sub> vrije energie.
- e. Introduceer standardeisen voor de aanstuurbaarheid van warmtepompen (*all-electric* en hybride) als *no-regret*, zodat deze - nu, of in de toekomst - tegen lage kosten aangestuurd kunnen worden, terwijl consumenten kunnen worden ontzorgd.
- f. Eventuele subsidies moeten vooral de meest flexibele types warmtesystemen stimuleren en in ieder geval ook de bovenstaande standardeisen voor de aanstuurbaarheid van warmtepompen als voorwaarde stellen.

# Samenwerken aan randvoorwaarden, zodat flexibiliteit veilig, kosteneffectief en zonder zorgen voor bewoners mogelijk kan worden

### Aandachtspunten

- Flexibele sturing van warmtesystemen aan de hand van zowel limieten in de netwerkcapaciteit als de elektriciteitsprijs is complex. Hierbij moet rekening gehouden worden met de mate van gelijktijdigheid van aansturing en de consequenties die dit kan hebben voor belasting van het elektriciteitsnet en spanningskwaliteit.
- Er is een aanzienlijk potentieel aan flexibele vraag die kan inspelen op zowel de limieten van netwerkcapaciteit als de elektriciteitsprijs. Daar tegenover staan kosten voor de kaders en systemen om dit mogelijk te maken. Het moet veilig kunnen functioneren, aan strikte privacy voorwaarden voldoen en laagdrempelig zijn voor bewoners.
- Aan de ene kant is de mogelijke besparing voor bewoners in de energiekosten tot 2030 nog beperkt, maar aan de andere kant zijn op termijn de systeemkosten aanzienlijk voor back-up vermogen dat nodig is voor *all-electric* warmtepompen. Daarom moeten randvoorwaarden zo worden ingericht dat de drempel voor bewoners zo laag mogelijk blijven en aan de andere kant de voordelen inzichtelijk worden van het optimaal gebruiken van CO<sub>2</sub> vrije elektriciteit.
- Naast de energiekosten, zijn de kosten van de netwerkaansluiting een belangrijke factor. Op dit moment is deze voor huishoudens nog uniform. Maar de verschillen in het gebruik worden steeds groter (wel of geen zonnepanelen, elektrische auto, of warmtepomp) en daarmee de noodzaak tot investeren in netverzwaring. Dan wordt het steeds logischer om ook de netwerktarieven voor huishoudens te differentiëren, bijvoorbeeld afhankelijk van het piekverbruik.
- Terwijl vraagsturing al wel wordt toegepast bij industriële verbruikers is het nieuw voor huishoudens. Er is nog weinig ervaring of bekendheid. Dit maakt het moeilijk te voorspellen hoeveel bewoners onder welke voorwaarden mee willen doen.

### Aanbevelingen

- g. Bredere proefprojecten met woningcorporaties, installatiebranche, energiebedrijven en netbeheerders moeten beter inzicht geven in de praktische haalbaarheid van het inzetten van flexibiliteit op basis van de elektriciteitsprijs en netwerkcapaciteit, randvoorwaarden en kosten voor opschaling en voorwaarden waaronder bewoners mee willen doen.
- h. De energiesector en de installatiebranche moeten samenwerken aan kennisontwikkeling en opleiding in de installatiebranche over keuzes in warmtesystemen die aansluiten bij het toekomstige elektriciteitssysteem.
- i. Binnen de energiesector moeten nadere afspraken worden gemaakt zodat flexibiliteit veilig kan worden gebruikt, zonder dat dit problemen oplevert in het elektriciteitsnet en zodat de flexibiliteit kan worden ingezet voor meerdere doeleinden.
- j. De netbeheerders moeten de invloed van en gewenste prikkels voor de slimme sturing van warmtepompen meenemen in nieuwe voorstellen voor de netwerktariefstructuur voor kleinverbruikers.



# Bijlagen

- A. Wat zijn de uitgangspunten van deze analyse over flexibiliteit en warmte?
- B. Wat kun je bereiken met het slim aansturen van warmtepompen?
- C. Welke rol kunnen warmtenetten en warmtebuffers spelen in een geïntegreerd energiesysteem?
- D. Hoe telt deze (in)flexibiliteit op in het landelijke energiesysteem?
- E. Waarom lost het elektriciteitssysteem met flexibiliteit en opslag dit niet op?
- F. Hoe is deze analyse tot stand gekomen?





# Bijlage A

**Wat zijn de uitgangspunten van deze analyse over flexibiliteit en warmte?**



# Wat zijn de uitgangspunten van deze analyse over flexibiliteit en warmte?

## Startanalyse 2019 door PBL

<https://www.pbl.nl/publicaties/achtergrondrapport-bij-de-startanalyse-aardgasvrije-buurt>

Het beginpunt van deze analyse was de Startanalyse aardgasvrije buurten (versie oktober 2019) van het PBL In de Startanalyse worden met behulp van het Vesta MAIS model voor elke buurt in Nederland vijf verschillende strategieën doorgerekend voor de verduurzaming van de warmtevoorziening. Hierbij wordt per strategie de nationale kosten berekend. Bij een deel van de strategieën zijn daarnaast nog verschillende varianten doorgerekend. Tabel A1 toont een overzicht van de verschillende strategieën en varianten die zijn doorgerekend in de Startanalyse.

## Startanalyse 2020 door PBL

[https://www.pbl.nl/sites/default/files/downloads/pbl-2020-startanalyse-aardgasvrije-buurt-versie\\_2020-24-september-2020\\_4038.pdf](https://www.pbl.nl/sites/default/files/downloads/pbl-2020-startanalyse-aardgasvrije-buurt-versie_2020-24-september-2020_4038.pdf) met toelichting <https://www.expertisecentrumwarmte.nl/nieuws/1736151.aspx>

Gedurende deze E-TOP studie werd er ook door het PBL verder gewerkt aan de Startanalyse. September 2020 is er een vernieuwde versie van de Startanalyse gepubliceerd. Belangrijke wijzigingen zijn:

- Aanvullende berekeningen met een lager isolatieniveau (schillabel D) voor varianten waarbij dit ook voldoende comfort kan bieden.
- Toevoeging van waterstof als energiedrager voor hybride warmtepompen en HR-ketels.
- Aanvullende data over onder andere restwarmtebronnen op basis van input van gemeenten.

Voor deze E-TOP studie is een herschikking gemaakt van de verschillende technologieën in de Startanalyse. Op de volgende pagina's wordt dit nader besproken.

Tabel A1: Overzicht strategieën in PBL Startanalyse (September 2020)

	Omschrijving	Variant	Schil - label	Omschrijving
S1	Individuele elektrische warmtepomp	S1a	B+	Luchtwarmtepomp
		S1b	B+	Bodemwarmtepomp
S2	Warmtenet met midden- tot hoge-temperatuur-bron	S2a	B+	MT Restwarmte
		S2b	B+	MT Geothermie
		S2c	B+	MT Geothermie overall*
		S2d	D+	MT Restwarmte
		S2e	D+	MT Geothermie
		S2f	D+	MT Geothermie overall*
S3	Warmtenet met lage-temperatuur-bron	S3a	B+	LT warmtebron, levering 30°C
		S3b	B+	LT warmtebron, levering 70°C
		S3c	B+	WKO, levering 70°C hele buurt*
		S3d	B+	WKO, levering 50°C
		S3e	B+	TEO+WKO, levering 70°C
		S3f	D+	LT warmtebron, levering 70°C
		S3g	D+	WKO, levering 70°C hele buurt*
		S3h	D+	TEO+WKO, levering 70°C
S4	Groengas	S4a	B+	Hybride warmtepomp
		S4b	B+	HR-ketel
		S4c	D+	Hybride warmtepomp
		S4d	D+	HR-ketel
S5	Waterstof	S5a	B+	Hybride warmtepomp
		S5b	B+	HR-ketel
		S5c	D+	Hybride warmtepomp
		S5d	D+	HR-ketel

# Wat zijn de uitgangspunten van deze analyse over flexibiliteit en warmte?

Tabel A2: Overzicht technologieën

	Technologie
Individuele technologie	Buitenluchtwarmtepomp
	Bodemwarmtepomp
	LT-warmtenet + warmtepomp
	Hybride-warmtepomp
Collectieve technologie	Warmtenet 70°C - HT restwarmte of geothermie
	Warmtenet 70°C - WKC
	Warmtenet 70°C - LT restwarmte of WKO
	Warmtenet 50°C - LT restwarmte of WKO
Niet elektrisch	HR-ketel

Tabel A2 toont een overzicht van de technologieën die zijn meegenomen in deze studie. Deze selectie is gemaakt op basis van de strategieën en varianten uit de Startanalyse. Hierbij zijn varianten die een vergelijkbaar (elektrisch) gedrag vertonen samengevoegd. Het maakt voor deze studie bijvoorbeeld niet uit of een warmtenet gevoed wordt vanuit een HT restwarmtebron (e.g. afvalverbrandingsinstallatie) of geothermiebron. Wel is er een onderscheid gemaakt tussen individuele technologieën, welke achter de meter bij huishoudens worden aangesloten op het elektriciteitsnet. En collectieve technologieën / warmtenetten. De kaders op deze en de volgende pagina, lichten respectievelijk de verschillende individuele en collectieve technologieën toe.

## Bij elke technologie zijn verschillende keuzes die bepalend zijn voor (in)flexibiliteit in deze analyse nader uitgewerkt:

- Slim aansturen van warmtepompen wel / niet
- Elektrisch weerstandselement in warmtepomp wel / niet
- Warmtebuffer in warmtenetten wel / niet
- Elektrische boilers aanvullend in warmtenetten wel / niet
- Warmtekracht Combinaties aanvullend in warmtenet wel / niet

## Individuele technologieën

**Buitenluchtwarmtepomp** Een buitenluchtwarmtepomp haalt warmte uit de buitenlucht, waarbij de temperatuur door de warmtepomp opgewaardeerd wordt. Doordat de buitentemperatuur niet constant is, zal de COP van buitenluchtwarmtepomp variëren.

**Bodemwarmtepomp** Een bodemwarmtepomp haalt warmte uit de bodem. Dit kan via een open bodem systeem waarbij grondwater opgepompt wordt, of via een gesloten systeem waarbij een vloeistof door een (verticale) bodemlus wordt gepompt. Dit wordt respectievelijk ook wel aangeduid als een water/water warmtepomp en een *brine*/water warmtepomp. Doordat de bodemtemperatuur vrijwel constant blijft over het jaar (10-12 °C), is er nagenoeg geen variatie in de COP. Daardoor zal de bodemwarmtepomp op koude dagen beter presteren dan de buitenluchtwarmtepomp.

**LT-warmtenet + warmtepomp** Een LT-warmtenet warmtepomp is een combinatie van een lage temperatuur warmtenet (20-30 °C) en een individuele warmtepomp waarbij het warmtenet fungeert als warmtebron voor de warmtepomp. Aangezien de warmtenet temperatuur constant wordt verondersteld gedurende het jaar, gedraagt dit systeem zich vergelijkbaar aan de bodemwarmtepomp, behalve dat door de hogere brontemperatuur een nog hogere COP behaald kan worden.

**Hybride warmtepomp** Een hybride warmtepomp is een combinatie van een buitenluchtwarmtepomp en een gasgestookte HR-ketel. Dit kunnen twee losse apparaten zijn, of geïntegreerd in één apparaat.

# Wat zijn de uitgangspunten van deze analyse over flexibiliteit en warmte?

## Aannames

Tabel A3 en Tabel A4 op de volgende twee pagina's tonen een uitgebreid overzicht van de aannames bij de verschillende technologieën. Voor elke technologie zijn twee à drie verschillende sub-varianten bedacht met een oplopende flexibiliteit. Hierbij kan er gevarieerd worden in de vermogens, maar ook in bijvoorbeeld het isolatieniveau of de buffercapaciteit.

De individuele technologieën zijn doorgerekend voor drie woningtypen; appartement, tussenwoning en vrijstaand. De collectieve technologieën aan de hand van drie wijktypen, gemiddeld (Nederland), hoog stedelijk en sub-urbaan. De wijktypen hebben verschillende samenstellingen qua woningtypen, zie Tabel A5. Conform de PBL Startanalyse 2019 is het uitgangspunt voor elke woning isolatieniveau label B. Behalve voor de sub-varianten waarvoor, omwille van de flexibiliteit, een hoger isolatieniveau is gekozen.

(In de bijgewerkte PBL Startanalyse van oktober 2020 worden ook woningen met isolatieniveau volgens label D meegenomen. Deze zijn in deze analyse niet meegenomen, alleen in een gevoeligheidsanalyse. Aangezien label D woningen niet door all-electric warmtepompen worden bediend, heeft dit op de landelijke eindresultaten nauwelijks invloed.)

## Warmtepomp vermogen

De dimensionering van de warmtepompen is gedaan op basis van een warmtevraagberekening met referentiejaar NEN5060:2018. De berekende warmtevraagpiek is vermenigvuldigd met een bèta-factor en er is circa een 0,5 kW<sub>thermisch</sub> bij opgeteld voor de tapwatervraag. De bèta-factor kan verschillen bij verschillende sub-varianten, zie Tabel A3. Vervolgens is het vermogen van de warmtepomp gekozen zodat deze bij -10°C buitentemperatuur het piekvermogen nog kan leveren. Hierbij is het elektrisch vermogen van de warmtepomp naar boven afgerond. Bij luchtwarmtepompen met een bèta-factor lager dan 1 wordt de resterende warmtevraag ingevuld door een elektrisch element.

## Collectieve technologieën

**Warmtenet 70°C – HT restwarmte of geothermie** Bij dit type warmtenet is er sprake van een restwarmtebron. In het model wordt dit beschouwd als een kosteloze warmtebron, maar met een beperkt vermogen. In het model heeft de warmtebron een vermogen van circa 30% van de warmtevraagpiek. Hiermee kan in een gematigd jaar ongeveer 80% van de warmtevraag ingevuld worden. Voor de resterende warmtevraag worden gasketels gebruikt. In een meer flexibele variant wordt er daarnaast ook gebruik gemaakt van een e-boiler.

**Warmtenet 70°C – WKC** Bij dit type warmtenet wordt een gasgestookte WKC ingezet. Verondersteld wordt dat de WKC een thermische efficiëntie heeft van 60% en een elektrische efficiëntie van 40%. Het thermische vermogen van de WKC ligt in het model op circa 50% van de warmtevraagpiek. Daarnaast is er sprake van een gasketel als back-up en in een meer flexibele variant ook een e-boiler.

**Warmtenet 70°C – LT restwarmte of WKO** Bij dit type warmtenet is er sprake van een lage temperatuur bron. Om die reden wordt de temperatuur verhoogd met behulp van een (industriële) warmtepomp. Er is in deze studie geen onderscheid gemaakt tussen verschillende LT warmtebronnen. Dit kan afvalwater zijn (TEA), maar ook bijvoorbeeld thermische energie uit oppervlaktewater (TEO) in combinatie met een WKO systeem. Aangenomen is dat de LT warmtebron een constante temperatuur heeft van 15°C. In meer flexibele varianten is er daarnaast ook sprake van een back-up gasketel en een e-boiler.

**Warmtenet 50°C – LT restwarmte of WKO** Dit type warmtenet is gelijk aan het hierboven beschreven warmtenet, behalve dat het warmtenet een lagere temperatuur heeft. Hierdoor kan de warmtepomp efficiënter werken en zijn de distributieverliezen lager. Echter, de temperatuur is niet hoog genoeg om ook tapwater te maken. Voor tapwater dient een aparte elektrische boiler of boosterwarmtepomp te worden geïnstalleerd in de woning. De tapwatervraag valt echter buiten de scope van deze studie.

# Wat zijn de uitgangspunten van deze analyse over flexibiliteit en warmte?

Tabel A3: Overzicht van de aannames rondom de individuele technologieën (warmtepompen).

Technologie	Sub-variant (code)	Flexibiliteit	Woningtype	Schil isolatie	Warmte-Pomp [kWel]	Bèta-factor	Bron-Temperatuur [°C]	Afgifte-temperatuur [°C]	COP bij -10 °C	COP bij +10 °C	Elektrisch Element [kWel]	Hr-ketel	Thermische massa [kWh/°C]	Vloer-verwarming	Netwerk-Capaciteit [kW]	Zonne-panels penetratie-graad	Elektrisch Koken penetratie-graad	
Buitenlucht-warmtepomp	WP-BL-F1	Standaard	Appartement	Label B	1.80	0.8	Variabel	45.0	2.16	3.43	2.0	Nee	5	Nee	1.0	33%	33%	
			Tussenwoning	Label B	2.00	0.8	Variabel	45.0	2.16	3.43	2.0	Nee	5	Nee	1.5	33%	33%	
			Vrijstaand	Label B	3.25	0.8	Variabel	45.0	2.16	3.43	4.0	Nee	7.5	Nee	2.5	33%	33%	
	WP-BL-F2	Goed	Appartement	Label B	2.20	1.0	Variabel	45.0	2.16	3.43	-	Nee	5	Nee	1.0	33%	33%	
			Tussenwoning	Label B	2.50	1.0	Variabel	45.0	2.16	3.43	-	Nee	5	Nee	1.5	33%	33%	
			Vrijstaand	Label B	4.00	1.0	Variabel	45.0	2.16	3.43	-	Nee	7.5	Nee	2.5	33%	33%	
	WP-BL-F3	Zeer goed	Appartement	Label A+	1.50	1.0	Variabel	35.0	2.71	4.71	-	Nee	10	Ja	1.0	33%	33%	
			Tussenwoning	Label A+	1.50	1.0	Variabel	35.0	2.71	4.71	-	Nee	10	Ja	1.5	33%	33%	
			Vrijstaand	Label A+	2.50	1.0	Variabel	35.0	2.71	4.71	-	Nee	15	Ja	2.5	33%	33%	
Bodem-warmtepomp	WP-BD-F1	Standaard	Appartement	Label B	1.10	1.0	10.0	45.0	4.50	4.50	-	Nee	5	Nee	1.0	33%	33%	
			Tussenwoning	Label B	1.25	1.0	10.0	45.0	4.50	4.50	-	Nee	5	Nee	1.5	33%	33%	
			Vrijstaand	Label B	2.00	1.0	10.0	45.0	4.50	4.50	-	Nee	7.5	Nee	2.5	33%	33%	
	WP-BD-F2	Zeer goed	Appartement	Label A+	0.80	1.0	10.0	35.0	5.50	5.50	-	Nee	10	Ja	1.0	33%	33%	
			Tussenwoning	Label A+	0.75	1.0	10.0	35.0	5.50	5.50	-	Nee	10	Ja	1.5	33%	33%	
LT-warmtenet-warmtepomp	WP-WN-F1	Standaard	Appartement	Label B	0.80	1.0	25.0	45.0	6.00	6.00	-	Nee	5	Nee	1.0	33%	33%	
			Tussenwoning	Label B	1.00	1.0	25.0	45.0	6.00	6.00	-	Nee	5	Nee	1.5	33%	33%	
			Vrijstaand	Label B	1.50	1.0	25.0	45.0	6.00	6.00	-	Nee	7.5	Nee	2.5	33%	33%	
	WP-WN-F2	Zeer goed	Appartement	Label A+	0.60	1.0	25.0	35.0	7.00	7.00	-	Nee	10	Ja	1.0	33%	33%	
			Tussenwoning	Label A+	0.75	1.0	25.0	35.0	7.00	7.00	-	Nee	10	Ja	1.5	33%	33%	
			Vrijstaand	Label A+	1.00	1.0	25.0	35.0	7.00	7.00	-	Nee	15	Ja	2.5	33%	33%	
	Hybride-warmtepomp	WP-HY-F1	Standaard	Appartement	Label B	0.80	0.4	Variabel	45.0	2.16	3.43	-	Ja	5	Nee	1.0	33%	33%
				Tussenwoning	Label B	1.00	0.4	Variabel	45.0	2.16	3.43	-	Ja	5	Nee	1.5	33%	33%
				Vrijstaand	Label B	1.50	0.4	Variabel	45.0	2.16	3.43	-	Ja	7.5	Nee	2.5	33%	33%
		WP-HY-F2	Goed	Appartement	Label B	1.80	0.8	Variabel	45.0	2.16	3.43	2.0	Ja	5	Nee	1.0	33%	33%
Tussenwoning				Label B	2.00	0.8	Variabel	45.0	2.16	3.43	2.0	Ja	5	Nee	1.5	33%	33%	
Vrijstaand				Label B	3.25	0.8	Variabel	45.0	2.16	3.43	4.0	Ja	7.5	Nee	2.5	33%	33%	
WP-HY-F3	Zeer goed	Appartement	Label A+	1.50	1.0	Variabel	35.0	2.71	4.71	2.0	Ja	10	Ja	1.0	33%	33%		
		Tussenwoning	Label A+	1.50	1.0	Variabel	35.0	2.71	4.71	2.0	Ja	10	Ja	1.5	33%	33%		
			Vrijstaand	Label A+	2.50	1.0	Variabel	35.0	2.71	4.71	4.0	Ja	15	Ja	2.5	33%	33%	

# Wat zijn de uitgangspunten van deze analyse over flexibiliteit en warmte?

Tabel A4: Overzicht van de aannames rondom de collectieve technologieën (warmtenetten).

Technologie	Sub-variant (code)	Flexibiliteit	Wijktype	Schil	Woning-equivalenten	Warmtepomp [kWel]	Bron-temperatuur [°C]	Warmtenet temperatuur [°C]	COP bij -10 °C	COP bij +10 °C	Power-to-Heat E-boiler [kWth]	Gas piekkelletel [kWth]	Rest-warmtebron [kWth]	WKC thermisch vermogen [kWth]	WKC elektrisch vermogen [kWel]	Warmte-buffer [GJ]	Indicatie buffer omvang [m3]	Distributie-verliezen [%]
Warmtenet 70°C HT restwarmte / geothermie	WN70-HTB-F1	Standaard	Wijktype A	Label B	1000	-	-	70	-	-	-	4000	1500	3000	2000	82	700	20%
			Wijktype B	Label B	1000	-	-	70	-	-	-	4000	1500	3000	2000	82	700	20%
			Wijktype C	Label B	1000	-	-	70	-	-	-	4000	1500	3000	2000	82	700	20%
	WN70-HTB-F2	Goed	Wijktype A	Label B	1000	-	-	70	-	-	1000	4000	1500	3000	2000	82	700	20%
			Wijktype B	Label B	1000	-	-	70	-	-	1000	4000	1500	3000	2000	82	700	20%
			Wijktype C	Label B	1000	-	-	70	-	-	1000	4000	1500	3000	2000	82	700	20%
	WN70-HTB-F3	Zeer goed	Wijktype A	Label B	1000	-	-	70	-	-	3000	4000	1500	3000	2000	575	5000	20%
			Wijktype B	Label B	1000	-	-	70	-	-	3000	4000	1500	3000	2000	575	5000	20%
			Wijktype C	Label B	1000	-	-	70	-	-	3000	4000	1500	3000	2000	575	5000	20%
Warmtenet 70°C WKC	WN70-WKC-F1	Standaard	Wijktype A	Label B	1000	-	-	70	-	-	-	1000	-	3000	2000	82	700	20%
			Wijktype B	Label B	1000	-	-	70	-	-	-	1000	-	3000	2000	82	700	20%
			Wijktype C	Label B	1000	-	-	70	-	-	-	1000	-	3000	2000	82	700	20%
	WN70-WKC-F2	Goed	Wijktype A	Label B	1000	-	-	70	-	-	1000	4000	-	3000	2000	82	700	20%
			Wijktype B	Label B	1000	-	-	70	-	-	1000	4000	-	3000	2000	82	700	20%
			Wijktype C	Label B	1000	-	-	70	-	-	1000	4000	-	3000	2000	82	700	20%
	WN70-WKC-F3	Zeer goed	Wijktype A	Label B	1000	-	-	70	-	-	3000	4000	-	3000	2000	575	5000	20%
			Wijktype B	Label B	1000	-	-	70	-	-	3000	4000	-	3000	2000	575	5000	20%
			Wijktype C	Label B	1000	-	-	70	-	-	3000	4000	-	3000	2000	575	5000	20%
Warmtenet 70°C LT restwarmte / WKO	WN70-LTB-F1	Standaard	Wijktype A	Label B	1000	750	15	70	4.0	4.0	-	1000	-	3000	2000	82	700	20%
			Wijktype B	Label B	1000	750	15	70	4.0	4.0	-	1000	-	3000	2000	82	700	20%
			Wijktype C	Label B	1000	750	15	70	4.0	4.0	-	1000	-	3000	2000	82	700	20%
	WN70-LTB-F2	Goed	Wijktype A	Label B	1000	750	15	70	4.0	4.0	1000	4000	-	3000	2000	82	700	20%
			Wijktype B	Label B	1000	750	15	70	4.0	4.0	1000	4000	-	3000	2000	82	700	20%
			Wijktype C	Label B	1000	750	15	70	4.0	4.0	1000	4000	-	3000	2000	82	700	20%
	WN70-LTB-F3	Zeer goed	Wijktype A	Label B	1000	750	15	70	4.0	4.0	3000	4000	-	3000	2000	575	5000	20%
			Wijktype B	Label B	1000	750	15	70	4.0	4.0	3000	4000	-	3000	2000	575	5000	20%
			Wijktype C	Label B	1000	750	15	70	4.0	4.0	3000	4000	-	3000	2000	575	5000	20%
Warmtenet 50°C LT restwarmte / WKO + tapwater Boosterwarmtepomp of E-boiler	WN50-LTB-F1	Standaard	Wijktype A	Label B	1000	600	15	50	5.0	5.0	-	1000	-	3000	2000	82	1000	15%
			Wijktype B	Label B	1000	600	15	50	5.0	5.0	-	1000	-	3000	2000	82	1000	15%
			Wijktype C	Label B	1000	600	15	50	5.0	5.0	-	1000	-	3000	2000	82	1000	15%
	WN50-LTB-F2	Goed	Wijktype A	Label B	1000	600	15	50	5.0	5.0	1000	4000	-	3000	2000	82	1000	15%
			Wijktype B	Label B	1000	600	15	50	5.0	5.0	1000	4000	-	3000	2000	82	1000	15%
			Wijktype C	Label B	1000	600	15	50	5.0	5.0	1000	4000	-	3000	2000	82	1000	15%
	WN50-LTB-F3	Zeer goed	Wijktype A	Label B	1000	600	15	50	5.0	5.0	3000	4000	-	3000	2000	575	7000	15%
			Wijktype B	Label B	1000	600	15	50	5.0	5.0	3000	4000	-	3000	2000	575	7000	15%
			Wijktype C	Label B	1000	600	15	50	5.0	5.0	3000	4000	-	3000	2000	575	7000	15%

# Wat zijn de uitgangspunten van deze analyse over flexibiliteit en warmte?

## Gebouwde omgeving in Nederland

Nederland telt op dit moment circa 7,8 miljoen verdeeld over ruim dertienduizend buurten. Daarbij komt nog 311 miljoen vierkante meter utiliteitsbouw. Omgerekend komt dit in totaal neer op ongeveer 10,2 miljoen woningequivalenten, waarbij 1 woningequivalent gelijk staat aan 130 vierkante meter bruto vloer oppervlak utiliteitsbouw. Op basis van cijfers van 2018 bedroeg de totale warmtevraag in de gebouwde omgeving circa 450 PJ. Ofwel, ongeveer 44 GJ per woningequivalent per jaar. Na isolatiemaatregelen zou daar volgens de Startanalyse nog zo'n 300 PJ van over moeten blijven. Tabel A6 toont aanvullende informatie over de gebouwde omgeving.

Hoewel de gebouwde omgeving bestaat uit woningen en utiliteitsgebouwen is in deze studie enkel uitgegaan van woningen. De warmtevraag van de utiliteitsgebouwen is wel in deze studie meegenomen, maar dan alsof het woningen betreft.

## Nieuwbouw

De Startanalyse heeft enkel betrekking op de verduurzaming van de bestaande bouw. Deze studie kijkt echter naar de warmtevoorziening in de gehele gebouwde omgeving. Daarom is er een inschatting gemaakt van de nieuwbouw tot 2030. Aangenomen is dat er tussen 2020 en 2030 nog circa 650.000 woningen worden bijgebouwd, goed voor een warmtevraag van ongeveer 15,5 PJ.

Tabel A5: Indeling wijktypen

	Vrijstaand	2 onder 1 kap	Rijwoning	Appartement
Wijktype A, gemiddeld NL	13%	9%	43%	35%
Wijktype B, hoog stedelijk	2%	4%	41%	53%
Wijktype C, sub urbaan	13%	12%	56%	18%

Tabel A6: Overzicht gebouwde omgeving Nederland

Woning type		Utiliteit type	
Vrijstaand	13%	Kantoor	21%
2 onder 1 kap	9%	Winkel	15%
Rijwoning	43%	Zorg	6%
Appartement	35%	Logies	4%
Woning bouwperiode		Onderwijs	12%
Voor 1946	19%	Industrie	15%
1946 – 1964	15%	Bijeenkomst	11%
1965 – 1991	41%	Sport	4%
1992 – 2005	15%	Cellen	0%
2006 – 2019	11%	Overig	10%
Woning energielabel*			
Label A(+)	13%		
Label B	17%		
Label C	30%		
Label D	12%		
Label E	8%		
Label F	12%		
Label G	7%		

\* Dit betreft het totale energielabel van de woning. Deze kan bijvoorbeeld verbeterd worden door zonnepanelen te plaatsen op het dak. Voor de warmtevoorziening is vooral het schillabel relevant, welke enkel gaat over de isolatie van de woning.

# Wat zijn de uitgangspunten van deze analyse over flexibiliteit en warmte?

## Model omschrijving

Voor de analyse met betrekking tot flexibiliteit zijn simulaties uitgevoerd met een model. De input voor het model zijn een warmtevraagprofiel en een elektriciteitsprijsprofiel voor een geheel jaar. Op basis van deze profielen probeert het model de warmtevraag zo goedkoop mogelijk in te vullen. Hierbij maakt het model gebruik van een warmtebuffer om tijdelijk thermische energie op te slaan. In het geval van de individuele technologieën komt dit bufferende vermogen voort uit de thermische massa van de woning. Bij de collectieve technologie is er sprake van een buffervat om thermische energie op te slaan.

Voor de individuele woning geldt dat deze overdag 1 °C mag opwarmen of afkoelen ten opzichte van de ingestelde temperatuur. 's Nachts mag de woning tot 2 °C afkoelen. Voor het collectieve warmtenet geldt dat de warmtebuffer tussen zijn minimum en maximum niveau dient te blijven.

Daarnaast is er voor de individuele woning ook een beperking opgenomen met betrekking tot de netwerkcapaciteit. Zoals eerder beschreven is de bestaande capaciteit in het laagspanningsnet in veel wijken nog niet klaar voor grote aantallen warmtepompen. Echter, voor berekeningen voor het eindbeeld is aangenomen dat de netwerkcapaciteit wel voldoende is. Verder zijn er voor collectieve systemen geen restrictie op netwerkcapaciteit. Elektrische apparatuur in een warmtenet, zoals een industriële warmtepomp, vragen een specifieke aansluiting op middenspanningsniveau.

## Inputs

- Geïnstalleerd warmtesysteem met totaal elektrisch vermogen
- Prijsprofiel elektriciteit
- Warmtevraagprofiel woning en thermische massa
- Brontemperatuur buitenlucht of bodem voor warmtepompen
- Temperatuurafhankelijke CoP warmtepompen
- Gasprijs, niet tijdsafhankelijk (voor hybride warmtepompen)

## Randvoorwaarden

### Warmtepomp

- Streef temperatuur en bandbreedte in de woning, met oplopende financiële penalty voor elke afwijking buiten de bandbreedte.
- Limiet maximale netbelasting per woning: nominale waarde met aftrek van overig verbruik.

## Randvoorwaarden

### Warmtenetwerk

- Limiet minimum en maximum vulling van warmtebuffer.

## Optimalisatie Warmtepomp per woning

- Minimalisatie energiekosten voor warmtevoorziening
- Regeling warmtepomp per uur, iteratief proces, *perfect foresight*.

## Optimalisatie Warmtenetwerk per wijk

- Minimalisatie energiekosten per periode van 24 uur (dag-buffer) of 168 uur (week-buffer).
- Regeling E-warmte per uur.

# Wat zijn de uitgangspunten van deze analyse over flexibiliteit en warmte?

## Elektriciteitsprijprofilen

Voor deze studie is gebruik gemaakt van warmtevraagprofilen en elektriciteitsprijprofilen. De elektriciteitsprijprofilen zijn berekend door Berenschot op basis van projecties van de elektriciteitsvraag en duurzame opwek in het Energie-transitiemodel (ETM) van Quintel en een elektriciteitsmarktmodel KyPF van KYOS. De profielen zijn doorgerekend voor de weerjaren 2015 (gemiddeld) en 1987 (extreem koud). Daarbij is in de berekeningen al aangenomen dat er al 6 GW (36 GWh) aan flexibiliteit aanwezig is in de markt. Bijvoorbeeld in de vorm van batterijen.

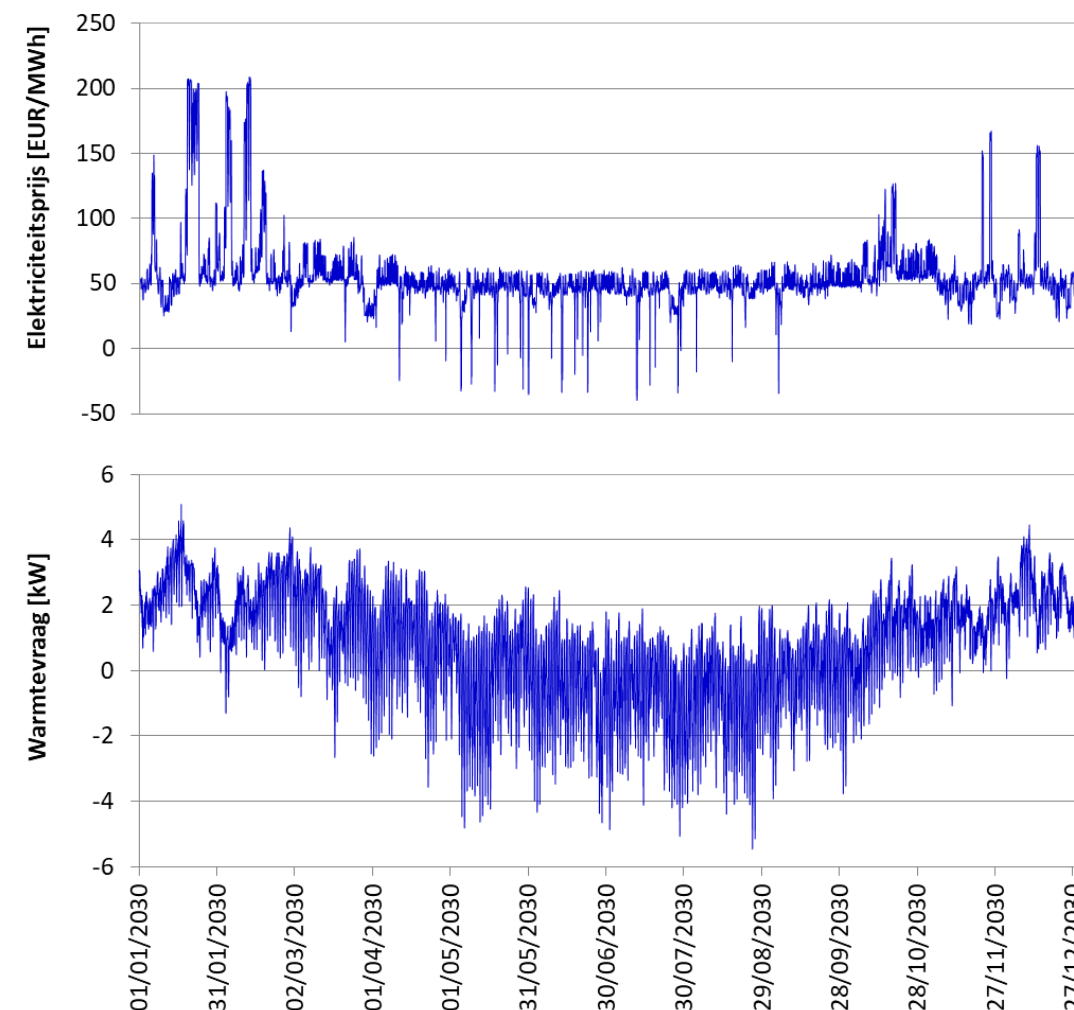
## Warmtevraagprofilen

De warmtevraagprofilen zijn gebaseerd op doorrekeningen met het eerder genoemde referentiejaar NEN5060:2018. Hierbij zijn verschillende woningtypen doorgerekend. Deze doorrekeningen zijn uitgevoerd door Schouten Techniek, met een model wat zij toepassen voor het ontwerp van hun warmtepomp systemen.

Het referentieklimaatjaar is opgebouwd uit weerdata van verschillende jaren. De elektriciteitsprijprofilen zijn echter berekend op basis van weerjaren 2015 en 1987. Door de weerdata van 2015 en 1987 en het referentieklimaatjaar met elkaar te vergelijken zijn er warmtevraagprofilen geconstrueerd voor de weerjaren 2015 en 1987.

Voor de verschillende wijktypen zijn de warmtevraagprofilen verkregen door individuele warmtevraagprofilen voor verschillende woningtypen op te tellen in de verhouding waarin de woningtypen in het wijktipe voorkomen. Daarbij zijn de individuele warmtevraagprofilen uitgemiddeld over drie achtereenvolgende uren om een ongelijktijdigheid in de collectieve warmtevraag na te bootsen.

Figuur A7: Voorbeeld jaarprofiel elektriciteitsprijs en warmtevraag





# Bijlage B

**Wat kun je bereiken met het slim aansturen van warmtepompen?**



# Wat kun je bereiken met het slim aansturen van warmtepompen?

De figuren rechts tonen het gedrag van een gestuurde en een ongestuurde warmtepomp. Te zien is dat de ongestuurde warmtepomp netjes de warmtevraag volgt zonder dat er rekening gehouden wordt met de elektriciteitsprijs.

De gestuurde warmtepomp daarentegen reageert wel op de elektriciteitsprijs. Te zien is dat het vermogen van de warmtepomp verlaagd wordt op het moment dat de elektriciteitsprijs stijgt rond 18:00 op 27-02. Op dat moment ligt de warmtevraag hoger dan het door de warmtepomp geleverde vermogen. Hierdoor zal de woning iets afkoelen. Dit wordt later ingehaald op het moment dat de elektriciteitsprijs weer wat gezakt is.

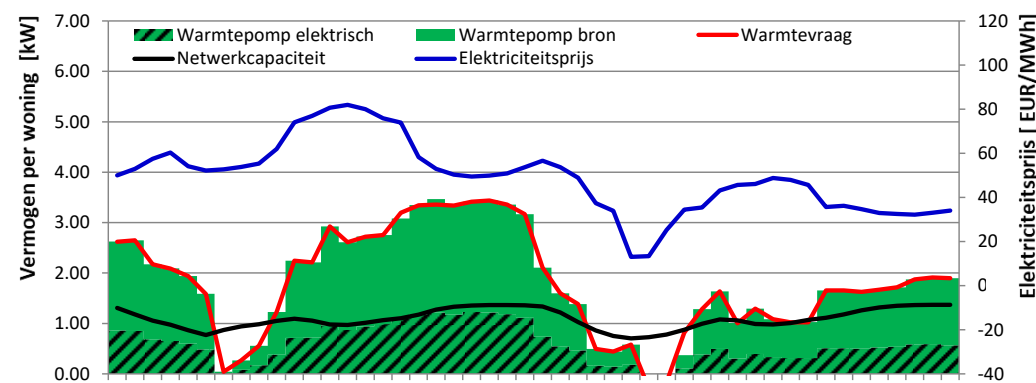
Een paar uur later, rond 12:00 op 28-02 zakt de elektriciteitsprijs nog verder, tot beneden het gemiddelde, ten gevolge van een overschot aan duurzame opwek. Op dat moment springt de warmtepomp aan om zoveel mogelijk te profiteren van de goedkope stroom. Het geleverde warmtevermogen ligt nu boven de warmtevraag waardoor de woning zal opwarmen. Hierdoor hoeft de warmtepomp even later minder hard te draaien wanneer de prijs weer wat hoger ligt.

De warmtepomp zou tijdens de goedkope uren nog harder kunnen draaien. Het elektrisch vermogen van de warmtepomp is namelijk 2,5 kW, terwijl er slechts 0,7 kW gebruikt wordt. Het resterende vermogen zou ingezet kunnen worden om bijvoorbeeld het tapwater boilervat te verwarmen. De warmtepomp wordt op dit moment echter gelimiteerd door de beperkte netwerkcapaciteit. De netwerkcapaciteit vormt hiermee een beperking op de mogelijkheid om het energieverbruik te optimaliseren op basis van de elektriciteitsprijs.

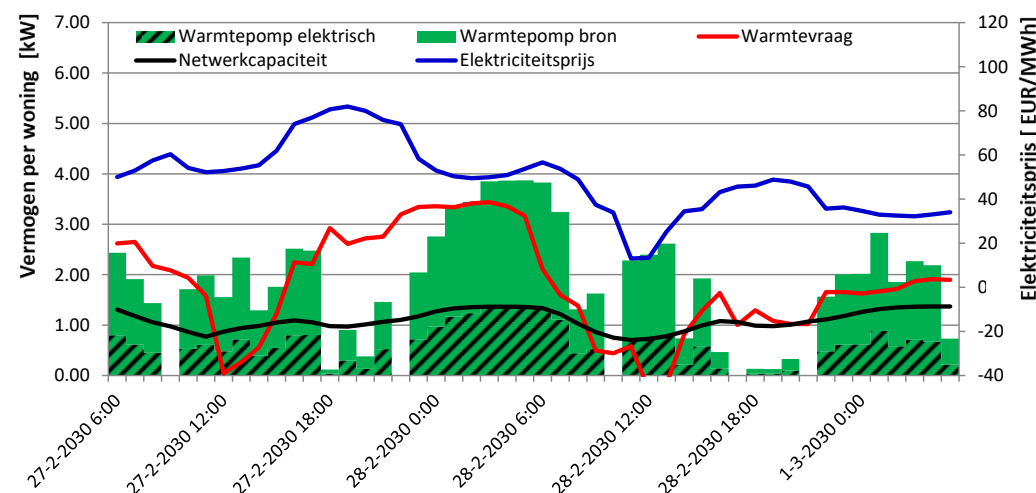
In deze simulatie is door het slim aansturen van de warmtepomp circa €15 bespaard op de kosten voor inkoop van elektriciteit over een gemiddeld jaar in 2030. Dit bedrag is direct afhankelijk van het gehanteerde prijsprofiel. Verwacht moet worden dat dit over de jaren verder zal oplopen. Ook kan het al eerder hoger uitpakken als de kosten voor meerkosten voor backup vermogen in de elektriciteitsprijs doortellen.

22 januari 2021

Figuur B1: Gedrag ongestuurde warmtepomp



Figuur B2: Gedrag gestuurde warmtepomp



# Wat kun je bereiken met het slim aansturen van warmtepompen?

Hogere isolatie en woningverbeteringen kunnen de flexibiliteit verder verhogen. Verschillende effecten spelen hierin een rol.

Allereerst wordt de warmtevraag verlaagd door hogere isolatie. Hierdoor zal de woning minder snel afkoelen wanneer de warmtepomp tijdelijk uit staat. Hierdoor kan een langere periode van hoge prijzen overbrugd worden.

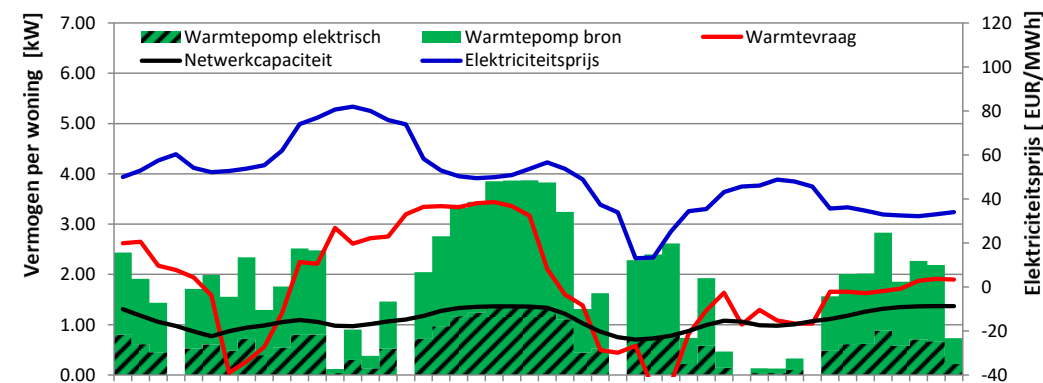
Daarnaast zijn we ervan uitgegaan dat er in de label A+ woning gebruik gemaakt wordt van vloerverwarming. Vloerverwarming is een traag reagerend systeem, dat langzamer opwarmt en afkoelt dan een convector. Hierdoor wordt effectief de thermische massa van de woning vergroot en daarmee het vermogen om thermische energie op te slaan.

Tot slot kan door het gebruik van vloerverwarming de CV afgiftetemperatuur verder verlaagd worden ten opzichte van convectoren. Hierdoor kan de warmtepomp efficiënter werken en zal de COP hoger komen te liggen. Daardoor kan met dezelfde hoeveelheid elektriciteit meer verwarmingsvermogen gerealiseerd worden.

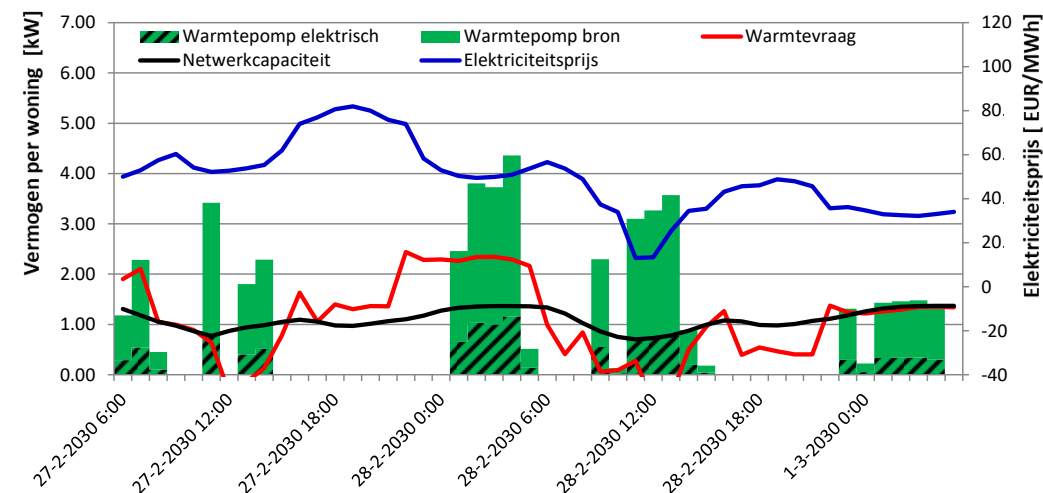
De figuren rechts tonen het verschil tussen een luchtwarmtepomp in een label B tussenwoning en een verbeterde label A+ tussenwoning, zoals hierboven beschreven. Te zien is dat de label A+ woning nog beter in staat is om hoge prijzen te vermijden en lage prijzen te benutten. Los van de besparing op het energieverbruik kan door het slim aansturen nog een besparing van circa €10 per jaar op de energierekening gehaald worden over een gemiddeld jaar.

Dit bedrag is direct afhankelijk van het gehanteerde prijsprofiel. Verwacht moet worden dat dit over de jaren verder zal oplopen. Ook kan het al eerder hoger uitpakken als de kosten voor meerkosten voor backup vermogen in de elektriciteitsprijs doortellen.

Figuur B3: Tussenwoning label B



Figuur B4: Tussenwoning label A+



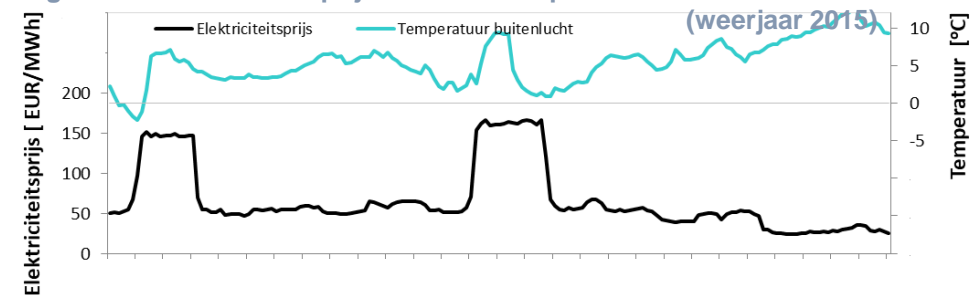
# Wat kun je bereiken met het slim aansturen van warmtepompen?

De analyse beschouwt steeds twee situaties:

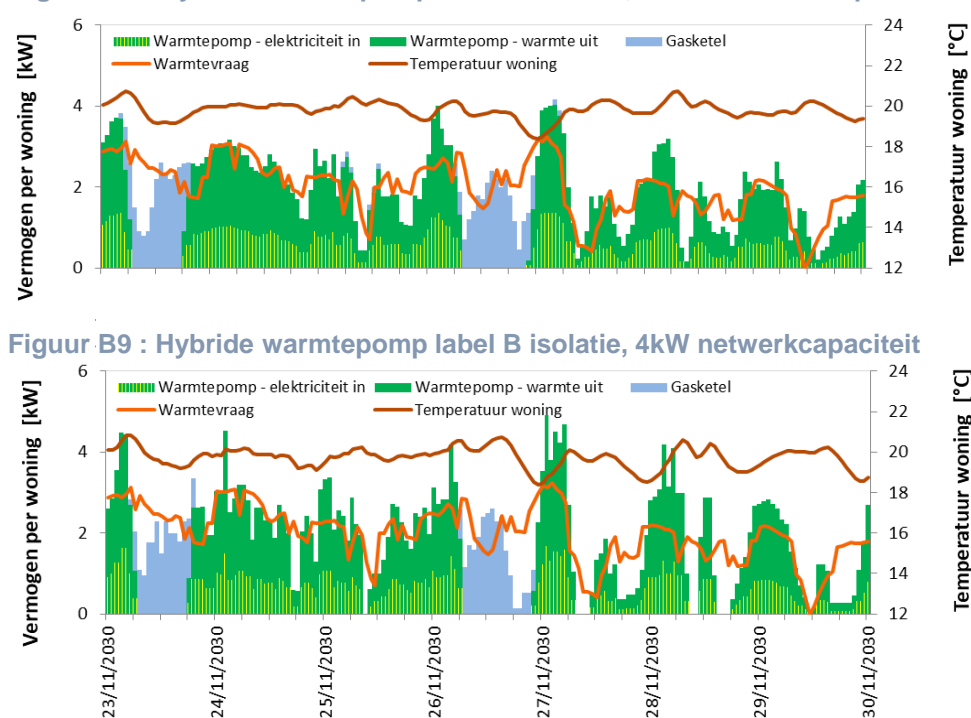
- Met beperkende effectieve netwerkcapaciteit (gelijktijdig) van 1.5kW per woning, representatief voor een oud netwerk in een bestaande woonwijk.
- Met ruime netwerkcapaciteit (gelijktijdig) van 4kW per woning, representatief voor een versterkt netwerk, of netwerk in een nieuwbouwwijk.

De figuren vergelijken het geoptimaliseerde gedrag van een hybride warmtepomp (links) en all-electric warmtepomp (rechts), voor een situatie met beperkende netwerkcapaciteit (boven) en ruime netwerkcapaciteit (onder).

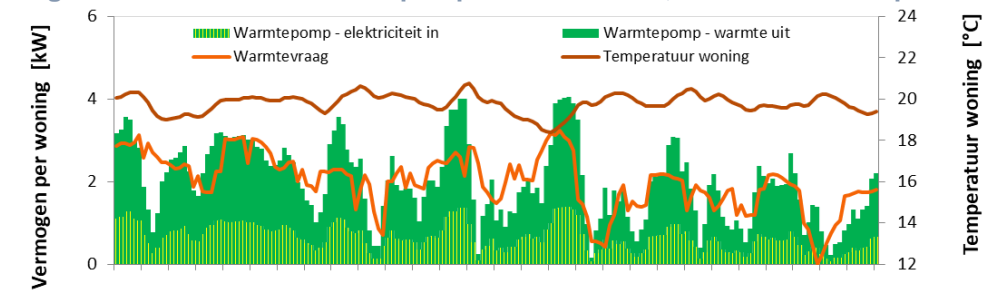
Figuur B5: Elektriteitsprijs en buitentemperatuur winterweek 2030 (weerjaar 2015)



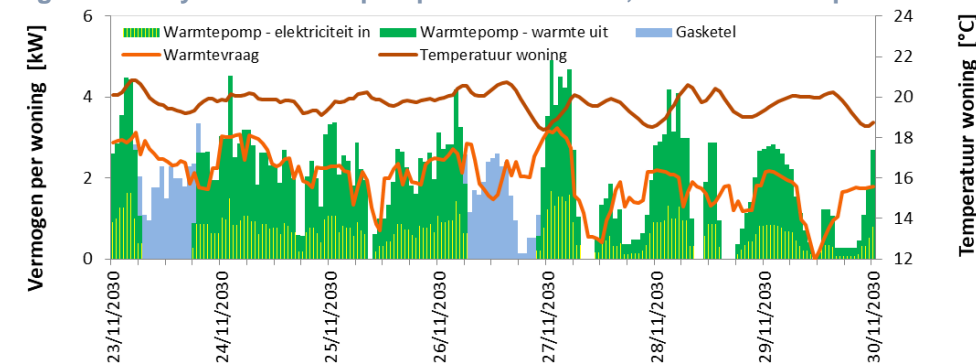
Figuur B8 : Hybride warmtepomp label B isolatie, 1.5kW netwerkcapaciteit



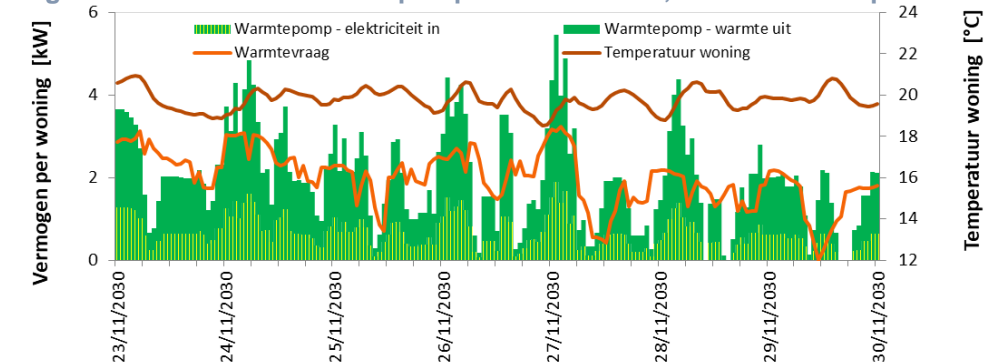
Figuur B6: All-electric warmtepomp label B isolatie, 1.5kW netwerkcapaciteit



Figuur B9 : Hybride warmtepomp label B isolatie, 4kW netwerkcapaciteit



Figuur B7: All-electric warmtepomp label B isolatie, 4kW netwerkcapaciteit



# Wat kun je bereiken met het slim aansturen van warmtepompen?

Onderstaande tabel vat modelresultaten samen voor de potentiële besparing in energiekosten door slimme sturing van een warmtepomp, ten opzichte van “een domme warmtepomp” die alleen op de warmtevraag reageert. Het uitgangspunt hierbij is een woning met een slimme meter en een variabel prijscontract met de elektriciteitsleverancier, die 1-op-1 varieert met de prijs op de nationale elektriciteitsmarkt voor een gemiddeld weerjaar (2015). De netto besparing over het jaar wordt rechts in de tabel weergegeven voor verschillende situaties. De getallen hebben betrekking op een tussenwoning. Vergelijkbare berekeningen zijn gemaakt voor twee aanvullende woningtypes:

- Vrijstaande woning besparing circa 180% van de genoemde getallen
- Appartement besparing circa 80% van de genoemde getallen

Uit de getallen kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- Het financiële voordeel op basis van de gebruikte prijsprofielen is beperkt tot enkele tientallen Euro's.
- Het verschil is klein tussen de situatie met beperkende of ruimte netwerkcapaciteit.
- Er is wel een duidelijk verschil tussen de prijsscenario's met meer of minder overige korte termijn flexibiliteit in de nationale markt.
- De potentiële besparing op de energiekosten is het grootste bij de hybride warmtepomp en de buitenluchtwarmtepomp.

Overzicht van potentiële financiële besparing op energiekosten door slimme sturing van warmtepompen, bij gemiddeld weerjaar 2015 en 4 verschillende cases: twee prijsscenario's met 1.4 of 6 GW overige flexibiliteit landelijk, en effectieve netwerkcapaciteit van 1.5kW of 4kW per woning.

Technologie	Sub-variant (code)	Flexibiliteit	Woningtype	Schil isolatie	Warmte-Pomp [kWe]	Weerjaar	2015 (gemiddeld)				
						Prijsscenario	GW flex overig	1.4	1.4	6	6
						Netwerkcapaciteit [ kW/woning ]		1.5 (beperkend)	4 (ruim)	1.5 (beperkend)	4 (ruim)
						<b>Besparing op energiekosten per tussenwoning [ EUR/ jaar ]</b>					
Buitenlucht-warmtepomp	WP-BL-F1	Standaard	Tussenwoning	Label B	2.00			-14	-20	-9	-13
	WP-BL-F2	Goed	Tussenwoning	Label B	2.50			-14	-20	-9	-14
	WP-BL-F3	Zeer goed	Tussenwoning	Label A+	1.50			-16	-17	-11	-12
Bodem-warmtepomp	WP-BD-F1	Standaard	Tussenwoning	Label B	1.25			-12	-12	-8	-8
	WP-BD-F2	Zeer goed	Tussenwoning	Label A+	0.75			-10	-10	-7	-7
LT-warmtenet-warmtepomp	WP-WN-F1	Standaard	Tussenwoning	Label B	1.00			-8	-8	-5	-5
	WP-WN-F2	Zeer goed	Tussenwoning	Label A+	0.75			-8	-8	-6	-6
Hybride-warmtepomp	WP-HY-F1	Standaard	Tussenwoning	Label B	1.00			-29	-29	-25	-25
	WP-HY-F2	Goed	Tussenwoning	Label B	2.00			-32	-35	-27	-29
	WP-HY-F3	Zeer goed	Tussenwoning	Label A+	1.50			-17	-18	-14	-14

# Wat kun je bereiken met het slim aansturen van warmtepompen?

## Oplossing A

*All-electric* Luchtwarmtepomp 2,5 kW  
tijdens een periode zonder zon en wind

Ook in een extreme winterweek met vrijwel geen duurzame opwek moet deze warmtepomp van elektriciteit worden voorzien. Energieopslag zal groeien, maar toch zullen gascentrales nog decennia de meest extreme en aanhoudende situaties helpen overbruggen.

Voor elke 2,5 kW warmtepomp moet er daarom ergens in het land ook 2,5 kW aan gascentrale klaar staan.

**Kosten** back-up centrale 120 - 200 € per jaar per woning  
verzwaring elektriciteitsnet PM (van meerdere factoren afhankelijk)

(Op basis van recente marktprijzen strategische reserve in België en studies in Duitsland: 50 - 80 € per jaar per kW opgesteld vermogen).

**Hoewel slechts een kleine factor in totale uitstoot, tijdens deze uren zonder elektriciteit uit zon of wind: uitstoot 150 - 170 gram CO<sub>2</sub> uit per kWh warmte** rekening houdend met de uitstoot van een gascentrale en de COP van de luchtwarmtepomp bij koude. **Gemiddeld is de uitstoot natuurlijk veel lager, omdat de elektriciteit grotendeels uit duurzame bronnen komt.**

Hoeveel uren deze centrale op jaarbasis zal moeten draaien hangt af van het hele elektriciteitssysteem. Het zal een beperkt aantal uren zijn zodat de uitstoot op jaarbasis beperkt is.

Voor een stad als Amsterdam, waar het warmtenet een grote rol speelt, worden volgens de recente Transitievisie Warmte (inspraak versie, maart 2020) richting 2040 circa 110.000 woningequivalenten (14% van de stad) met *all-electric* warmtepompen verwacht. Uitgaand van de genoemde 2,5 kW per woning vraagt dit om circa 275 MW aan elektrisch back-up vermogen. Dit is vergelijkbaar met ongeveer een eenheid extra bij de bestaande twee in de gascentrale bij Diemen.

## Oplossing B

Hybride luchtwarmtepomp 1,0 kW,  
tijdens een periode zonder zon en wind

In een extreme winterweek met hoge elektriciteitsprijzen schakelt dit systeem over op de gasketel. Voorlopig is dit aardgas, maar op termijn kan deze op CO<sub>2</sub> vrije brandstof zoals biogas of waterstof overstappen.

In de woning staat hiervoor een gasketel klaar.

### Meerkosten

Gasketel afschrijving 70 - 140 Euro per jaar per woning  
(Op basis 1000 tot 2000 € per ketel, 15 jaar afschrijvingsduur).  
Gasnet instandhouding 100 - 200 €/jaar

### Minder-kosten

Kleinere warmtepomp 150 - 300 €/jaar  
(Op basis 3000 tot 4500 € per extra kW warmtepomp, 15 jaar afschrijving).

**Netto meerkosten circa 0 - 100 €/jaar**

Ten opzichte de *all-electric* warmtepomp (linker kolom) liggen deze kosten voor de hybride warmtepomp 0 - 200 €/jaar lager  
+ eventuele besparing netverzwaring PM  
(niet gekwantificeerd want door meerdere factoren gedreven).

**Hoewel slechts een kleine factor in totale uitstoot, tijdens deze uren : CO<sub>2</sub> uitstoot 180 gram CO<sub>2</sub> uit per kWh warmte in de woning**  
**Gemiddeld is de uitstoot natuurlijk veel lager, omdat de woning voor een groot deel met duurzame elektriciteit wordt verwarmt.**

Bij gebruik van aardgas ligt de CO<sub>2</sub> uitstoot over de keten dicht bij elkaar. Op termijn is ook de hybride warmtepomp CO<sub>2</sub> vrij te maken door overstap naar biogas of waterstof. Vanwege de bescheiden hoeveelheid gas stook kunnen de brandstof kosten beperkt blijven.

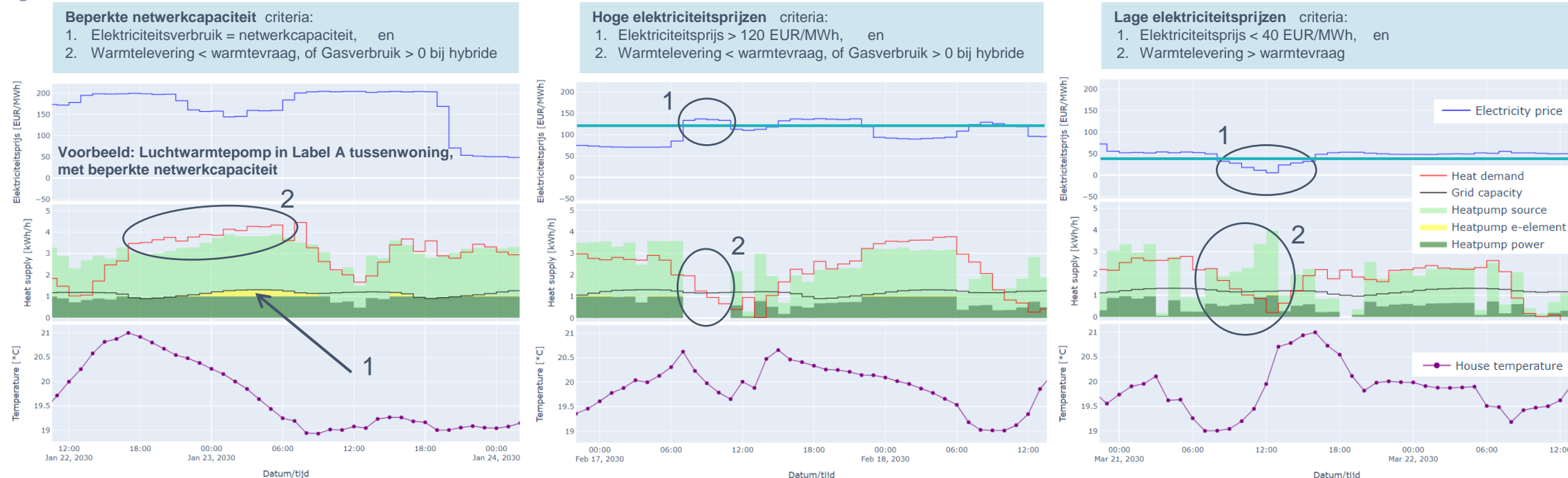
# Wat kun je bereiken met het slim aansturen van warmtepompen?

**Drie maten voor flexibiliteit worden gekwantificeerd, gerelateerd aan verschillende maatgevende situaties:**

Beperkte netwerkcapaciteit, Hoge elektriciteitsprijzen (schaarste), Lage elektriciteitsprijzen (overvloed). Om het flexibele vermogen te bepalen is er gekeken naar de meest extreme 336 uren (2 weken) in het winter halfjaar. De uren waarop de netwerkcapaciteit het meest knelde of de uren waarin de elektriciteitsprijs het hoogst dan wel het laagst waren. Voor elk van deze uren is bepaald in hoeverre de technologie flexibiliteit gebruikt om in te spelen op de externe prikkels. Onderstaande tekstboxen tonen de criteria die gehanteerd zijn om te beoordelen of er sprake was van flexibiliteit.

Bij beperkte netwerkcapaciteit en hoge elektriciteitsprijzen is de afkoeling van de woning of het buffervat een maat voor de hoeveelheid vermogen dat er dat uur niet gebruikt is. Dus het flexibele vermogen in dat uur. Het vermogen dat in deze uren resteert (nog wel nodig is) tellen we als het inflexibele vermogen. Voor de lage elektriciteitsprijzen geldt het tegenovergestelde. De opwarming van de woning of het buffervat is een maatstaf voor de hoeveelheid vermogen dat er dat uur extra gebruikt is en daarmee dus het flexibele vermogen.

**Figuur B10: Definitie van drie maten voor flexibiliteit**



# Wat kun je bereiken met het slim aansturen van warmtepompen?

De grootte van de flexibele elektriciteitsvraag en inflexibele (resterende) elektriciteitsvraag zoals beschreven op de voorgaande pagina is bepaald op basis van de modelresultaten. Voor elk van deze criteria zijn de 336 uren (2 weken) die het meest kritiek waren samengevat in de figuur rechts. Dit aantal uren is enigszins arbitrair gekozen: groot genoeg om alle meest kritieke situaties te bevatten, en klein genoeg om selectief te focussen op die uren die er het meeste toe doen (in het gemiddelde jaar 2015). Dit gaat om de flexibele en inflexibele vraag in de 336 uren met:

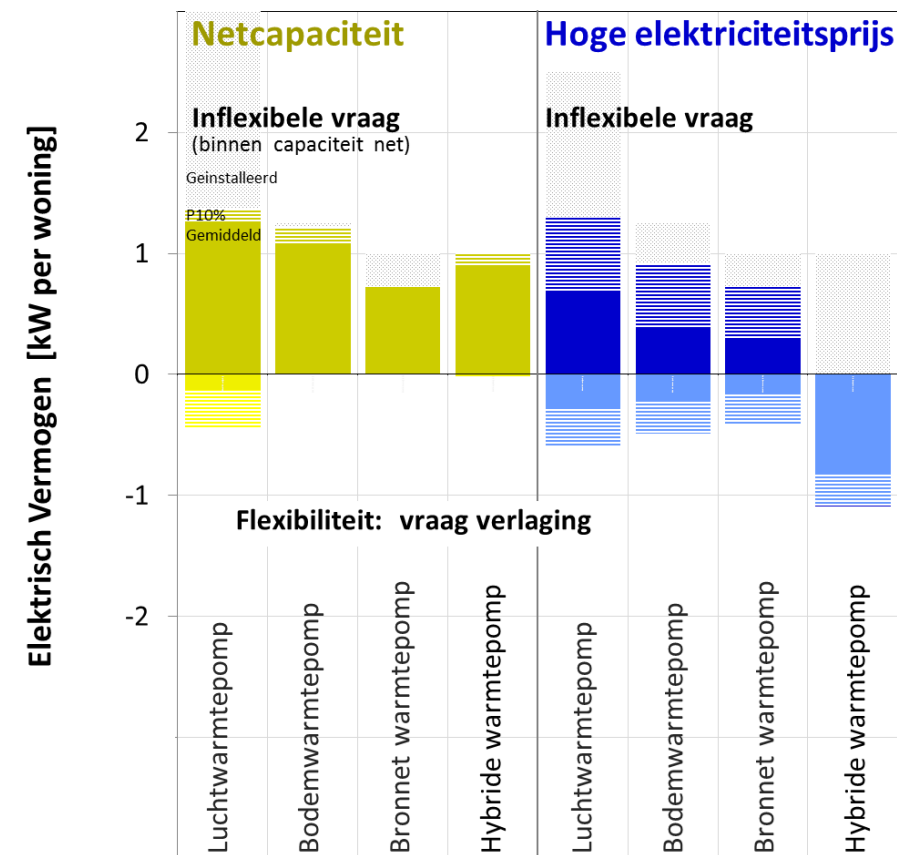
1. Meest beperkte netwerkcapaciteit
2. Hoogste elektriciteitsprijzen (gerelateerd aan schaarse duurzame opwek en hoge overige elektriciteitsvraag)
3. Laagste elektriciteitsprijzen (gerelateerd aan overvloedige duurzame opwek en/of lage overige elektriciteitsvraag)

De 336 beschouwde uren zijn vervolgens op een volgorde van grootte gezet voor elk van 3 genoemde criteria. Vervolgens zijn 10% en 90% percentielen ( $P_{10\%}$  en  $P_{90\%}$ ) en het gemiddelde bepaald over deze uren. Deze drie waarden zijn in samenvattende figuren weergegeven per technologie.

De figuur vat de resultaten samen voor een typische tussenwoning de inflexibele vraag (positieve waarden) en de potentiële flexibiliteit (negatieve waarden) van elk type warmtepompen met slimme sturing in verband met beperkte netwerkcapaciteit en hoge elektriciteitsprijzen. Als referentiewaarde is ook het geïnstalleerd vermogen weergegeven. Voorbeeld voor interpretatie:

- In de uren met knellende netwerkcapaciteit, vraagt de woning met luchtwarmtepomp (inflexibele vraag) gemiddeld 1.2 kW per woning, en soms ( $P_{10\%}$ ) tot 1.4 kW.
- In de uren met een zeer hoge elektriciteitsprijs kan de woning met luchtwarmtepomp gemiddeld (minus) 0.3 kW flexibele vraag reduceren, en soms ( $P_{10\%}$ ) tot (minus) 0.6 kW.
- In de uren met een zeer hoge elektriciteitsprijs kan de woning met hybride warmtepomp gemiddeld (minus) 0.8 kW flexibele vraag reduceren, en soms ( $P_{10\%}$ ) tot (minus) 1.1 kW, terwijl de inflexibele vraag nihil is (0 kW).

Figuur B11: Inflexibele piekvraag en flexibiliteit van in verschillende types warmtepompen voor Tussenwoning schillabel B.





# Bijlage C

**Welke rol kunnen warmtenetten en warmtebuffers spelen in een geïntegreerd energiesysteem?**

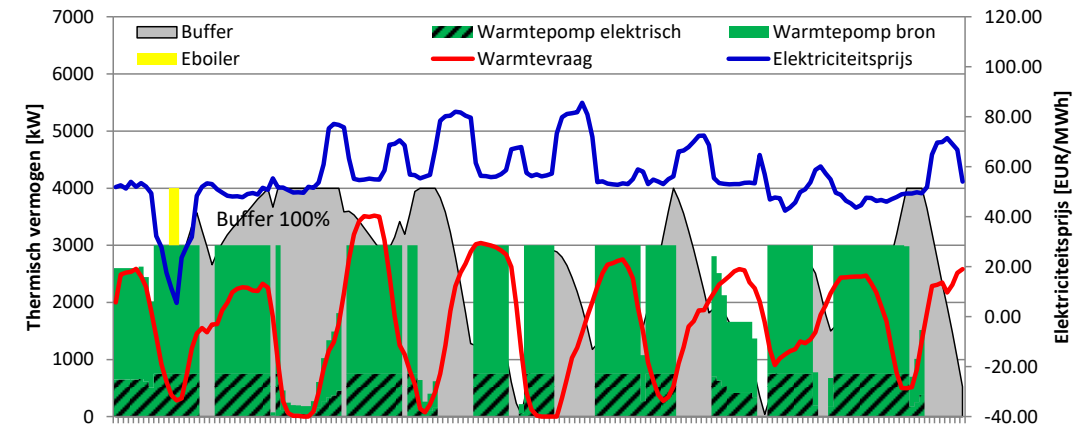


# Welke rol kunnen warmtenetten en warmtebuffers spelen in een geïntegreerd energiesysteem?

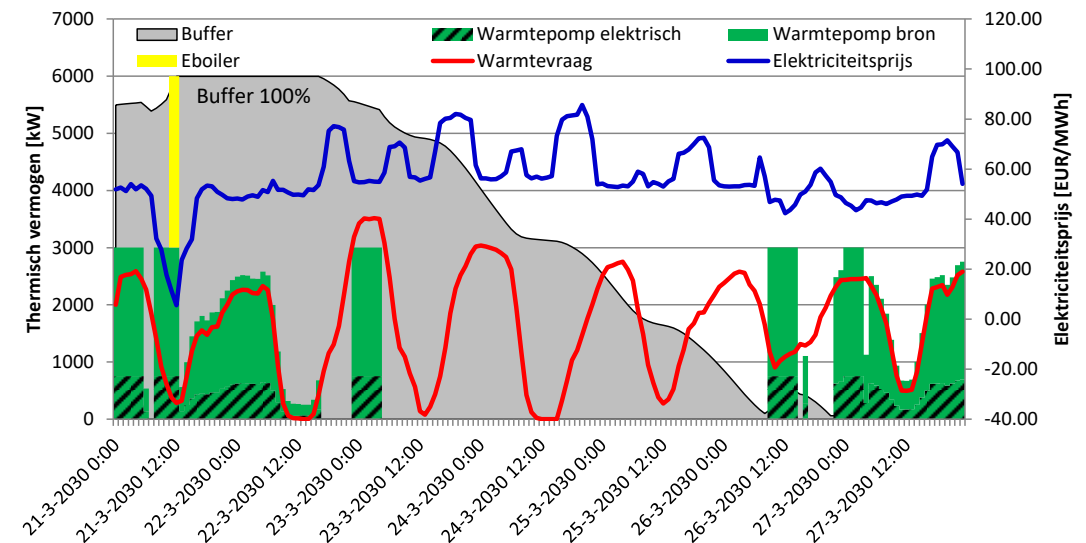
De figuren rechts tonen het gedrag van een warmtenet met een industriële warmtepomp in combinatie met een dag-buffer of een week-buffer. Daarnaast is er ook nog sprake van een E-boiler. In het warmtenet met de week-buffer heeft de E-boiler een hoger vermogen. Echter, in de getoonde week kon de E-boiler maar 2 uur rendabel ingezet worden.

In de figuren is te zien dat er met behulp van de week-buffer een langere periode van hoge elektriciteitsprijzen overbruggd kan worden. Hierdoor kan dit systeem meer flexibiliteit leveren.

Figuur C1: Warmtenet met dag-buffer



Figuur C2: Warmtenet met week-buffer



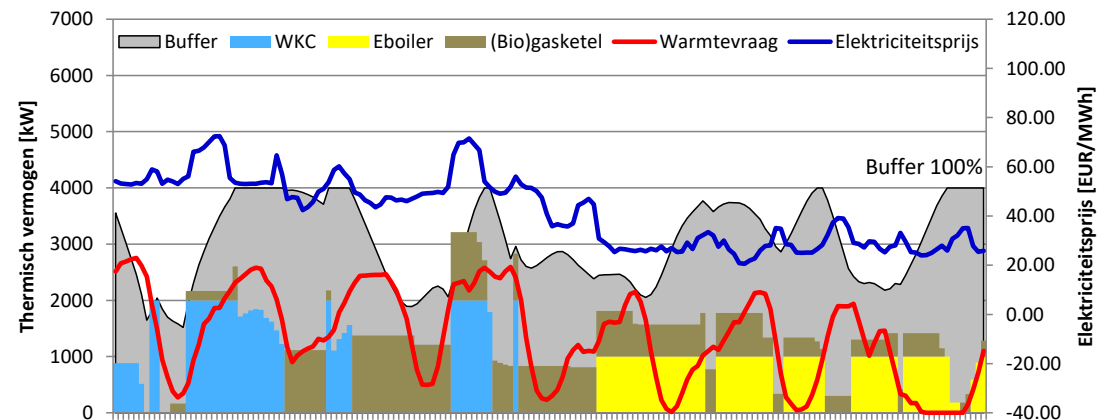
# Welke rol kunnen warmtenetten en warmtebuffers spelen in een geïntegreerd energiesysteem?

De figuren rechts tonen een ander voorbeeld van het gedrag van een warmtenet. Dit maal een warmtenet met een WKC in combinatie met een E-boiler en een back-up gasketel. Er wordt een warmtenet met een dag-buffer getoond en een warmtenet met een week-buffer. Wederom heeft de E-boiler meer vermogen in de combinatie met de week-buffer.

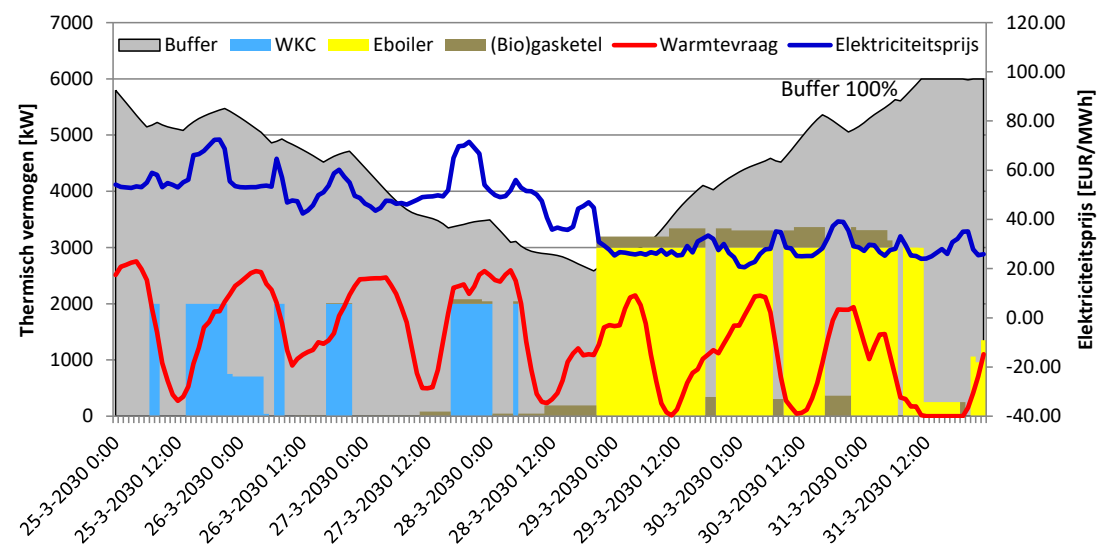
In deze figuren is goed het voordeel te zien van de eigenschap van het warmtenet dat er verschillende warmtebronnen op kunnen worden aangesloten. Tijdens de uren met hoge elektriciteitsprijzen kan de WKC draaien om extra elektriciteit te produceren. Tijdens de uren met lage elektriciteitsprijzen kan de E-boiler gebruikt worden om overschotten duurzame energie nuttig te gebruiken. Daarnaast zijn er uren waarop het voor zowel de WKC als de E-boiler niet rendabel is om te draaien. Op dat moment kan de gasketel inspringen om het warmtenet te voeden.

Een belangrijk aspect hierbij is echter, dat de business case van de WKC negatief beïnvloed wordt door een oplopend aantal uren met relatief goedkope elektriciteit uit zon en wind opwek. Daarmee nemen de draaiuren (en daarmee de inkomsten) van de WKC navenant af. Een dergelijke WKC moet in een teruglopend aantal uren per jaar toch voldoende inkomsten kunnen genereren.

Figuur C3: Warmtenet met dag-buffer



Figuur C4: Warmtenet met week-buffer



# Welke rol kunnen warmtenetten en warmtebuffers spelen in een geïntegreerd energiesysteem?

Ook in de voeding van warmtenetten kan flexibel gebruik van duurzame elektriciteit meer en meer worden toegepast. In Denemarken, waar warmtenetten een grote rol spelen en dat voorloopt met in duurzame elektriciteit uit wind en zon, groeit dit snel (zie pagina 24). Een warmtenet kan modulair verder worden ontwikkeld, wanneer meer duurzame of goedkopere bronnen beschikbaar komen. Het verlagen van het temperatuur-niveau met beter geïsoleerde woningen kan bijdragen.

Een belangrijk aspect is dat warmtenetten vaak meerdere bronnen benutten. Naast een restwarmtebron is er vrijwel altijd sprake van warmte-kracht combinatie (WKC) en/of gasketels om piek-warmtevraag te kunnen leveren. Daarmee kunnen deze warmtenetten zeer flexibel elektriciteit gebruiken, analoog aan hybride warmtepompen.

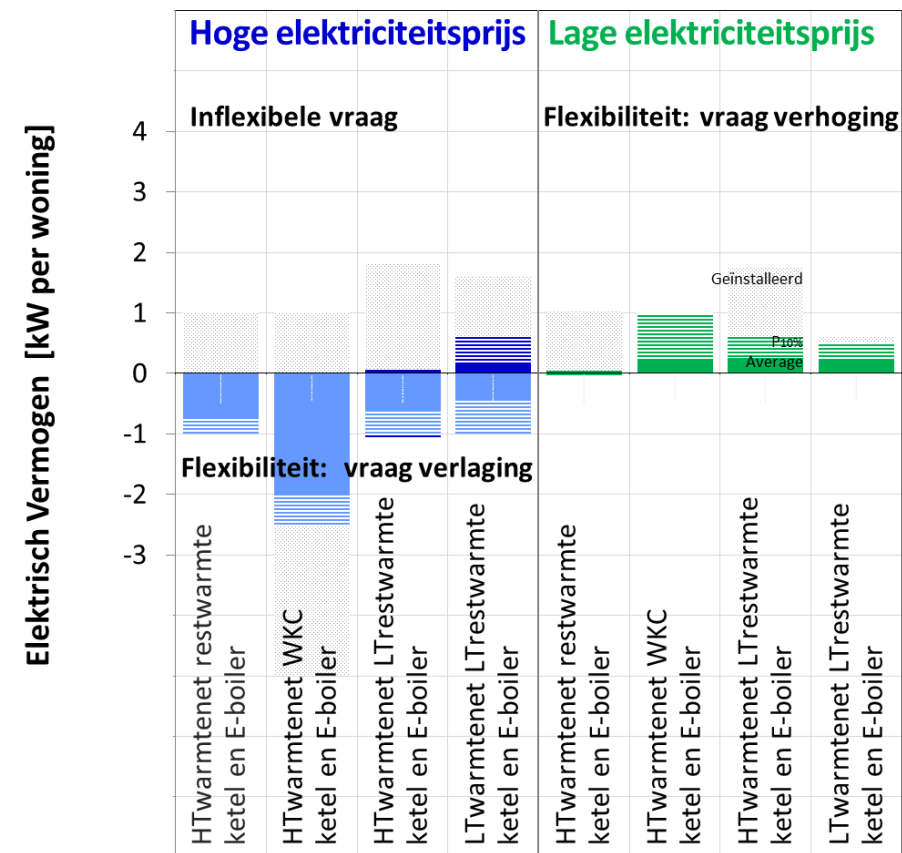
Vergelijkbaar met de weergave voor warmtepompen (Bijlage B), is ook de flexibele en inflexibele vraag voor de elektrische voeding van warmtenetten weergegeven, voor de 336 uren met:

1. Hoogste elektriciteitsprijzen (gerelateerd aan schaarse duurzame opwek en hoge overige elektriciteitsvraag);
2. Laagste elektriciteitsprijzen (gerelateerd aan overvloedige duurzame opwek en/of lage overige elektriciteitsvraag).

Voorbeeld voor interpretatie, alle waardes uitgedrukt per woning:

- In de uren met een zeer hoge elektriciteitsprijs kan een warmtenet met back-up ketel en E-boiler gemiddeld 0.7 kW flexibele vraag reduceren.
- In de uren met een zeer hoge elektriciteitsprijs kan de WKC bij een warmtenet gemiddeld 2 kW elektriciteit leveren.
- In de uren met een zeer lage elektriciteitsprijs kunnen de warmtenetten met E-boiler gemiddeld 0.2 kW extra vraag realiseren en soms ( $P_{10\%}$ ) tot 0.6 kW aan extra vraag.

Figuur C5: Flexibiliteit van verschillende configuraties warmtenetten, in dit geval met dag-buffer voor warmteopslag.



# Welke rol kunnen warmtenetten en warmtebuffers spelen in een geïntegreerd energiesysteem?

Naast verschillende warmtebronnen bieden warmtenetten ook de mogelijkheid om warmtebuffers toe te passen (en dit gebeurt ook al in veel warmtenetten). Een warmtebuffer biedt de mogelijkheid om de warmteproductie in de tijd (deels) te ontkoppelen van de piekwarmtevraag. In combinatie met een WKC kan dan warmte worden geproduceerd op momenten dat de vraag naar elektriciteit het hoogste is. Ook draagt het bij aan het invullen van piek-warmtevraag, met minder inzet van gaspieketels.

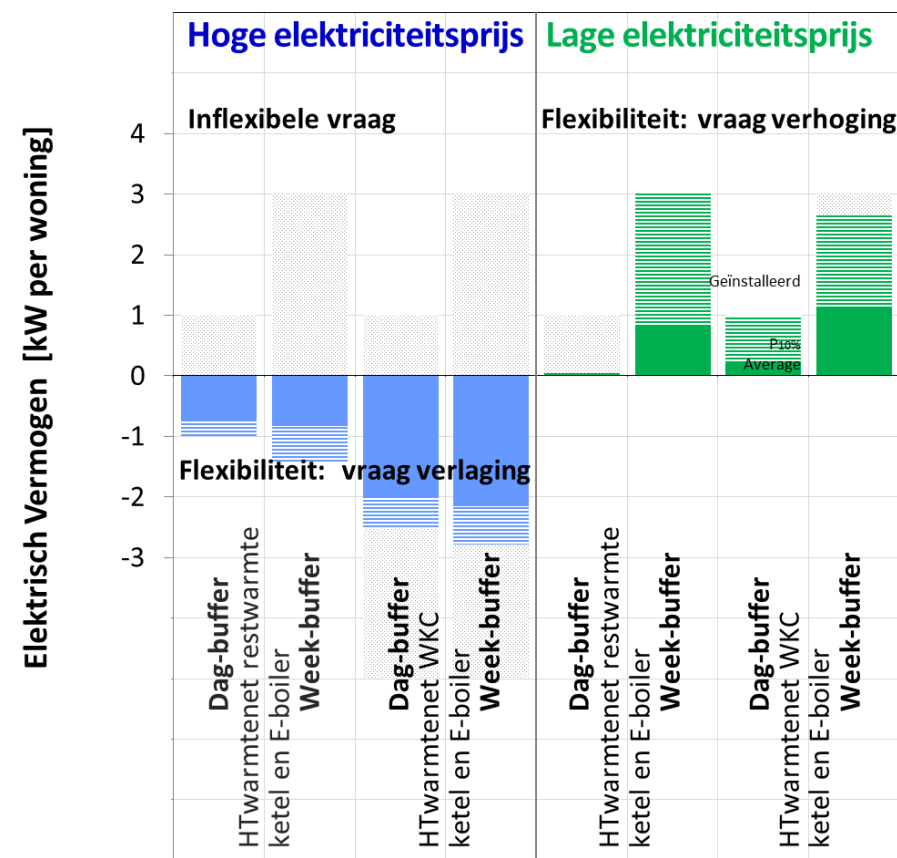
Warmtebuffers zijn een van de meest kosteneffectieve mogelijkheden voor grootschalige energieopslag. Daarmee kan het een rol spelen om een groter deel van uren met een overschot aan elektriciteit uit zon- en wind nuttig in te zetten. Door de warmtepomp of elektrische boiler aan te zetten tijdens die uren wordt het warmtenet gevoed met CO<sub>2</sub>-vrije energie, en de geproduceerde warmte op te slaan voor later gebruik.

Figuur C6 toont de meerwaarde van een dag- of week-buffer voor het ontsluiten van meer flexibele elektriciteitsvraag

Voorbeeld voor interpretatie:

- In de uren met een zeer hoge elektriciteitsprijs kan een warmtenet met back-up ketel en E-boiler de elektriciteitsvraag gemiddeld 0.8 kW reduceren met een dag-buffer en 0.9 kW met een week-buffer (vergelijk met 0.7 kW flexibele vraag zonder buffer, zie vorige pagina).
- In de uren met een zeer lage elektriciteitsprijs kan een warmtenet met back-up ketel en E-boiler met een dag-buffer gemiddeld 0.05 kW extra vraag realiseren, maar met een week-buffer gemiddeld tot 0.8 kW extra vraag en soms ( $P_{10\%}$ ) tot 3 kW aan extra vraag (vergelijk met 0 kW flexibele vraag zonder buffer, zie vorige pagina).

Figuur C6: Flexibiliteit uit de inzet van E-boilers in combinatie met warmtebuffer: dag-buffer, of week-buffer.





# Bijlage D

**Hoe telt deze (in)flexibiliteit op in het landelijke energiesysteem?**



# Hoe telt deze (in)flexibiliteit op in het landelijke energiesysteem?

## Scenario's

Met de verschillende technologieën zijn scenario's gedefinieerd om een landelijke optelling te maken van de flexibele vermogen in Nederland in 2030 met een doorkijk naar 2050.

Als basis scenario is de Startanalyse gevolgd van het PBL. Hierbij is voor iedere buurt in Nederland uitgegaan van de strategie met de laagste Nationale Kosten. Vervolgens zijn meer of minder flexibele scenario's gemaakt door te schuiven tussen varianten, en tussen verschillende sub-varianten.

### Flex-

- Halvering van aandeel warmtenet, van elk type in Basis, ten gunste van lucht/water warmtepomp (3/4 deel) en bodem/water warmtepomp (1/4 deel)

### Flex+

- Meer flexibiliteit in lucht/water warmtepompen. (Hoger vermogen, minder elektrisch element.)
- Minder lucht/water warmtepomp en water/water warmtepomp ten gunste van hybride warmtepomp.
- Meer flexibiliteit in warmtenetten. (Gasketel back-up + e-boiler.)

### Flex++

- Meer flexibiliteit in lucht/water warmtepompen. (Hoger vermogen, minder elektrisch element, verbeterde woning)
- Meer flexibiliteit in water/water warmtepompen. (Verbeterde woning)
- Minder lucht/water warmtepomp en water/water warmtepomp ten gunste van hybride warmtepomp, en klein deel WKC warmtenet
- Meer flexibiliteit in warmtenetten. (Gasketel back-up, grote e-boiler, grote buffers)
- Meer WKC warmtenet ten koste van andere HT-warmtenetten (70°C)

Tabel D1: Overzicht scenario's en vergelijking II3050

	All- electric warmtepomp	Hybride warmtepomp (groengas)	Hybride warmtepomp (waterstof)	Warmtenet	HR-ketel
<b>Scenario 2030</b>					
Basis	7%	6%	n.v.t.*	17%	70%
Flex-	8%	6%	n.v.t.*	16%	70%
Flex+	7%	7%	n.v.t.*	17%	69%
Flex++	7%	7%	n.v.t.*	17%	69%
<b>Scenario Eindbeeld</b>					
Basis	38%	6%	n.v.t.*	44%	11%
Flex-	60%	6%	n.v.t.*	22%	11%
Flex+	28%	17%	n.v.t.*	44%	11%
Flex++	20%	21%	n.v.t.*	48%	11%
<b>Scenario II3050</b>					
Regionale sturing	35%	20%	0%	45%	0%
Nationale sturing	55%	20%	0%	25%	0%
Europese sturing	25%	40%	20%	15%	0%
Internationale sturing	25%	0%	60%	15%	0%

\* In de E-TOP studie is geen onderscheid gemaakt tussen een hybride warmtepomp met groengas of met aardgas.

# Hoe telt deze (in)flexibiliteit op in het landelijke energiesysteem?

De combinatie van de 4 scenario's met het landelijke aantallen woningen per warmte-technologie en de totale elektriciteitsvraag per uur, zonder en met slimme sturing van warmtepompen (bovenste rij figuren) en warmtenetten (onderste rij figuren) is samengevat in onderstaande figuren. Hierin is voor 2 weerjaren (1987 en 2015) de elektriciteitsvraag per uur weergegeven, afhankelijk van de buitentemperatuur.

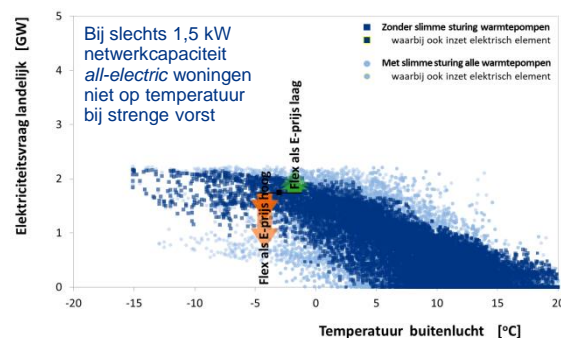
Figuren D2 Landelijke vermogensvraag voor warmte per uur

**2030 met beperkende netwerkcapaciteit**

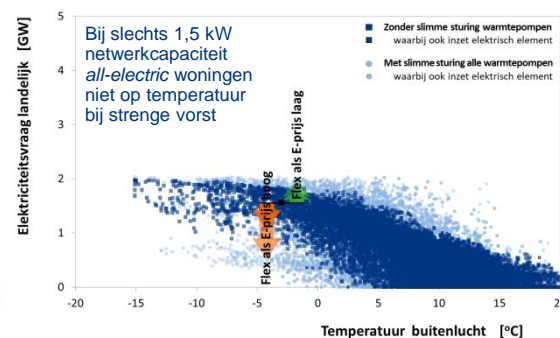


## Individuele Warmtepompen

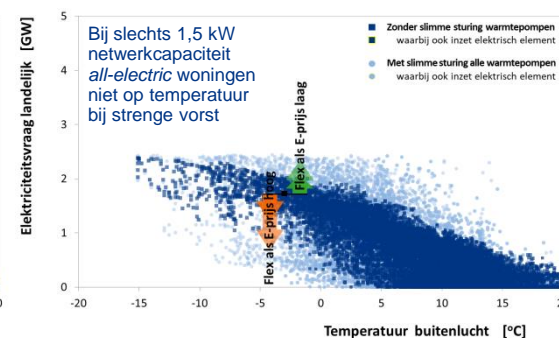
Scenario Flex –



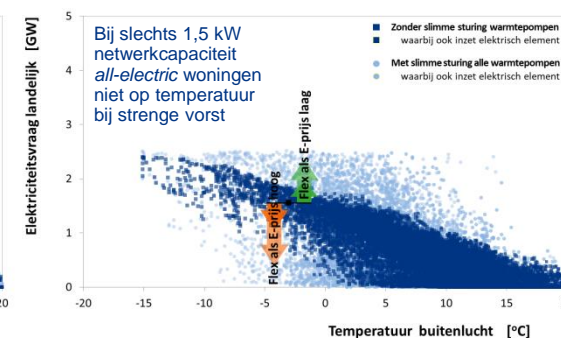
Basis



Flex +

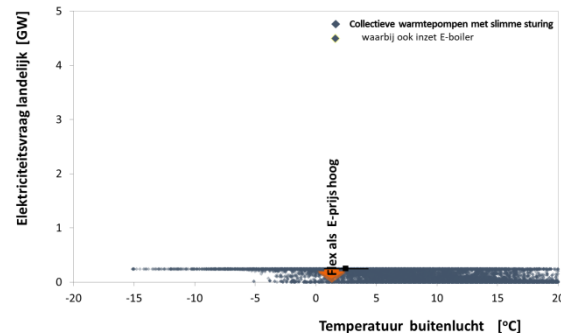


Flex ++

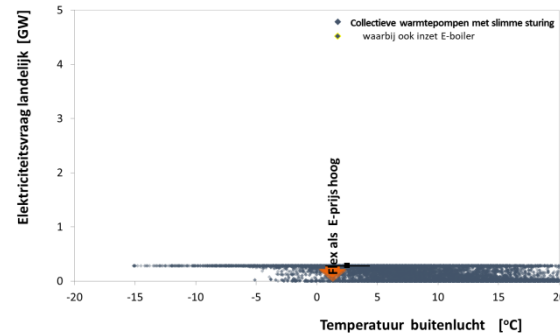


## Warmtenetten met collectieve warmtepompen en E-boilers

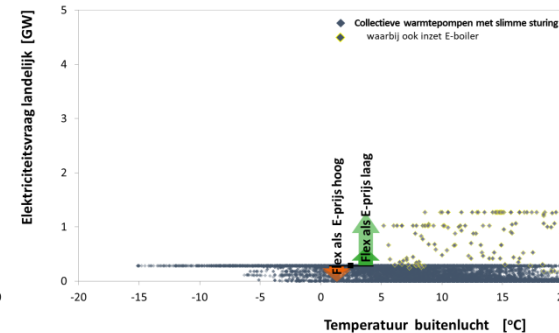
Scenario Flex –



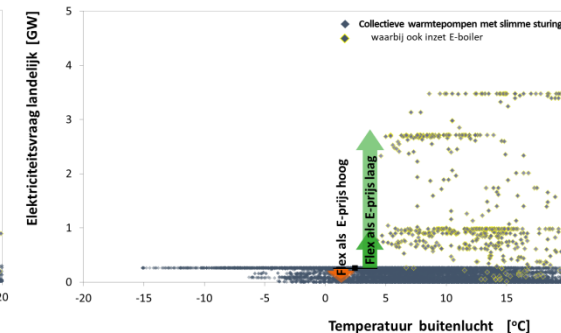
Basis



Flex +



Flex ++



# Hoe telt deze (in)flexibiliteit op in het landelijke energiesysteem?

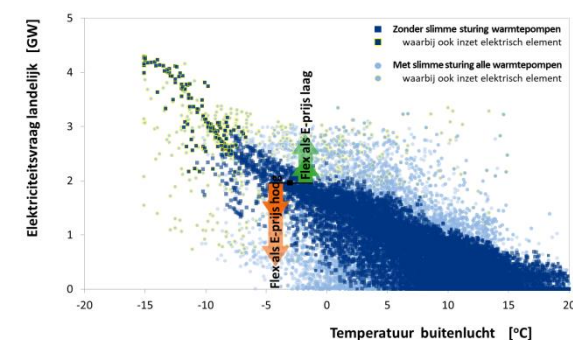
De combinatie van de 4 scenario's met het landelijke aantallen woningen per warmte-technologie en de totale elektriciteitsvraag per uur, zonder en met slimme sturing van warmtepompen (bovenste rij figuren) en warmtenetten (onderste rij figuren) is samengevat in onderstaande figuren. Hierin is voor 2 weerjaren (1987 en 2015) de elektriciteitsvraag per uur weergegeven, afhankelijk van de buitentemperatuur.

Figuren D3 Landelijke vermogensvraag voor warmte per uur

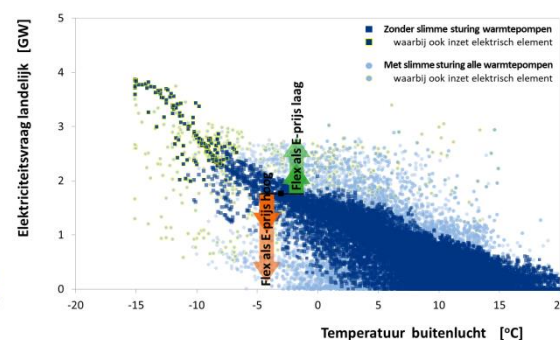
**2030** zonder beperkende netwerkcapaciteit  

## Individuele Warmtepompen

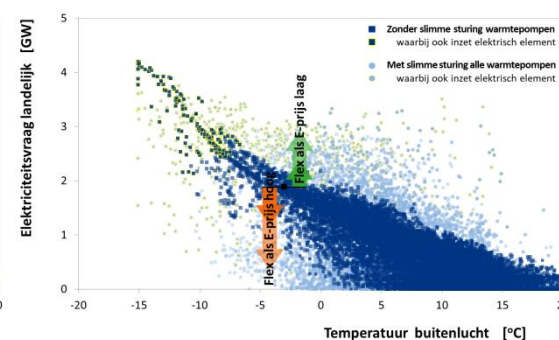
Scenario Flex -



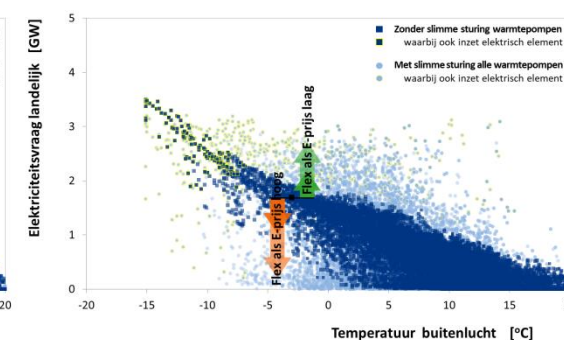
Basis



Flex +

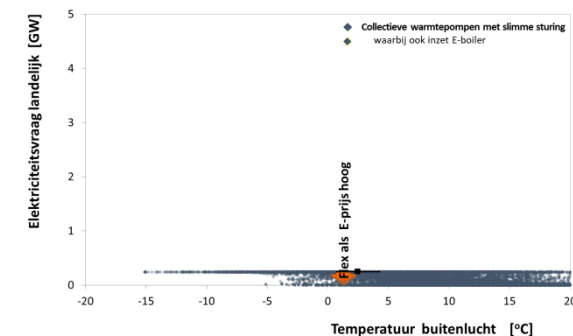


Flex ++

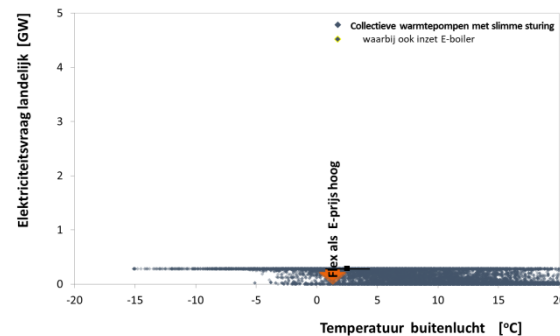


## Warmtenetten met collectieve warmtepompen en E-boilers

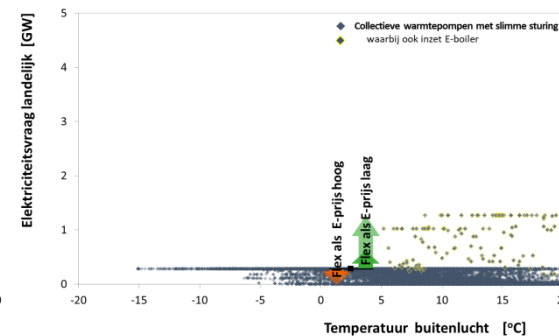
Scenario Flex -



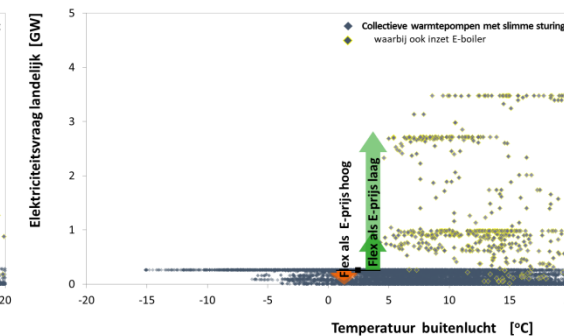
Basis



Flex +



Flex ++



# Hoe telt deze (in)flexibiliteit op in het landelijke energiesysteem?

De combinatie van de 4 scenario's met het landelijke aantallen woningen per warmte-technologie en de totale elektriciteitsvraag per uur, zonder en met slimme sturing van warmtepompen (bovenste rij figuren) en warmtenetten (onderste rij figuren) is samengevat in onderstaande figuren. Hierin is voor 2 weerjaren (1987 en 2015) de elektriciteitsvraag per uur weergegeven, afhankelijk van de buitentemperatuur.

## Eindbeeld

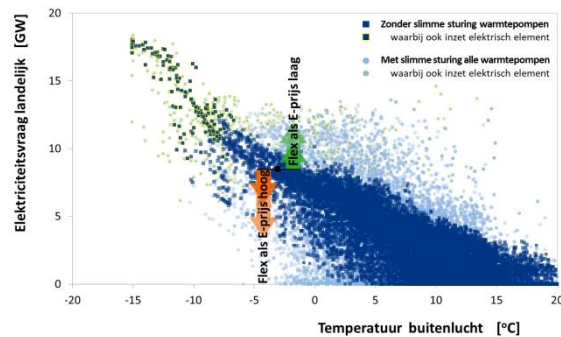
Figuren D4 Landelijke vermogensvraag voor warmte per uur

~2050 zonder beperkende netwerkcapaciteit

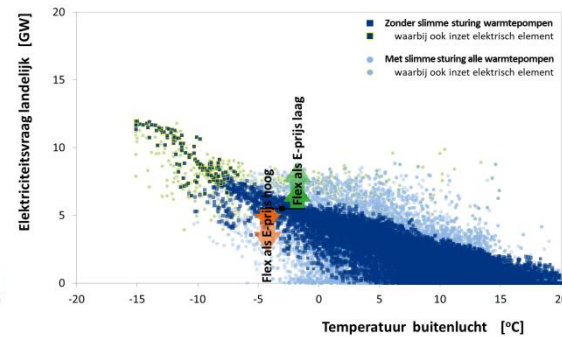


### Individuele Warmtepompen

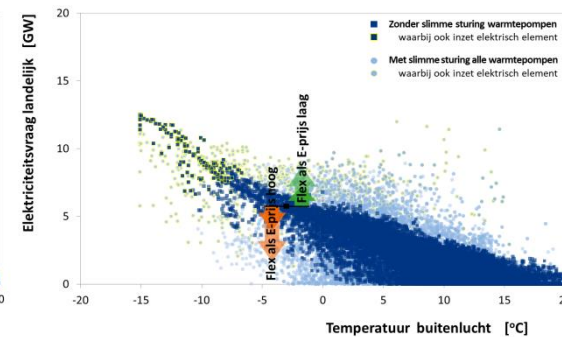
Scenario Flex -



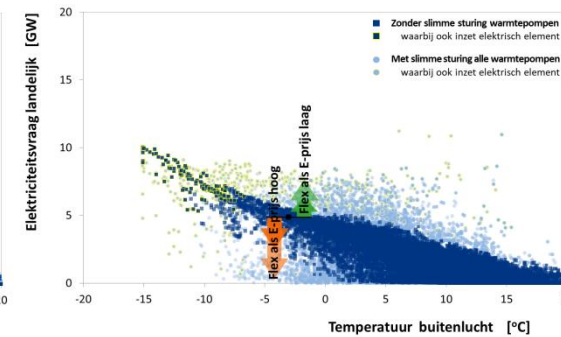
Scenario Basis



Scenario Flex +

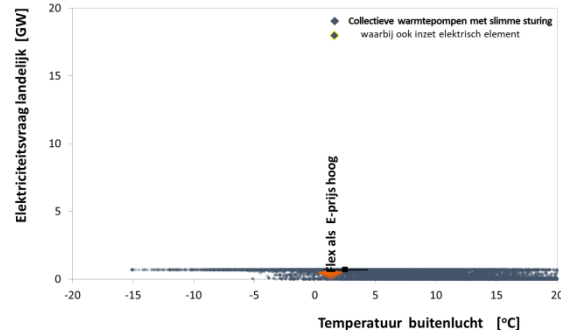


Scenario Flex ++

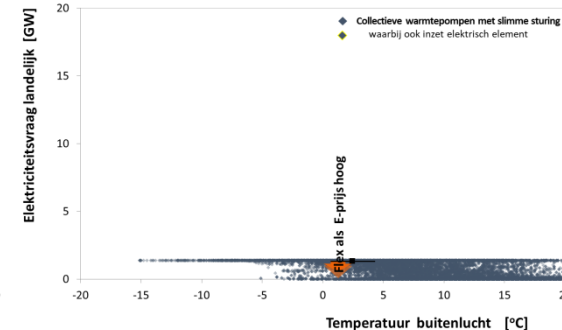


### Warmtenetten met collectieve warmtepompen en E-boilers

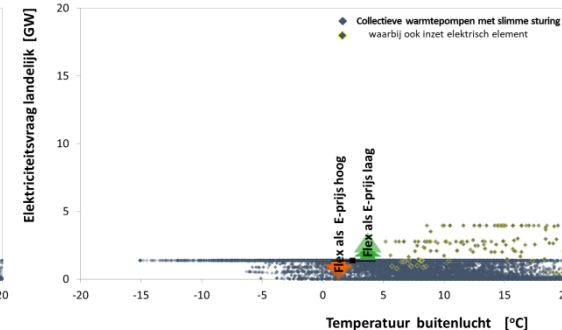
Scenario Flex -



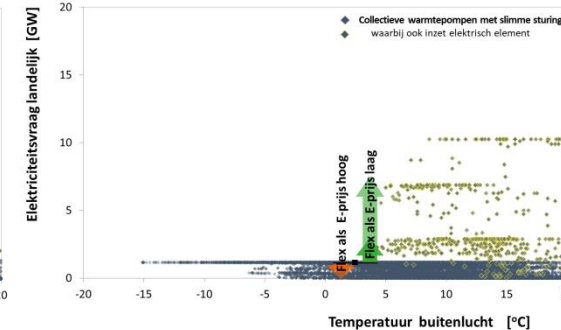
Scenario Basis



Scenario Flex +



Scenario Flex ++



# Hoe telt deze (in)flexibiliteit op in het landelijke energiesysteem?

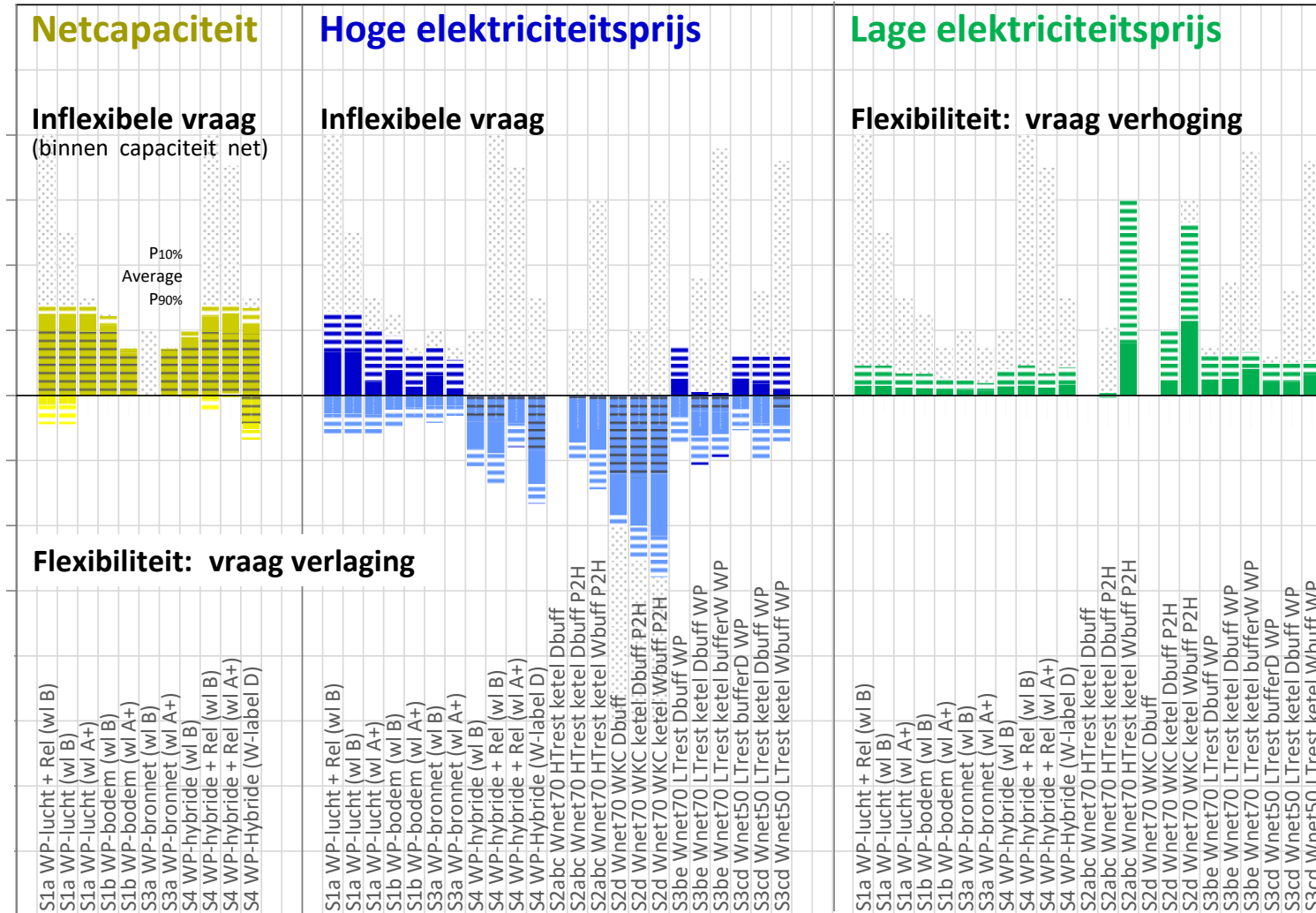
Als startpunt voor de analyse van landelijke flexibele vermogens in de meest extreme 336 uren in een gemiddeld jaar, is de flexibiliteit voor de hele set warmtetechnologieën en woningen (althans voor de tussenwoning) samengevat in de Figuur D1 (zoals in Bijlagen B en C).

Hierbij wordt het gemiddelde flexibele vermogen weergegeven als de ingekleurde balk. Daarnaast wordt het P10 en P90 flexibele vermogen weergegeven in respectievelijk de zwarte strepen en de witte strepen. Ook wordt in het lichtgrijs nog het totaal opgestelde vermogen weergegeven per woning.

In de volgende stap worden deze gecombineerd met een set scenario's, die beschrijven hoeveel van elk van deze types woningen in het land voorkomen, zowel voor 2030 als in het Eindbeeld met een volledig verduurzaamde gebouwde omgeving. Uit deze combinatie volgt een totaal nationaal potentieel flexibel (en inflexibel) vermogen.

Elektrisch Vermogen [kW per woning]

Figuur D5: Flexibel elektrisch vermogen in kW per woning



# Hoe telt deze (in)flexibiliteit op in het landelijke energiesysteem?

Onderstaande figuren tonen de landelijke optelling van (in)flexibel vermogen voor de verschillende scenario's met weerjaar 2015, gemiddeld voor de maatgevende uren (eerder beschreven in Bijlage B). De figuur links toont het inflexibele elektrisch vermogen en het geïnstalleerd elektrisch vermogen, als optelling van de relevante technologieën. De gecombineerde figuur rechts toont (rechtsonder) de flexibele verlaging van de vraag en (rechtsboven) de flexibele extra vraag in de maatgevende uren met respectievelijk een extreem hoge en lage elektriciteitsprijs. Hieruit kan geconcludeerd worden:

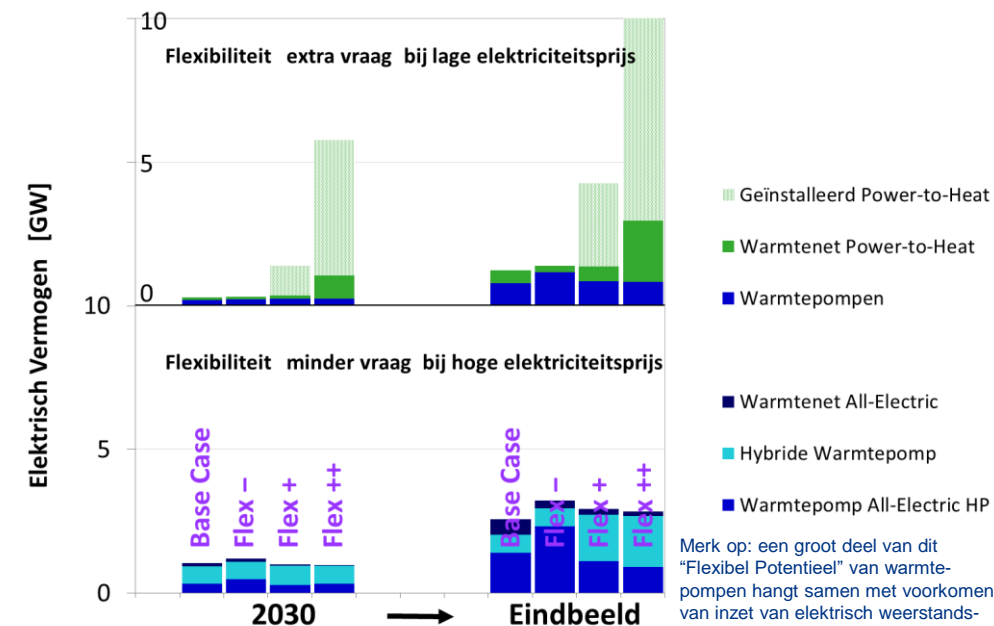
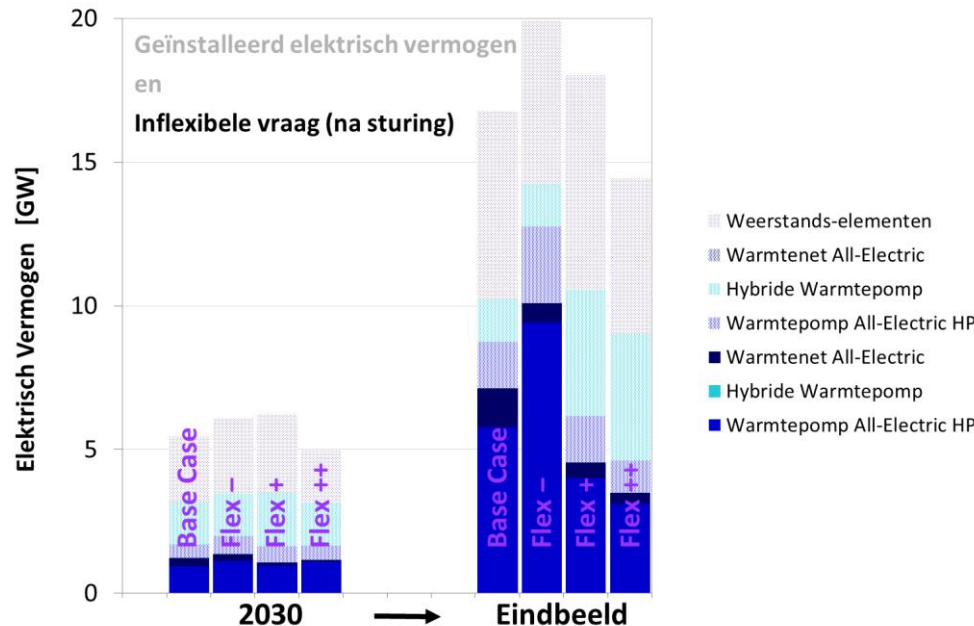
## Tot 2030:

- Warmtepompen kunnen optellen tot 5 GW (waarvan een deel in elektrisch weerstandselement). Zonder flexibiliteit kan dit vragen om 3 of 4 grote gascentrales om dit vermogen te leveren op dagen zonder wind of zon.
- Met veel slimme hybride en all-electric warmtepompen kan inflexibele elektriciteitsvraag beperkt blijven: 1 GW.
- E-boilers en slimme sturing van warmtepompen kunnen bijdragen aan het nuttig gebruik van enkele GW duurzame opwek op piekmomenten.

## Eindbeeld ~2050 met een volledig duurzame warmtevoorziening:

- Vermogen warmtepompen kan de bestaande nationale piekvraag elektriciteit in 2020 overstijgen.
- Met slimme hybride en all-electric warmtepompen kan inflexibele vraag aanzienlijk lager uitvallen.
- E-boilers en slimme sturing van warmtepompen kan optellen tot een groot vermogen nuttig gebruik van duurzame opwek op piekmomenten.

Figuur D6:  
Inflexibel (links) en flexibel (rechts) landelijk elektrisch vermogen, voor 4 scenario's in 2030 en Eindbeeld ~2050



Merk op: een groot deel van dit "Flexibel Potentieel" van warmtepompen hangt samen met voorkomen van inzet van elektrisch weerstandselement door slimme sturing.

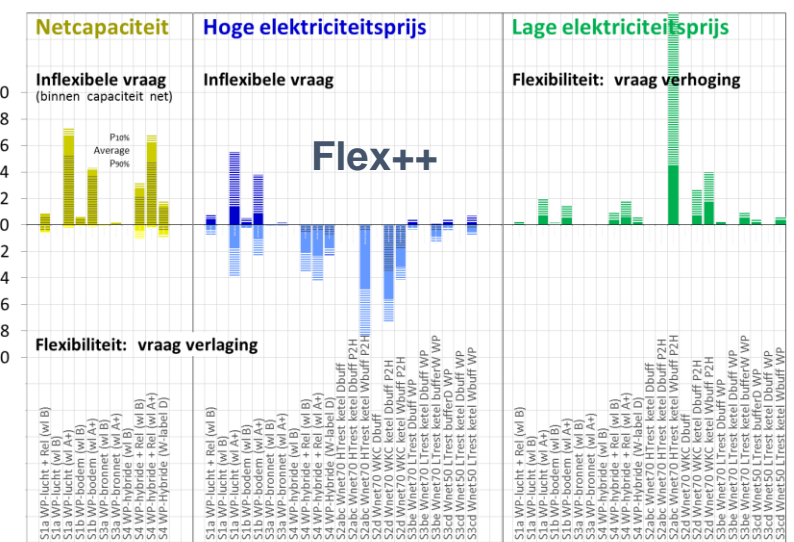
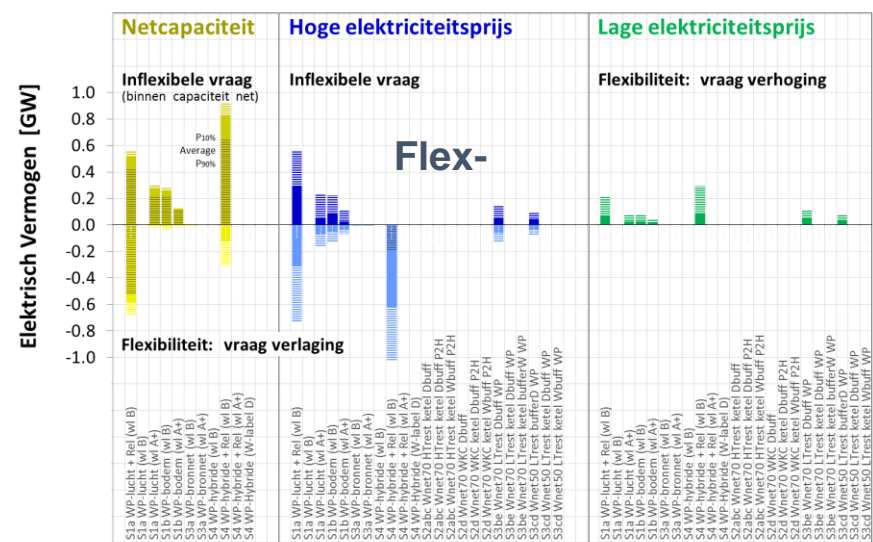
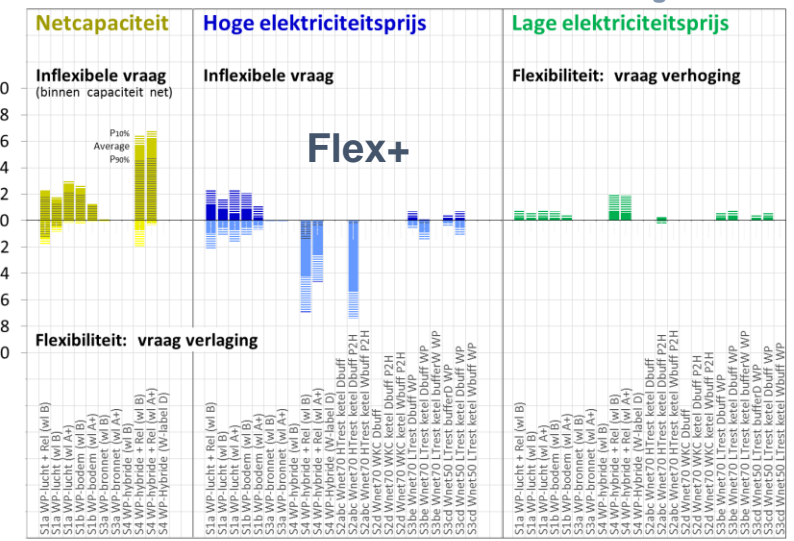
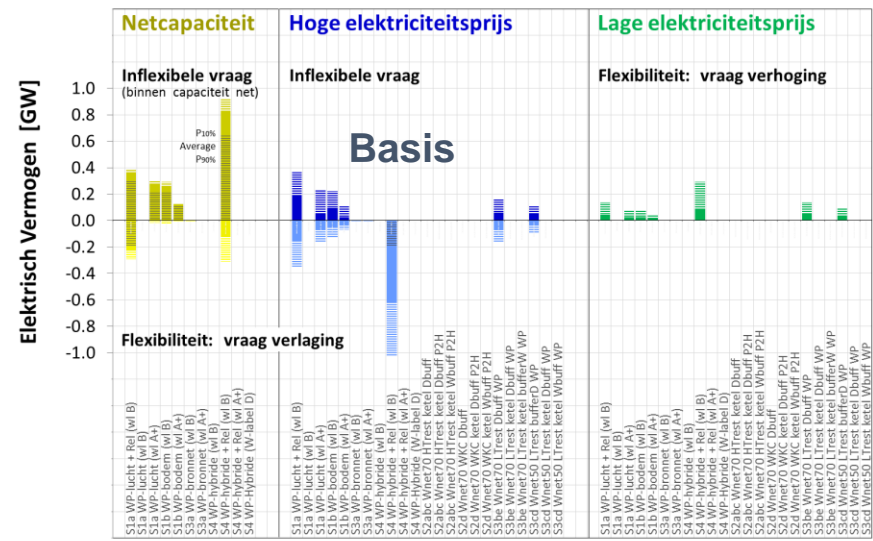
# Hoe telt deze (in)flexibiliteit op in het landelijke energiesysteem?

Figuren D7

## 2030

De figuren tonen de bijdragen van de verschillende technologieën aan het totale flexibele en inflexibele vermogen in 2030, voor de vier verschillende scenario's die de landelijke aantallen woningen weergeven waarin elk van de warmtetechnologieën verondersteld wordt te worden toegepast.

Het resultaat maakt inzichtelijk welke van de technologieën opgeteld over het land substantieel bijdragen aan het totale flexibele en inflexibele vermogen in het betreffende scenario.



# Hoe telt deze (in)flexibiliteit op in het landelijke energiesysteem?

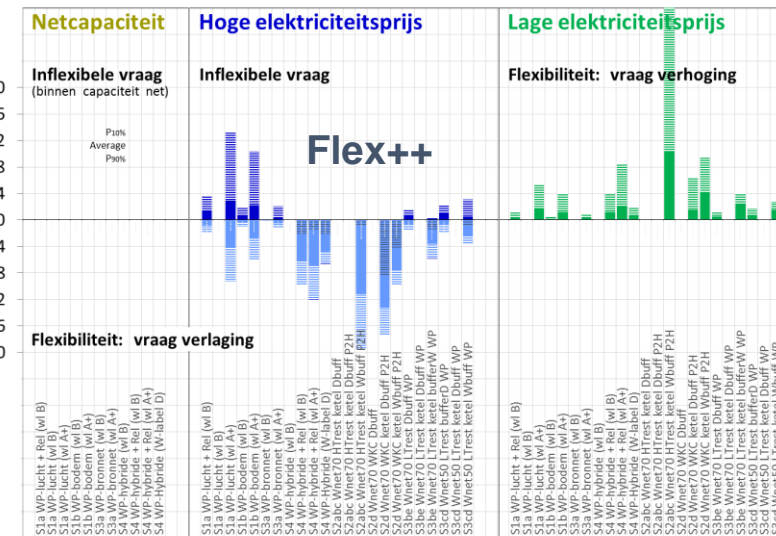
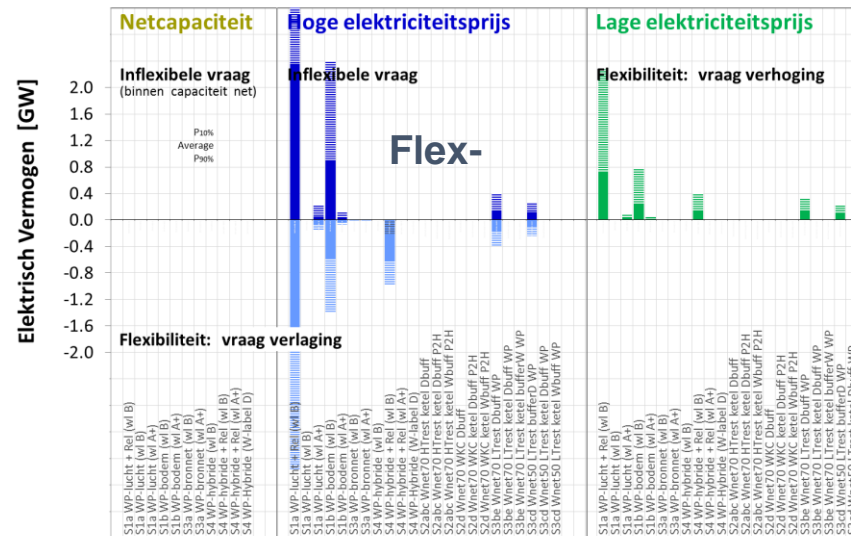
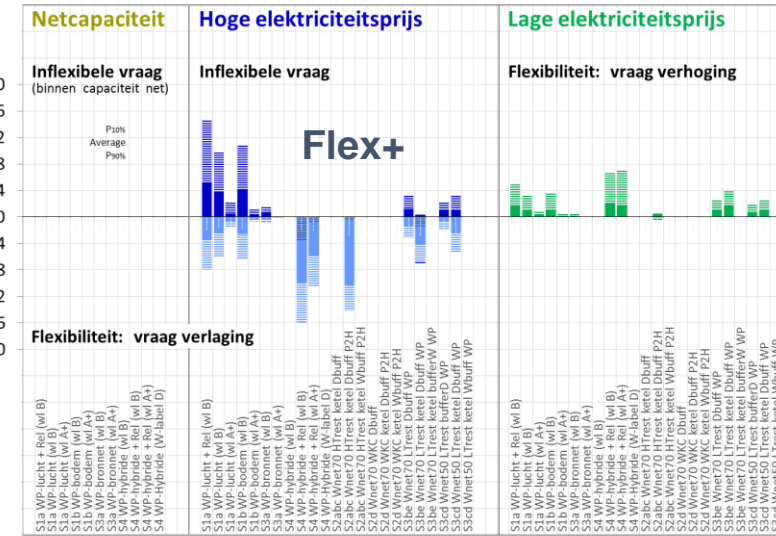
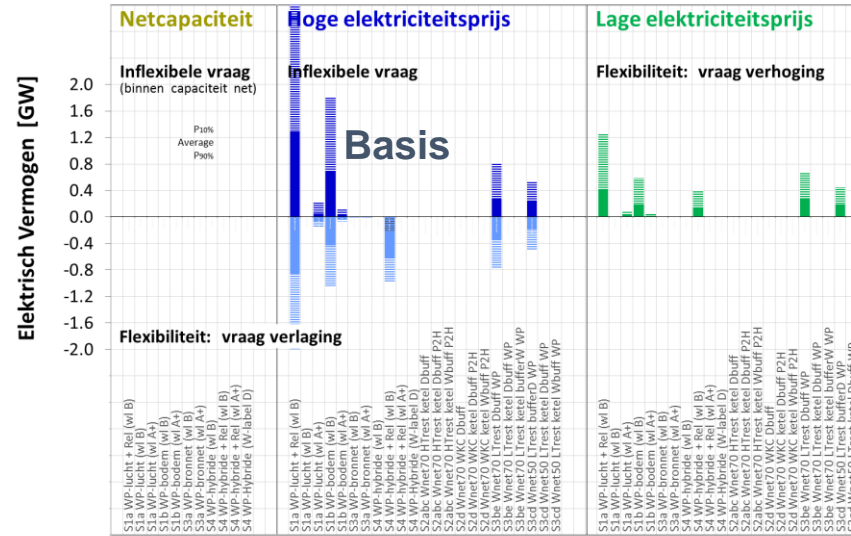
Figuren D8

## Eindbeeld ~2050

De figuren tonen de bijdragen van de verschillende technologieën aan het totale flexibele en inflexibele vermogen in het eindbeeld, voor de vier verschillende scenario's.

Het resultaat maakt inzichtelijk welke van de technologieën opgeteld over het land substantieel bijdragen aan het totale flexibele en inflexibele vermogen in het betreffende scenario.

In dit eindbeeld is er geen (in)flexibele vraag meer is met betrekking tot de netwerkcapaciteit. Dit komt doordat is aangenomen dat er een hogere netwerkcapaciteit is gerealiseerd aan het einde van de warmtetransitie.





# Bijlage E

**Waarom lost het elektriciteitssysteem met flexibiliteit en opslag dit niet op?**



# Waarom lost het elektriciteitssysteem met flexibiliteit en opslag dit niet op?

**Andere bronnen van flexibiliteit zijn relatief kostbaar of geven CO<sub>2</sub> uitstoot.** In de zoektocht naar de goedkoopste flexibiliteitsopties met omvang moeten warmte-systemen zeker niet worden overgeslagen. Het is niet waarschijnlijk dat het hele technische potentieel aan flexibiliteit in warmte ook economisch haalbaar is. Ook alleen een deel hiervan is in omvang zeer relevant in het elektriciteitssysteem.

**Internationale interconnectie en uitwisseling van elektriciteit uit zon en wind met buurlanden** spelen een belangrijke rol, maar kunnen op zijn best slechts een deel overbruggen van de GW verschillen tussen vraag en aanbod. Bovendien biedt het in slechts een deel van de gevallen uitkomst, omdat de variaties zon- en wind-opwek en de vraag in Nederland vaak gelijklopen met die in onze buurlanden.

**Vandaag leveren gascentrales de meeste flexibiliteit, maar met CO<sub>2</sub> uitstoot.** In een duurzame energievoorziening is uitsluitend plaats voor CO<sub>2</sub>-vrije flexibiliteit. Centrales kunnen op termijn op waterstof draaien, hoewel dit een aanzienlijke kostenstijging tot gevolg zal hebben. Daarnaast zullen back-up/piekcentrales in een duurzamere energievoorziening steeds minder uren draaien, waardoor de kosten per eenheid geproduceerde elektriciteit zullen stijgen.

**In een betaalbaar en groen elektriciteitssysteem past eerst vraagsturing die tegen lage kosten gerealiseerd kan worden, en pas in tweede instantie duurdere oplossingen zoals elektriciteitsopslag.** Vraagsturing hoort bij de meest betaalbare flexibiliteitsopties, aangezien er weinig additionele investeringen voor nodig zijn. Andere opties, zoals batterijen, vragen hogere investeringen die gedurende de levensduur terugverdiend moet worden en dus op de energierekening terugkomen.

**Er zijn een beperkt aantal opties om overschotten zon en wind opwek nuttig in te zetten. Omzetting en opslag als warmte hoort bij de meest betaalbare mogelijkheden.** De kosten van de installaties die hiervoor nodig zijn, zijn aanzienlijk lager dan bijvoorbeeld batterij-opslag of conversie naar waterstof.

## Toelichting    Overzicht van flexibiliteitsopties

**Vraagsturing:** de behoefte aan flexibiliteit wordt zo groot, dat in alle sectoren gezocht moet worden naar kansen. Bepaalde industrieën leveren nu ook al vraagsturing. Slim laden van elektrische voertuigen biedt kansen. Met vraagsturing kun je je elektriciteitsrekening verlagen. Sommige bedrijven doen dit al. Ook voor huishoudens wordt dit steeds aantrekkelijker.

**Hybridisering:** speelt ook in andere sectoren dan warmte een rol. Met de mogelijkheid om over te schakelen op gas kan deze meebewegen met het elektriciteitsaanbod. Op termijn kan het gas worden verduurzaamd met biogas of groene waterstof.

**Batterijopslag** wordt langzaam goedkoper. Maar het vergt aanzienlijke investeringen en zal relatief kostbaar blijven voor de grote hoeveelheden energie, zoals over een paar koude winterweken. Er zijn 4 tot 8 Tesla Power-Walls thuisbatterijen nodig voor 1 woning met warmtepomp voor 24 uur.

**Waterstof** heeft het voordeel dat het betaalbaar in grote hoeveelheden opslagen kan worden. Maar de productie uit elektriciteit is nog relatief duur en bij de conversie (E naar H<sub>2</sub> en terug) gaat al snel 50% energie verloren.

**Back-up/piekcentrales** gaan met meer zon- en wind energie steeds minder uren draaien. Daardoor wordt deze back-up elektriciteit relatief kostbaar.

**Inter-connectie / uitwisseling met buurlanden** van elektriciteit helpt vaak, maar lang niet altijd. Het komt ook voor dat in buurlanden ook veel of juist weinig duurzame opwek beschikbaar is op hetzelfde moment als in NL.

NB: flexibiliteitsopties zijn niet allemaal uitwisselbaar, onder andere afhankelijk van de richting of geografische lokatie.



# Bijlage F

Hoe is deze analyse tot stand gekomen?



# Hoe is deze analyse tot stand gekomen?

Dit project is uitgevoerd in het kader van het E-TOP programma. TenneT heeft het E-TOP programma eind 2019 gelanceerd om met haar partners en stakeholders in het energiesysteem samen te werken aan het versnellen van de energietransitie.

Het E-TOP programma bestaat uit een jaarlijks evenement waarin de dialoog wordt gezocht met de verschillende stakeholders in het energiesysteem. Aansluitend zijn er twee werkgroepen aan de slag gegaan om twee verschillende thema's nader uit te diepen.

De eerste werkgroep is aan de slag gegaan met het onderwerp Flexibiliteit en Warmte in de Gebouwde Omgeving. De tweede werkgroep met het onderwerp Elektrificatie en het Toekomstige Vraagprofiel.

Dit rapport is opgesteld door TenneT mede op basis van de input van deze eerste werkgroep. Hiernaast is een overzicht gegeven van de deelnemers.

## Deelnemers werkgroep Flexibiliteit en Warmte in de Gebouwde Omgeving

- Frank Wiersma, Tjerk den Boer (TenneT)
- Jannis van Zanten (Stichting Warmtenet, Vattenfall)
- Hubert Spruijt (Senfal, Vattenfall)
- Marcel Bakker, Erik Geensen (Engie)
- Dioni Franken, Jeroen Peters (Eneco)
- Olivia Sicurani (Sympower)
- Alienke Ramaeker, Marc Londo (NVDE)
- Coos Schouten, Tom Schouten (TechniekNL, Schouten Techniek)
- Jan van Hout (TechniekNL, Hout adviseurs en installateurs)
- Hans van der Spek, Stefan Olsthoorn (FME)
- Nico Hoogervorst (PBL)
- Maarten de Vries (TKI Urban energy)
- Lex Bosselaar (Expertise Centrum Warmte, RVO), Stan van den Broek (RVO)
- Faruk Dervis, Bart Kaas (TNO)
- Ivo Pothof (TU Delft, Deltares)
- Bert den Ouden (Flexible Alliance Network, Berenschot)
- Eppe Luken (Alliander)
- John Hodemaekers, Amy van Groot Battavé (Stedin)
- Piet Nienhuis (Gasunie)

## Overige bijdragen:

- Max Coenen, Liesbeth van Klinkt (Berenschot)
- Emile Chappin, Gerdien de Vries (TU Delft)
- Peter Wagener, Paul Friedel, Maarten Hommelberg (BDH)

# Disclaimer

Deze powerpoint wordt u aangeboden door TenneT TSO B.V. (“TenneT”). De inhoud ervan - alle teksten, beelden en geluiden - is beschermd op grond van de auteurswet. Van de inhoud van deze powerpoint mag niets worden gekopieerd, tenzij daartoe expliciet door TenneT mogelijkheden worden geboden en aan de inhoud mag niets worden veranderd. TenneT zet zich in voor een juiste en actuele informatieverstrekking, maar geeft ter zake geen garanties voor juistheid, nauwkeurigheid en volledigheid.

TenneT aanvaardt geen aansprakelijkheid voor (vermeende) schade, voortvloeiend uit deze powerpoint, noch voor de gevolgen van activiteiten die worden ondernomen op basis van gegevens en informatie op deze powerpoint.



22 januari 2021

De rol van flexibiliteit in de warmtevoorziening van morgen