

Decentrale ontwikkelingen in het energiesysteem

in relatie tot de benodigde investeringen in het
elektriciteitsnet



TNO 2025 R11978 – 18 december 2025

Decentrale ontwikkelingen in het energiesysteem

in relatie tot de benodigde investeringen in het
elektriciteitsnet

Auteurs	Richard Westerga Linda van Bouwel Marijn Rijken Julia Jansen Hanna Jonker Floris Uleman Vincent Kamphuis
Rubricering rapport	TNO Publiek
Bijlagen	TNO Publiek
Aantal pagina's	80 (excl. voor- en achterblad)
Aantal bijlagen	2
Projectnaam	KVE25 Decentrale Ontwikkelingen
Projectnummer	060.66827

Alle rechten voorbehouden

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

© 2025 TNO

Samenvatting

Achtergrond

Het energiesysteem in Nederland wordt grondig verbouwd. Hiermee verduurzamen we onze energievoorziening en waarborgen we andere belangen als betrouwbaarheid en strategische autonomie. Om te kunnen voorzien in de verwachte groei in aanbod en vraag naar elektriciteit moet het elektriciteitsnet in de komende decennia fors worden verzwakt. Hier zijn grote investeringen mee gemoeid. Het interdepartementaal beleidsonderzoek (IBO) Bekostiging van de Elektriciteitsinfrastructuur schatte in dat er in de periode 2024-2040 195 miljard euro geïnvesteerd moet worden in de elektriciteitsinfrastructuur, waarvan 107 miljard euro voor de infrastructuur op land. In het kader van het IBO is door de netbeheerders en BCG ook becijferd dat er € 5 tot 29 miljard euro bespaard kan worden door een betere benutting van het net. Onderdeel van deze besparing vormen decentrale ontwikkelingen waarbij de vraag en het aanbod van energie op lokaal of regionaal niveau bij elkaar worden gebracht, zowel in de tijd als ruimtelijk. Daarmee hoeft er minder elektriciteit getransporteerd te worden en kan er, mits dit ook leidt tot een vermindering van de maximale piekbelasting, bespaard worden op de verzwaring van het elektriciteitsnet.

Doel en onderzoeksvraag

Dit project beoogt het potentieel van decentrale ontwikkelingen in het energiesysteem in kaart te brengen. Specifiek maken we een orde grootte inschatting van de potentiële besparing van decentrale ontwikkelingen op de benodigde investeringen in verzwaring van het elektriciteitsnet. De studie dient voor het Ministerie van Klimaat en Groene Groei als basis voor beleidsvorming gericht op sturing van decentrale ontwikkelingen in het energiesysteem.

De onderzoeksvraag luidt:

Wat is het besparingspotentieel van het decentraal bij elkaar brengen van vraag naar en aanbod van energie wanneer het gaat om de investeringen in het elektriciteitsnet?

Methode

We beantwoorden de onderzoeksvraag door allereerst een definitie en afbakening van de begrippen decentrale ontwikkelingen en decentrale interventies in het energiesysteem op te stellen. Binnen de scope van deze studie kan TNO zelf geen financiële berekeningen maken van investeringen in het net. Daarom nemen we de investeringsberekeningen en mogelijke besparingen hierop gemaakt door de netbeheerders en BCG in het kader van het IBO Bekostiging van de Elektriciteitsinfrastructuur als vertrekpunt en proberen het aandeel van decentrale ontwikkelingen uit de totale mogelijke besparingen te berekenen. Om verder te kijken dan de BCG-studie, en een eigen beeld van de potentie en randvoorwaarden van decentrale ontwikkelingen te vormen, hebben we vervolgens twee benaderingen gevolgd: een literatuurstudie aangevuld met TNO's eigen expertise en onderzoek naar ervaringen in de praktijk op basis van interviews en casuïstiek. Daarbij is de focus gelegd op bedrijventerreinen en woonwijken, inclusief utiliteitsbouw en mobiliteit, omdat we daar het grootste potentieel voor decentrale ontwikkelingen zien. Qua tijdshorizon sluiten we aan bij het IBO en hanteren we 2025 tot aan 2040.

Wat verstaan we onder decentrale interventies?

Om te sturen op decentrale ontwikkelingen zijn interventies nodig. In deze studie refereren we hieraan met de term decentrale interventies. We hanteren daarbij de volgende definitie:

Decentrale interventies in het energiesysteem zijn interventies waarmee regionale en lokale productie van energie en de veranderende vraag naar energie zo veel mogelijk bij elkaar worden gebracht, in tijd en ruimte, zodat er minder energie getransporteerd hoeft te worden op momenten van piekbelasting, en er bespaard kan worden op de verzwaring van het elektriciteitsnet.

Wat zijn belangrijke interventies met een besparingspotentieel?

Het grootste deel van decentrale interventies met een besparingspotentieel richt zich op gebruikers, zowel kleinverbruikers als grootverbruikers. In deze studie benoemen we de belangrijkste interventies gericht op eindgebruikers binnen de gebouwde omgeving en op en rond bedrijventerreinen:

In de gebouwde omgeving:

- Flexibiliteit in de gebouwde omgeving
 - Aansturing laadpalen en V2G/V2H
 - Aansturing warmtepompen
 - Aansturing thuis- en buurtbatterijen
- Warmtebatterijen
- Warmtenetten
- Energiegemeenschappen

Op en rond bedrijventerreinen:

- Flexibiliteit op bedrijventerreinen
 - Industriële vraagresponse
 - Power-to-heat en power to X.
 - Opslag
- Warmtenetten
- Energiehubs

Naast interventies gericht op eindgebruikers zijn interventies gericht op locatiesturing voor opwek, opslag en gebruik van belang om vraag en aanbod dicht bij elkaar te brengen. Hieronder zijn de eerder genoemde energiehubs en energiegemeenschappen te scharen, maar ook specifieke instrumenten die sturen op de locatie van opwek en batterijen, zoals subsidies en ruimtelijke plannen. Locatieafhankelijke nettarieven kunnen ook onderdeel van locatiesturing zijn, maar de ACM adviseerde onlangs dit pas verder te verkennen na introductie en evaluatie van de tijdsafhankelijke nettarieven.

Wat is het potentieel van decentrale interventies?

Het besparingspotentieel van decentrale interventies varieert volgens onze inschatting van 4,5 tot 24,5 miljard Euro. Deze inschatting is gebaseerd op de BCG-rapportage, waarin het totale besparingspotentieel op netverzwaring wordt becijferd. Dit bedrag is aanzienlijk ten opzichte van de totale investeringen van 107 miljard euro, maar heeft ook een grote bandbreedte die afhankelijk is van hoe sterk er op de interventies wordt gestuurd en de wijze waarop de interventies worden geïmplementeerd. Bij het maken van onze inschatting

scharen we een drietal interventieclusters uit deze BCG-rapportage onder de noemer decentrale ontwikkelingen. Het gaat dan om de clusters kleinverbruiker, grootverbruiker en locatiekeuze. Dit zijn clusters die typisch interventies bevatten die een decentraal karakter hebben. Binnen die clusters selecteren we vervolgens de interventies met een aansluiting op het laag- of middenspanningsnet. Een verdere onderverdeling van de besparingen naar specifieke interventies in die clusters was niet mogelijk vanwege op de onderlinge samenhang en gevolgde rekenwijze door BCG en de netbeheerders.

Een hard onderscheid tussen centrale en decentrale interventies is ook niet in alle gevallen goed te maken. Zo is flexibiliteit bij eindgebruikers soms wel maar ook niet altijd te typeren als een decentrale ontwikkeling: flexibiliteit wordt namelijk niet alleen ingezet om lokaal vraag en aanbod op elkaar af te stemmen, maar kan voor meerdere doelen aangewend worden. Zo wordt flexibiliteit ook ingezet op de nationale energie- en onbalansmarkten. Als flexibiliteit echter wordt ingezet om met lokale netcongestie om te gaan of consumptie van eigen opwek te maximaliseren maakt het wel deel uit van decentrale interventies. Omdat we, zoals gezegd, het gezamenlijke effect van alle interventies binnen de genoemde clusters meenemen, en als gevolg daarvan ook interventies die ook als centraal te typeren zijn meenemen, vormt het ingeschatte besparingspotentieel van decentrale ontwikkelingen mogelijk een overschatting.

Aan de andere kant, hebben we ook decentrale interventies geïdentificeerd en beschreven die niet of slechts ten dele zijn meegenomen in de berekeningen door BCG. Namelijk: bidirectioneel laden van elektrische voertuigen (vehicle to home/grid), thuis- en buurtbatterijen en opslag op bedrijventerreinen, industriële vraagrespon, conversie (bijv. power to heat), warmtenetten op bedrijventerreinen, en collectieve aanpakken zoals energiegemeenschappen en energiehubs. Deze interventies kunnen een aanzienlijke additionele piekreductie leveren en kunnen het genoemde besparingspotentieel verder verhogen. Hoe dit zich vertaalt in besparingen op de investeringen in netverzwaring is nog onduidelijk en verdient nader onderzoek.

Belangrijker echter dan de vraag of een interventie als decentraal of centraal gezien kan worden is het verwachte effect op piekreductie. De verwachte pieken in netbelasting bepalen de dimensionering van het net, en daarmee de benodigde investeringen in netverzwaring. Alle interventies die bijdragen aan het verlagen van de piekbelasting zijn daarom zinvol om maximaal op in te zetten.

Naast besparing op netverzwaring bieden decentrale ontwikkelingen nog overige voordelen (potentie). Bedrijven en bewoners richten zich in de praktijk vooral op het inpassen van hun activiteiten binnen de beschikbare ruimte op het net, waarbij het perspectief van het energiesysteem over het algemeen niet centraal staat. Niet zo zeer het verminderen van, maar het omgaan met netcongestie vormt hierbij de belangrijkste drijfveer voor decentrale interventies. Dergelijke interventies dragen niet alleen bij aan het verlichten van de investeringsdruk rondom netverzwaring, maar zijn ook essentieel voor het behalen van klimaatdoelen, het faciliteren van duurzame ontwikkelingen en het mogelijk maken van economische groei en snellere woningbouw.

Hoe is het potentieel te verzilveren?

Aanvullende beleidsmaatregelen zijn nodig om het potentieel te verzilveren. Het gaat dan bijvoorbeeld om bewustwording (communicatie), normering van bijvoorbeeld de aanstuurbaarheid van flexibele apparaten, tijd en/of locatie-afhankelijke nettarieven, marktgebaseerde maatregelen zoals dynamische energietarieven, of directe sturing zoals

afschakeling bij overbelasting. Dit vertaalt zich dan in het sturen op gedragsverandering (zachte sturing), financiële compensaties (milde sturing), of verplichtingen (harde sturing). Met elk van deze stappen zal de voorspelbaarheid van het effect van de maatregelen toenemen, ook al zijn absolute garanties nooit te geven. Uit de resultaten van dit onderzoek blijkt dat het inzicht over het daadwerkelijk te verwachten effect van maatregelen nader onderzoek verdient.

Uit ons onderzoek blijkt dat een bredere rol voor netbeheerders, waarbij zij opereren als lokale system integrators, wenselijk is om decentrale ontwikkelingen optimaal te kunnen ontwikkelen en benutten in het energiesysteem. Daarbij zijn automatische aansturing en digitalisering cruciale bouwstenen, al bestaan er nog aanzienlijke uitdagingen op het gebied van standaardisatie, interoperabiliteit, cybersecurity, normering en wetgeving. Voor het verlagen van de piekvraag naar elektriciteit zijn en worden er verschillende tijdafhankelijke transportovereenkomsten en financiële prikkels ontwikkeld. Echter, het terugdringen van transport van elektriciteit tussen en over verschillende netvlakken door vraag en aanbod in ruimtelijke zin bij elkaar te brengen wordt momenteel niet tot onvoldoende beloond. Bovendien bestaat er nog onzekerheid in de sector over de netimpact van verschillende type warmtenetten ten opzichte van alternatieve oplossingen voor warmte, wat vraagt om aanvullend onderzoek. Ook blijkt de governance van collectieve oplossingen, zoals collectieve warmtesystemen, complex; zowel bewoners als bedrijven hebben behoefte aan ontzorging, vooral wanneer dergelijke oplossingen opgeschaald moeten worden.

Het verzilveren van het potentieel betekent dat naast de netbeheerders ook eindgebruikers aan de slag moeten en moeten investeren, individueel of collectief. Daarvoor hebben ze tijd, aandacht en kennis nodig en speelt het economische aspect een belangrijke rol. De doelen van de eindgebruikers zijn niet gericht op het besparen op investeringen in netverzwaringen, die immers door de netbeheerders worden gedaan. Bij de realisatie van interventies zijn er ook kosten voor andere partijen dan de netbeheerders, zoals bij de eindgebruikers. Dit kan de potentiële besparingen drukken als vanuit maatschappelijk oogpunt wordt gekeken.

Welke randvoorwaarden zijn er?

De belangrijkste randvoorwaarden voor het realiseren van decentrale ontwikkelingen zijn:

- **Energiebesparing:** Door efficiënt om te gaan met energie, kan het hele energiesysteem ontlast worden, zowel centraal als decentraal. Energie die niet wordt gebruikt, hoeft niet opgewekt en niet getransporteerd te worden. In dit rapport beschouwen we energiebesparing niet als een decentrale interventie op zich, maar wel een noodzakelijke randvoorwaarde om het centrale én decentrale deel van het elektriciteitsnet zo goed mogelijk te benutten.
- **Economische en zakelijke randvoorwaarden**
Een sluitende business case is essentieel voor het opschalen van decentrale oplossingen. Financiële prikkels, zoals korting op nettarieven en eerlijke verdeling van opbrengsten, zijn nodig om lokale afstemming van opwek en verbruik te stimuleren. Subsidies en fiscale voordelen kunnen helpen wanneer marktinkomsten onvoldoende zijn. Vertrouwen en voorspelbaarheid zijn belangrijk voor investerende partijen.
- **Beleidsmatige en juridische kaders**
Standaardisatie van aantrekkelijke flexibele contracten en gedifferentieerde nettarieven voor groot- en kleinverbruikers zijn noodzakelijk om flexibiliteit te ontsluiten. Er is behoefte aan standvastig beleid en duidelijke keuzes op alle niveaus, zodat bedrijven en

investeerders zekerheid hebben. Overheidsprogramma's zoals het Landelijk Actieprogramma Netcongestie (LAN) en sectorale aanpakken versnellen de adoptie van flexibiliteit. EU-harmonisatie is nodig om juridische en marktbelemmeringen weg te nemen en een consistent kader voor industriële vraagrespon in heel Europa te creëren. Nieuwe afspraken over netbeheer, nettarieven en normering (zoals netbewust bouwen) zijn nodig. Aantrekkelijke uitstapregelingen voor groepstransportovereenkomsten kunnen barrières verlagen.

- **Technische innovatie en digitalisering**

Investerings in aanstuurbare assets en energiemanagementsystemen zijn nodig. Interoperabiliteit en open standaarden zorgen ervoor dat systemen kunnen communiceren en vendor lock-in wordt voorkomen en kunnen de kosten van producten verlagen. Betrouwbare data, bemetering, digitalisering en cybersecurity zijn cruciaal voor een veilig en efficiënt decentraal energiesysteem. Privacy en controle over data en assets zijn hierbij belangrijke aandachtspunten.

- **Multi-commodity systeemintegratie**

Bij beperkte netcapaciteit kunnen hybride systemen uitkomst bieden. Het optimaal functioneren van een decentraal energiesysteem vereist integratie tussen elektriciteit, waterstof, warmte en koolstof, en tussen sectoren (industrie, gebouwde omgeving, mobiliteit en landbouw). Inzet op systeemintegratie is een randvoorwaarde voor efficiëntie en leveringszekerheid van de energievoorziening.

- **Samenwerking en governance**

Decentrale ontwikkelingen vragen om intensieve samenwerking tussen netbeheerders, lokale overheden, bedrijven, woningcorporaties, huishoudens en andere betrokken partijen. Collectieve oplossingen kennen vaak een complexe governance door de diversiteit aan stakeholders. Partijen die voorheen weinig met energie te maken hadden moeten nu een actieve rol spelen. Voor veel huishoudens en bedrijven is dit uitdagend. Daarom is een ecosysteem van energiebedrijven en dienstverleners nodig, om gebruikers te ontzorgen, optimalisaties achter de meter en trafo te faciliteren, en het onbenutte potentieel te ontsluiten.

- **Ruimtelijke planning en samenwerking**

Energiebeleid moet geïntegreerd worden in lokale planologie, met ruimte voor opwek, opslag en duurzame warmte. Locatiesturing van grote afnemers en producenten is belangrijk niet alleen voor een efficiënt gebruik van het net, maar ook om het ruimtebeslag van het toekomstige energiesysteem te beheersen. Regie in ruimtelijke ordening en sturen op locaties voor vraag en aanbod ligt vooral bij de decentrale overheden, planning van het elektriciteitsnetwerk ligt bij de netbeheerders, vraag en aanbod ontwikkelingen bij gebruikers en producenten. De afspraken en de samenwerking die hiervoor nodig zijn, inclusief de relatie met de nationale plannen over het energiesysteem komt bij elkaar in het nieuwe Nationale Programma Energiesysteem, waar het programmeren van elektriciteitsinfrastructuur, de warmtetransitie en ontwikkelingen van duurzame opwek integraal opgepakt worden.

- **Arbeidsmarkt en kennis**

Er is een tekort aan technici, installateurs, netarchitecten en ICT-specialisten, wat de energietransitie vertraagt. Meer kennis is nodig over de maatschappelijke impact, kosten en innovatieve business cases voor decentrale oplossingen. Transparantie en inzicht in aannames onder verschillende studies zijn essentieel om opties te kunnen vergelijken.

Aanbevelingen

Op basis van de resultaten uit dit onderzoek doen we de volgende aanbevelingen aan beleidsmakers en netbeheerders:

- Zet in op beleidsmaatregelen die decentrale interventies en daarmee decentrale ontwikkelingen stimuleren. De potentiële besparing op de kosten voor netverzwaring is dermate groot dat het nut heeft de beleidsmaatregelen die nodig zijn om flexibiliteit, energiebesparing en locatiekeuzes te stimuleren maximaal in te zetten. Daarnaast worden hiermee ook andere belangrijke voordelen gerealiseerd, zoals het beperken van economische schade door wachtrijen voor netaansluiting en de verdere verduurzaming van de energievoorziening.
- Richt je op interventies die de piekvraag beheersbaar en voorspelbaar maken. Netbeheerders ontwerpen het net momenteel op de piekvraag. Het is vooral aan de markt met ondersteuning van de netbeheerders om ervoor te zorgen dat de pieken beheersbaar blijven en daarmee het net beter benutten, maar vooral ook voorspelbaar zijn op de langere termijn. Alleen in dat geval kunnen netbeheerders ook daadwerkelijk hun investeringsplannen erop aanpassen. Maak daarbij ook de maatschappelijke kosten- en baten inzichtelijk. Niet alleen besparen op net-investeringen maar ook de kosten van interventies voor piekvraagbeheersing zijn relevant. Daarbij hoort ook het zoeken van de balans tussen het verzwaren van het net versus interventies en de afgeleide effecten, waaronder de afweging centraal versus decentraal en de ruimtelijke impact.
- Verbeter de werkwijze om inzicht te krijgen in de potentiële besparingen op de kosten voor netverzwaring. Dit onderzoek heeft aangetoond dat er nog veel vragen liggen die verduidelijking behoeven. De literatuur beperkt zich vaak tot energetische grootheden, in termen van gigawatt opgesteld vermogen, of globale piekreducties. Het is niet mogelijk om op basis daarvan het besparingspotentieel in te schatten zonder uitgebreide berekeningen te doen. Een berekening zoals BCG heeft uitgevoerd zou goed zijn om met enige regelmaat te actualiseren. En daarbij de aanvullende interventies zoals benoemd in deze studie mee te nemen. Het gaat daarbij om bidirectioneel laden van elektrische voertuigen, thuis- en buurtbatterijen en opslag op bedrijventerreinen, industriële vraagrespons, conversie (bijv. power to heat), warmtenetten op bedrijventerreinen, en collectieve aanpakken zoals energiegemeenschappen en energiehubs. Het aandeel van decentrale interventies binnen de totale besparingen is lastig uit te splitsen maar die uitsplitsing lijkt minder van belang. Wel lijkt het zinvol om te monitoren in hoeverre vraag en aanbod bij elkaar liggen in tijd en ruimtelijke zin, om te zien of bijsturing wenselijk is.
- In de praktijk liggen er nog veel vragen bij de ontwikkelingen op lokaal niveau. Er is daarom aandacht nodig voor ontzorging, opschaling (standaardisatie), verdienmodellen, planmatige samenwerking, visie en standvastigheid in beleid en regelgeving, en nieuwe vormen van netbeheer, zoals het concept van de local service provider. Deze is gericht op het integreren en opereren van het lokale energiesysteem voor kleinverbruikers.

Aandachtspunten voor vervolgonderzoek

Dit verkennende onderzoek heeft geleid tot een aantal aandachtspunten voor vervolgonderzoek, gebaseerd op onder andere de aanbevelingen en op de uitdagingen die we zelf tijdens het onderzoek hebben ervaren. Hieronder volgt een lijst van deze onderwerpen in willekeurige volgorde.

- Er is behoefte aan meer transparantie over de aannames voor besparing op piekvermogen en investeringen in netverzwaring, die in verschillende studies worden gebruikt, omdat deze vaak niet gelijk zijn en het vergelijken of combineren van resultaten daardoor lastig is.
- Maak een inschatting welk deel van het technische besparingspotentieel van decentrale interventies in de praktijk ook daadwerkelijk gerealiseerd kan worden. Daarbij is ook onderzoek nodig naar de vraag welke interventies eindgebruikers bereid zijn om aan mee te werken.
- Aanvullende interventies zoals benoemd in deze studie zouden meegenomen moeten worden in het berekenen van het besparingspotentieel. Daarbij is het wenselijk om efficiëntere en herhaalbare methoden te ontwikkelen om complexe besparingsberekeningen, zoals nu uitgevoerd door BCG en de netbeheerders, regelmatig te kunnen actualiseren. Gevoeligheidsanalyses kunnen aanvullend handelingsperspectief bieden voor beleidsvorming.
- Er is behoefte aan indicatoren die naast piekverlaging in gigawatt of percentages, ook inzicht geven in investeringsbeslissingen voor het elektriciteitsnet. Denk daarbij bijvoorbeeld piekverlaging in de bepalende scenario's (bijv. dunkelflaute), of het effect op knelpunten in het net.
- Tot slot is het belangrijk om innovatieve businesscases te ontwikkelen die de maatschappelijke waarde van decentrale oplossingen meenemen. Daarbij is het relevant om de balans tussen centrale en decentrale maatregelen te bepalen, rekening houdend met ruimte, netcapaciteit en kosten voor alle partijen.

Inhoudsopgave

Samenvatting.....	3
1 Inleiding	11
1.1 Context en aanleiding	11
1.2 Doel en onderzoeksvraag.....	11
1.3 Scope.....	12
1.4 Methode en leeswijzer	12
2 Wat zijn decentrale ontwikkelingen?.....	14
3 Besparingspotentieel decentrale interventies binnen IBO	18
3.1 Analyse besparingspotentieel decentrale interventies.....	19
3.2 Nadere verkenning van de interventies uit BCG.....	20
4 Potentie van decentrale interventies op basis van literatuur	25
4.1 Decentrale interventies in de gebouwde omgeving	26
4.2 Decentrale interventies op bedrijventerreinen	39
4.3 Randvoorwaarden decentrale interventies	51
4.4 Reflectie op decentrale interventies	52
5 Decentrale ontwikkelingen in de praktijk.....	54
5.1 Leeswijzer.....	54
5.2 Methode	54
5.3 Afbakening van decentrale interventies	54
5.4 Impact van decentrale interventies op het elektriciteitsnet	55
5.5 Aanvullende impact van decentrale interventies	56
5.6 Randvoorwaarden.....	58
5.7 Reflectie op de interviews	61
5.8 Case beschrijvingen.....	62
6 Conclusies en aanbevelingen	67
Referenties	72
Bijlagen	
Bijlage A: Lijst met geïnterviewde organisaties en personen	76
Bijlage B: Interviewprotocollen	77

1 Inleiding

1.1 Context en aanleiding

Het energiesysteem in Nederland wordt grondig verbouwd. Hiermee verduurzamen we onze energievoorziening, en waarborgen we andere belangen als betrouwbaarheid en strategische autonomie. Een steeds groter deel van het aanbod aan elektriciteit wordt duurzaam opgewekt, voornamelijk met zon en wind. Niet alleen op grote schaal, zoals windenergie op zee, maar ook op kleinere schaal door het hele land heen in zon- en windparken en met zonnepanelen op daken. Ook worden lokale warmtebronnen benut, bijvoorbeeld voor het verwarmen van huizen en bedrijfspanden. Naast het aanbod verandert ook de vraag naar energie. Door elektrificatie in sectoren als industrie, mobiliteit en de gebouwde omgeving neemt naar verwachting de vraag naar elektrische energie toe. Om te kunnen voorzien in deze groei in aanbod en vraag naar elektriciteit wordt het elektriciteitsnet in de komende decennia fors verzwakt. Hier zijn grote investeringen mee gemoeid. Het interdepartementaal beleidsonderzoek (IBO) Bekostiging van de Elektriciteitsinfrastructuur (IBO Bekostiging Elektriciteitsinfrastructuur, 2025) schatte in dat er in de periode 2024-2040 195 miljard euro geïnvesteerd moet worden in de elektriciteitsinfrastructuur, waarvan 107 miljard euro voor de infrastructuur op land. In het IBO-rapport is ook becijferd dat er € 3,5 tot 22,5 miljard euro bespaard kan worden door een betere benutting van het net. In dit TNO-rapport maken we gebruik van de inschattingen die door BCG (BCG, 2025) in het kader van het IBO-onderzoek zijn aangeleverd, waarin meer besparingselementen zijn meegenomen, en die daardoor een hogere potentiële besparing geeft (5-29 miljard)¹.

Onderdeel van deze besparing vormen decentrale ontwikkelingen waarbij de vraag en het aanbod van energie op lokaal of regionaal niveau bij elkaar worden gebracht, zowel in de tijd als ruimtelijk. Daarmee hoeft er minder energie getransporteerd te worden en kan er, mits dit ook leidt tot een afvlakking van de piekbelasting, bespaard worden op de verzwaring van het elektriciteitsnet. In de Kamerbrief “Decentrale ontwikkeling van het energiesysteem” van juni 2025 (Ministerie van Klimaat en Groene Groei, 2025) gaf het kabinet aan dat het nader in kaart wil brengen wat de bijdragen van deze decentrale ontwikkelingen kunnen zijn, waaronder op het gebied van netinvesteringen.

1.2 Doel en onderzoeksvraag

Dit project beoogt het potentieel van decentrale ontwikkelingen in het energiesysteem in kaart te brengen. Specifiek proberen we een orde grootte inschatting te maken van de potentiële besparing van decentrale ontwikkelingen op investeringen in verzwaring van het elektriciteitsnet. Hiermee worden beleidsmakers van het Ministerie van Klimaat en Groene Groei geïnformeerd over het belang van decentrale ontwikkelingen en bieden we richting voor het ontwikkelen van beleid en vervolgonderzoek.

De onderzoeksvraag luidt: *Wat is het besparingspotentieel van het decentraal bij elkaar brengen van vraag naar en aanbod van energie wanneer het gaat om de investeringen in het elektriciteitsnet?*

¹ In Hoofdstuk 3 geven we aan wat de verschillen zijn.

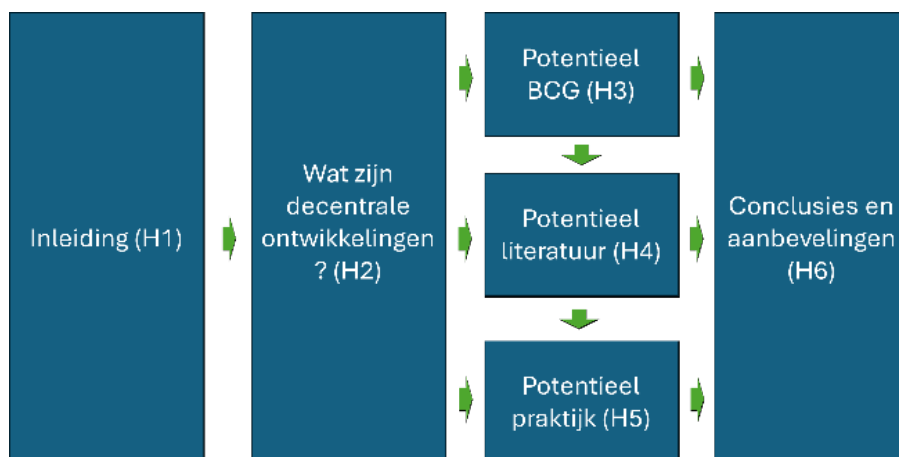
De studie beoogt het potentieel van decentrale ontwikkelingen in te schatten. Deze ontwikkelingen moeten grotendeels nog van de grond komen. In veel gevallen zijn de beleidsmaatregelen en uitwerking daarvan in bijvoorbeeld wet- en regelgeving, normering of subsidie nog in ontwikkeling. Mede daarom is het toekomstig potentieel lastig in te schatten, en volstaan we met een orde grootte inschatting.

1.3 Scope

De inschatting van het totale besparingspotentieel omvat in beginsel alle sectoren. Gelet op de beperkte doorlooptijd van de studie, hebben we echter de focus gelegd op decentrale ontwikkelingen op en rond bedrijventerreinen en woonwijken, inclusief utiliteitsbouw en mobiliteit, omdat we daar het grootste potentieel voor decentrale ontwikkelingen verwachten. Omdat we ons in deze studie mede willen baseren op ervaring in de praktijk richten we ons daarbij op bestaande bedrijventerreinen en woonwijken. De grote industriële clusters hebben ook potentieel maar vragen elk om een maatwerkbenadering. Qua tijdshorizon sluiten we aan bij het IBO en hanteren we 2025 tot aan 2040. Aan de hand van het in Hoofdstuk 2 geïntroduceerde begrip van decentrale ontwikkelingen zullen we de afbakening verder bepalen.

1.4 Methode en leeswijzer

We beantwoorden de onderzoeksvraag door allereerst een definitie en afbakening van het begrip decentrale ontwikkelingen in het energiesysteem op te stellen, zie Hoofdstuk 2. Binnen de scope van deze studie kan TNO zelf geen financiële berekeningen maken van investeringen in het net. Daarvoor is de doorlooptijd te kort en ontbreekt het TNO aan gedetailleerde gegevens over het elektriciteitsnet. Daarom nemen we als vertrekpunt de investeringsberekeningen en mogelijke besparingen, gemaakt door de netbeheerders en BCG in het kader van het IBO Bekostiging van de Elektriciteitsinfrastructuur. Hoofdstuk 3 geeft een beeld van het aandeel van decentrale ontwikkelingen uit die totale mogelijke besparingen. Om verder te kijken dan de BCG-studie, en een eigen beeld van de potentie van decentrale ontwikkelingen te vormen hebben we nog twee onderzoeklijnen gevolgd: een literatuurstudie en onderzoek naar ervaringen in de praktijk. In Hoofdstuk 4 beschrijven we, op basis van literatuurstudie en TNO-expertise de potentie van decentrale ontwikkelingen en de randvoorwaarden om deze te realiseren. We beschrijven tevens aanvullende ontwikkelingen die niet zijn meegenomen in het besparingspotentieel berekend in het kader van het IBO. Hoofdstuk 5 beschrijft de bredere potentie en randvoorwaarden van decentrale ontwikkelingen in de praktijk, gebaseerd op interviews met betrokkenen en aantal casestudies op bedrijventerreinen en in woonwijken. In Hoofdstuk 6, tenslotte, trekken we conclusies over: het besparingspotentieel van decentrale ontwikkelingen als het gaat om een vermindering op de netinvesteringen, het overige potentieel van decentrale ontwikkelingen, de randvoorwaarden voor realisatie van het potentieel en geven we aanbevelingen voor beleidsvorming en vervolgonderzoek.



Figuur 1.1: Grafische weergave van methode en hoofdstukindeling

2 Wat zijn decentrale ontwikkelingen?

Voordat we in dit rapport ingaan op de potentie van decentrale ontwikkelingen in het energiesysteem is het nodig eerst een beter begrip en afbakening van decentrale ontwikkelingen en gerelateerde termen te creëren. Hiervoor kijken we eerst naar hoe anderen partijen decentrale ontwikkelingen beschrijven. Op basis van hiervan beschrijven wij vervolgens wat TNO verstaat onder decentrale ontwikkelingen, en hoe de begrippen decentrale ontwikkelingen, interventies en beleidsmaatregelen zich tot elkaar verhouden. We sluiten het hoofdstuk af met onze definitie en afbakening van decentrale interventies.

Decentrale ontwikkelingen staan al enige tijd op de kaart. Het **Planbureau voor de Leefomgeving** schreef al in 2009 *"in een duurzaam decentraal elektriciteitssysteem wordt op lokale schaal met behulp van innovatieve technologieën en organisatiemethoden gestreefd naar een goede balans tussen vraag en aanbod van elektriciteit." Daarnaast wordt ook lokale productie benadrukt. "Bij een decentraal elektriciteitssysteem wordt een groot deel van de elektriciteit lokaal geproduceerd."* (PBL, 2009).

Het **innovatienetwerk Transform** organiseerde in samenwerking met het ministerie van Klimaat en Groene Groei een *deep dive* over decentraal met 150 voorlopers in de energietransitie, waaronder netbeheerders, energiebedrijven, overheden en bedrijven (Transform, 2025). Zij concludeerden dat het lastig is om een eenduidige definitie van een decentraal energiesysteem vast te stellen. Een precieze afbakening hangt af van de karakteristieken van het gebied en het vraagstuk, en kunnen hierdoor verschillen per gebied, per energiedrager of oplossing. Is bijvoorbeeld een grootschalig warmtenet dat over gemeentegrenzen gaat decentraal, of centraal? Er blijft in de meeste definities een koppeling met andere decentrale onderdelen en met het centrale energiesysteem.

De Kamerbrief Decentrale ontwikkeling van het energiesysteem (Ministerie van Klimaat en Groene Groei, 2025) spreekt dan ook van decentrale *ontwikkelingen* zonder één afgebakende definitie te geven, maar benoemt drie kernpunten: 1) het optimaal in balans brengen van vraag en aanbod van energie op ieder schaalniveau, 2) het beter organiseren van de samenhang tussen gebiedsontwikkeling en het energiesysteem en 3) regie vanuit sociaal-maatschappelijk perspectief.

Verschillende partijen hanteren uiteenlopende definities van decentrale ontwikkelingen of een decentraal energiesysteem, waarbij telkens vergelijkbare elementen worden benadrukt.

- In het **Nationaal Plan Energiesysteem** (Ministerie van EZK, 2023) wordt de volgende definitie gehanteerd: "Decentrale energiesystemen is de verzamelnaam voor het op decentraal niveau (lokaal en regionaal) produceren, omzetten, opslaan, uitwisselen en gebruiken van energie. Het is de tegenhanger van centrale productie en toevoer van energie die als eenrichtingsverkeer via distributie zijn weg vindt naar afnemers. Centrale en decentrale systemen zijn in de praktijk onderling verbonden en niet precies van elkaar af te bakenen."

- **Het Nationaal Programma Regionale Energiestrategie (NP RES)** definieert het decentrale deel van het energiesysteem als energieproductie en - opslag dicht bij de gebruiker. "Decentralisering gaat om de verweving van verschillende functies (opwek, transport, opslag en conversie), zowel groot- als kleinschalig. Als een netwerk waarbij elk onderdeel zelfstandig is, maar ook continu in verbinding met andere onderdelen." (NP RES, 2025), (NP RES, 2025).
- Het **innovatienetwerk Transform** concludeert: "*De decentrale ontwikkeling houdt in dat we productie en vraag lokaal samenbrengen, transport op piekmomenten reduceren en energie opslaan en converteren ten behoeve van wonen, werken en verplaatsen.*" Daarbij wordt benadrukt dat ieder gebied anders is en er lokaal geen 'baas' van het energiesysteem is; bij oplossingen en vraagstukken zijn altijd meerdere partijen betrokken. Een standaard afbakening maken van het decentrale energiesysteem is lastig, omdat het afhankelijk is van de karakteristieken van een gebied en van het vraagstuk. Wel is "*de essentie van decentraal om te optimaliseren op het laagst mogelijke niveau.*" (Transform, 2025).

Een aantal elementen keert in de verschillende definities terug:

- De nadruk licht op lokale productie dicht bij de gebruikers.
- Het gaat om het lokaal of regionaal samenbrengen van vraag en aanbod van energie, in ruimte en in tijd.
- Er wordt daarbij geoptimaliseerd 'in de haarvaten' van het energiesysteem, bv. het laagst mogelijke netvlak.
- Een netwerk van regionaal en lokaal geoptimaliseerde onderdelen, om elk zo autonoom mogelijk in hun energiebehoeften te voorzien, maar die verbonden zijn met elkaar en met het centrale energiesysteem.
- Het opkomen van nieuwe, lokale actoren en samenwerkingen in het energiesysteem die tot stand komen vanuit de maatschappij, zoals energiehubs en energiegemeenschappen.
- De inzet van innovatieve technologieën of nieuwe toepassingen en/of aansturing daarvan, zoals bi-directionele batterijen in elektrische voertuigen, slim laden, warmtepompen, restwarmte, warmtebuffers en collectieve warmtesystemen.

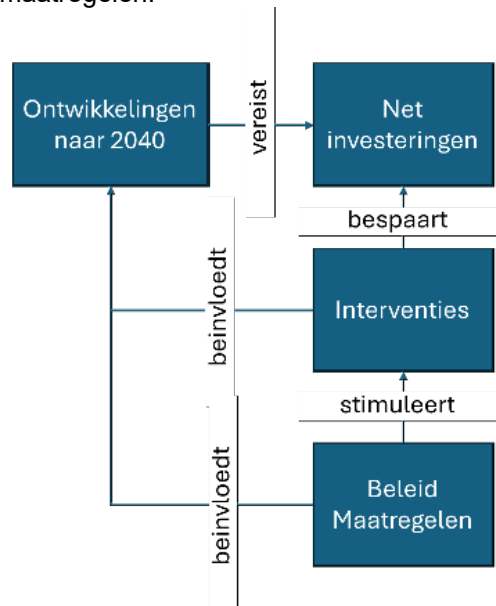
TNO beschrijft **decentrale ontwikkelingen** in deze studie als volgt:

Het energiesysteem ontwikkelt zich van een systeem met voornamelijk centrale energieproductie naar een systeem met een toenemende rol voor decentrale energieproductie op regionaal en lokaal niveau. Dit betreft productie van elektriciteit, maar ook van warmte, groen gas en waterstof. Ook verandert de vraag naar energie voor wonen, werken en verplaatsen. Als gevolg van elektrificatie zal de vraag naar elektriciteit toenemen.

Deze decentralisatie van productie en veranderende vraag biedt kansen en zorgt voor uitdagingen. Een kans en tevens uitdaging is de energie-infrastructuur optimaal te benutten en investeringen in transportinfrastructuur te beperken door vraag en aanbod van energie zo veel mogelijk bij elkaar te brengen, zowel ruimtelijk, als in de tijd, of energie op te slaan en/of om te zetten. Hiermee verminderen we netcongestie en/of gaan we er slimmer mee om. Dat vraagt om een aanpassing en/of investering in de manier waarop we wonen, werken en bewegen. Een kans zit in het organiseren van deze decentralisatie middels energiehubs of energiegemeenschappen². De uitwerking van nieuwe structuren met bijbehorende rollen en verantwoordelijkheden is nog volop in ontwikkeling en verschilt nog erg per situatie.

² Zie Hoofdstuk 3 voor een beschrijving van energiehubs en energiegemeenschappen.

Deze kansen en uitdagingen vragen om bepaalde **interventies**, zoals het inregelen van vraagsturing, locatiesturing van opwek energieproductie en energievraag, ontwikkeling en inzet van technologieën voor conversie en opslag, maar ook om de introductie van nieuwe lokale organisatiestructuren en verdienmodellen. Hieraan kunnen **beleidsmaatregelen** gekoppeld worden die deze interventies reguleren of stimuleren, o.a. via wetgeving, normering, tariefdifferentiatie, alternatieve transportrechten, of subsidies. Zie Figuur 2.1 voor een samenhang tussen de decentrale ontwikkelingen, investeringen in het elektriciteitsnet, interventies en beleidsmaatregelen.



Figuur 2.1: Samenhang tussen decentrale ontwikkelingen, investeringen in het net, interventies en beleidsmaatregelen.

Voor deze studie hanteert **TNO** de volgende definitie van decentrale interventies:

Decentrale interventies in het energiesysteem zijn interventies waarmee regionale en lokale productie van energie en de veranderende vraag naar energie zo veel mogelijk bij elkaar worden gebracht, in tijd en ruimte, zodat er minder energie getransporteerd hoeft te worden op momenten van piekbelasting, en er bespaard kan worden op de verzwaring van het elektriciteitsnet.

Een aantal interventies en beleidsmaatregelen laten we in deze studie **buiten** beschouwing (niet uitputtend):

- Energiebesparing: dit beschouwen we als randvoorwaardelijk in elk efficiënt energiesysteem. Energie die niet gevraagd wordt, hoeft ook niet opgewekt en getransporteerd te worden. Op zichzelf is energiebesparing echter geen decentrale of centrale ontwikkeling.
- Verhoogde technische benutting van het netwerk is relevant zowel bij meer centrale als meer decentrale energiesystemen, en wordt in deze studie niet in de scope meegenomen.
- Tijdsafhankelijke nettarieven laten we in deze studie buiten beschouwing. Feitelijk is dit geen decentrale beleidsmaatregel omdat in de nieuwe tijdsafhankelijke tarieven die momenteel door de regionale netbeheerders worden voorgesteld geen onderscheid wordt gemaakt in locatie. Er geldt één tariefstructuur voor het hele land. Wel is uiteraard de verwachting dat de nieuwe tariefstructuur met tijdsgebonden tarieven zal leiden tot een verlaging van de piekbelasting en daarmee een efficiëntere benutting van de netten. Uit een recente verkenning van de ACM naar *locatie*afhankelijke nettarieven blijkt dat deze in

theorie aanvullende voordelen kunnen bieden, maar de ACM wil dat netbeheerders eerst andere maatregelen volledig implementeren waaronder de tijdgebonden nettarieven (ACM, 2025).

- De focus van de studie richt zich op regionale en lokale productie van elektriciteit (veelal met zon en wind) en warmte (uit lokale warmtebronnen). In de scenario's voor het toekomstig Nederlands energiesysteem zijn dit de dominante vormen van lokale productie. Er zijn ook andere vormen van productie mogelijk die een wezenlijke rol kunnen spelen bij specifieke decentrale ontwikkelingen, waar we in deze studie omwille van de beschikbare tijd niet verder op in gaan. We noemen de volgende:
 - productie van elektriciteit met gasgeneratoren om tijdelijke knelpunten in het net op te lossen,
 - small en medium kernreactoren (SMR) (kleine kerncentrales, nog in ontwikkeling),
 - warmtekracht koppeling (WKK, vaak toegepast in de glastuinbouw),
 - productie van (groene) gas en biomassa.

3 Besparingspotentieel decentrale interventies binnen IBO

In 2024 heeft PWC de FIEN+ “Financiële impact energietransitie voor netbeheerders” (PWC, 2024) gepubliceerd. In 2025 is door BCG het rapport “Slimme keuzes voor een betaalbaar en robuust energiesysteem” (BCG, 2025) uitgebracht. Samen vormen deze rapporten de basis voor de IBO-rapportage “Schakelen naar de Toekomst” (KGG, 2025), waar een actualisatie en uitbreiding is gedaan van de onderliggende rapporten, gericht op de energierekening van netgebruikers.

In dit onderzoek baseren we ons voornamelijk op de studie van BCG: Slimme Keuzes voor een betaalbaar en robuust energiesysteem. Die studie heeft gezocht naar mogelijkheden het rendement van netinvesteringen zo groot mogelijk te maken. Hiervoor zijn ingrepen (interventies) uit vijf verschillende clusters bekeken:

- Flexibiliteit bij kleinverbruik
- Flexibiliteit bij grootverbruik
- Slimme locatiekeuze voor opwek, opslag en gebruik
- Verhoogde technische benutting van het netwerk
- Lokale conversie van windenergie op zee

Volgens de studie zorgen deze ingrepen bij elkaar voor een besparingspotentieel van ongeveer 5-29 mld. euro tot 2040.

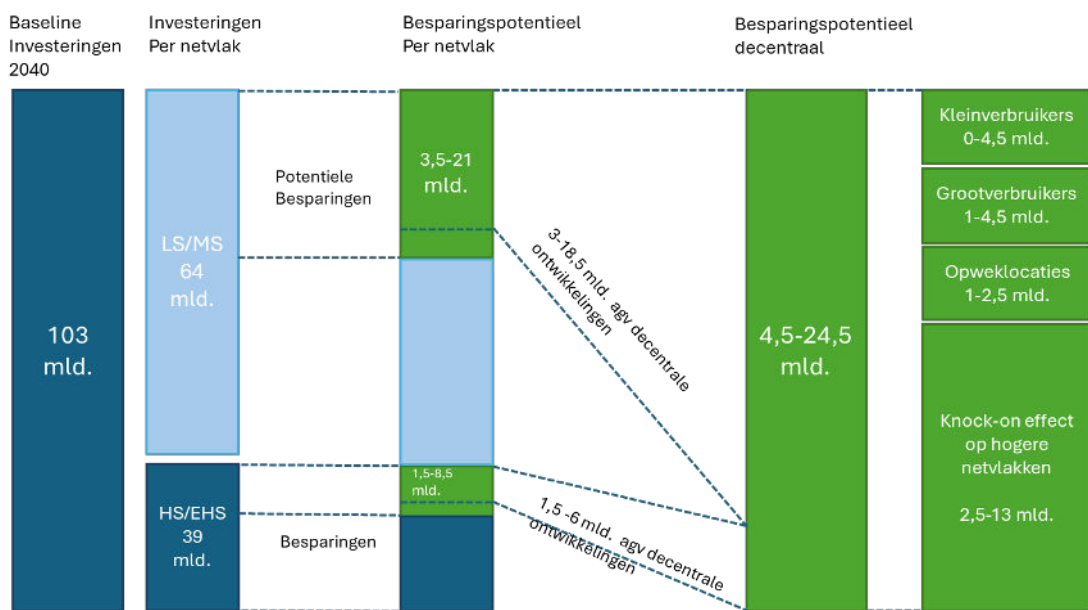
In dit hoofdstuk is gezocht naar het aandeel van decentrale interventies in dit besparingspotentieel. De volgende conclusies zullen we in de rest van dit hoofdstuk onderbouwen:

- Een groot deel (80-90%) van de totale potentiële besparingen is afkomstig van de interventies die gaan over decentrale interventies voor kleinverbruikers, grootverbruikers en locatiesturing op laag- en middenspanningsniveau.
- De bandbreedte van de mogelijke besparing door decentrale interventies is zeer groot, variërend van 4,5 tot 24,5 mld. De besparing is sterk afhankelijk van de mate waarin de interventies gestimuleerd worden, zowel met technische (direct) maatregelen als beleidsmatige (indirecte) maatregelen.
- Verhoogde technische benutting van het net en windenergie op zee vallen niet onder decentrale interventies.

De BCG besparingen versus de IBO besparingen. In de IBO-rapportages zijn lagere besparingen genoemd dan BCG heeft berekend. Bij navraag blijken de verschillen afkomstig te zijn door de effecten van het verkleinen van het maakbaarheidsgat³ en het vergroten van het aantal te realiseren aansluitingen op het net door de besparingen. Omdat het op basis van de aangeleverde informatie van BCG en bijbehorende toelichting het niet mogelijk bleek de vertaling van de BCG naar de IBO besparingen te maken, is in dit rapport is gekozen te werken met de resultaten van BCG. Voor de goede orde: globaal is aannemelijk te maken dat het verschil in maximum besparing 2-3 mld. kan zijn voor de decentrale interventies.

3.1 Analyse besparingspotentieel decentrale interventies

De analyses van BCG geven aan dat tot 2040 103 mld. euro aan investering nodig is voor de verzwaring van het elektriciteitsnet op land (BCG, 2025) zoals te zien is in de linker kolom in Figuur 3.1.



Figuur 3.1: CAPEX-investeringen in de infrastructuur, cumulatief tot 2040 (linker twee kolommen) in miljard euro. De middelste kolom geeft in groen aan welke besparingen er per netvlak mogelijk zijn. De rechter twee kolommen tonen het besparingspotentieel voor decentrale interventies.

De investeringen. Links zien we de totale investeringen op land, cumulatief tot 2040 van 103 mld. De totale investeringen zijn in de figuur verdeeld over de netvlakken. De investeringen voor laagspanning/middenspanning (LS/MS) bedragen 64 mld. euro en de investeringen in hoogspanning/extra-hoogspanning (HS/EHS) bedragen 39 mld. euro. Deze verdeling is anders dan in de IBO-rapportages is genoemd, maar dat bleek een foutieve interpretatie in het IBO te zijn.

³ Het maakbaarheidsgat drukt het verschil uit tussen de netcapaciteit waar vraag naar is (en die gebouwd zou moeten worden) en de netcapaciteit die daadwerkelijk kan worden gebouwd (bron: Netbeheer Nederland).

De besparingen als gevolg van alle interventies. Maken we een stapje naar rechts, dan zien we een potentiële besparing van 3,5-21 mld. voor laag- en middenspanning en 1,5-8,5 mrd besparing voor de hogere netvlakken. Dit zijn de besparingen als we alle interventies meenemen, ook niet decentraal. Samen levert dit een potentiële besparing op van 5 tot 29,5 mld. euro.

Besparingen als gevolg van decentrale interventies. Decentrale interventies leveren een deel van die besparingen op. In deze studie kunnen we de effecten van decentrale interventies echter niet exact uitsplitsen. Daarom geven we een indicatie van het besparingspotentieel door het effect van interventies die aangrijpen op aansluitingen op het LS en MS als decentraal effect te beschouwen. Zie 3.2 voor een verdere toelichting. Per netvlak zijn er besparingen mogelijk. Voor de effecten van die interventies op LS/MS bedragen die 3-18,5 mld. euro. Voor de effecten van die interventies op HS/EHS is dat 1,5-6 mld. euro. Opgeteld is dat 4,5-24,5 mld. Dit betekent dat een groot deel van de besparingen (80/90%) toe te kennen is aan decentrale interventies. Het is belangrijk om te realiseren dat een deel van de besparingen die decentraal zijn komt van de effecten op de hogere netvlakken, zoals het effect van interventies op het niveau van LS een effect hebben op het MS en ook op het HS/EHS. Dit zijn de zogenaamde knock-on⁴ effecten. Dit zijn geen interventies op zichzelf, maar effecten van interventies.

Onderverdeling van decentrale interventies. De verdere verdeling van besparingen naar de clusters zijn dan: 0-4,5 mld. voor het cluster kleinverbruikers, 1-4,5 mld. voor het cluster grootverbruikers en 1-2,5 mld. voor het cluster locatiekeuzes. En zoals gezegd, een net zo groot aandeel voor de knock-on effecten (2,5-13 miljard).

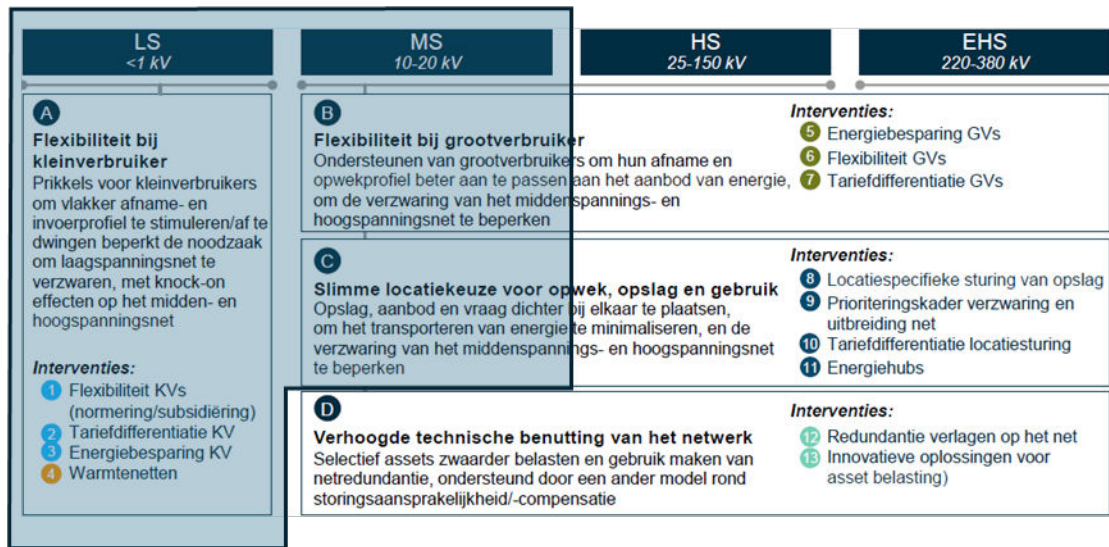
Grote spreiding van getallen. Het totale decentrale besparingspotentieel varieert van 4,5 tot 24,5 mld. De bandbreedte is dus erg groot. Deze bandbreedte komt vooral door de mate waarin de interventies worden toegepast in de drie verschillende doorgerekende scenario's . Denk daarbij dan aan de mate van sturing op flexibiliteit of prikkels versus actieve sturing. Dit lijkt dus een scenario-keuze te zijn en daarmee geen onzekerheid.

Besparingspotentieel per netvlak. Het besparingspotentieel in het LS/MS deel van het elektriciteitsnet is een stuk groter dan het besparingspotentieel in HS/EHS deel van het elektriciteitsnet (met een maximum van respectievelijk 21 en 8,5 mld. euro. Daar komt bij dat een groot deel van het besparingspotentieel op HS/EHS komt van de knock-on effecten. Dat betekent dat voor hoogspanning er niet bijzonder veel additionele besparingen zijn die alleen door interventies op dat netvlak veroorzaakt worden.

3.2 Nadere verkenning van de interventies uit BCG

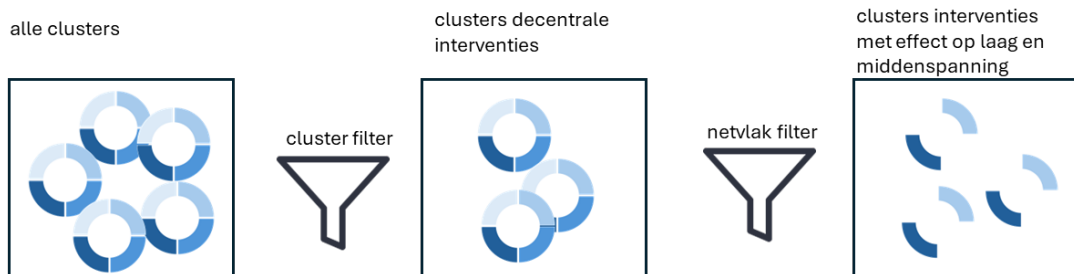
In de BCG-studie zijn op een gestructureerde manier interventies meegenomen voor het complete beeld over de mogelijke besparingen op netverzwaring, verdeeld over een aantal interventieclusters A-D, zie Figuur 3.2. Deze clusters zijn verdeeld over de verschillende netvlakken, laag, midden, hoog en extra hoogspanning.

⁴ Knock-on effecten is een term afkomstig uit de BCG rapportage. Een mogelijk betere term is ripple effect, domino-effect of neutraler: indirecte effecten



Figuur 3.2: Overzicht interventieclusters uit BCG rapportage. Het gearceerde gebied geeft globaal aan waar de decentrale interventies onder vallen.

Voor dit onderzoek naar de effecten van decentrale interventies is uit deze clusters een selectie gemaakt van de decentrale interventies. Een eerste filter gaat over de clusters: *kleinverbruik, grootverbruik en locatiesturing* (In de figuur aangeduid als, A, B en C). Dit zijn clusters die typisch interventies bevatten die een decentraal karakter hebben. Een tweede filter is gelegd op de netvlakken: alleen interventies die effect hebben op aansluitingen op het laagspanning en middenspanningsnet zijn meegenomen. We krijgen dan het gearceerde gebied in de bovenstaande figuur.



Figuur 3.3: Twee filters op de clusters van BCG.

Het is niet mogelijk gebleken nog een extra filter toe te passen binnen de clusters zelf voor specifieke interventies binnen dat cluster. Dit extra filter kan waardevol zijn om verder te kunnen selecteren en de splitsing naar decentrale interventies nauwkeuriger te kunnen maken. Wanneer we naar onze definitie van decentrale interventies kijken zoals gegeven in Hoofdstuk 2 gaan decentrale interventies over het bij elkaar brengen van vraag en aanbod in tijd en ruimte. Dus gelijktijdigheid van vraag en aanbod is dan nodig, maar ook het bij elkaar brengen van die vraag en aanbod in een gebied. De interventies Flexibiliteit, tariefdifferentiatie en energiebesparing zijn dan ook interventies die niet per sé een decentraal karakter hebben, maar wel in deze clusters zitten. In welke mate die bijdragen aan het besparingspotentieel is op dit moment niet expliciet te krijgen, en mogelijk ook niet expliciet te maken omdat er afhankelijkheden bestaan. Bijvoorbeeld: flexibiliteit kent een aantal doelen. Het kan inspelen op tarieven (niet decentraal), maar ook lokale congestie voorkomen door gebruik te maken van lokale opwek, of kosten besparen door verhoogd gebruik van eigen opwek (beiden wel decentraal). Als er maatregelen komen die flexibiliteit

stimuleren is het onderscheid tussen de verschillende doelen minder scherp. Ondanks dit is de consequentie dat het besparingspotentieel zoals we dat hier bepalen een overschatting is, maar een verdere uitsplitsing van de besparing bleek in de scope van deze studie niet mogelijk.

Voor elk van deze gearceerde clusters uit Figuur 3.2 volgt hieronder een samenvattend overzicht hoe de interventies door BCG zijn meegenomen in de doorrekeningen. Daarvoor introduceren we eerst een paar termen:

Basispad: De interventies zijn voor een groot deel gebaseerd op parameters in het basispad zoals dat gebruikt is door FIEN+. Het basispad is gebruikt om te komen tot de totale investeringen die nodig zijn.

Scenario: Er is gewerkt met drie scenario's: laag, midden en hoog. Een voorbeeld: de interventie 'flexibiliteit' heeft op zich weinig betekenis. Maar wel de mate waarin de apparaten die flexibiliteit kunnen leveren, voor specifieke doelen. In de doorrekening is dan ook gewerkt met verschillende mate van maatregelen die flexibiliteit stimuleren. In onderstaande tabellen geven we kort aan wat de variaties zijn in de verschillende scenario's. Voor een volledig overzicht verwijzen we naar de BCG rapportage.

Tabel 3.1: Interventiecluster kleinverbruikers uit berekeningen BCG

Interventiecluster kleinverbruikers 0-4,5 mld. besparingspotentieel	Basispad zonder extra interventies	Variatie in scenario's
Aanstuurbare apparaten / Flexibiliteit	Adoptie van elektrische voertuigen (EV), warmtepompen (WP) en Zon-PV. Geen sturing op deze apparaten.	Verschillende mate en mix van actieve sturing en prikkels voor EV, WP en Zon-PV
Warmtenetten	20% in 2050	10-20-30% penetratie warmtenetten in 2040
Energiebesparing	Label B bij full electric-WP	Piekreductie full electric-WP

Toelichting interventiecluster kleinverbruikers. In de BCG-studie is terecht gekozen voor de aanstuurbare apparaten EV, WP en Zon-PV. Deze apparaten hebben gemeenschappelijk dat de vraag om productie om grotere *vermogens* gaat met een grote mate van *gelijktijdigheid*. Dat vraagt om maatregelen deze gelijktijdigheid en/of vermogens te beïnvloeden door sturing en prikkels, zoals in de scenario's is gedaan. De resultaten zijn echter gevoelig voor twee aspecten: de adoptiecijfers inclusief de ruimtelijke spreiding van de apparaten en de mate waarin die sturing en prikkels het potentieel aan flexibiliteit kan realiseren. De adoptiecijfers zijn bijna per definitie onzeker en het realistisch potentieel is zeker onzeker. Bijvoorbeeld de adoptie van warmtenetten (het alternatief voor de warmtepomp) is momenteel veel discussie over, en de cijfers variëren aanzienlijk. Een analyse van de gevoeligheden van de adoptie op de berekende besparing is hier aan te bevelen. Ook de adoptie van EV en WP is sterk afhankelijk van aanschafkosten, subsidies en belastingen. Een nadere analyse van deze gevoeligheden en de impact daarvan op de besparingen is aan te bevelen.

Energiebesparing staat als interventie in dit cluster omdat dit integraal is meegenomen in de berekeningen door BCG en een uitsplitsing niet mogelijk bleek. Volgens onze definitie valt dit niet onder decentrale interventies waardoor de besparingen van 0-4,5 mld. in dit cluster dan te hoog zijn ingeschat voor decentrale interventies. Zoals gezegd zou een verdere filtering hier kunnen helpen, onder de voorwaarde dat er geen afhankelijkheden bestaan met andere interventies.

In het volgende hoofdstuk gaan we in op decentrale interventies die in de BCG-studie niet meegenomen zijn, maar potentieel een aanvullende besparingen kunnen leveren.

Tabel 3.2: Interventiecluster Grootverbruikers

Interventiecluster grootverbruikers 1-4,5 mld. besparingspotentieel	Basispad zonder extra interventies	Variaties in scenario's
Flexibilisering	Geen flexibilisering	Hoogte van de compensatie flexibiliteit bij industrie
Logistiek laden (tijd)	Geen flexibilisering	Stimuleren/verplichting piekreductie laadvermogen
Energiebesparing	Standaard beleid	Handhaving besparingsplicht en 'andere maatregelen', effectief extra besparing 5-10%

Toelichting interventiecluster grootverbruikers

Bij grootverbruikers zijn er scherpe keuzes gemaakt in de meegenomen interventies voor industrie, logistiek en datacenters. De variaties zitten met name in compensatiemaatregelen voor de inzet van flex (zonder verplichting) en de handhavingsplicht voor energiebesparing (die plicht is er al, alleen de handhaving wordt nog strakker aangezet)⁵. Onder de reeds opgenomen interventies vallen zon-PV curtailment, (systeem)batterij opslag en achter-de-meter oplossingen, die niet verder zijn gedefinieerd, het flexibel verbruik door de industrie, datacenters en logistiek en inzetten op energiebesparing. In het volgend hoofdstuk laten we zien wat hier mogelijk nog aan toegevoegd kan worden, wat kan leiden tot extra besparingen.

Tabel 3.3: Interventiecluster Locatie sturing

Interventiecluster Locatie sturing 1-2,5 mld. besparingspotentieel	Basispad zonder extra interventies	Variaties in scenario's
Locatiesturing van stuurbare opwek	Opslag op middenspanning	Locaties opwek (assets): locatie PV velden, PV op gebouwen, Windenergie op land, kleine gascentrales
Locatiesturing stuurbare vraag van grootverbruikers	Geen effecten meegenomen	Effecten op MS niet meegenomen in de besparingsgetallen

Toelichting interventiecluster locatiesturing. In de uiteindelijke besparingsgetallen heeft BCG gekozen om alleen de effecten van de variaties in de locaties van opwek mee te nemen en niet de locaties van de stuurbare vraag om dubbeltellingen met de effecten van flexibiliteit bij grootverbruikers te voorkomen. De locatie van elektriciteitsvraag is minder stuurbaar, de vraag zelf natuurlijk wel.

⁵ Er wordt ook al veel gehandhaafd: [Energiebesparingsplicht, 2008-2023 | Rapport | Algemene Rekenkamer](#)

Realisme van de verschillende scenario's en interventies. In Hoofdstuk 4 gaan we uitgebreider in op decentrale interventies op basis van kennis uit de literatuur en TNO eigen expertise, en benoemen we aanvullende interventies die nog tot extra besparingen kunnen leiden. We zagen eerder al dat de bandbreedte in de totale mogelijke besparing hoog is, ca 20 mld. euro (zie 3.1). Hoe hoog de besparing kan worden is dus vooral een kwestie van beleid. Beleid kan meesturen op de haalbaarheid en realisatie van de technische opties en daarmee de variatie binnen de bandbreedte. Uiteindelijk is dat waar het om draait: de potentie van besparingen is groot, maar het realiseren van de potentie gaat niet vanzelf. In de IBO-rapportage is daar uitgebreid aandacht aan besteed, zie de overzichten uit Schakelen naar de toekomst (IBO Bekostiging Elektriciteitsinfrastructuur, 2025), Hoofdstuk 3.5 en Bijlage 6.

4 Potentie van decentrale interventies op basis van literatuur

In dit hoofdstuk gaan we dieper in op decentrale interventies en interventies in twee domeinen: de (bestaande) gebouwde omgeving en bedrijventerreinen, met een nadruk op interventies die niet in de BCG-rapportages in het kader van het IBO (Hoofdstuk 3) zijn meegenomen of juist specifieker zijn gemaakt. Voor deze interventies vatten we de potentie en de benodigde randvoorwaarden samen, zoals beschreven in de literatuur en op basis van eigen inzichten. Hierbij vermelden we waar mogelijk de potentiële piekreductie of potentiële besparing op verzwaring van het elektriciteitsnet. We sluiten het hoofdstuk af met het benoemen van een aantal algemene randvoorwaarden voor decentrale interventies, en een reflectie op wat er tot nu toe bekend is in de literatuur.

De interventies die in dit hoofdstuk aan bod komen zijn:

Interventie	T.o.v. IBO berekeningen
Decentrale interventies in de gebouwde omgeving	
<ul style="list-style-type: none"> • Flexibiliteit in de gebouwde omgeving <ul style="list-style-type: none"> - Aansturen laadpalen en V2G/V2H - Aansturing warmtepompen - Aansturing thuis- en buurtbatterijen - Warmtebatterijen • Energiegemeenschappen • Warmtenetten 	<p>V2G/V2H is aanvullend</p> <p>Specifieker</p> <p>Aanvullend</p> <p>Aanvullend</p> <p>Aanvullend</p> <p>Specifieker</p>
Decentrale interventies op bedrijventerreinen	
<ul style="list-style-type: none"> • Flexibiliteit op bedrijventerreinen <ul style="list-style-type: none"> - Industriële vraagrespons - Opslag - Power to heat en power to X • Energiehubs • Warmtenetten 	<p>Aanvullend</p> <p>Specifieker</p> <p>Aanvullend</p> <p>Aanvullend</p> <p>Aanvullend</p>

Deze selectie is tot stand gekomen door ons eigen begrip van decentrale interventies (hoofdstuk 2), de studie van BCG in het kader van het IBO (Hoofdstuk 3) en onze eigen reflectie hierop. De beschreven interventies gaan daarmee verder dan de interventies meegenomen in het IBO. Gegeven de doorlooptijd van dit project hebben we keuzes moeten maken in de scope van de onderzochte interventies. Zo beperken we ons tot de bestaande

gebouwde omgeving, en gaan hier niet in op netbewuste nieuwbouw. Binnen het stuk bedrijventerreinen laten we clusters 1 tot 5 buiten beschouwing, aangezien deze specifieke industriële clusters om maatwerk vragen. Wat betreft slimme locatiekeuzes voor (groot)verbruik en inpassing van opwek beperken we ons tot de interventies energyhubs en energiegemeenschappen. Ondanks deze afbakening menen we dat we binnen deze scope de belangrijkste decentrale interventies binnen de (bestaande) gebouwde omgeving en bedrijventerreinen weergeven.

4.1 Decentrale interventies in de gebouwde omgeving

4.1.1 Flexibiliteit in de gebouwde omgeving

Flexibiliteit verwijst naar de mogelijkheid van aangesloten partijen om hun elektriciteitsvraag en/of – productie aan te passen. De reden kan verschillend zijn: bijvoorbeeld vanwege de beschikbare capaciteit van het elektriciteitsnet, de momentane prijs van energie, of de beschikbaarheid van duurzame energiebronnen. Dit betekent dat zij hun elektriciteitsverbruik of -productie beperken of verschuiven in de tijd, en opgewekte elektriciteit tijdelijk opslaan in batterijen of omzetten, bijvoorbeeld in warmte.

Flexibiliteit bij eindgebruikers is niet altijd een decentrale ontwikkeling: het wordt niet alleen ingezet om lokaal vraag en aanbod op elkaar af te stemmen, maar kan voor meerdere doelen aangewend worden. Zo wordt flexibiliteit ook ingezet op de nationale energiemarkten en onbalansmarkten. Als flexibiliteit echter wordt ingezet om met lokale netcongestie om te gaan, maakt het wel deel uit van relevante decentrale interventies. Vaak werken de prikkels die voortkomen uit de verschillende doelen dezelfde kant op: bij een grote vraag naar energie stijgt over het algemeen de prijs van energie, en is de kans op (lokale) transport schaarste ook groot. Dan werken nationale markten als het ware mee met decentrale ontwikkelingen door vraagpieken te dempen of te verschuiven en zo productie op andere tijden (waaronder lokale productie) beter te benutten. Dat maakt dat de interventies gericht op flexibiliteit en het potentieel niet goed te scheiden zijn in een centraal en decentraal deel.

De potentie van flexibiliteit bij kleinverbruikers wordt met name gezien bij laadpalen (voor elektrische voertuigen, warmtepompen, thuisbatterijen en zonnepanelen). Deze apparaten doen hun intrede in huishoudens vanwege de elektrificatie van (een deel van) de energievraag. De elektriciteitsvraag van warmtepompen en laadpalen worden als een van de grotere problemen gezien voor netbelasting, omdat ze relatief veel vermogen vragen en een grote mate van gelijktijdigheid kennen. Dat wil zeggen dat de vermogensvraag van de apparaten veelal op hetzelfde moment is. Ook valt de vraag vaak binnen de avondpiek, grofweg tussen vier en negen uur 's avonds. Dat is momenteel het moment op de dag dat er de meeste vraag naar stroom is. Voor opwek ligt de piek vaak overdag, als de zon schijnt. Die pieken, zowel aan de opwek- als de vraagkant, bepalen nu nog de dimensionering van het elektriciteitsnet. Actieve aansturing van genoemde apparaten kan zorgen voor een verlaging van de piek, zowel door elektrische vraag in piekuren te reduceren of tijdelijk uit lokale opslag te leveren, als door vraag en teruglevering beter te spreiden zodat de gelijktijdigheid afneemt. Echter kunnen thuisbatterijen de vraagpiek ook vergroten wanneer ze ingezet worden om te handelen op de onbalansmarkt. Het is dus van belang om de actieve aansturing apparaten niet alleen uit te laten gaan van de vraag en aanbod naar energie, maar ook van de beschikbare transportcapaciteit. Deze producten zijn voor kleinverbruikers echter nog in ontwikkeling.

Binnen de gebouwde omgeving vormt de utiliteitsbouw ook een relevante categorie binnen het laagspanningsnet. Veel gebouwen zoals scholen, kantoren en winkels hebben een ander verbruikspatroon dan huishoudens, met vraagpieken overdag. Maar andere utiliteitsgebouwen, zoals restaurants, hebben juist een piek in hun energievraag tijdens de piekvraag van huishoudens. Gesprekken met experts van kennisinstellingen en netbeheerders laten zien dat een significant deel van de vraag van klein- en grootverbruikers op het LS-net afkomstig is van de utiliteitsbouw (CE Delft & Merosh, 2024). Slimme sturing van flexibele assets als warmtepompen, elektrisch laden en batterijen tot kunnen leiden tot piekreductie bij utiliteitsgebouwen.

Hieronder bespreken we in meer detail de potentie en eventuele specifieke randvoorwaarden voor de volgende interventies: aansturing van laadpalen en vehicle to home/grid, aansturing van warmtepompen, aansturing van thuis- en buurtbatterijen, en aansturing van warmtebatterijen. We hanteren hierbij steeds dezelfde structuur: eerst geven we een algemene beschrijving van de interventie, vervolgens beschrijven we de potentie, en als laatste benoemen we specifieke randvoorwaarden. Binnen de scope van dit onderzoek hebben we ook gekeken naar de potentie van aansturing van warmtepompen in de utiliteitsbouw – binnen de beperkte tijd voor dit onderzoek hebben we de potentie van opslag en aansturing van EV laden binnen de utiliteitsbouw niet kunnen onderzoeken.

Aansturing laadpalen en vehicle to grid/vehicle to home (V2G/V2H)

Wat is aansturing van laadpalen en vehicle to home/grid?

Slim laden gaat over het uni-directioneel laden van het voertuig waarbij flexibiliteit ontstaat door het sturen van het moment en snelheid van laden. Bi-directioneel laden bouwt hierop voort en kan zelfs het net ontlasten doordat het voertuig ook kan ontladen naar de woning of het net (V2H/V2G). Dit biedt een aanzienlijke additionele flexibiliteit, omdat elektrische auto's een grote accu hebben en gemiddeld 95% van de tijd stilstaan. V2H/V2G kan in de praktijk (zie voorbeeld van We Drive Solar in 5.8) worden aangestuurd door marktpartijen (aggregators, leveranciers, charge point operators), terwijl de lokale uitvoering via een laadpaal of een HEMS⁶ loopt. Netbeheerders hebben voornamelijk een rol in het bepalen van de randvoorwaarden en signaleren van de benodigde flexibiliteit voor het net.

Wat is de potentie van aansturing laadpalen en vehicle to home/grid?

De voorspellingen zijn dat er in 2040 5-9 miljoen batterij elektrische auto's in Nederland zijn, en een totaal van 3,5 miljoen laadpunten. Dit levert aanzienlijke pieken op, ook op lokaal niveau. (ElaadNL, 2023) schat dat netbewust laden zorgt voor een potentiële piekreductie van 44% bij thuisladen en 28% bij publiek laden. En dat heeft impact op het net: in een andere studie schat (ElaadNL, 2023) dat dankzij netbewust laden er een afname van 10-15% in 2030 (en 15-20% in 2035) op het aantal door afname overbelaste MSR's (middenspanningsruimte transformatoren) mogelijk is.

Brinkel e.a. modelleren dat netcongestie in laagspanningsnetten geheel kan verdwijnen als 20-30% van de auto's bidirectioneel laadt (Brinkel, AISkaif, & Sark, 2022) (Brinkel e.a., 2022). (ElaadNL, 2025) laat daarnaast zien dat V2G vehicle to grid tot 4,5 GW vermogen flexibel kan leveren in 2050. Wel met de aanname dat alle personen- en bestelauto's elektrisch en V2G geschikt zijn. Deze aanname is hierin een theoretisch maximaal haalbaar potentieel, wat in de praktijk nog in de implementatie zich moet bewijzen. Wanneer deze waarde lineair wordt teruggeschaald, bedraagt de geschatte capaciteit in 2040 ongeveer 2,5 GW. De EAFO Consumer Monitor 2023 laat zien dat 42% van de Nederlandse EV-rijders bekend is met V2G

⁶ Home Energy Management System

en 75% interesse heeft in een V2G-capabele auto, wat de haalbaarheid van dit potentieel ondersteunt.

Waar op wijkniveau alleen al met slimme aansturing van EV's een reductie in piekbelasting mogelijk is, kan V2G-technologie mogelijk tot piekreductie op MSRs leiden. Een mooi voorbeeld zijn de bidirectionele deelauto's in Utrecht, waar een vloot van 50 voertuigen pieken van bijna 200 kW teruglevering laat zien, bij een middenspanningsruimte van 630 kVA betekent dit ruim 30% extra capaciteit (ElaadNL, 2025).). Elaad stelt dat een combinatie van 100 huishoudens elk huishouden gemiddeld gezien 1 tot 2 kW terug aan het net kan leveren in de piekuren – en met 2kW kan één ander huis van stroom worden voorzien. Verder noemt Elaad dat er mogelijkheden en kansen zijn om bidirectioneel laden te kunnen inzetten voor piekreductie en/of handel met elektriciteit; zoals bij supermarkten, overheden of installateurs. Het effect is het grootst in de zomer, wanneer PV-overschot kan worden opgeslagen en 's avonds teruggeleverd, en het kleinst in de winter, wanneer minder overschot beschikbaar is. Deze flexibiliteit verlaagt piekbelasting doordat het laden wordt verschoven naar daluren en de gelijktijdigheid van laadsessies afneemt; bidirectioneel laden vermindert daarnaast het lokale piekvermogen doordat voertuigen in piekuren vermogen kunnen terugleveren.

Wat zijn specifieke randvoorwaarden voor aansturing laadpalen en vehicle to home/grid?
V2G vraagt om standaardisatie van communicatieprotocollen, duidelijke verrekening van twee-richtingenstromen en markttoegang voor aggregators tot onbalans- en capaciteitsmarkten. Tariefstructuren of contracten kunnen, aanvullend op dynamische prijzen en geaggregeerde sturing, waar nodig op lokale netbelasting sturen. Zonder netbewuste sturing kunnen nieuwe secundaire pieken ontstaan wanneer veel voertuigen tegelijk op lage tarieven reageren, waardoor de piekreductie teniet kan worden gedaan. De combinatie van V2G met thuisbatterijen en warmtepompen vergroot de lokale flexibiliteit en verlaagt de noodzaak tot verzwaring verder.

Aansturing warmtepompen

Wat is aansturing van warmtepompen?

Aansturing van warmtepompen door bewoners, energieleveranciers, aggregators of andere partijen maakt het mogelijk om de avondpiekvraag van warmtepompen te verlagen. Via een 'slimme' thermostaat of timers kan het buffervat, de vloerverwarming of de woning alvast voorverwarmen, bijvoorbeeld wanneer de stroomprijzen laag zijn en er een lagere belasting van het net is. Als de woning goed geïsoleerd is, kan de warmtepomp dan tijdens de piekuren, wat minder hard draaien zonder dat de temperatuur erg daalt.

De aansturing van warmtepompen is al onderdeel van de interventies in de BCG-studie en is als zodanig ook geen aanvullende interventie. De onderliggende aannames zijn wel van groot belang om het besparingspotentieel goed in te schatten. In de literatuur blijkt variatie te zitten in bepaalde aannames.

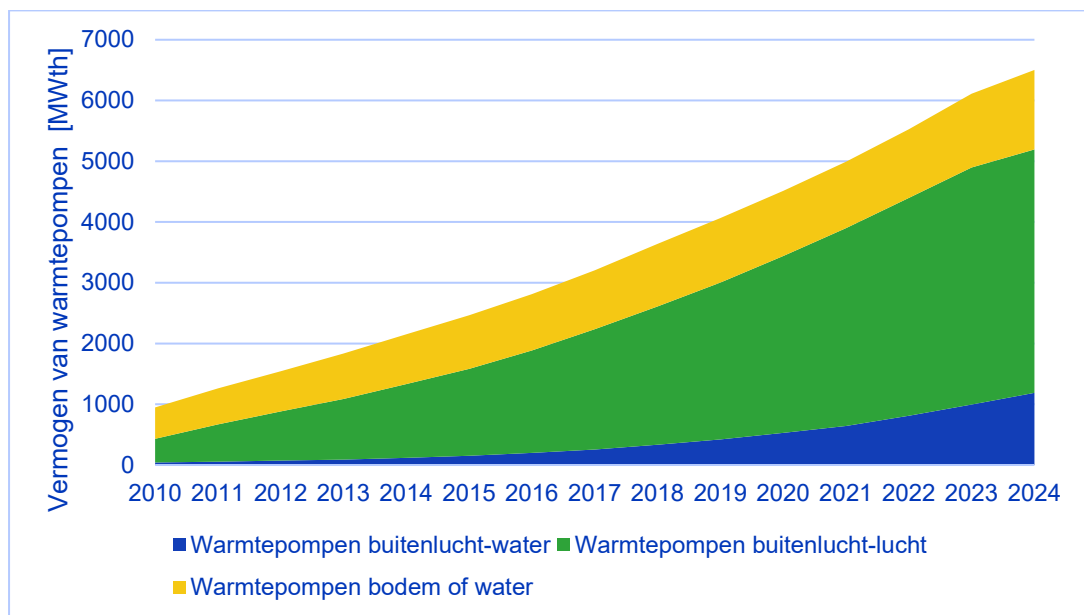
Wat is de potentie van aansturing van warmtepompen?

Het totaal opgestelde aantal warmtepompen in woningen neemt de komende jaren naar verwachting toe tot 2,1 miljoen warmtepompen in 2030, waarvan twee derde all-electric is (DNE Research, 2025). TenneT verwacht dat in 2030 warmtepompen in woningen optellen tot een additionele piekvraag van 2.5 - 3.5 GW. Tevens verwacht TenneT dat slimme aansturing van warmtepompen in 2030 zo'n 0.5 tot 2 GW aan piekreductie en 0 tot 1 GW aan piekverhoging kan opleveren, afhankelijk van de aansturing (TenneT, 2025). Merosch liet onderzoek uitvoeren naar de netbelasting van warmtepompen in een gemiddelde rijtjeswoning en komt tot gelijktijdige vermogens van 1,3kW per gemiddelde woning met een

luchtwarmtepomp (Merosch, 2024). Ze gaan daarbij uit van een gelijktijdigheid van 50%, terwijl ze in de praktijk percentages tot 30% zien. Netbeheerders lijken volgens die studie van hogere (gelijktijdige) vermogens uit te gaan, rond de 2,5 kW. Merosch stelt dat nader onderzoek naar de gelijktijdigheid van de belasting van individuele warmtepompen wenselijk is. Dat lijkt inderdaad wenselijk, aangezien daarmee ook aannames over de potentie van aanstuurbare warmtepompen voor het verlagen van netimpact veranderen.

Een andere factor die de mate van piekreductie bepaalt is de grootte van de beschikbare buffercapaciteit. TNO (TNO, 2024) laat zien dat buffervaten van 200–300 liter doorgaans circa één uur flexibiliteit kunnen bieden, terwijl grotere vaten van 400–500 liter meerdere uren overbrugging mogelijk maken bij het sturen van warmtepompen. Op basis van TNO- en GO-e-onderzoek komt dit neer op een potentiële piekreductie per woning van circa 10–20% zonder extra buffervat en 20–40% met buffervaten van 200–500 liter. Hierdoor kan de warmtepomp in de avonduren substantieel worden teruggestuurd, wat leidt tot een merkbare reductie van zowel piekvermogen als gelijktijdige belasting van het net.

Warmtepompen spelen ook in de utiliteitsbouw een steeds grotere rol, zie Figuur 4.1. Deze kunnen net als bij woningen gedeeltelijk afgeschakeld worden in de piekmomenten. Bij hybride systemen is het mogelijk om met aardgas te verwarmen in de piekmomenten. Het aandeel van hybride systemen is niet gekwantificeerd door het CBS maar deze systemen vallen ook binnen de categorie warmtepompen. Het aandeel van lucht-lucht warmtepompen is het grootst (CBS, 2025). De warmtepompen in de utiliteitsbouw hebben een ander profiel dan de warmtepompen in woningen, omdat de gebruikstijden doorgaans verschillen. Wel is het zo dat 20% van de piekvraag in de gebouwde omgeving van de utiliteitsbouw afkomstig is. De potentie van de sturing van warmtepompen bij utiliteitsbouw is echter nog niet goed onderzocht en daarom zijn er geen harde cijfers te geven over dit potentieel.



Figuur 4.1: Thermisch vermogen van warmtepompen | Opgesteld thermisch vermogen einde jaar megawatt voor Utiliteitsgebouwen, kassen en stallen (CBS, 2025)

Wat zijn specifieke randvoorwaarden voor aansturing van warmtepompen?

De effectiviteit van aansturing ten behoeve van piekreductie hangt af van de isolatiegraad, buffergrootte en voorspellende regeling. Bij onvoldoende buffer of comfortinstellingen die

herladen tijdens piekuren afdwingen, kan piekreductie beperkt zijn of wegvallen. In 2021 was zeventien procent van de warmtepompen aangesloten op het internet, waarmee aansturing in principe mogelijk is. Echter, 77 procent van de aangekochte warmtepompen kon in theorie aangesloten worden op het internet, maar was dat nog niet (FAN; RVO, 2023). Momenteel zijn nog veel communicatieprotocollen in gebruik, wat eenvoudige aansturing en opschaling daarvan in de weg staat. Op verzoek van het Ministerie van Klimaat en Groene Groei gaat de NEN samen met de markt een NTA (Nederlands Technische Afspraak) ontwikkelen voor ‘Slimme warmtepompen’. Dit initiatief heeft als doel het vastleggen van afspraken omtrent de slimme aanstuurbaarheid van warmtepompen, ter vermindering van netcongestie op het laagspanningsnet (NEN, 2025). Om de aanstuurbaarheid daadwerkelijk om te zetten in flexibiliteit ten behoeve van congestievermindering, is het noodzakelijk dat er prikkels (prijzen of afspraken) bestaan om de warmtepompen netvriendelijk aan te sturen. Een prijsprinkel vanuit lokale congestie kan daaraan bijdragen. Voor individuele afnemers bestaat momenteel de mogelijkheid om te sturen op dynamische energieprijzen, wat in veel gevallen ook voor congestie goed uitpakt. Belangrijk om te noemen is dat als iedereen op hetzelfde (lage) energietarief reageert zonder coördinatie, kan er een nieuwe “secundaire piek” ontstaan. Collectieve of geaggregeerde vormen van aansturing lijken al meer mogelijkheden te bieden voor netvriendelijke aansturing, bijvoorbeeld via contracten met de netbeheerders (zie voor een voorbeeld het Smart Thermal Grid in 00) of geaggregeerd aanbod van de flexibiliteit op GOPACS.

Aansturing thuis- en buurtbatterijen

Wat is aansturing van thuis- en buurtbatterijen?

Aansturing van elektrische thuis- en buurtbatterijen kan een belangrijke bijdrage leveren aan het verminderen van piekbelasting op het laagspanningsnet. Batterijen reduceren piekbelasting doordat in piekuren vermogen uit opslag wordt geleverd in plaats van uit het net. Hierdoor dalen zowel het piekvermogen per aansluiting als de gelijktijdigheid van afname in kritieke uren. Ook kunnen batterijen bijdragen aan een verlaging van de piek op de teruglevering van opgewekte elektriciteit.

Thuisbatterijen slaan lokaal opgewekte elektriciteit op, meestal van zonnepanelen, en kunnen deze teruggeven tijdens de piekuren. Buurtbatterijen doen dit op wijkniveau. Thuisbatterijen worden meestal aangestuurd door de eigenaar zelf of door energiedienstverleners en aggregators die meerdere systemen gebundeld beheren. Buurtbatterijen worden doorgaans centraal aangestuurd door een exploitant of energiecoöperatie. Vanuit systeemperspectief is het wenselijk dat netbeheerders de technische randvoorwaarden en grenzen voor veilig gebruik vaststellen, zodat aansturing in lijn blijft met het verminderen van netbelasting.

Wat is de potentie van aansturing van thuis- en buurtbatterijen?

Volgens het Nationaal Smart Storage Trendrapport 2024/2025 waren in 2023 circa 40.000 batterijsystemen geïnstalleerd met een gezamenlijke capaciteit van 621 MWh, waarvan ongeveer 205 MWh residentieel. Het rapport verwacht tussen 1 en 10 GWh in 2030 en tussen 7,5 en 25 GWh in 2050 aan batterijen bij huishoudens. Bij lineaire interpolatie resulteert dit in een verwachte capaciteit van ongeveer 4–18 GWh in 2040. Uitgaande van batterijen van 5–10 kWh per huishouden komt dit overeen met ongeveer 0,4 tot 1,8 miljoen systemen.

CE Delft toont aan dat deze systemen congestie kunnen reduceren, mits ze netbewust worden aangestuurd (Delft, 2023). Bij marktgestuurde inzet zonder goede prijs- of capaciteitsprikkels kan congestie toenemen, terwijl goed ontworpen nettarieven (zoals time-of-use) juist kunnen bijdragen aan het verminderen van piekbelasting (CE Delft, 2023). Netbeheerders geven aan dat lokale opslag helpt om het net slimmer te benutten, vooral als

veel woningen tegelijk stroom vragen of leveren (Netbeheer Nederland, 2025; (TNO, 2024). Het effect verschilt daarbij wel per locatie in het net: thuisbatterijen verlichten vooral spanningsproblemen aan het einde van de kabel, terwijl buurtbatterijen dichterbij de transformator juist de belasting van kabels en trafo's het meest reduceren (Enexis, 2024).

CE Delft (2023) en Witteveen+Bos schatten dat thuisbatterijen pieken in elektriciteitsafname met 5–15% kunnen reduceren, en pieken in opwek met 5–25%, afhankelijk van de combinatie van PV, elektrische voertuigen en warmtepompen in de woning. De meeste residentiële systemen kunnen ongeveer twee uur piekvermogen overbruggen. In de zomer is het effect groter, omdat de batterij dan vaker vol geladen is door hogere zonne-opwek. In de winter is de bijdrage beperkt: er valt dan simpelweg minder te laden. Aangezien de koude winterperiodes leidend zijn voor de maximale piekvraag die op het transformatorstation terechtkomt, zal dit het potentieel van piekreductie en daarmee gepaarde besparing op netuitbreiding beperken.

Wat zijn specifieke randvoorwaarden voor aansturing van thuis- en buurtbatterijen?

Het piekreducerende effect neemt toe wanneer batterijen gecoördineerd worden aangestuurd via een Energy Management Systeem (EMS) of op wijkniveau via een aggregator. Dynamische of kwartier-gebaseerde tarieven die sturen op lokale netwaarden versterken dit effect. Zolang de salderingsregeling van kracht is, blijft het financieel aantrekkelijk om terug te leveren in plaats van lokaal op te slaan, wat de adoptie van batterijen vertraagt. Beëindigen van salderen en het oplossen van dubbele energiebelasting op opslag zijn daarom randvoorwaardelijk voor grootschalige inzet. Verder zijn de type nettarieven of contracten die sturen op piekvermogen bepalend voor de mate van piekreductie of zelfs piekverhoging. Wanneer batterijen primair op energiemarktprijzen reageren, kan laden plaatsvinden tijdens hoge lokale netbelasting, waardoor pieken juist toenemen. Marktgestuurde aansturing zonder netbewuste prikkels kan daardoor juist tot verplaatsing naar een ander congestiemoment leiden, door gelijktijdig gedrag in vraagsturing. Dit risico zal groter zijn naar mate de adoptie van de technologie toeneemt.

Onderzoek laat zien dat een groot aandeel van bewoners bereid⁷ is om 'flexibiliteit te leveren'. In 80% tot 92% van de gevallen waarin flexibiliteit ontsloten zou kunnen worden, lijken mensen bereid om die te leveren. Uit een studie van TNO blijkt dat mensen bereid zijn tot verplaatsen of uitstellen van de energievraag onder randvoorwaarden: behoud van comfort, transparantie over energiekosten en -besparing en eenvoudige bediening (TNO, 2024). De bereidheid hangt samen met beloning. Een financiële beloning is de meest gekozen reden om flexibiliteit te leveren. Verder bleek uit de studie dat een groter bewustzijn onder consumenten van het congestievraagstuk kan bijdragen aan de bereidheid van consumenten om flexibiliteit te delen. Ook blijken respondenten meer bereid om flexibiliteit te leveren vanuit het laden van een auto, naarmate men meer ervaring heeft met een elektrische auto.

Aansturing van warmtebatterijen

Wat is aansturing van warmtebatterijen?

In deze studie maken we onderscheid tussen warmteopslag in:

- Buffervaten bij individuele warmtepompen: relatief kleine warmwaterbuffers (orde 100–300 liter) die direct gekoppeld zijn aan één warmtepomp, primair bedoeld voor comfort (tapwater, ontdooicyclus) en kortdurende buffering (uren). De effecten van buffervaten bij warmtepompen worden genoemd in 4.1.1.2.

⁷ Dit is onderzocht via *experience sampling*, waarbij deelnemers de vraag kregen of ze hypothetisch gebruik van apparaten uit zouden willen stellen op basis van verzoeken via een app op verschillende momenten van de dag.

- Warmtebatterijen: thermische opslagsystemen met een grotere capaciteit of andere technologie (bijvoorbeeld Phase Change Materials (PCM) of thermochemische opslag), op woning-, gebouw- of wijkniveau, die meerdere uren tot dagen kunnen overbruggen en expliciet zijn ontworpen voor flexibiliteit en netontlasting (TNO, 2024; CE Delft, 2020).

Warmtebatterijen zijn een verzamelterm voor thermische energieopslag en omvatten zowel conventionele warmwaterbuffers (lage- en middentemperatuur) als hogetemperatuuropslag (HTO). Aansturing van warmtebatterijen kan bijdragen aan het verlagen van elektrische pieken, met name in all-electric woningen met warmtepompen. Deze systemen kunnen autonoom worden beheerd door bewoners of huishoudens, maar voor effectieve netontlasting en integratie in het energiesysteem is collectieve of gecentraliseerde sturing gewenst, bijvoorbeeld door een beheerder, warmtenet-exploitant of aggregator. Zo kunnen warmtebatterijen naast comfort en zelfconsumptie ook fungeren als flexibele buffer voor vraag- en aanbodpieken, en bijdragen aan stabiliteit van elektriciteits- en warmtenetten. TNO's Innovatieroadmap Warmteopslag (2024) en CE Delft (2023) tonen dat thermische opslag een effectieve manier is om het net te ontlasten door vraag en aanbod van elektriciteit beter te spreiden.

Wat is de potentie van aansturing van warmtebatterijen?

De adoptie van warmtebatterijen hangt samen met de uitrol van elektrische warmtepompen. Uit de RVO-netimpactanalyse (2025) blijkt dat de gelijktijdige vermogens van warmtepompen gemiddeld 1,7–3,3 kW bedragen. Wanneer 20–30% van de warmtepompen in 2040 wordt uitgerust met een warmtebuffer van 20–30 kWh_{th}, komt dit neer op circa 0,3 tot 1 miljoen geïnstalleerde systemen.

Volgens TNO en CE Delft kan thermische opslag het elektrisch piekvermogen van warmtepompen met 20–40% verlagen, afhankelijk van de grootte en het type opslag en de regeling. De piekreductie is het grootst in de winter, wanneer warmtevraag en gelijktijdigheid hoog zijn, en lager in de zomer, wanneer de opslag vooral wordt benut om overtollige zonnestroom op te slaan.

Buffervaten bij individuele warmtepompen zijn met name effectief voor het kortdurend afvlakken van de dagelijkse avondpiek: met enkele kWh_{th} opslag kan de warmtepomp één tot enkele uren minder of niet draaien in de uren 17:00–20:00, mits de woning goed geïsoleerd is en de sturing comfort bewaakt. Warmtebatterijen met grotere capaciteit kunnen daarnaast vraagprofielen over meerdere dagen beïnvloeden: bij koude perioden kunnen warmtepompen in daluren of bij hoge duurzame productie extra warmte laden, waarna in meerdere opeenvolgende piekuren of zelfs dagen minder elektrisch vermogen nodig is (TNO, 2024); (Delft, 2023).

Voor het elektriciteitsnet betekent dit dat buffervaten vooral bijdragen aan het verminderen van de hoogte van de dagelijkse piek, terwijl grotere warmtebatterijen zowel de hoogte als de duur en frequentie van piekbelasting op transformatorstations kunnen beperken.

Wat zijn specifieke randvoorwaarden voor aansturing van warmtebatterijen?

Warmtebatterijen functioneren het best in combinatie met slimme warmtepompregeling en dynamische energietarieven of tijdsafhankelijke nettarieven die daluren stimuleren. Vaste tarieven bieden huishoudens geen prikkel om buiten piekuren warmte te laden. De technologie vraagt beperkte gedragsverandering, maar heeft baat bij ondersteuning via regelingen zoals de ISDE en integratie in EMS-systemen. In combinatie met PV, warmtepompen en elektrische opslag kan de inzet van warmtebatterijen leiden tot piekreductie, vooral in winterse piekuren.

4.1.2 Energiegemeenschappen

Wat zijn energiegemeenschappen?

Energiegemeenschappen kunnen een rol spelen om de interventies uit voorgaande paragrafen in woonwijken te implementeren en coördineren op lokale schaal. Energiegemeenschappen zijn organisaties die ten behoeve van haar leden, vennoten of aandeelhouders activiteiten (o.a. op de energiemarkt) verrichten. Ze hebben als hoofddoel het bieden van milieuvoordelen of economische of sociale voordelen aan haar leden of hun omgeving. (Art.1.1 Energiewet, 2026). Energiegemeenschappen kunnen verschillende activiteiten uitvoeren die bijdragen aan betere benutting van het net en aan het lokaal bij elkaar brengen van productie, gebruik en opslag, zoals energiedelen, flexibiliteit leveren, vraagresponso bij leden stimuleren en het aanbieden van die flexibiliteit op verschillende energiemarkten. De afgelopen decennia zijn energiecoöperaties⁸ met name actief geweest op het gebied van energieproductie (wind en zon) en energiebesparing.

Wat is de potentie van energiegemeenschappen?

Energiegemeenschappen worden gezien als partij die vanwege hun lokale inbedding en vertrouwen van hun leden afspraken kunnen maken over aanbod en energiegebruik in een gebied (TNO, 2025). Ze kunnen daarmee een rol spelen in de implementatie en coördinatie van de interventies uit de voorgaande paragrafen in woonwijken. Van activiteiten zoals energiedelen en vraagresponso bundeling wordt verwacht dat het kan bijdragen aan een hoger gelijktijdigheidspercentage tussen lokale opwek en lokaal gebruik.

Netbeheerders geven aan de potentie van energiegemeenschappen te zien. Met name wanneer een gemeenschap zich bevindt binnen een lokaal netgebied. Zo ziet Enexis bijvoorbeeld dat energiegemeenschappen een rol spelen in duurzame energieproductie, maar dat ze ook vaak betrokken zijn bij transitieplannen voor warmte en mobiliteit in een buurt. *“Energiegemeenschappen kunnen gezien worden als een katalysator voor flexibiliteit bij (groepen) individuele klanten. Dit kan in principe helpen om netcongestie te voorkomen of op te lossen. Met als belangrijke voorwaarde dat de energiegemeenschap zich bevindt binnen een lokaal (net)gebied, anders biedt het te weinig voordelen voor de huidige netsituatie.”* (Enexis, 2025).

Wat zijn specifieke randvoorwaarden voor energiegemeenschappen?

Met ingang van de Energiewet ontstaan meer mogelijkheden voor energiegemeenschappen om ook flexibiliteitsactiviteiten te ontwikkelen en lokaal energie te delen. Voor een grotendeels top-down en gecentraliseerd energiesysteem vereist marktdeelname van gemeenschappen veranderingen in de organisatie van dit systeem, zoals minder afhankelijkheid voor afnemers van één leverancier (zie bijvoorbeeld (Wieczorek, et al., 2024)). Er zijn nog verschillende randvoorwaarden waaraan voldaan moet worden om activiteiten zoals energiedelen en flexibiliteitsactiviteiten van energiegemeenschappen tot ontwikkeling te laten komen (TNO, 2025). Zo is samenwerking tussen netbeheerders, gemeenten en energiegemeenschappen essentieel, is er behoefte aan (financiële) ondersteuning in verschillende fasen van ontwikkeling en leeft ook de verwachting dat de ontwikkeling van een markt aan dienstverleners en adviseurs bij kan dragen aan de ontwikkeling van de nieuwe activiteiten door energiegemeenschappen. Voor de ontwikkeling van energiedelen en

⁸ Energiegemeenschappen worden vanaf ingang van de Energiewet (2026) formeel erkend als speler in het energiesysteem. Ze kunnen verschillende juridische vormen aannemen, waaronder die van een coöperatie. Een deel van de bestaande energiecoöperaties zullen gaan voldoen aan de eisen die worden gesteld aan een energiegemeenschap, zoals zeggenschap voor leden en niet gericht op het maken van winst maar op milieu, economische en sociale doelen.

vraagrespons speelt specifiek dat er momenteel geen/weinig financiële prikkels zijn om deze activiteiten te ontwikkelen of ermee bij te dragen aan het beter benutten van het net.

4.1.3 Warmtenetten in de gebouwde omgeving

Wat zijn warmtenetten?

Warmtenetten brengen warm water, opgewarmd door een warmtebron, naar woningen via een buizennetwerk. In de woningen hangt een afleverzet. Afhankelijk van de temperatuur van de warmtebron zijn er collectieve en/of individuele warmtepompen en boilers nodig om de temperatuur 'op te krikken' voor verwarming van woningen en tapwater. Hoge temperatuur warmtebronnen zijn bijvoorbeeld afvalverbrandingscentrales of gasverbranding. Andere warmtebronnen zijn bijvoorbeeld restwarmte van industrie, aardwarmte, rivieren of plassen en biomassa. Wanneer warmtenetten gasloos worden voorzien van warmte, bieden ze een manier om woningen aardgasvrij te verwarmen.

Sommige warmtenetten zijn ook geschikt om in de zomer mee te koelen door juist koud water door de leidingen te vervoeren. Om de impact van warmteoplossingen op netinvesteringen te vergelijken, is het niet alleen van belang om de temperatuur van de warmtebron en het de technologie op de warmte op te waarderen van belang, maar om ook de koelingsvraag mee te nemen.

Wat is de potentie van warmtenetten voor besparingen op netinvesteringen?

Warmtenetten worden gezien als alternatief voor het verwarmen van woningen met een individuele warmtepomp en als een manier om de elektriciteitsvraag voor warmte omlaag te brengen en daarmee de netimpact van de warmtevraag te verlagen. Er zijn verschillende studies die beargumenteren dat warmtenetten tot lagere nationale kosten leiden, onder andere vanwege kosten voor netverzwaring die in alternatieve scenario's (met warmtepompen) nodig zouden zijn (Berenschot, 2024) (Royal HaskoningDHV; WarmtelinQ, 2025) (CE Delft, 2024). CE Delft (2024) berekende voor drie voorbeeldbuurten de impact van drie scenario's op de nationale kosten, extra elektriciteitsvraag en extra piekvraag. CE Delft vergeleek scenario's met adoptie van *all electric* warmtepompen of hybride warmtepompen⁹ met een scenario waarin in 2030 1,3 miljoen woningequivalenten zijn aangesloten op een warmtenet die warmte op midden- of hoge temperatuur levert¹⁰, in buurten waar volgens de Startanalyse uit 2020 warmtenetten de laagste kosten hadden. Ze concludeerden dat er in de warmtepomp-scenario's 6 PJ meer elektriciteit nodig is dan in het scenario waarin 1,3 miljoen woningequivalenten wel zijn aangesloten op een warmtenet. Rekening houdend met gelijktijdigheid, verwachtte CE Delft een extra piekvraag van 1 GW ten opzichte van de situatie waarin alle 1,3 miljoen woningequivalenten wel overgaan op een warmtenet. Dit leidt volgens hen tot extra netverzwarkosten voor de netbeheerder van 35-38 miljoen euro. Ze maken gebruik van kengetallen voor piekvermogen en gelijktijdigheid van de netbeheerders. Ze gaan ervanuit dat collectieve warmtepompen worden aangesloten op het MS-net.

Verschillende auteurs zetten echter vraagtekens bij de aannames in de studies van Berenschot, Royal Haskoning en CE Delft. Zo is er discussie over de aannames rond de netimpact bij verschillende typen warmtenetten. De potentie voor kostenbesparingen op netverzwaring vanwege toepassing van warmtenetten verschilt sterk per locatie en is van een aantal factoren afhankelijk: locatie van de warmtebron, temperatuur van de warmtebron (op maar weinig plekken is een duurzame hoge temperatuur warmtebron aanwezig) en de temperatuur van het warmtenet, type warmtepompen die worden ingezet, het veronderstelde piekvermogen van de warmtepompen, aanstuurbaarheid van de warmtepompen, de

⁹ In aanvulling op 315 woningequivalenten die op een warmtenet zijn aangesloten in 2040, aangezien dat het aantal is wat gehaald wordt als met het tempo ten tijde van de studie woningen aangesloten blijven worden.

¹⁰ Ze nemen zowel HT, MT als LT bronnen mee in hun analyses.

elektriciteitsbronnen, en uiteraard de te verwarmen woningen en diens isolatiegraad. Het verschilt per wijk wat voor warmtebronnen aanwezig zijn en welk type warmtenet dus een mogelijkheid is. De inpassing van het totale collectieve warmtesysteem (bronnen, eventueel aanvullende warmtepompen, pompen voor de infrastructuur en eventueel opslag) in het elektriciteitsnet is zeer bepalend voor de impact op de elektrische infrastructuur.

Ook is het lastig om kosten voor netverzwaring toe te rekenen aan warmte-oplossingen voor woningen. Per locatie zijn veel factoren die invloed hebben op de noodzaak tot netverzwaring los van de warmtevraag. Veel studies baseren zich op de Startanalyse van het PBL om kosten voor netverzwaring in scenario's met en zonder warmtenetten te berekenen. Het PBL brengt echter enkel de kosten voor netverzwaring in kaart als gevolg van een aardgasvrije strategie (Polen & Blok, 2025). Hier wordt geen rekening gehouden met ontwikkelingen in bijvoorbeeld mobiliteit (elektrisch laden), elektrisch koken, koelen en zon-PV, die ook tot netverzwaring leiden. (Polen & Blok, 2025).

Verder is er discussie rond aannames over de netimpact van warmtenetten *ten opzichte van* alternatieven zoals scenario's met warmtepompen. De netimpact van warmtepompen wordt bepaald door een groot aantal factoren, waaronder vraagreductie door isolatie, comfortverlies, klimaatverandering en bijkomende warmte en koudevraag, efficiëntie van de warmtepompen (en ontwikkelingen daarin), vraagsturing van warmtepompen om dagfluctuaties te voorkomen (bijvoorbeeld via dynamische tarieven), gelijktijdigheid van warmtepompen¹¹, vraagsturing in andere sectoren en de toepassing van lokale opslag van elektriciteit en warmte, collectief of individueel (TNO, 2025) (Dijkstra, Kopányi, Montfoort, & Mulder, 2025), (Schilt, 2024). Huidige inschattingen voor de netimpact van warmte-alternatieven (ten opzichte van een warmtenet) nemen hooguit een deel van deze factoren mee. Ook blijkt uit een praktijkstudie dat de netimpact van individuele warmtepompen in de praktijk lager lijkt te zijn dan de cijfers waarmee eerdergenoemde studies rekenen (Merosch, 2024).

Wat zijn randvoorwaarden voor de ontwikkeling van netvriendelijke warmtenetten?

Gezien de discussie over de netimpact van warmtenetten, beschrijven we hier zowel aanbevelingen voor de ontwikkeling van netvriendelijke warmtenetten, als algemene randvoorwaarden om de ontwikkeling van warmtenetten te stimuleren.

Randvoorwaarden voor ontwikkeling van netvriendelijke warmtenetten:

- Sturing en buffering bij grote systemen: met name de netimpact van centrale warmtepompen, vooral bij grotere systemen, blijft substantieel en vereisen sturing en buffering (Vliet, Suilen, & Wurpel, 2025).
- Aanstuurbaarheid van de warmtepompen. Inrichting en aansturing van zowel collectieve als individuele warmtepompen in warmtenetten is cruciaal om netimpact van warmtenetten (lage en midden temperatuur) te verminderen. Dat kan gaan om individuele aansturing, bijvoorbeeld op dynamische prijzen of nettarieven of collectieve aansturing, zie bijvoorbeeld het Smart Thermal Grid in H5.
- Lokale regie als randvoorwaarde. De aankomende Wet collectieve warmte (Wcw) stelt dat warmtenetten een publiek meerderheidsbelang moeten krijgen. Maar ook met publiek eigendom is er geen zekerheid dat op lokale publieke belangen gestuurd wordt, waardoor

¹¹ Er zijn verschillende studies die aangeven dat de gelijktijdigheid én vermogensvraag van individuele warmtepompen, in de praktijk lager zijn dan de cijfers waarmee in de eerdergenoemde studies gerekend wordt (Merosch, 2024)

het niet duidelijk is of en hoe de decentrale voordelen die hier beschreven worden geïmplementeerd zullen worden. Lokale regie kan die belangen beter waarborgen.

Er zijn ook randvoorwaarden voor de ontwikkeling van warmtenetten in het algemeen.

- Studies geven aan dat er extra investeringen vanuit de overheid nodig zijn, gericht op zowel warmtebedrijven als de consument. Financieel komen zowel grootschalige als kleinschalige warmtenetten niet rond.
- Consistentie in het beleid en de subsidiëring voor warmteoplossingen. Ook collectieven hebben ondersteuning nodig in de inrichting en governance van kleinschalige warmtenetten.
- Meer transparantie in het onderzoek waarin verschillende warmtenetten en andere warmte-oplossingen met elkaar worden vergeleken. Aannames over kosten voor verschillende typen collectieve versus individuele warmte-oplossingen zijn in veel studies niet transparant en verschillen van elkaar. Ook komen kosten in de verschillende warmte-scenario's bij andere partijen terecht. Dat maakt vergelijken lastig.
- Verder onderzoek naar de benodigde investeringen in geld, ruimte en arbeidskrachten voor verschillende collectieve en individuele warmte-oplossingen.
- Kennisuitwisseling over de verschillende collectieve (en individuele) warmte-oplossingen en de lokale randvoorwaarden voor de ontwikkeling.

4.1.4 Conclusie decentrale interventies in de gebouwde omgeving

De kwantitatieve inzichten uit de in dit hoofdstuk beschouwde aanvullende oplossingen voor flexibiliteit aan de kleinverbruikerszijde laten zien dat deze een substantiële bijdrage kunnen leveren aan het beperken van netverzwaring. De tabel hieronder vat een aantal kentallen uit de literatuur over verwachte adoptiegraad en mogelijke piekreductie van deze interventies weer. Deze cijfers geven uitsluitend de orde van grootte van de beschikbare flexibiliteitsmiddelen weer. Ter referentie: in de besparingsberekeningen van BCG zorgen alle interventies bij elkaar voor ca. 16GW potentiële reductie van de piekvraag in 2040. De daadwerkelijke reductie van deze interventies hangt af van de mate waarin deze middelen netbewust worden aangestuurd, van de beschikbare buffergrootte en van tarief- en marktprikkels die sturen op piekvermogen in plaats van alleen op energieprijs.

Tabel 4.1: Kentallen uit de literatuur over verwachte adoptiegraad en mogelijke piekreductie van de besproken interventies

Interventie	Verwachte adoptie	Piekreductie (kentallen)
Thuis-/buurtbatterijen	4–18 GWh opslagcapaciteit (≈ 0,4–1,8 miljoen systemen) in 2040	5–15% reductie van afnamepieken, 5–25% reductie van opwekpiek; 2 uur afvlakking per cyclus
Warmtebatterijen	0,3–1,0 miljoen systemen met 20–30 kWh _{th} opslag in 2040	20–40% reductie van warmtepomp-piek, vooral in winterse piekuren
V2G/V2H	Maximaal 2,5 GW beschikbaar vermogen in 2040	1-2 kW teruglevering gemiddeld per huis voor 100 huishoudens gecombineerd
Laadpunten en EVs	+/- 3,5 miljoen laadpunten in 2040 (Elaad) 2040: 5 tot 9 miljoen batterij-elektrische personenauto's (Elaad)	10–20% reductie van wijkpiek bij slim laden in gebieden met hoge EV-dichtheid; tot 40% in pilots met V2G bij optimale sturing

Interventie	Verwachte adoptie	Piekreductie (kentallen)
Warmtepompen	Cijfers 2030: 2,1 miljoen warmtepompen in 2030, waarvan twee derde all-electric (DNE Research, 2025). TenneT verwacht dat in 2030 warmtepompen in woningen optellen tot 2.5 - 3.5 GW nieuwe piek elektriciteitsvraag. In 2021 was 17% van de warmtepompen verbonden met het internet. 77% kon in theorie aangesloten worden op het internet.	10–20% reductie van warmtepomp-piek zonder extra buffervat; 20–40% reductie met buffervaten van 200–500 liter, afhankelijk van isolatie en regeling
Warmtenetten	1,3 miljoen woningequivalenten in 2030	Tot 1GW piekreductie t.o.v. scenario met warmtepompen *dit is sterk afhankelijk van aannames in zowel de warmtenettenscenario's als de warmtepompen scenario's

De gerapporteerde piekreductie varieert tussen 5 en 15% voor afnamepieken en 5–25% voor terugleverpieken bij elektrische batterijen, 10–20% op wijkniveau (en tot 40% bij optimale sturing) voor V2G/V2H, en 20–40% voor het elektrisch piekvermogen van warmtepompen door inzet van warmtebatterijen. Deze bandbreedtes beschrijven het technisch potentieel onder optimale of gecoördineerde sturing. In de praktijk kan de gerealiseerde piekreductie lager uitvallen wanneer comfortinstellingen, beperkte buffercapaciteit, individuele (in plaats van collectieve) sturing of tariefstructuren leiden tot gelijktijdig gedrag tijdens andere uren. Zonder netbewuste coördinatie kunnen sommige interventies zelfs tot secundaire pieken leiden.

Samengevat tonen deze waarden dat gecoördineerde aansturing van decentrale opslag en apparaten een belangrijke rol speelt in het beperken van piekvermogens en het uitstellen of voorkomen van kostbare infrastructuuruitbreidingen. Het gezamenlijke effect ontstaat doordat deze interventies zowel het maximale piekvermogen per aansluiting beperken als de gelijktijdigheid van belasting in een wijk verlagen, waarmee de dimensionerende piek op kabels en transformatorstations wordt gedrukt en de benodigde netcapaciteit afneemt. Belangrijk om te noemen dat de genoemde bandbreedtes het technisch potentieel betreffen. De in de praktijk realiseerbare piekreductie hangt sterk af van adoptie, beschikbaar buffervolume, coördinatie en tariefprikkels, menselijk gedrag, en valt doorgaans lager uit dan het technisch potentieel.

Binnen de gebouwde omgeving wordt in de meeste studies de nadruk gelegd op woningen. De utiliteitsbouw (gebouwen zoals scholen, winkels en ziekenhuizen) is een categorie waar nog weinig onderzoek naar gedaan is, terwijl ze wel zorgt voor ongeveer 20% van de vraag van klein- en grootverbruikers op het laagspanningsnet. Ook bij dit type gebouwen wordt verwacht dat er steeds meer potentieel flexibel vermogen opgesteld zal staan, zoals bijvoorbeeld warmtepompen. Meer onderzoek is nodig om de potentie van decentrale interventies in deze categorie van de gebouwde omgeving goed in beeld te krijgen.

Warmtenetten hebben de potentie om de elektriciteitsvraag voor warmte aanzienlijk te verlagen en daarmee de druk op het elektriciteitsnet te verminderen. Een aantal studies laten zien dat grootschalige toepassing van warmtenetten kan leiden tot minder piekvraag (tot 1GW versus een scenario met warmtepompen) en lagere kosten voor netverzwaring, al zijn deze effecten sterk afhankelijk van lokale omstandigheden en aannames. De werkelijke

impact blijft onzeker door variaties in warmtebronnen, nettemperaturen, type warmtepompen en vraagsturing, waardoor locatie-specifieke analyses essentieel zijn.

Van potentie naar realisme

Hoewel bestaande studies inzicht geven in de algemene werking van nettarieven, is aanvullend onderzoek nodig naar de specifieke impact van verschillende tariefstructuren op piekreductie voor concrete interventies zoals warmtepompen, elektrische voertuigen, batterijen en warmteopslag. Dit betreft zowel de effectiviteit per technologie als de effecten op gelijktijdigheid en secundaire pieken in verschillende typen wijken. Welke interventie effectief is verschilt per wijk, omdat het lokaal dimensionerende piekmoment (EV-laden, warmtepompen, of teruglevering) verschilt. Flexibiliteit levert alleen kostenbesparing op netinvesteringen op wanneer zij precies op dat piekmoment wordt ingezet. Daarnaast is nadere analyse nodig naar de vraag in hoeverre verschillende flexibiliteitsopties daadwerkelijk inspelen op het lokaal dimensionerende piekmoment, omdat niet iedere interventie hetzelfde type netbelasting verlaagt.

Om te voorkomen dat de elektriciteitsvraag van warmtepompen en het laden van elektrische auto's de piek verhogen, heeft TNO in verschillende studies onderzocht hoe de stroomvraag van laadpalen en warmtepompen te verplaatsen is naar andere momenten op de dag en uitgesmeerd kan worden over een langere periode. Uit onderzoek van TNO (TNO, 2024) blijkt dat door de inzet van energieflexibiliteit en slimme apparaten netcongestie in veel gevallen kan worden voorkomen, maar soms zullen er andere of aanvullende maatregelen nodig zijn wanneer de flexibiliteit niet voldoende zal zijn.

Nettarieven en financiële prikkels bepalen in belangrijke mate hoe flexibiliteit wordt ingezet. Volumetarieven sturen primair op totaalverbruik en nauwelijks op piekvermogen (CE Delft, 2023). Time-of-use-tarieven kunnen vraag uit piekuren verschuiven, maar leiden bij gelijktijdige reactie van veel gebruikers gemakkelijk tot secundaire pieken (CE Delft, 2024). Vermogenstarieven geven een directe prikkel om het maximale piekvermogen te beperken en zijn daarmee effectiever voor het reduceren van netbelasting. Dynamische, lokaal capaciteitsafhankelijke tarieven kunnen flexibiliteit richten op de momenten en locaties waar netbelasting kritisch is, maar vereisen geavanceerde meet- en sturingssystemen (Netbeheer Nederland, 2023) en vragen veel van de gebruiker.

Een aandachtspunt is dat uniforme beleidsprikkels hetzelfde gelijktijdige gedrag bij veel gebruikers kunnen stimuleren, waardoor juist nieuwe pieken ontstaan op andere momenten van de dag. Dit risico neemt toe naarmate de adoptie van warmtepompen, elektrische voertuigen en batterijsystemen verder groeit (TNO, 2024), (ElaadNL, Bidirectioneel laden en netimpact van elektrische voertuigen, 2024). Voor daadwerkelijke piekreductie op het laagspanningsnet blijken vooral vermogenstarieven en lokaal capaciteitsafhankelijke tarieven effectief; volume- of vaste dag-/nachtstarieven zijn hiervoor minder geschikt (Netbeheer Nederland, 2023).

4.2 Decentrale interventies op bedrijventerreinen

4.2.1 Flexibiliteit op bedrijventerreinen

Naar verwachting neemt het elektriciteitsverbruik van bedrijven fors toe richting 2040, voornamelijk door de elektrificatie van de industrie. De prognose is dat het elektriciteitsverbruik via het HS en MS net bijna zal verdubbelen van 74 TWh in 2024 naar 117 TWh in 2040 volgens FIEN+ (Netbeheer Nederland, 2024). Ook het opgesteld vermogen neemt volgens de prognose toe met 10,1 GW tot 2030. Dit vraagt om forse investeringen in het elektriciteitsnet.

Bedrijven op bedrijventerreinen zullen een belangrijk aandeel hebben in de toename. De 3.500 bedrijventerreinen (excl. Cluster 1 t/m 5) waren in 2020 goed voor ruim een derde (36%) van de totale elektriciteitslevering aan bedrijven Nederland (bewerking op (CBS, 2021); (TNO, 2024). Op bedrijventerreinen¹² zijn bedrijven met een diverse range aan gebruiksfuncties volgens de Basisregistratie Adressen en Gebouwen (BAG) te vinden, van kantoren tot industrie. Het energiegebruik op bedrijventerreinen bestaat grofweg uit energie voor het gebouw en voor de processen. Naar schatting wordt 71%, van het finale elektriciteitsverbruik gebruikt door industriële processen, voor aardgas is dit 61% (TNO, 2024). De elektrificatie van energiegebruik zal vooral in de elektrificatie van industriële warmte en mobiliteit een rol spelen (TNO, 2025). Daarnaast wordt een significant deel, namelijk 16% van het aardgas gebruikt voor omzetting, bijvoorbeeld in een Warmte-Kracht Koppeling (WKK).

Bedrijven op bedrijventerreinen kunnen flexibiliteit leveren op verschillende manieren. Zij kunnen energie bufferen met opslag en zo hun vraag verschuiven, zij kunnen elektriciteit omzetten naar warmte of waterstof en ze kunnen vraagrespons leveren, door tijdelijk de elektriciteitsvraag of productie aan te passen. Deze maatregelen kunnen op verschillende niveaus geleverd worden. Zo kunnen bedrijven op individueel niveau binnen de huidige aansluiting en energiecontract flexibiliteit leveren of binnen de huidige aansluiting met een alternatief contract, daarnaast is het ook mogelijk om collectief flexibiliteit te leveren. Er bestaan verschillende vormen van collectief flexibiliteit leveren, dit kan met een groepscontract, middels samenwerken op de elektriciteitsaansluiting, en het kan georganiseerd worden op een energiehub. Per bedrijf kunnen meerdere manieren van flexibiliteit leveren worden toegepast. En flexibiliteit leveren kan aan de vraag- en opwekkant.

In het kader van het IBO zijn door BCG de flexibiliteitsinterventies opgenomen die focussen op de individuele bedrijven, o.a. het (strenger handhaven van) energie besparen. De flexibiliteit uit flexcompensatie voor bedrijven verwacht BCG voor de helft via non-firm ATO te ontsluiten en verder via CAPEX subsidies. Het afschakelen van laden van de logistiek wordt aangenomen volledig via non-firm ATO¹³ te ontsluiten. Voor opwekcongestie heeft BCG zon-PV en wind curtailment meegenomen. In de baseline zijn ook achter-de-meter oplossingen en systeembatterijen opgenomen, in de prognoses wordt voor elke verdubbeling in verbruik rekening gehouden met een toename van 50% in transportvermogen (Netbeheer Nederland,

¹² In de praktijk is er op bedrijventerreinen een mix van kleinverbruikers en grootverbruikers. Daarom hebben we het in dit stuk over 'flexibiliteit op bedrijventerreinen' in plaats van 'flexibiliteit bij grootverbruik'.

¹³ Een non-firm ATO is een aansluit- en transportovereenkomst waar de transportcapaciteit niet altijd kan worden gebruikt. Bedrijven krijgen bij dit contract korting op de transportkosten.

2024). De achter-de-meter oplossingen zijn niet toegelicht in de studie, het is dus onduidelijk welke interventies zijn meegenomen en voor welke piekreductie deze zorgen.

De potentie van flexibiliteit van bedrijven is in verschillende studies becijferd. Het gaat hierbij om nationale cijfers die een beeld geven van de rol die bedrijventerreinen kunnen spelen in het vergroten van flexibiliteit. Deze nationale cijfers zijn niet één op één te relateren aan (financiële) besparingen op netverzwaring, omdat regionale verschillen bepalend zijn voor de lokale kosten van netverzwaring. Daarnaast hebben de interventies overlap met elkaar en met de scenario's uit de BCG-studie. Hieronder wordt eerst het nationale beeld geschetst.

Een studie van Merosch en CE Delft onderzocht het potentieel van een aantal oplossingen voor netcongestie bij grootverbruikers¹⁴ (CE Delft & Merosh, 2024). Voor 2030 wordt het potentieel van sturing achter de meter op 1,5 tot 2,9 GW geschat. Het potentieel van flexibel transportvermogen via een capaciteitsbeperkend contract (CBC) of andere alternatieve transportrechten worden geschat op 2,2 tot 5,1 GW. Het potentieel voor elektriciteitsconversie is geschat op 2 tot 2,5 GW en elektriciteitsopslag op 0,25 tot 0,5 GW. Deze potentiëlen zijn niet additief: een capaciteitsbeperkend contract kan extra potentieel bovenop sturing achter de meter creëren, maar overlapt met het geschatte potentieel van sturen achter de meter. Groepscontracten en energiehubs hebben weer een hoger potentieel, geschat op 3,7 tot 7,3 GW, omdat ze sturing achter de meter, conversie en opslag op een groter geheel toepassen (CE Delft & Merosh, 2024). Aan invoedingscongestie zijn cable pooling en een directe lijn vergelijkbaar in potentieel, tot bijna 2 GW.

De drie hoofdcategorieën van flexibiliteit (industriële vraagrespons, opslag, en conversie) bespreken we hieronder. Per categorie worden de verschillende toepassingen toegelicht en waar mogelijk is een indicatie van het piekreductie potentieel gegeven. Dit is op nationaal niveau of cases gebaseerd. De praktijk casussen zijn opgenomen om op lokaal niveau een beeld te geven van de toepassing. Waar van toepassing zijn specifieke randvoorwaarden beschreven. Daarnaast lichten we de organisatievorm 'energiehub' verder uit, hierin komen verschillende interventies samen gericht op collectieve oplossingen.

Industriële vraagrespons

Wat is industriële vraagrespons?

Industriële vraagrespons (DSR) betreft het tijdelijk en gecontroleerd aanpassen van het elektriciteitsverbruik van industriële installaties in reactie op signalen uit het energiesysteem, zoals prijzen, congestiesignalen of afspraken met netbeheerders. Dit kan variëren van het kortstondig verlagen van het vermogen van installaties tot het verschuiven van productie naar andere uren of het tijdelijk stilzetten van processen.

I. Afhankelijk van de proceskarakteristieken kan dit bestaan uit het kortdurend terugschakelen van installaties, het verschuiven van productie naar andere uren waarbij de output later wordt ingehaald, of het tijdelijk volledig uitschakelen van apparatuur. Het laden van elektrische voertuigen op bedrijventerreinen zal tot een grote groei in opgesteld vermogen leiden (TNO, 2025). Naast personenwagens gaat dit in de logistieke sector ook om trekker-opleggers, bakwagens en bestelwagens. Het verschuiven van het laden van elektrische voertuigen (EV) door langzamer of niet te laden op momenten met piekvraag, of net wel te laden op moment met piekaanbod kan tot piekreductie op het net leiden. Deze interventie is reeds opgenomen in de BCG-studie, daarom wordt dit niet verder toegelicht. De

¹⁴ Niet alle bedrijven op bedrijventerreinen zijn grootverbruikers. De meeste bedrijventerreinen hebben een mix aan groot- en kleinverbruikersaansluitingen. Ook liggen niet alle grootverbruikers op een bedrijventerrein. Omdat er wel overlap is kiezen we ervoor om deze studie toch in dit onderdeel te citeren.

flexibiliteit die daarmee beschikbaar komt is sterk afhankelijk van de technische kenmerken van processen, de mate van continue productie, de veiligheidsmarges en de mogelijkheid om productie later in te halen (DNV GL, 2020).

Wat is de potentie van industriële vraagrespons?

Eerdere studies laten zien dat industriële vraagrespons een aanzienlijk technisch potentieel heeft om het elektriciteitssysteem te ondersteunen, met name tijdens pieken en perioden van schaarste. (PWC, 2021) schat het theoretische reductievermogen van de industrie op circa 3,4 GW. (DNV GL, 2020) komt, op basis van een brede inventarisatie van procesflexibiliteit, tot een potentieel van ongeveer 4 GW in 2030. TenneT hanteert een meer conservatieve raming van 1,7 GW in 2030, oplopend tot circa 2,0 GW in 2035, waarbij wordt uitgegaan van een inzetbaarheid van ongeveer 20% van het geïnstalleerde industriële vermogen (TenneT, 2025).

De systeemwaarde van industriële vraagrespons ligt vooral in het verminderen van piekvermogen en het beperken van de inzet van dure en CO₂-intensieve piekproductie. Industriële flexibiliteit kan vraag verlagen op momenten waarop het net wordt belast door gelijktijdige warmtepompvraag, EV-laden of beperkte beschikbaarheid van hernieuwbare opwek. Daarmee ondersteunt DSR zowel het beheersen van congestie als het verminderen van de behoefte aan netverzwaring. Het potentieel voor piekreductie verschilt per sector. Met name elektrochemische processen, compressietechniek en koel-/vriesinstallaties kunnen over korte perioden significante vermogensreductie leveren, terwijl continue thermische processen beperkte bandbreedtes kennen voor piekreductie.

Voor het elektriciteitssysteem ligt de waarde van DSR vooral bij het reduceren van nationale systeem pieken en regionale middenspanningspieken op bedrijventerreinen, waar industriële aansluitingen een substantieel aandeel van de lokale belasting vormen. In dergelijke gebieden kan vraagrespons de belasting op transformatoren en MS-ringen tijdelijk verlagen en daarmee bijdragen aan het beperken of uitstellen van netverzwaring.

De bijdrage van industriële vraagrespons aan het beperken van netverzwaring is locatieafhankelijk. Op bedrijventerreinen waar industriële aansluitingen dominant zijn, kan DSR pieken op middenspanning effectief reduceren en daarmee investeringen uitstellen. Voor de leveringszekerheid op nationaal niveau blijft industriële vraagrespons wel een belangrijke bron van flexibiliteit tijdens perioden van schaarste of lage productie van wind en zon.

Wat zijn de randvoorwaarden van industriële vraagrespons?

De inzet van industriële vraagrespons wordt begrensd door technische, economische en regelgevende factoren. Veel processen hebben slechts beperkte bandbreedtes voor piekreductie vanwege continuïteit, veiligheid en productkwaliteit, waardoor flexibiliteit alleen binnen strikte operationele grenzen mogelijk is (DNV GL, 2020). Daarnaast ontbreken stabiele inkomstenmodellen; onzekerheden over marktproducten, activatiefrequentie en vergoeding maken investeringen in flexibiliteit risicovol (TenneT, 2025). Markttoegang is eveneens een belemmering door complexe prekwificatie-eisen en beperkte standaardisatie. Ook de beperkte aansluitcapaciteit op bedrijventerreinen remt elektrificatie en daarmee het toekomstige flexibiliteitspotentieel. Bedrijven geven aan flexibiliteit te willen leveren wanneer er meer zekerheid is over infrastructuur, vergoeding en consistent beleid. De effectiviteit van industriële vraagrespons hangt bovendien af van de prikkelstructuur: zonder contractvormen of tarieven die expliciet op piekreductie sturen, wordt flexibiliteit vooral prijs-gedreven ingezet en niet noodzakelijk op de momenten waarop netbelasting het hoogst is (TNO, 2025).

Opslag

Net als in de gebouwde omgeving, kan ook op bedrijventerreinen de opslag van warmte of elektriciteit bijdragen aan het verminderen van de piekbelasting van het elektriciteitsnet. Het biedt flexibiliteit voor elektriciteits- of warmtevraag die niet verplaatst kan worden. Ook biedt de warmtekrachtkoppeling (WKK) mogelijkheden voor reductie van invoedingscongestie. In het baselinescenario is opslag met een systeembatterij op MS- en HS-net meegenomen (BCG, 2025). Elektriciteitsopslag in batterijen maakt het mogelijk om elektriciteit op te slaan voor enkele minuten tot dagen, om zo piekbelasting op het net te verminderen. Batterijen kunnen bij bedrijven achter de meter worden geplaatst, of in een energiehub worden opgenomen. Warmteopslag kan bijdragen aan piekreductie doordat het de mogelijkheid biedt om dag- of seizoensopslag toe te passen (De Boer, Smeding, & Zondag, 2025). Daarmee kunnen periodes van lage hernieuwbare energieopbrengst worden overbrugd.

Wat is de potentie van opslag?

Op bedrijventerreinen worden warmteopslag en batterijen al toegepast en nieuwe toepassingen zijn in ontwikkeling voor hogere temperaturen en opslagduur. Theoretisch kan warmte op alle temperatuurniveaus worden opgeslagen en is het technisch potentieel voor warmteopslag gelijk aan de totale industriële warmtevraag, ca. 365 PJ (De Boer, Smeding, & Zondag, 2025). Het installatie potentieel en de economische haalbaarheid ligt vele malen lager. Hieronder worden de reeds toegepaste en opkomende warmteopslag technologieën toegelicht.

Conventionele warmteopslag wordt toegepast bij batchprocessen, middels piekbuffering en warmteterugwinning. In de industrie betreft piekbuffering vaak stoomopslag, wat al commercieel wordt toegepast (De Boer, Smeding, & Zondag, 2025). Desondanks moet de stoom worden opgeslagen op hoge temperatuur en hoge druk, dit maakt dat dit niet zonder meer kosteneffectief kan worden toegepast (Trinomics B.V., 2024). Het potentieel wordt ingeschat als *een deel* van de 200 PJ energiegebruik van batchprocessen in Nederland (De Boer, Smeding, & Zondag, 2025). Warmteterugwinning wordt toegepast bij restwarmte in de industrie, het potentieel daarvan ligt een stuk lager omdat het grotere afhankelijkheden van lokale vraag en temperatuurniveau kent. Het potentieel voor warmteopslag is ingeschat op 2,6 PJ in de industrie (De Boer, Smeding, & Zondag, 2025).

De WKK is een derde toepassing die flexibiliteit kan bieden in combinatie met warmteopslag. Een WKK wordt met name gebruikt in de chemische-, voedingsmiddelen- en papierindustrie. Van de elektriciteitsproductie middels een WKK in de industrie wordt vaak de helft tot driekwart geleverd aan het elektriciteitsnet (Trinomics B.V., 2024). De voornaamste flexibiliteit is te bieden bij een invoedingscongestie. Door de warmtevraag tijdens invoedingspieken in te vullen met opgeslagen energie uit warmwater- of stoombuffers, kan de WKK (deels) worden afgeschakeld en geen elektriciteit leveren aan het net. De opgewekte warmte met een WKK in de industrie (inclusief raffinage) in 2022 was 73PJ (De Boer, Smeding, & Zondag, 2025). Deze warmtevraag is niet te koppelen aan piekreductie op het elektriciteitsnet maar geeft een beeld van de warmtevraag. Alternatieven voor opslag zijn het inzetten van andere stoomopwekkers, zoals aardgasketels (Trinomics B.V., 2024). Dit vraagt om een omschakeling van “must-run” WKK’s naar flexibel WKKs. Hierbij spelen technische en economische beperkingen.

De vierde toepassing in opkomst is een carnotbatterij waarmee warmte op hoge temperaturen over seizoenen kan worden opgeslagen. Elektriciteit wordt omgezet in warmte die wordt opgeslagen in gesmolten zout op temperaturen boven de 500 °C. De warmte kan direct gebruikt worden of op piekmomenten worden omgezet naar elektriciteit (Aalborg

Universiteit, n.d.). Vanwege de lage efficiëntie van de omzetting van warmte naar elektriciteit wordt de carnotbatterij nog weinig toegepast. Met andere opslagmedia zoals beton en gesteente, is warmteopslag ook op hogere temperaturen mogelijk.

De opslag van elektriciteit kan een belangrijke rol spelen bij piekreductie zowel voor invoedings- als afnamecongestie. De batterij wordt opgeladen op momenten van een overschot van hernieuwbare elektriciteit en de batterij kan worden ontladen op piekmomenten. De potentie voor elektriciteitsopslag wordt groter naarmate mobiliteit en warmte verder wordt geëlektrificeerd op bedrijventerreinen. Verschillende casestudies tonen de potentie aan voor piekreductie. Een casestudie op een bedrijventerrein laat zien dat de combinatie van een batterij en logistiek laadpunt tot een gereduceerde vermogensvraag van 20 tot maximaal 40% kan leiden (Budding et al., 2024). Ze becijferen dit potentieel op 250 tot 500 MW op een laadvraag van logistieke voertuigen van 1200 MW in Nederland in 2030. Een opmerking bij deze cijfers is dat piekreductie van flexibiliteit in de logistiek in de BCG-studie al is meegenomen waardoor er een gedeeltelijke dubbeltelling ontstaat. Naast de batterijopslag in combinatie met logistiek kan de elektra opslag voor industriële warmte tot aanvullende piekreductie leiden. Een case study in de aardappelverwerker realiseerde 20% piekreductie door het plaatsen van een batterij voor elektriciteitsopslag (Terpstra, 2025). Deze casestudies laten zien dat elektrische opslag bij grootverbruikers lokaal substantiële piekreductie kan realiseren, mits de batterij primair wordt ingezet op het verlagen van het maximaal afgenomen vermogen en niet uitsluitend op elektriciteitsmarktoptimalisatie.

Wat zijn specifieke randvoorwaarden voor opslag?

De effectiviteit van opslag bij grootverbruikers wordt bepaald door zowel technische als economische randvoorwaarden. Voor warmteopslag is verdere elektrificatie en kosteneffectiviteit bepalend, en zijn oplossingen voor opslag op hoge temperatuur nog opkomend, en is verdere innovatie nodig. Voor elektrische opslag zijn vooral de sturing en tariefprikkel kritisch voor de impact op netbelasting. Zonder netbewuste aansturing worden batterijen bij grootverbruikers primair ingezet op energiemarkten, wat kan leiden tot secundaire pieken op het middenspanningsnet. Daarnaast beperken contractueel vastgelegde vermogensgrenzen en aansluitcapaciteit de inzet van opslag. Opschaling vraagt daarom om duidelijke afspraken over netbewuste aansturing, passende tariefstructuren, flexibele contracten en afstemming tussen markt- en netdoelen (RHDHV, 2025). Voor invoedingscongestie zijn technologische aanpassingen aan “must-run” WKKs nodig.

Conversie

Onder conversie van elektriciteit naar een andere commodity worden als belangrijkste de omzetting van “power to heat” en “power to gas” gezien. Op momenten dat er veel hernieuwbare elektriciteit beschikbaar is kan dat worden omgezet naar warmte en gassen. De warmte of gassen kunnen worden gebufferd of opgeslagen en worden gebruikt op piekmomenten, zodat productieprocessen minder moeten worden verschoven. Ook hybride toepassingen van (back-up)capaciteit kunnen worden ingezet. Van gassen is de belangrijkste toepassing op een bedrijventerrein de omzetting naar waterstof middels een elektrolyser. Daarnaast kan elektriciteit ook worden omgezet in methaan. Op bedrijventerreinen gaat het om het elektrificeren van de warmtevraag met e-boilers, (industriële) warmtepompen, en overige 1 op 1 elektrificatie, zoals met ovens en drogers (TNO, 2025). BCG neemt in de scenario's het flexibel inzetten van een e-boiler mee, het is niet bekend hoeveel piekreductie dat oplevert in de berekeningen.

Wat is de potentie van “power to heat”?

Veel warmteprocessen in de industrie zijn aardgasgestookt. Wanneer de warmtevraag wordt geëlektrificeerd vanwege de transitie naar schonere energie, dragen deze assets bij aan een toename in de piek op het elektriciteitsnet. Door deze assets (deels) flexibel in te zetten kan deze toename in de piek worden gereduceerd en de hernieuwbare elektriciteit beter benut. Nationale cijfers over het reductie potentieel van “power to heat” op netverzwaren zijn nog niet beschikbaar. Wel geven enkele studies inzicht in welke “power to heat” technologie naar verwachting het grootste opgestelde vermogen heeft. Het opgesteld vermogen is niet gelijk aan het flexibel in te zetten vermogen. Dit is afhankelijk van de mogelijkheden van het bedrijfsproces om te bufferen, te verplaatsen of te schuiven in de productie. Een andere manier is het inzetten van hybride (back-up)capaciteit, later in dit hoofdstuk.

Volgens prognoses heeft de e-boiler in 2035 het meest opgestelde vermogens van de power to heat assets op bedrijventerreinen. Voor de e-boiler zijn de prognoses 900 MWe in 2035 (TNO, 2025). De bijdrage van de warmtepompen (industriële en gebouw gebonden) is voor 2035 bijna 200 MWe, een stuk lager dan van de e-boiler. Prognoses voor de elektrische oven ontbreken. In de KEV (2024) wordt uitgegaan van een groter opgesteld vermogen van industriële warmtepompen (namelijk 85% meer) en een vergelijkbaar vermogen voor e-boilers. Dat beperkt zich niet enkel tot bedrijventerreinen, maar is de prognose voor de hele industrie en invoeding op warmtenetten.

Wat is de potentie van “power to gas”?

De potentie van de “power to gas” is beperkt tot de industriële sectoren waar de gassen worden gebruikt. Methaan wordt voor sommige processen in de chemische industrie gebruikt. In de literatuur wordt met name de potentie van elektrolyse uitgelicht, waar bedrijven in de elektrochemische industrie gebruik van maken. Op basis van praktijkcases komt TKI Energie en Industrie (2022) tot de inschatting dat elektrochemische processen een hoog flexpotentieel van 20 tot 80% kunnen leveren. Deze flexibiliteit is te realiseren in combinatie met bufferopslag.

Wat is de potentie van hybride toepassingen?

In verschillende studies worden voorbeelden van hybride toepassingen gegeven die bij kunnen dragen aan piekreductie, zoals een WKK, een e-boiler naast een gasboiler en een hybride warmtepomp. TKI Energie en Industrie (2022) geeft aan dat tot circa 2030 hier potentie voor is op bedrijventerreinen (2022). Na 2030 zal dit naar verwachting alleen zinvol zijn bij het gebruik van groen gas. Enkele studies doen inschattingen voor het nationaal reductiepotentieel. Bijvoorbeeld door het inzetten van een industriële e-boiler naast een gasketel zou maximaal 2.2 GW reductie op kunnen leveren bij grootverbruikers (CE Delft & Merosh, 2024). Dezelfde studie verwacht een maximaal reductiepotentieel van 440 MW voor hybride warmtepompen in de utiliteitsbouw.

Wat zijn voorbeelden uit praktijkcasussen?

Enkele praktijkcasussen laten op individueel en collectief niveau de potentie voor piekreductie zien. Enkele bedrijven leveren flexibiliteit middels een e-boiler, in combinatie met een WKK of warmteopslag (TKI Energie en Industrie, 2022). Deze bedrijven leveren “tientallen MW’s” of tot 85% flexibiliteit. De tijdschaal van deze flexibiliteit verschilt. Ook in een collectieve praktijkcasus is de reductie van de netaansluiting groot. KWR becijferde voor drie bedrijventerreinen in de provincie Utrecht de impact van een power-to-X aanpak, waarbij overschotten van elektriciteit worden omgezet naar warmte en/of waterstof (KWR, 2024). De overstap van een klassieke (fossiele) naar een volledig geëlektrificeerde energievoorziening vereist een 6 tot 8 keer grotere aansluiting op het elektriciteitsnet, terwijl de Power-to-X-variant slechts een 3 tot 5 keer grotere aansluiting nodig heeft. De Power-to-X-aanpak

vermindert dus aanzienlijk de benodigde capaciteit van de netaansluiting (KWR, 2024). Zie onderstaande tabel voor een uitwerking van deze casus.

Tabel 4.2: Benodigde netcapaciteit in MWe (Provincie Utrecht) (Bron: KWR, 2024)

	Klassiek fossiel	Elektrificatie	Power-to-X
Isselt	9	48	40
Lage Weide	21	177	78
Ambacht-Nijverkamp	12	72	40

Wat zijn specifieke randvoorwaarden voor conversie?

De inzet van “power to X” is zeer sectorspecifiek en heeft daarom een beperkt potentieel op bedrijventerreinen als geheel. Met name waterstof en methaan worden voor industriële processen gebruikt. De elektrificatie van warmte heeft een prijsprikkel nodig, die momenteel nog ontbreekt. De verhouding van energiekosten voor elektriciteit en gas, inclusief transport/netwerkkosten en belastingen is in het voordeel van aardgas (De Boer, Smeding, & Zondag, 2025). Wanneer “power to X” mogelijk is om toe te passen zal een verzwaring van de netaansluiting bijna altijd noodzakelijk zijn. De casestudies laten zien dat de verzwaring beperkt kan worden door flexibele inzet. Een belangrijk aandachtspunt is dat in een meerdere (netcongestie) gebieden verzwaring überhaupt momenteel niet mogelijk is. Het flexibel inzetten van het vermogen brengt barrières met zich mee, met name omdat bedrijven de bedrijfsvoering moeten aanpassen (TNO, 2025). De inzet van hybride toepassingen is met name kansrijk voor de korte termijn.

4.2.2 Energiehubs

Wat zijn energiehubs?

Een energiehub is een slim gestuurd, decentraal energiesysteem waar hernieuwbare energieopwekking en consumptie in een specifiek gebied zoveel mogelijk op elkaar worden afgestemd (Royal Haskoning DHV, 2024). Het betreft een samenwerking tussen meerdere partijen, waarbij energiedragers op elkaar worden afgestemd en soms worden uitgewisseld, zoals elektriciteit, stoom, warmte of waterstof, vaak in combinatie met opslag en lokale opwek van energie. Deze uitwisseling en afstemming tussen bedrijven kan tot een efficiënter gebruik van energie leiden en bijdragen aan piekreductie. Het gecontracteerde vermogen op de elektriciteitsaansluiting wordt vaak vastgelegd in een groepscontract, zoals een groepstransportovereenkomst (GTO). In energiehubs worden vaak bovenstaande decentrale interventies toegepast. Op collectieve schaal kan er vaak meer impact uit deze interventies gerealiseerd worden. Energiehubs zijn dus op zichzelf geen decentrale interventie, maar wel een organisatievorm waarmee de impact van andere decentrale interventies nog opgeschaald kan worden.

Wat is de potentie van energiehubs?

De nationale overheid zet in op een groei van energiehubs in Nederland (Ministerie van Klimaat en Groene Groei, 2025). Verschillende studies kwantificeren de potentie van energiehubs, maar de potentie voor piekreductie op het vlak van decentrale interventies is nog moeilijk te concluderen. Royal Haskoning DHV identificeert 4 families van energiehubs: gebouwde omgeving, mobiliteit, bedrijventerreinen en cluster 6. Samen kunnen deze energiehubs tot 3,2 GW piekbelasting op het elektriciteitsnet verminderen tot 2030. Voor bedrijventerreinen is er een potentieel van 349 kansrijke energiehubs, wat gezamenlijk tot een verminderde piekbelasting van 1.092 MW kan leiden in 2030. Daar nemen zij

(seizoens)warmteopslag, grootschalige batterijopslag, restwarmte, zon PV, slimladers, generatoren en waterstof conversie in mee. Voor een gemiddelde energiehub wordt 2,7 megawatt piekreductie geschat (Royal Haskoning DHV, 2024).

CE Delft vindt een reductie van de piekbelasting op het net van 5-40% gebaseerd op 5 casussen. De 5 casussen zijn divers: met een klein aantal bedrijven (3 tot 6) tot een groter aantal (20), met afname- en/of invoedingscongestie. In totaal zorgen de 5 casussen voor een reductie van 14 megawatt piekbelasting: gemiddeld 2,8 megawatt per energiehub. Daarnaast nemen de totale energiekosten voor bedrijven af met 5 tot 44% en wordt er CO₂ reductie gerealiseerd. Ook deze studie preciseert dat de vermeden netinvesteringen onzeker zijn omdat netbeheerders investeringen plannen op grotere schaal. Desondanks schat deze studie dat er per energiehub mogelijk 210.000 tot 620.000 euro aan netinvesteringen kunnen bespaard worden, gebaseerd op de gemiddelde investeringen van een HS/MS-station (CE Delft, 2024). Op basis van 17 gerealiseerde groepscontracten, schat een studie van Merosch en CE Delft de potentie van ontsluiten van flexibiliteit binnen energiehub met groepscontracten in 2030 op 3,7 tot 7,3 gigawatt (gebaseerd op de maatregelen industriële vraagrespons, industriële e-boilers naast gasketels, hybride warmtepompen in de utiliteitsbouw en slim laden van logistieke voertuigen) (CE Delft & Merosch, 2024).

Tabel 4.3: Potentieelinschatting energiehub en groeps-TO 2030 (bron: CE Delft, 2024).

Maatregel	Minimaal potentieel (MW)	Maximaal potentieel (MW)
Industriële vraagrespons tot 24 uur	1260	2520
Industriële e-boilers naast gasketels	1560	3120
Hybride warmtepompen in de utiliteitsbouw	550	1090
Slim laden logistieke voertuigen	300	600
Totaal	3700	7300

Ook in enkele case studies wordt de potentie van energiehub bevestigd. Bijvoorbeeld in Lage Weide Utrecht waar het individueel gecontracteerde vermogen (GTV's) van 3300 kW kon worden teruggebracht in een GTO naar een vermogen 2200 kW (Strijker, 2025). Een andere casus van een energiehub, waar warmtepompen, batterijen en aggregaten worden gemodelleerd voor een energiehub en een referentiescenario. Deze modellering voorziet een forse piekreductie, van 44% voor 2050 voor het energiehub scenario (2,7 MW tegen 1,5 MW) (CE Delft, 2025). Een andere casus van een energiehub is op het bedrijventerrein Ecofactorij. Daar is een batterij in combinatie met een smart grid geoptimaliseerd (Lobregt, 2025). Monitoren van de temperatuurmeting van de kabels en een correctie zorgt ervoor dat daar 50% meer vermogen gevraagd kon worden met dezelfde kabels (ter illustratie: het interne piekverbruik is 18 MW geweest op een netaansluiting bij Liander van 11 MW).

Een studie van (CE Delft, 2025) kwantificeert de maatschappelijke waarden en netimpact reductie van energiehub. Daartoe stellen zij 12 archetypen op. Voor een aantal archetypen op industriële bedrijventerreinen zien zij een positieve mkba, namelijk elektrificatie op een industrieel bedrijventerrein, wat maximaal 190 MW netimpact reductie kan opleveren en lokale waterstof productie, wat maximaal 58 MW kan opleveren. De archetypen gemengd bedrijventerrein met elektrificatie, ZLT-warmtenet en logistiek hebben een negatieve maatschappelijke kosten baten analyse. Deze leveren wel netimpact reductie op, maar volgens de studie weegt dat niet op tegen de maatschappelijke kosten. Op lokaal niveau kunnen de maatschappelijk kosten-baten afwegingen verschillen.

Naast potentie voor het elektriciteitsnet, bieden energiehubs een uitkomst voor bedrijven die willen uitbreiden of verduurzamen door te elektrificeren. Zo kunnen energiehubs de rem op economische groei verminderen, waardoor bedrijven zich kunnen vestigen of uitbreiden zonder op netverzwaring te hoeven wachten. Multi-commodity energiehubs (waar verschillende energiedragers zoals elektriciteit, warmte, waterstof en opslag worden gecombineerd) worden gezien als een bouwsteen van het toekomstige, meer decentrale energiesysteem. Ze kunnen zorgen voor meer energie-onafhankelijkheid, weerbaarheid en lagere energieprijzen (Arjen Zuiderduijn, 2025). In energiehubs kunnen schaalvoordelen worden behaald en investeringskosten worden gedeeld ten opzichte van bijvoorbeeld individuele batterijen of aggregaten. Ook kunnen energiehubs zorgen voor een betere benutting van lokale opwek uit zon en wind. Ze kunnen ook meer lokale duurzame opwek mogelijk maken in gebieden met invoedingscongestie (CE Delft, 2024). Door het bundelen van aansluitingen kunnen kleinere bedrijven ook toegang krijgen tot energiemarkten en flexibiliteitsdiensten, waardoor er extra inkomensstromen ontstaan (TNO e.a., 2024). Ten slotte hebben energiehubs ook impact op het behalen van de klimaatdoelen: Royal Haskoning becijfert dat energiehubs 1,3 tot 3,9 kiloton CO₂-reductie per jaar opleveren. Daarnaast kunnen ze potentieel 1,5 tot 3,7 megaton CO₂ reduceren per jaar, en zelfs 4,8 megaton bij volledige verduurzaming van het gasgebruik¹⁵ (Royal Haskoning DHV, 2024).

Wat zijn specifieke randvoorwaarden voor energiehubs?

- **Samenwerking en governance:** Energiehubs vragen vertrouwen en goede samenwerking tussen lokale partijen, netbeheerders, bedrijven en overheden. Lokale kartrekkers en regisseurs met kennis van zaken zijn een kritieke succesfactor. Organisatiegraad, governance en juridische borging zijn nog volop in ontwikkeling en vormen soms nog belemmeringen.
- **Ruimtelijke inpassing:** Fysieke ruimte voor opwekking, opslag en infrastructuur moet beschikbaar zijn en vraagt goede afstemming met ruimtelijk beleid en gebiedsontwikkeling.
- **Juridisch kader:** Er is behoefte aan een helder wettelijk kader, vooral rond alternatieve transportrechten zoals groepstransportovereenkomsten (GTO's) of collectieve capaciteitsbeperkende contracten (C-CBC's), aansprakelijkheid en verzekeraarbaarheid. Collectieve contracten kennen vaak onduidelijke of onevenredige aansprakelijkheidsverplichtingen, wat ondernemers afschrikt. Daarnaast is standaardisatie van contractvormen bij netbeheerders wenselijk.
- **Technische randvoorwaarden:** Er zijn nog innovaties nodig in opslag, conversie (naar warmte of waterstof) en sturing. Daarnaast is duidelijkheid over netcapaciteit, nettopologie en beschikbare infrastructuur noodzakelijk. Goede data-uitwisseling, en technische tools voor simulatie en optimalisatie zijn nodig om de potentie te benutten.

4.2.3 Warmtenetten op bedrijventerrein

Wat zijn warmtenetten op bedrijventerreinen?

Warmtenetten op bedrijventerreinen bieden de mogelijkheid om warmte flexibeler aan te sturen en sluiten en daarmee bij te dragen aan de potentie van Power to X en andere flexibiliseringstools. Warmte is voornamelijk de grootste energievraag van bedrijven (TNO, 2024), waardoor ook de toepassing van flexibele sturing van warmtevraag grote impact kan hebben. Restwarmte komt hoofdzakelijk voor op bedrijventerreinen, en warmtenetten op bedrijventerreinen zijn een manier om onnodige warmte opwek te vermijden waar bedrijven

¹⁵ Dit is gebaseerd op top-down analyse met openbare data, met kanttekening dat dit niet noodzakelijk gelijk staat aan vermijden van netcongestie en verlichten van netinvesteringen. Daarvoor raadt Royal Haskoning DHV aan om in samenwerking met netbeheerders de analyses verder te ontwikkelen.

aanwezig zijn met restwarmte. Eventueel in combinatie met warmteopslag kan restwarmte worden afgevangen en getransporteerd naar andere bedrijven. Deze restwarmte komt naast hoge temperaturen bij bijvoorbeeld papier- en metaalbewerkers ook in lagere temperaturen als 'ongewenst' restproduct vrij bij datacenters en koel/vrieshuizen. Er wordt meestal gedacht aan het hergebruiken van restenergie bij deze processen, al kennen grote (cluster 5) bedrijventerreinen ook stoomnetten als manier om hoogwaardige warmte op één plek op te wekken en te transporteren naar diverse productieprocessen¹⁴.

Potentie van warmtenetten op bedrijventerreinen?

De meest concrete prognose van warmteuitwisseling komt van cluster 6 die uit lijkt te van een verdubbeling van de warmteuitwisseling in 2030, maar zij zien de elektriciteitsvraag ook 2,5x zo groot worden (Stichting Cluster Zes, 2025). In de praktijk zijn er beperkt voorbeelden van warmtenetten op bedrijventerreinen. Op de Boekelermeerpolder in Alkmaar ontvangen bedrijven warmte uit het 'klassieke' warmtenet van HVC, en bij de Duurzame Ring Heerhugowaard voeden verschillende bedrijven warmte in die andere bedrijven en woningen afnemen. Warmtenetten zijn in o.a. ontwikkeling op De Zwette in Leeuwarden en in Haarlem Waarderpolder. Er zijn ook plekken waar twee of drie bedrijven onderling warmte uitwisselen, zoals bij Warmtenet de Wildeman en tussen twee bedrijven in Almelo. In het MOOI ABLE project wordt momenteel een schaalbaar concept ontwikkeld voor kleinschalige, uitbreidbare warmtenetten op bedrijventerreinen, aan de hand van 3 concrete cases (ABLE: Versnelling kleinschalige warmtenetten bedrijventerreinen)

Randvoorwaarden?

Warmtenetten zijn voor bedrijventerreinen onder de huidige omstandigheden weinig kansrijk door lage gasprijzen en relatief hoge en variabele warmtevrage van bedrijven. De warmte moet voor gebruik in processen vaak worden opgewaardeerd middels een warmtepomp naar hogere temperaturen, wat additionele elektriciteitsvraag met zich mee brengt. Ontwikkelingen zoals de transitie naar aardgasvrij maken wel dat er nu al bedrijventerreinen worden aangelegd die geen aardgas aansluiting meer krijgen, en hier zijn bedrijven dus afhankelijk van (vaak nog) niet beschikbare elektriciteit. Dit kan leiden tot innovaties, maar zal niet meteen leiden tot grootschalige implementatie van warmtenetten.

4.2.4 Conclusie decentrale interventies op bedrijventerreinen

De aanvullende interventies op bedrijventerreinen hebben een aanvullend piekreductie potentieel. Het is belangrijk om onderscheid te maken in de termijn, het type piekmoment en het type bedrijventerrein waar de congestie speelt. Korte en lange termijn oplossingen zijn afzonderlijk toegelicht omdat de mate van elektrificatie en de ontwikkelingen van de aardgasprijzen daar een belangrijke rol speelt. Als laatste is een overzicht gegeven van piekreductie en reflecties op de cijfers uit de literatuur.

Korte termijn, afnamecongestie

Op de korte termijn (2030) is de bijdrage aan verhelpen afname congestie van vraagrespons, conventionele warmteopslag, batterijen en hybride warmteprocessen naar verwachting het grootst. Industriële vraagrespons kan met name geleverd worden door bedrijven met elektrochemische processen, compressietechniek en vriesinstallaties. Deze kunnen over korte perioden significante vermogensreductie leveren. Daarnaast kan het laden van elektrische voertuigen op bedrijventerreinen significante vraagrespons leveren, waarbij het belangrijk is onderscheid te maken tussen de verschillende type voertuigen. Conventionele warmteopslag en batterijopslag kunnen bijdrage leveren aan

afnamecongestie. Voor warmteopslag geldt dit enkel voor bedrijven met geëlektrificeerde warmteprocessen. Hybride toepassingen bieden ook een oplossing voor afnamecongestie, waarbij een gasgestookte (back-up) ketel nodig is, bijvoorbeeld naast een warmtepomp of e-boiler. Deze oplossingen kunnen middels verschillende interventies mogelijk worden gemaakt. In tegenstelling tot de lange termijn oplossingen zijn deze kortetermijnoplossingen zowel binnen de huidige ATO als ook met een non-firm ATO te realiseren. Bedrijven kunnen door het toepassen van combinaties van oplossingen substantiële percentages flexibiliteit realiseren (TKI Energie en Industrie, 2022). Bijvoorbeeld door een e-boiler met warmtebuffer te combineren. De totale potentie voor piekreductie is echter nog onduidelijk, en ook is het onduidelijk welke toepassingen tot de meeste piekreductie zullen leiden.

Lange termijn, afnamecongestie

Op langere termijn, tussen 2030 en 2040, zijn naar verwachting meer bedrijven geëlektrificeerd. Deze elektrificatie leidt tot een grotere elektriciteitsvraag, de vermogenspiek kan gedeeltelijk beperkt worden door toepassing van opslag en industriële vraagrespons. De opkomst van opslag op hoge temperatuur en seizoensopslag zal in sectoren met veel warmteprocessen een rol spelen. De rol van hybride toepassing zal afnemen vanwege verwachte hogere aardgasprijzen. De inpassing van de collectieve oplossingen zal naar verwachting groter zijn. Inschattingen over de rol van energiehubs zijn uiteenlopend. Studies over nationale piekreductie verschillen van aannames en hebben uiteenlopende conclusies. In de scope van deze studie is hier niet uitgebreid op in gegaan. Op lokaal niveau spelen veel verschillende factoren mee welke bepalend zijn voor de piekreductie. Afhankelijk van de inrichting van de energiehubs, is vanuit verschillende casussen getoond dat deze potentie hebben om piekbelasting met 5 tot 40% te verminderen. Daarnaast kunnen energiehubs helpen om extra verbruik in te passen in het bestaande net, alsook lokale opwek te stimuleren en in te passen. Warmtenetten zijn voor bedrijventerreinen op de korte termijn weinig kansrijk door lagere gasprijzen en variabele warmtevraag van bedrijven, maar zouden op de langere termijn een rol kunnen spelen door hogere gasprijzen.

Invoedingscongestie

Voor het oplossen van invoedingscongestie spelen de curtailment van hernieuwbare bronnen, opslag, must-run WKKs flexibel inzetten en conversie een rol.

Overzicht piekreductie

In Tabel 4.4 zetten we de geschatte impact van aanvullende interventies op bedrijventerreinen naast elkaar. De geschatte impact van verschillende interventies is echter niet optelbaar: in de impact van verschillende interventies is overlap mogelijk. Een meer systematische analyse van de overlap en interactie tussen maatregelen nodig is om het werkelijke besparingspotentieel te bepalen.

Daarnaast zijn veel cijfers gebaseerd op technisch of theoretisch potentieel. De stap naar economisch of praktisch realiseerbaar potentieel wordt niet altijd expliciet gemaakt. Daarvoor is verder onderzoek naar de aannames over adoptiegraad, businesscases en daadwerkelijke implementatie in de praktijk nodig. Daarom hebben we hierboven per interventie een aantal randvoorwaarden benoemd om een beeld te geven bij de succesfactoren die adoptie kunnen beïnvloeden. Door de brede scope van de studie benoemen we de randvoorwaarden op hoofdlijnen. In de praktijk zijn juist de details rond contractvorming, governance, ruimtelijke inpassing, juridische belemmeringen en business case vaak doorslaggevend.

In dit overzicht gaan we ook nog niet dieper in op de onzekerheden of gevoeligheidsanalyses in de literatuur. Een aantal rapporten verwijzen naar case studies, maar omdat het aantal gerealiseerde voorbeelden van veel interventies nog beperkt is, is extrapolatie naar het

nationale niveau nog onzeker. Mede door onzekerheid over de cumulatie van lokale effecten, geven netbeheerders (o.a. in interviews in Hoofdstuk 5 aan dat het effect van decentrale interventies op uitstel of afstel van netverzwaring vaak onzeker is).

Tabel 4.4: Overzicht van impact decentrale interventies op bedrijventerreinen (cijfers zijn niet optelbaar)

Interventie	Impact/reductie op aansluitingsvermogen	Referentiejaar	Scope van de studie	Bron
Power-to-gas	Flexpotentieel van 20 tot 80%	huidig	Elektrochemische processen o.b.v. enkele bedrijven	TKI Energie en Industrie (2022)
Power-to-X	Tussen 20 en 55% lagere netcapaciteit		Waterstof en warmte, op 3 bedrijventerreinen	KWR (2024)
Hybride	Max 2,2 GW	2030	Industriële boiler naast een gasketel voor cbc/non-firm ATO	CE Delft & Merosch (2024)
	770 MW potentieel	2030	Hybride warmtepompen in de utiliteitsbouw cbc/non-firm ATO	CE Delft & Merosch (2024)
Industriële vraagrespons	3,4 GW		Theoretische reductievermogen van de industrie	(PWC, 2021)
	4 GW	2030	Procesflexibiliteit	(DNV GL, 2020)
	1,7 GW in 2030 2,0 GW in 2035	2030 en 2035	20% van het geïnstalleerde industriële vermogen	(TenneT, 2025).
Batterij opslag	20 tot 40% vermindering vermogensvraag	2030	Logistiek	Budding et al. (2024)
	20% piekreductie	-	Case study aardappelverwerker	Terpstra (2025)
Energiehubs	Verminderde piekbelasting van 1092 MW	2030	BT energiehubs	RHDHV (2024)
	Potentiële reductie van 3,7 GW tot 7,3 GW	2030	Alle energiehubs en GTO	CE Delft & Merosch (2024)
	33% lager vermogen	-	Case study Lage weide	Stijker (2025)
	44% piekreductie	2050	Case study	CE Delft (2025)

4.3 Randvoorwaarden decentrale interventies

Hierboven hebben we een aantal decentrale interventies en hun potentie voor het elektriciteitsnet beschreven. In de literatuur over decentrale energiesystemen worden ook een aantal algemene randvoorwaarden beschreven. Hieronder volgt een korte samenvatting van deze randvoorwaarden (Berenschot, 2023), (Edwin Edelenbos, 2025), (Transform, 2024), (Transform, 2025).

- **Energiebesparing:** Door efficiënt om te gaan met energie, kan het hele energiesysteem ontlast worden, zowel centraal als decentraal. Energie die niet wordt gebruikt, hoeft niet opgewekt en niet getransporteerd te worden. In dit rapport beschouwen we energiebesparing niet als een decentrale interventie op zich, maar wel een noodzakelijke randvoorwaarde om het centrale én decentrale deel van het elektriciteitsnet zo goed mogelijk te benutten.
- **Economische randvoorwaarden:** om het lokaal afstemmen van opwek en verbruik te incentivieren zijn prikkels nodig die het verkorten van transport (kort transport)waarden, bijvoorbeeld via korting op nettarieven. De tariefsignalen moeten de waarde van flexibiliteit uitdrukken. Investerings in flexibiliteitsmaatregelen moeten zich terugverdienen in een sluitende business case. Daarbij zijn eventueel subsidies of fiscale voordelen nodig om deze investeringen te ondersteunen als de marktinkomsten nog niet toereiken zijn (RVO, 2025). Verder moeten de opbrengsten van flexibiliteitsdiensten eerlijk verdeeld worden met transparante verdienmodellen voor de betrokken spelers. Ten slotte is risicobeheersing nodig: bedrijven vragen aan de netbeheerders voldoende voorspelbaarheid over de frequentie en duur van flexibiliteitsverzoeken (DNV-GL, 2020).
- **Beleidsmatige en juridische randvoorwaarden:** Standaardisering van flexibele contractvormen en nettarieven is nodig om ze grootschaliger te kunnen toepassen. Variabele nettarieven worden ook als randvoorwaardelijk genoemd (TenneT, 2025) (RVO, 2025). Vraagresponsovereenkomsten als capaciteit in een marktontwerp met een capaciteitsmechanisme kan ook helpen om flexibiliteit te ontsluiten (TenneT, 2025).
- **Subsidies** zoals Flex-E en investeringssteun zijn nodig om de onrendabele top van flexibiliteitsmaatregelen bij bedrijven te dekken. Overheidsprogramma's zoals het Landelijk Actieprogramma Netcongestie (LAN) en sectorale aanpakken versnellen de adoptie van flexibiliteit. EU-harmonisatie is nodig om juridische en marktbelemmeringen weg te nemen en een consistent kader voor industriële vraagresponsovereenkomsten in heel Europa te creëren (DNV-GL, 2020) (TenneT, 2025). De studie van (TNO, 2025) laat zien dat de subsidie eisen, zoals het aantal draaiuren in de SDE++, mogelijk negatief effect hebben op flexibel aansturen van assets.
- **Bemetering en digitalisering:** basisdata moet zoveel mogelijk op orde worden gebracht met het plaatsen van bemetering. Waar dat (nog) niet kan, kunnen datamodellen en scenario's een uitkomst bieden. Transparante en betrouwbare digitalisering en data-uitwisseling is nodig, wat vraagt om nieuwe platformen, protocollen, standaarden en spelregels om publieke waarden als toegankelijkheid en privacy te waarborgen. Open standaarden en protocollen waarborgen interoperabiliteit. Daarnaast speelt cybersecurity een belangrijke rol: het energiesysteem moet weerbaar zijn tegen aanvallen van buitenaf (zie voor een compleet overzicht van acties die bij digitalisering van belang zijn de Actieagenda Digitalisering (TNO, 2025)).

- **Multi-commodity systeemintegratie:** bij beperkte netcapaciteit kunnen hybride systemen uitkomst bieden. Het optimaal functioneren van een decentraal energiesysteem vereist integratie tussen elektriciteit, waterstof, warmte en koolstof, en tussen sectoren (industrie, gebouwde omgeving, mobiliteit). Inzet op systeemintegratie is een randvoorwaarde voor efficiëntie en leveringszekerheid (Netbeheer Nederland, 2023).
- **Planologische aanpak bij regionale en lokale overheden:** Decentrale overheden hebben een rol bij de ruimtelijke sturing mb.t. het bijeenbrengen van vraag en aanbod van energie, en bij het stimuleren van slimme locatiekeuzes van opwek en afname. Er is ruimte nodig voor lokale opwek van duurzame warmte en elektriciteit en voor opslag. In het nieuwe nationale programma energiesysteem worden afspraken over samenwerking gemaakt tussen de nationale en decentrale overheden, de netbeheerders, waar ook de afhankelijkheden met gebruikers, marktpartijen in worden meegenomen. Informatiedeling is daarbij cruciaal, dus daarbij moet ook gekeken worden naar oplossingen voor de onbalans in informatie tussen netbeheerders en decentrale overheden.
- **Samenwerking:** bij decentrale ontwikkelingen zijn veel spelers betrokken die op andere manieren gaan samenwerken dan in een centraal ingericht energiesysteem. Veel oplossingen zitten in verbeterde samenwerking tussen netbeheerders, (lokale) overheden, woningcorporaties, ondernemers en bedrijven, en huishoudens. De noodzaak voor verbeterde samenwerking en de uitbreiding van het spelersveld maken de samenwerking soms complex, en vereist innovaties op gebied van governance, risicodeling en verzekering, en financiering. Ook binnen bedrijven zijn er nieuwe samenwerkingen nodig. Flexibiliteit ontsluiten vergt nauwe samenwerking tussen productieplanners, energiemanagers, en procestechnologen. Personeel en management moeten bereid zijn om productieplannen aan te passen voor energiedoelinden. Binnen het bedrijf moet er draagvlak zijn om flexibel te kunnen reageren (TNO, 2023).
- **Ontzorging en professionalisering:** in een decentraal energiesysteem moeten partijen die voorheen weinig met energie te maken nu een actievere rol spelen. Voor veel huishoudens en bedrijven is dit best uitdagend. Daarom is een ecosysteem van energiebedrijven en dienstverleners nodig, om het onbenutte potentieel te ontsluiten en optimalisaties achter de meter en trafo te faciliteren. Ook bedrijven hebben vaak nog te weinig interne kennis over energiemarkt. Daarom zien zij barrières om te handelen op de energiemarkt. (TNO, 2025).

Productieprocessen worden vaak ontworpen op productie-optimalisatie en niet op energie-kostenoptimalisatie waarbij rekening wordt gehouden met (toekomstige) waarde van flexibiliteit; zij zien dat flexibiliteit als risico voor continuïteit van de productie (TNO, 2025).

4.4 Reflectie op decentrale interventies

In dit hoofdstuk hebben we voor de belangrijkste decentrale interventies in de (bestaande) gebouwde omgeving en op bedrijventerreinen het potentieel en randvoorwaarden voor ontsluiting besproken. Waar mogelijk, geven we een kritische reflectie op de potentie van deze interventies.

Het is lastig uit literatuur op te maken hoeveel besparingspotentieel decentrale ontwikkelingen opleveren, omdat verschillende studies verschillende aannames doen en daar ook niet altijd transparant over zijn. Dit maakt dat het appels met peren vergelijken wordt.

Een aanbeveling zou zijn om in onderzoeken (en het uitzetten ervan) te sturen op transparantie over de aannames. Daarnaast zijn veel interventies nog volop in ontwikkeling.

Toch hebben veel decentrale ontwikkelingen potentie voorbij de mogelijke besparingen op netverzwaring. Naast de potentie voor piekreductie, maken veel van deze interventies verduurzaming en CO₂-besparing mogelijk. Met decentrale interventies is het voor een aantal bedrijven toch mogelijk om zich te vestigen of uit te breiden, door het bestaande net en lokale opwek zo optimaal mogelijk te benutten. Verder onderzoek naar de maatschappelijke kosten en baten van decentrale interventies is dus wenselijk. Daarmee kunnen eventuele beleidsaanbevelingen ook breder onderbouwd worden.

Het blijft lastig om kosten voor netverzwaring, of de besparingen hierop, toe te rekenen aan specifieke interventies. Per locatie zijn veel factoren die invloed hebben op de noodzaak tot netverzwaring en besparingen zijn afhankelijk van interventies op alle, of minstens de meeste, factoren die aanleiding geven tot verzwaring. Gezien netbeheerders aangeven dat de kosten van het fysieke werk voor verzwaren van het net (“het openbreken van de straat”) doorslaggevend zijn, zijn het stimuleren van deelinterventies die slechts leiden tot een reductie van de verzwaring, maar niet tot het vermijden van de verzwaring, minder effectief om een besparing op netverzwaring op te leveren (“want de straat moet alsnog open”).

Om deze potentiële besparingen op netinvesteringen te realiseren worden een flink aantal randvoorwaarden benoemd, waarvan een van de belangrijkste is het ontwikkelen van (financiële) prikkels die kort transport van elektriciteit belonen. Daarnaast zijn energiebesparing, verdere bemetering (van het net), digitalisering en data-uitwisseling, afstemming met ruimtelijk beleid, het stimuleren van nieuwe samenwerkingsvormen, verdere professionalisering en ontzorging, en systeemintegratie belangrijke voorwaarden om decentrale ontwikkelingen verder te stimuleren. Deze randvoorwaarden zijn in deze studie nog op hoofdlijnen benoemd. Verdere stappen in de praktijk en praktijkonderzoek kunnen helpen deze randvoorwaarden verder te verscherpen.

5 Decentrale ontwikkelingen in de praktijk

Dit hoofdstuk beschrijft de ervaring met decentrale interventies in de praktijk die we hebben opgehaald middels interviews met betrokkenen en experts. Decentrale ontwikkelingen zijn nog volop in ontwikkeling in de praktijk. Toch kunnen we uit de perspectieven van experts en de ervaringen van koplopers al veel leren over de (potentiële) impact van decentrale interventies, en welke randvoorwaarden zij benoemen om de potentie ten volle te benutten en op te schalen. In dit hoofdstuk gaan we in op de perspectieven van experts en koplopers in de praktijk en geven hier onze reflectie op.

5.1 Leeswijzer

We beginnen het hoofdstuk met een korte beschrijving van de onderzoeksmethode. Daarna gaan we in op de afbakening die experts zelf geven van decentrale interventies. Vervolgens bespreken we het perspectief van de geïnterviewde partijen op de impact van decentrale interventies, zowel op het net als op andere aspecten. Daarna vatten we de randvoorwaarden samen die in de interviews genoemd zijn om decentrale ontwikkelingen te kunnen realiseren. We geven een korte reflectie op de inzichten uit de praktijk. We sluiten het hoofdstuk af met een beschrijving van de vier cases.

5.2 Methode

We hebben voor dit hoofdstuk elf experts geïnterviewd. Deze experts zijn betrokken bij negen verschillende organisaties of projecten. Vijf interviews richtten zich op de algemene potentie van decentrale ontwikkelingen voor het besparen op netinvesteringen en zes mensen spraken we over casestudies met specifieke interventies. We hebben de geïnterviewden ook gevraagd wat zij als decentrale interventies beschouwen, dus sommige resultaten gaan over méér interventies dan we bespreken in de rest van het rapport. Bij de selectie van experts hebben we gekozen voor een divers aantal perspectieven: netbeheer, provincies, adviseurs in warmtenetten, en personen betrokken bij nationale organisaties in de energietransitie. Voor de casussen hebben we gekozen voor twee casussen in de gebouwde omgeving en twee in bedrijven. In de gebouwde omgeving bespreken we twee verschillende decentrale ontwikkelingen: slim laden en V2G, en slim aansturen van warmtepompen. Bij bedrijven hebben we gekozen voor een individuele casus (optimaliseren achter de meter) en een collectieve casus (een energiehub met groepstransportovereenkomst en capaciteitsbeperkend contract). Zie Bijlage A voor een lijst met gesproken personen en de interviewprotocollen.

5.3 Afbakening van decentrale interventies

In de interviews werden de volgende decentrale interventies het vaakst genoemd als veelbelovend voor afname van benodigde investeringen op elektriciteitsinfrastructuur:

- Flexibiliteit, o.a. door aansturing van warmtepompen en zonnepanelen en netbewust of bidirectioneel laden

- Collectieve oplossingen, zoals energiehubs en kleinschalige collectieven, o.a. energiegemeenschappen
- Collectieve batterijen (lokale opslag)
- Netbewuste nieuwbouw
- Energiebesparing
- Elektrificatie

Deze lijst komt deels overeen met de lijst decentrale interventies genoemd in Hoofdstuk 4. Aanvullingen van de geïnterviewden zijn energiebesparing en elektrificatie. Energiebesparing draagt eraan bij dat meer mensen bediend kunnen worden met dezelfde of minder infrastructuur. In onze definitie beschouwen we energiebesparing niet als een decentrale interventie op zich, maar als randvoorwaardelijk om een energiesysteem met decentrale ontwikkelingen zo efficiënt mogelijk te laten werken. Netbewuste nieuwbouw blijft in deze studie buiten scope, omdat we ons toeleggen op interventies bij bestaande gebouwen.

Elektrificatie is niet alleen een middel om het energiegebruik te verduurzamen (door over te stappen op elektriciteit en de elektriciteitsbronnen te verduurzamen), maar wordt door geïnterviewden ook benoemd als aanjager voor andere decentrale ontwikkelingen zoals realisatie van decentrale opwek en opslag, dichtbij de vraag.

Warmtenetten zijn ook als oplossing besproken in de interviews, maar daar kwam een wisselend beeld over naar voren.

5.4 Impact van decentrale interventies op het elektriciteitsnet

In de interviews worden besparingen op netinvesteringen wel herkend als mogelijke impact, maar niet als de hoofdzakelijke impact of motivatie voor decentrale interventies. In de praktijk ligt de motivatie voor decentrale interventies hoofdzakelijk bij het omgaan met de belemmeringen die voortkomen uit netcongestie. Gebruikers in congestiegebied zoeken ruimte om hun activiteiten uit te breiden of te elektrificeren, en vinden oplossingen door bestaande infrastructuur beter te benutten en/of opwek, conversie of opslag lokaal in te passen.

Ook in de praktijkcases van bedrijven stellen we vast dat decentrale interventies vooral worden gedaan om te kunnen verduurzamen of uitbreiden binnen de bestaande gecontracteerde transportcapaciteit wanneer het vergroten van de aansluitcapaciteit niet mogelijk is. Bijvoorbeeld bij ABB Ede werd er dankzij de inzet van flexibiliteit achter de meter ruimte gecreëerd om twee warmte-koude opslag (WKO) installaties in gebruik te nemen, met als doel de productiefaciliteit *net zero* te maken. Door dit soort oplossingen kan de vraag naar verzwaring van de capaciteitsaansluiting worden uitgesteld.

Geïnterviewden beamen dat decentraal vraag en aanbod bij elkaar brengen wel een rol speelt in het beter benutten van de bestaande elektriciteitsinfrastructuur. Pieken in afname en invoeding worden beter gespreid. Besparingen op netinvesteringen zijn voor spelers in het veld dus niet de hoofdzakelijke drijfveer achter decentrale interventies, maar decentrale interventies kunnen er wel voor zorgen dat infrastructuur beter benut wordt, waardoor investeringen uitgesteld of zelfs vermeden kunnen worden.

Vanuit netbeheerders klinkt het geluid dat de impact van deze decentrale ontwikkelingen de komende jaren nog te onzeker zijn om op korte termijn al rekening mee te kunnen houden in

de investeringsplannen. Nu inzetten op het stimuleren van decentrale ontwikkelingen kan wel nog zwaardere investeringen in het elektriciteitsnet na 2040 helpen verlichten. Ook hebben decentrale ontwikkelingen de komende jaren mogelijk impact op de snelheid en planmatigheid waarmee netverzwaringen uitgevoerd worden. Wanneer decentrale oplossingen ertoe bijdragen dat netbeheerders investeringen nog beter kunnen spreiden in de tijd, kan er efficiënter met middelen ten behoeve van netverzwaring worden omgegaan.

Decentrale interventies helpen volgens geïnterviewden de maatschappelijke kosten van netcongestie te verminderen. De wachttijd voor nieuwe capaciteitsaansluitingen is opgelopen tot 14.000 bedrijven (Ministerie van Klimaat en Groene Groei, 2025), met naar schatting 10-40 miljard economische schade per jaar tot gevolg (IBO Bekostiging Elektriciteitsinfrastructuur, 2025). Met decentrale interventies kunnen bedrijven toch vestigen, uitbreiden of elektrificeren zonder op een zwaardere aansluiting te hoeven wachten. En met netbewuste nieuwbouw kunnen nieuwe woonwijken aangesloten worden op minder zware aansluitingen.

Naast een betere spreiding van netinvesteringen in de tijd, worden bij decentrale interventies de investeringen in de energie-infrastructuur verspreid over meer partijen dan de netbeheerders. Investeringen in warmtenetten, netbewuste nieuwbouw, opslag en conversietechnologie, lokale opwek en energiegemeenschappen en – hubs worden gedragen door meerdere partijen. Dit verlicht volgens geïnterviewden de last op de beperkte mensen en middelen van de netbeheerders.

Een financiële vergelijking van de opgave van netverzwaring zonder versus met decentrale oplossingen is echter lastig. Niet alleen de techniek wordt gedecentraliseerd, ook de governance- en financieringsstructuur. Daarnaast is veel maatwerk nodig afhankelijk van de situatie en techniek. Bij netverzwaring worden de kosten gesocialiseerd en regelen netbeheerders vrijwel alles, waardoor er beter zicht is op de totale kosten. Geïnterviewden gaven aan dat een vergelijking maken met de totale benodigde investeringen met inzet op decentrale ontwikkelingen moeilijk te maken is.

Uit de interviews komt verder naar voren dat de impact van collectieve warmtenetten nog onduidelijk is. Of een warmtenet de belasting op het elektriciteitsnet verlaagt is afhankelijk van verschillende factoren (zie ook in 4.1.3). Er zijn meer studies nodig met voldoende transparante aannames om de netimpact van verschillende type warmtenetten en de vergelijking met andere warmte-oplossingen te maken.

5.5 Aanvullende impact van decentrale interventies

Vanuit de praktijk is de voornaamste motivatie om decentraal aan de slag te gaan het aanpakken van de belemmeringen van netcongestie op vestigen, uitbreiden, en elektrificeren. Met andere woorden het omgaan met netcongestie en niet zo zeer het verminderen van netcongestie of investeringen in het net. Decentrale interventies helpen de economische schade van wachtrijen voor capaciteitsaansluitingen te verzachten. Ook in woonwijken wordt er door decentrale interventies gezocht naar mogelijkheden om toch te verduurzamen in gebieden met netcongestie, bijvoorbeeld het grootschalig uitrollen van warmtepompen bij woningcorporaties of het verder opschalen van elektrische deelauto's. Daarnaast benoemen geïnterviewden ook andere vormen van impact van decentrale interventies. In dit stuk gaan we hier verder op in.

Een voordeel is (potentieel) **lagere energiekosten**. Bedrijven die achter de meter optimaliseren kunnen de energiekosten per product verlagen, en hier concurrentievoordeel mee behalen. Bestuurders van elektrische auto's kunnen voordeliger laden door de energievraag voor het laden te verschuiven naar goedkope momenten, indien er dynamische prijzen gehanteerd worden.

Naast het verzachten van economische schade door netcongestie, kunnen ook andere uitdagingen in Nederland beter aangepakt worden met decentrale interventies, zoals het **versnellen van de woningbouw** door netbewust te bouwen.

Verschillende decentrale interventies **verlagen CO₂-uitstoot** vanuit energiegebruik. Wanneer afnemers sturen op (flexibel) gebruik van duurzame bronnen, brengt dit de CO₂-uitstoot omlaag. Niet van alle decentrale interventies die we bespraken is het duidelijk wat de impact op CO₂-uitstoot is. Zo is dat voor warmtenetten versus warmtepompen een discussie die zich richt op de aannames over de verschillende oplossingen.

Het verzwaren van het centrale elektriciteitsnet vergt veel **schaarse ruimte**. Het ruimtebeslag kan soms weerstand opwekken van omwonenden. Hoe beter lokale netten benut kunnen worden, hoe minder ruimte er voorzien hoeft te worden voor schakelstations en trafohuisjes. Daarnaast worden door lokale opwek en gebruik van energie de energieverliezen door transport over langere afstanden beperkt. Decentrale ontwikkelingen leggen echter ook een beslag op schaarse ruimte. Denk aan lokale opwek uit zon en wind, of buurtbatterijen, of een warmtepomp in huis. Als de voordelen van lokale opwek ook aan de lokale gemeenschap toekomen, kan dit helpen om het draagvlak voor dit ruimtebeslag, en voor de bredere energietransitie, te verhogen.

Betrokkenen in de praktijk halen ook de **sociale en maatschappelijke impact** aan. Decentrale interventies kunnen bijdragen aan het beter benutten van (lokale) hernieuwbare productie. Eén van de geïnterviewden verwacht dat lokale afstemming van aanbod en vraag ook positief kan bijdragen aan de publieke opinie en draagvlak voor lokale opwek vanuit zon-PV. Deze geïnterviewde observeert dat het beëindigen van de salderingsregeling en het instellen van terugleververgoedingen onzekerheid hebben gebracht bij mensen of een investering in zonnepanelen nog wel verstandig is. Het lokaal bij elkaar brengen van aanbod en vraag, bijvoorbeeld met behulp van energiemanagement, kan volgens deze geïnterviewde het verhaal voor mensen weer begrijpelijk maken. Dat kan met individuele, maar ook met collectieve oplossingen om aanbod en vraag van energie lokaal bij elkaar te brengen. Geïnterviewden verwachten wel dat uiteindelijk de business case bepalend blijft voor de oplossingen die mensen kiezen, of die nou individueel of collectief zijn.

Bij bedrijven is er ook sociale en maatschappelijke impact. Verbruikspieken verschuiven betekent vaak een aanpassing van productieprocessen. Dat heeft een impact op de manier van werken: aangepaste werktijden, complexere planning die rekening houdt met energie-intensiteit van processen, en nieuwe vaardigheden die bij werknemers ontwikkeld moeten worden.

Naast innovaties in bedrijfsprocessen, jagen decentrale ontwikkelingen ook **technologische innovaties** aan, met o.a. snelle vooruitgang in batterijtechnologie voor grootschalige opslag. Tot slot geven betrokkenen aan dat een decentraal energiesysteem **weerberaarder en strategisch onafhankelijker** is. Het verlaagt de afhankelijkheid van fossiele brandstoffen in een onzekere geopolitieke wereld.

5.6 Randvoorwaarden

De geïnterviewden benoemen verschillende randvoorwaarden om decentrale interventies te kunnen opschalen. Vanuit de verschillende interventies en cases, worden een aantal randvoorwaarden benoemd die hieronder samengevat worden.

- **Technische digitaliseringsinnovaties breed uitrollen en nog verdere stappen zetten in digitalisering**

Geïnterviewden benadrukken dat er nog investeringen nodig zijn om assets aanstuurbaar te maken, zodat gebruikers en apparaten signalen kunnen ontvangen en daarop kunnen reageren, zo benadrukken geïnterviewden. Bij grootverbruikers zou het gebruik van een energiemanagementsystemen (EMS) standaard moeten worden om flexibiliteit te kunnen ontsluiten¹⁶. Veel technologie is al beschikbaar, maar moet nog op grote schaal uitgerold worden. Interoperabiliteit en open standaarden zijn nodig om ervoor te zorgen dat verschillende systemen met elkaar kunnen communiceren en om vendor lock-in te voorkomen. Geïnterviewden benadrukken dat sommige bedrijven standaard protocollen afwachten om verder in aanstuurbaarheid te investeren.

Daarnaast benadrukken geïnterviewden dat verdere bemetering van het elektriciteitsnet nodig om de actuele capaciteit van het lokale net te kennen en signalen hierover te kunnen sturen naar gebruikers. De uitdaging hierbij is dat assets typisch voor minstens 40 jaar 'de grond in gaan', waardoor een dekkingsgraad van 100% nog een aantal jaar nodig heeft. In de tussentijd kunnen modellen en schattingen een uitkomst bieden.

Bij digitalisering moet rekening gehouden worden met de privacy-gevoeligheid van de data. In interviews kwam ook naar voor dat er bij huishoudens en bedrijven bezorgdheden zijn over aanstuurbaarheid van assets: veel mensen willen een zekere mate van controle behouden, o.a. door het kunnen instellen van aanvaardbare parameters of de mogelijkheid om zelf de controle over te nemen van automatisch aangestuurde apparaten.

Daarnaast wordt cybersecurity door verschillende betrokkenen benoemd als cruciaal om de veiligheid en betrouwbaarheid van het energiesysteem te garanderen.

Veel van deze punten zijn geadresseerd in de Actieagenda Digitalisering Energiesysteem (TNO, 2025)

- **Een sluitende business case is een belangrijke randvoorwaarde om private investeringen in decentrale interventies op te schalen**

Geïnterviewden zeggen dat om investeringen in decentrale oplossingen op schaal uit te rollen, een aantrekkelijke business case nodig is. Voor een aantal decentrale interventies blijft dit uitdagend. Warmtenetten krijgen de business case over het algemeen moeilijk rond. Een mogelijkheid is om subsidiëring toe te kennen voor interventies waarvan de maatschappelijke waarde aantoonbaar positief is.

Daarnaast hebben decentrale interventies een impact op bestaande businessmodellen. Bijvoorbeeld exploitanten van laadpalen die flexibiliteitsdiensten aanbieden hebben te maken

¹⁶ Ook voor huishoudens zijn energiemanagementsystemen (hEMS) al beschikbaar. Toch wijzen geïnterviewden erop dat bij huishoudens nog veel impact te behalen valt met een aantal eenvoudige gedragsveranderingen (zoals EVs buiten de pieken laden), gestimuleerd via prikkels zoals gedifferentieerde nettarieven.

met inkomstenverlies wanneer auto's minder snel of niet geladen kunnen worden. Dit inkomstenverlies moeten ze afwegen tegen nieuwe inkomstenstromen uit flexibiliteitsmarkten. Voor (lokale) overheden of netbeheerders die decentrale interventies willen stimuleren ligt er een uitdaging om ook voor gevestigde business cases het aantrekkelijk te maken om flexibiliteit voor het lokale net te ontsluiten.

- **Ontzorging bij (collectieve) decentrale interventies is wenselijk voor opschaling, vanwege de complexiteit van technologie en governance**

In de praktijk zien geïnterviewden dat collectieve decentrale interventies vaak een complexe governance kennen, door de veelheid en verscheidenheid van betrokken actoren. Tussen het aanvankelijke enthousiasme en een professioneel ingerichte governance voor collectieve oplossingen van bewoners en bedrijven bevindt zich vaak een 'valley of death', waarin de diversiteit van stakeholders en de complexiteit van besluitvorming kunnen leiden tot vertraging of zelfs stilstand van het project.

Daarnaast halen geïnterviewden aan dat voor opschaling een zekere mate van ontzorging wenselijk is, zowel voor collectieve als voor individuele oplossingen. Bewoners, ondernemers en lokale overheden zijn op zoek naar laagdrempelige informatie, heldere business cases, en bewezen stappenplannen om decentrale oplossingen op te zetten. Ook nieuwe rollen en spelers die nu volop in ontwikkeling zijn, zoals hub regisseurs bij energiehubbs of nieuwe dienstverleners, dragen bij tot een zekere mate van ontzorging.

Ten slotte vermelden geïnterviewden dat vertrouwen hierbij cruciaal is: een decentrale interventie "hoeft maar één keer fout te gaan" om tot terughoudendheid bij investerende partijen te leiden.

- **Geïnterviewden benadrukken de behoefte aan standvastig beleid met een heldere visie en duidelijke keuzes**

Geïnterviewden benadrukken de noodzaak van standvastig overheidsbeleid vanuit een heldere visie. Het intrekken van eerder beleid (bv. beëindiging van verplichting op hybride warmtepompen) zorgt voor aarzeling bij bedrijven en investeerders. Naast standvastigheid zijn heldere keuzes nodig op alle beleidsniveaus. Netbeheerders geven aan dat ze hopen dat er zo snel mogelijk duidelijkheid moet komen vanuit gemeentelijke bestuurders over de aanleg van warmtenetten. Wanneer eerder voor een warmtenet gekozen werd in een wijk, maar deze toch niet (tijdig) gerealiseerd wordt, dreigt er laagspanningsnetcongestie.

De snelheid van innovatie in de praktijk en de snelheid van het wetgevingsproces zijn soms lastig op elkaar af te stemmen. Zo geven geïnterviewden aan nog onzekerheden te ervaren rond de Energiewet, de inwerkingtreding van de wet Collectieve Warmte, en invoering en ontwerp van nieuwe nettarieven.

- **Op juridisch vlak vermelden geïnterviewden de behoefte aan nieuw netbeheer met nieuwe afspraken, gedifferentieerde nettarieven en verankering netbewust bouwen**

Geïnterviewden verwachten dat de rol van de netbeheerder evolueert in een energiesysteem met decentrale ontwikkelingen. Naast de klassieke taken wordt van de netbeheerder steeds vaker de rol van lokale 'system operator' verwacht, waarbij de netbeheerder meer adviseert aan spelers in het energiesysteem over op- en afschakelen van productie, opslag en afname op basis van inzichten in beschikbare capaciteit. Verschillende regionale netbeheerders richten dit nu organisatorisch nog anders in. Daarnaast stellen sommige geïnterviewden de

vraag of netbeheerders aan andere KPI's gehouden zouden moeten worden, die de system operator rol incentivieren en netbeheerders stimuleren om de economische schade door wachtrijen te beperken. Netbeheerders worden nu gehouden aan KPI's rond betrouwbaarheid, o.a. rond uptime en storingsduur. Geïnterviewden verwachten dat vasthouden aan deze KPI's zónder inzet op decentrale ontwikkelingen na 2040 nog tot veel hogere benodigde investeringen kan leiden dan nu door het IBO-rapport worden becijferd.

Naast de rol van de netbeheerder, worden nog een aantal verdere juridische randvoorwaarden genoemd door geïnterviewden:

- Gedifferentieerde tarieven om afname en invoeding te sturen: niet enkel voor time of use (tijdsafhankelijk), maar ook locatieafhankelijk om zo kort mogelijk transport te stimuleren.
- Netbewust bouwen verankeren in normering: bijvoorbeeld een aanvulling of uitbreiding op de BENG normering (Bijna Energie Neutrale Gebouwen) die vandaag vooral energiebewust maar nog weinig netbewust is.
- Aantrekkelijke voorwaarden voor groepstransportovereenkomsten (GTO): bij het afsluiten van een GTO vragen netbeheerders vaak aan collectieven van bedrijven om 15 tot 40% van de capaciteit in te leveren, gebaseerd op het feitelijke verbruiksprofiel (en eventuele toekomstplannen). Bij uittreding uit de GTO krijgen bedrijven doorgaans minder gecontracteerde capaciteit terug dan voor ze in de GTO stapten. Dit brengt onzekerheid mee voor bedrijven. Deze onzekerheid vormt voor veel ondernemers nog een barrière om in een GTO te stappen. Een aantrekkelijke uitstapregeling (eventueel gekoppeld aan voorwaarden) zou de barrière voor bedrijven om in een GTO te stappen kunnen verlagen.
- **Geïnterviewden benadrukken dat ruimtelijke planning afgestemd met lokale en regionale overheden en locatiesturing van grote afnemers en invoerders nodig is**
Het energiesysteem van de toekomst zal een groter ruimtebeslag leggen dan vandaag. Zowel decentrale assets als centrale assets vereisen meer ruimte dan het huidige energiesysteem. Vanuit lokaal perspectief vermelden geïnterviewden dat inzetten op een decentrale interventies helpt om de ruimtelijke opgave om grote schakelstations in te plannen te verlichten. Geïnterviewden benadrukken het belang van afstemming door regionale en lokale overheden tussen energiebeleid en ruimtelijk beleid. Deze overheden zouden ook planmatig ruimte kunnen bieden om lokale opwek te stimuleren waar de grootste vraag is, of grote afnemers in te planten dicht bij lokale opwek.
- **De arbeidsmarkt vormt een knelpunt voor de snelheid van de energietransitie.**
Geïnterviewden zeggen dat met name bij netbeheerders 30.000 technici en installateurs tekort zijn om de nodige werken uit te voeren. Daarnaast zijn netarchitecten en ICT-specialisten knelpuntberoepen. Ook met decentrale interventies blijft dit knelpunt bestaan, omdat de komende jaren technici nodig zijn om meetapparatuur te plaatsen, ondersteuning van GTOs en locatiesturing van vraag en aanbod netarchitecten vereist, en er voor de toenemende behoeften rond cybersecurity-specialisten nodig zijn.
- **Tot slot zeggen geïnterviewden dat er is nog behoefte aan kennis rond decentrale interventies**, met name over de maatschappelijke impact en kosten van verschillende types warmtenetten versus warmtepompen, en het ontwikkelen van innovatieve business cases die de maatschappelijke impact van decentrale oplossingen een plaats geven. Daarbij is transparantie en inzicht in de aannames onder verschillende studies essentieel om de verschillende opties te kunnen vergelijken.

5.7 Reflectie op de interviews

De voornaamste drijfveren om in de praktijk aan de slag te gaan met decentrale interventies is oplossingen zoeken voor verduurzaming en economische ontwikkeling ondanks netcongestie. Het beter benutten van het net en het eventueel uitstellen, verlichten of zelfs vermijden van netverzwaring worden als mogelijke impact herkend, maar zijn vanuit het perspectief van de praktijk bijvangst. De hoofdzakelijke motivatie en beleefde impact is het mogelijk maken van economische ontwikkelingen en verduurzaming, zowel vanuit het perspectief van bedrijven als de gebouwde omgeving.

Of de totale benodigde investeringskosten bij verhoogde inzet op decentrale interventies hoger of lager zijn dan een scenario met weinig tot geen inzet op decentrale interventies is vandaag nog moeilijk te vergelijken. Bij hogere inzet op decentrale interventies worden investeringen gespreid over meerdere partijen, maar liggen de investeringen deels ook dichterbij de gebruikers. Zonder inzet op decentrale interventies ligt het zwaartepunt van de investeringen bij de netbeheerders en worden de kosten gesocialiseerd met hogere netkosten voor alle gebruikers tot gevolg. Vervolgonderzoek over het integrale kostenbeeld in een scenario mét verhoogde inzet op decentrale interventies versus zonder, en de verdelingseffecten daarvan, lijkt wenselijk.

Naast mogelijke besparingen op benodigde investeringen in netverzwaring, benoemen geïnterviewden nog verdere positieve impact van decentrale interventies. Decentrale interventies dragen onder andere bij aan het verlagen van de CO₂ uitstoot, lagere energiekosten, besparen op het ruimtebeslag voor hoog- en middenspanningsinfrastructuur, en hebben mogelijk positieve sociale en maatschappelijke effecten, zoals een hoger draagvlak voor lokale opwek bij lokale afname. Decentrale interventies kunnen dus bijdragen aan andere doelen, zoals het realiseren van woningbouw en het behalen van de klimaatdoelen.

Om de impact van decentrale interventies ten volle te benutten en op te schalen, noemen geïnterviewden een aantal randvoorwaarden. Zo geven ze aan dat de rollen van sommige spelers moeten evolueren: netbeheerders krijgen meer de rol van 'system operator' of 'orchestrator', en lokale overheden moeten energieplanning meenemen in hun ruimtelijke ordening om lokaal energievraag en energieaanbod bij elkaar te brengen. Daarnaast vragen geïnterviewden ook om helder en standvastig beleid om de onzekerheid rond investeringen te verlagen. Een zekere mate van ontzorging en ondersteuning bij het sluitend maken van business cases is ook nodig om decentrale interventies breder op te schalen voorbij de koplopersgroep.

Geïnterviewden zien allen een rol voor zowel individuele oplossingen als collectieve oplossingen om lokaal vraag en aanbod beter op elkaar af te stemmen. In de literatuur wordt een aanzienlijke potentie beschreven voor collectieve oplossingen, zoals energiegemeenschappen en energiehubs. Toch merken we bij geïnterviewden in de praktijk voorzichtigheid en wordt de complexiteit om tot duurzame samenwerkingen te komen benadrukt. Geïnterviewden stellen dat in de praktijk veel burgers en bedrijven de voorkeur geven aan individuele oplossingen, en pas bereid zijn aan collectieve oplossingen deel te nemen als dat de enige oplossing is of als de business case aanzienlijk beter is dan een individuele oplossing. Daarnaast wordt ook gewezen op de complexiteit van de governance van collectieve oplossingen. Dit kan een tempering betekenen op de schatting van de potentie van collectieve oplossingen in de literatuur. Meer onderzoek naar de sociale drijfveren en barrières voor de adoptie van collectieve oplossingen lijkt zinvol.

5.8 Case beschrijvingen

Bidirectioneel laden van huurauto's – Utrecht

Motivatie

Gemeente Utrecht, We Drive Solar, MyWheels en Renault Group werken samen aan pilot en blauwdruk voor het opschalen van *vehicle-to-grid*-technologie in Europa. Het creëren van een open ecosysteem en standaarden is daarin een belangrijke component. De partijen hebben de ambitie bij te dragen aan de integratie van duurzame energie in het energiesysteem door lokale opwek en de elektriciteitsvraag van personenauto's aan elkaar te koppelen. De gemeente Utrecht ambieert ook om het elektriciteitsnet te ontlasten, werkt zo aan verduurzaming van personenvervoer en verwacht kostenvoordelen voor afnemers.

Aanpak en beoogde impact

In Utrecht zijn vijftig bi-directionele laadpalen en huurauto's neergezet. Binnen één à twee jaar komen daar minstens vierhonderdvijftig auto's bij, in Utrecht of twee andere steden. De huurauto's hebben een eigen afgekruste plek in Utrecht. De laadpaalbeheerder (*charge point operator*) bepaalt de laadprijs binnen een marge die gesteld is door de gemeente. Voor deze pilot stelde de gemeente Utrecht een apart vergunningsstelsel voor huurauto's op.

Laadsessies van de auto's worden gestuurd op de energieprijzen van de *day ahead*-markt. Congestie management gebeurt binnenkort via een capaciteitsbeperkend contract tussen de netbeheerder en laadpaalexploitant, die op verzoek kan sturen op laden of ontladen van de auto's. De laadpaalexploitant wordt dan vergoed voor de gedeerde inkomsten.

Impact

Een betrokkene geeft aan dat voor grofweg 95% van de tijd de *day ahead*-marktprijzen correleren met de capaciteit op het net in de pilot. Voor de overige momenten geeft de netbeheerder een signaal af. Elaad en Universiteit Utrecht hebben op basis van de data uit de pilot berekeningen over gerealiseerde en potentiële impact uitgevoerd. Na vijf maanden testen zijn ontladingspieken tot 300kW gemeten van de 50 auto's gezamenlijk en is er zo'n 70.000 kWh ontladen in 130 uur per auto. Verdere resultaten worden nog gepubliceerd, onder andere op de website van het Horizon-project waar de pilot onderdeel van is.¹⁷ Brinkel e.a. modelleerden eerder dat netcongestie in laagspanningsnetten geheel kan verdwijnen als 20-30% van de auto's bidirectioneel laadt (Brinkel, AISkaif, & Sark, 2022) (Brinkel e.a., 2022).

Betrokkenen bij de pilot signaleren daarnaast dat de laadkosten voor eindgebruikers dalen door te sturen op de *day ahead*-prijzen. Als dat bijdraagt aan de populariteit van huurauto's als alternatief voor privéauto's en fossiele brandstof, draagt dat bij aan het verminderen van CO₂-uitstoot. Dynamische sturing bevordert ook het gebruik van hernieuwbare bronnen.

Randvoorwaarden voor opschaling

Voor opschaling van bidirectioneel laden zijn voldoende V2G-geschikte voertuigen van belang. Het businessmodel van bidirectioneel laden is momenteel nog lastig te doorgronden, ook voor grote autofabrikanten, wat tot aarzelingen rond investeringen leidt. Daarnaast spelen technische uitdagingen rond het inpassen van de laadpalen en voertuigen op verschillende flexmarkten, zoals GOPACS. Interoperabiliteit en verdere standaardisering binnen Europa is van belang, want de markt van productie en verkoop van auto's is niet nationaal. Ook moet de toegang tot het net voor bi-directionele voertuigen eenvoudiger worden.

¹⁷ Zie [Publications - SCALE](#)

Smart thermal grid - De Warmte Maatschappij

Motivatie

De Warmte Maatschappij heeft met onder anderen woningbouwcorporatie De Alliantie een oplossing ontwikkeld gericht op verduurzaming van woningbouwcorporatiewoningen, in het bijzonder rijtjeswoningen en portiekwoningen. Corporaties staan voor de opgave om hun woningen van het gas af te halen en hebben daarbij last van het split incentives. Corporaties zoeken een gasloze verwarmingsoplossing die qua eindgebruikerskosten kan concurreren met gas. Netcongestie legt beperkingen op qua netbelasting van het warmtealternatief.

Aanpak en beoogde impact

In Hilversum is De Warmte Maatschappij bezig 371 woningen aan te sluiten op een smart thermal grid. Het gaat om 180 sociale huurwoningen van de Alliantie, 111 sociale huurwoningen van Gooi en omstreken, en daarnaast 80 particuliere woningen in gemeente Hilversum. Er zijn momenteel reeds 21 woningen aangesloten. Het smart thermal grid bestaat uit een zeer laagtemperatuur warmtenet met bodemwarmtebron en bij de individuele woningen een warmtepomp. Onderdeel van de oplossing zijn een lokaal stroomnet die de installaties van elektriciteit voorzien, een datanetwerk en een EMS per 4-12 woningen, die centrale aansturing van de apparaten mogelijk maken. Elke woning heeft een boiler voor tapwater. In de woningen zijn extra convectoren of nieuwe convectoren geïnstalleerd ter compensatie van het warmteverlies vanwege de lagere temperatuur verwarming.

De Warmte Maatschappij treedt op als *Energy Service Company (ESCO)* die de warmte levert, de elektriciteit voor de installaties collectief inkoopt en de warmtepompen aanstuurt. De stroom wordt ingekocht op de *day ahead*-markt op basis van een inschatting van de warmtevraag - dit is de reden dat de eindgebruikerskosten kunnen concurreren met gas. Bewoners betalen de Warmte Maatschappij voor de geleverde warmte per gigajoule, daar zitten de kosten voor stroomgebruik en het datanetwerk bij in.

De warmtepompen, boilers en circulatiepompen worden centraal aangestuurd om drukke momenten op het net te ontzien. Dit schakelbare vermogen op wijkniveau is zowel inzetbaar voor capaciteit beperkende (CBC) als wel capaciteit sturende (CSC) contracten. De CSP-rol ligt bij een derde partij. Bewoners merken er volgens betrokkenen weinig van, de woningen fungeren zelf als 'opslag' van warmte binnen de temperatuurgrenzen die de thermostaat toelaat. Met die flexibiliteit kan De Warmte Maatschappij in theorie meedoen op alle markten, maar in de huidige praktijk richt het zich op EPEX day ahead markt.

Impact

Het systeem draait nu zo'n twee winters. De totale elektriciteitsvraag van de woningen is op jaarbasis gestegen, maar op de piekmomenten in het net is de elektriciteitsvraag van de warmtepompen nagenoeg nul. De extra stroomvraag zit op wijkniveau onder 1 aansluiting. Voor warmte zijn de woningen niet meer afhankelijk van gas en CO₂ uitstoot daalt, ook wanneer nog wel gebruik gemaakt wordt van 'grijze stroom'.

In Hilversum kozen de betrokken partijen voor de inkoop van 100% windenergie voor de elektriciteitsvoorziening. Die keuze is aan de betrokken corporaties en andere stakeholders en kan dus eventueel ook uit lokale bronnen komen. Tijdens *dunkelflautes* moet de stroom van andere bronnen dan zon en wind komen. Het systeem laat toe dat meerdere lokale warmtebronnen worden aangesloten, mits die in de wijk aanwezig zijn. Koude dagen vormen geen probleem. In de toekomst kan ook aansturing van laadpalen, zonPV en zonPVT meegenomen worden in het systeem, zolang ze binnen dezelfde opstal vallen.

De eindgebruikerskosten kunnen lager zijn dan voor gas. De hoogte van de eindgebruikerskosten hangt samen met de investeringen die corporaties doen in de installaties en inkomsten uit huren. Dat zijn communicerende vaten en het kostenplaatje kan dus per wijk verschillen. De *total cost of ownership* is goedkoper dan lucht-waterwarmtepompen en ook goedkoper dan gas (OPEX + CAPEX).

Randvoorwaarden voor opschaling

Het *smart thermal grid* in Hilversum diende als leerschool om de aanpak en een blauwdruk voor opschaling te ontwikkelen. De Warmte Maatschappij werkt nu aan voorbereiding voor opschaling door het land door met ketenpartners in verschillende regio's te overleggen hoe ze de oplossing kunnen integreren in hun werkwijze.

Bij implementatie en opschaling is van belang dat bewoners goed worden geïnformeerd over het proces en de propositie. De ervaring van de Warmtemaatschappij is dat het vooral visueel gemaakt moet worden voor bewoners wat de impact is, bijvoorbeeld met een voorbeeld woning. Ook een goede handleiding en communicatie over het installatieproces zijn van belang. Communicatie met de bewoners lag in de pilot bij de woningbouwcorporatie en bij de gemeente, bij respectievelijk huurders en particulieren. De Warmte Maatschappij richt zich op opschaling onder woningcorporaties. Technisch werkt het systeem ook goed voor particulieren, maar heeft de Warmte Maatschappij er een partij bij nodig die de communicatie en afstemming met bewoners op zich neemt. Het systeem is rendabel vanaf veertig woningen. De TCO voor deze oplossing (*smart thermal grid*) lager ligt dan voor individuele warmtepompen.

Bedrijventerreinen – collectieve oplossingen: Energy valley Alkmaar, Bedrijventerrein Boekelermeer (Reformers)

Motivatie

In Alkmaar wordt binnen het Horizon Europe project REFORMERS een Renewable Energy Valley ontwikkeld en gerealiseerd. Deze 'flagship valley' dient als blauwdruk voor vergelijkbare initiatieven in Europa. Een renewable energy valley is een decentraal ecosysteem waarin meerdere energiedragers (elektriciteit, waterstof, groen gas en warmte) worden geïntegreerd. Het doel is om een CO₂-neutraal en energiepositief gebied creëren, door o.a. af te stappen van fossiele energie, hernieuwbare opwek in te passen, en opwek en verbruik op elkaar af te stemmen op regionale schaal. Alkmaar ligt in een netcongestiegebied. Verschillende bedrijven wachten op een aansluiting of verzwaring om zich te vestigen, te verduurzamen of uit te breiden.

Aanpak en beoogde impact

Verschillende gebieden nemen deel aan het project, waaronder woonwijken (Overdie in Alkmaar en delen van Heiloo) en bedrijventerrein Boekelermeer. Het Reformers-project richt zich op verduurzaming van zowel bedrijven als de gebouwde omgeving. Er wordt gewerkt aan de integratie van verschillende energiedragers: elektriciteit, warmte, waterstof en groen gas. Er komt een ecosysteem voor lokaal geproduceerde waterstof en een bestaand warmtenet wordt verder uitgebreid met nieuwe geothermiebronnen met een warmtebuffer.

Op het bedrijventerrein worden diverse energiehubs onderzocht. Er staat een windmolen van 2,3MW die energie op het elektriciteitsnet invoert. De eigenaar van de windmolen onderzoekt of zij elektriciteit kan delen met twee bedrijven op het terrein. Een van de bedrijven heeft een grotere aansluiting nodig om zijn activiteiten te kunnen uitbreiden. De drie betrokken bedrijven verkennen een groepstransportovereenkomst (GTO). Met twee batterijen van 2MWh en 5 MWh stemmen de bedrijven hun verbruik af op de productie van de windmolen, zodat het grootste deel van de opgewekte elektriciteit lokaal wordt gebruikt.

Een andere site op het bedrijventerrein wordt ontwikkeld als nieuwe vestigingsplaats voor bedrijven. De netbeheerder kan de komende jaren beperkt vaste transportcapaciteit bieden. Daarom is voor het gebied een groepscapaciteitsbeperkend contract (CBC) getekend. De individuele bedrijven die zich vestigen moeten ook een capaciteitsbeperkend contract tekenen. Daarnaast heeft de gemeente via het Reformers project geïnvesteerd in een batterij van 5MWh (2,5MW). Bij congestie levert de batterij eerst stroom aan het gebied. Als de batterij onvoldoende vermogen kan leveren, wordt de flexcapaciteit ingezet. In totaal is er zo ruimte gemaakt voor een capaciteitsaansluiting van 2400kW. Hierdoor kunnen 6 tot 10 bedrijven toch van stroom worden voorzien.

Als laatste wordt er ook met een 4-tal bedrijven buiten het consortium toegewerkt naar een Groepstransportovereenkomst (GTO). Deze bedrijven zijn selectief uitgekozen op basis van hun positie op het elektriciteitsnet, hun matchende energieprofielen en hun ambities om deel te nemen. Deze GTO moet het ook voor deze bedrijven mogelijk maken om hun bedrijfs- en logistieke processen te verduurzamen en uit te breiden.

De grootste impact van deze drie voorbeelden is dat de rem van netcongestie op de economische ontwikkeling van het gebied wordt losgelaten. De batterijen helpen ook het net te balanceren, zowel op de eigen middenspanningsring als op het schakelstation. Wanneer dat schakelstation stroom tekortkomt door hoge vraag op andere middenspanningsringen, kunnen de batterijen bijspringen om het schakelstation te ontlasten. Ook stabiliseren de batterijen de frequentie en spanning in het gebied (load balancing).

Randvoorwaarden voor opschaling

Opwek en opslag moeten tijdig in kaart gebracht worden. Veel projecten leggen de nadruk op de inpassing van extra verbruik, maar voor een succesvol decentraal ecosysteem moet er ook substantiële opwek ingepast worden. Door de seizoenseffecten is zonPV alleen hier vaak onvoldoende – er zijn zowel alternatieve bronnen (bv. wind) als seizoensopslag nodig.

Nauwe samenwerking met netbeheerders wordt ook als belangrijke randvoorwaarde genoemd, onder andere om de benodigde data beschikbaar te maken.

Verder moet het ecosysteem voor een energiehub goed in kaart gebracht worden (o.a. hoe lopen de laag- en middenspanningsringen, wat is de capaciteit van de kabels en het onderstation). Hoe hoger het knelpunt zit, hoe hoger het potentieel voor decentrale oplossingen.

Bedrijven – individuele oplossingen: ABB Ede

Motivatie

ABB is een technologiebedrijf dat producten en oplossingen levert rond elektrificatie en automatisering, van trafo's tot stopcontacten. De ABB fabriek in Ede produceert onderdelen voor groepenkasten met spuitgietmachines. ABB heeft de ambitie om in 2030 80% van zijn productiefaciliteiten net-zero te maken. ABB Ede is ingericht als pilotlocatie om een blauwdruk voor andere productielocaties te ontwikkelen.

ABB Ede wilde met een WKO installatie van het gas af voor de verwarming van het kantoor en de fabriekshallen. Omdat de benodigde uitbreiding op de elektriciteitsaansluiting niet mogelijk was door netcongestie, ging ABB Ede op zoek naar ruimte op de bestaande aansluiting.

Aanpak

Het proces begon met een cultuurverandering: het inrichten van een lerende organisatie waarin medewerkers centraal worden gesteld in het zoeken naar oplossingen. Vervolgens werd het huidige energieverbruik in detail in kaart gebracht, door middel van energiemeters per machine. Daardoor kon energie-intensiteit van bepaalde processen meegenomen worden in het opstellen van de planning. Er kwam ook inzicht in de oorzaken van verbruikspieken. Het opstarten van machines op maandagochtend bleek een grote verbruikspiek te veroorzaken. De machines in het weekend stand-by laten bleek beter voor het totale energieverbruik en verlaagde de piekbelasting. Gezien de machines toch aan bleven, werd het productiesysteem met ploegenarbeid in 2 shifts deels geautomatiseerd tot een 24/7 productiesysteem waarin rekening gehouden kan worden met de energie-intensiteit van bepaalde producten in de planning. Een deel van het personeel werd omgeschoold, o.a. van logistieke arbeiders tot operators. Ondanks de automatisering werd het personeelsbestand met 11% uitgebreid door de verhoogde productie en nood aan technisch geschoold personeel om productieprocessen in te richten en machines te bedienen.

Daarnaast werd ingezet op energiebesparing met ledverlichting en aanpassingen in het klimaatsysteem, door de verwarming aan te passen aan het gemeten gebruik van ruimtes. Op vrijdagen werkten bijvoorbeeld minder mensen op het kantoor, dus werd slechts 1 verdieping verwarmd. Vergaderruimtes worden pas verwarmd voor de eerste geboekte vergadering, in plaats van standaard tijdens de kantooruren.

Dankzij de extra ruimte op de bestaande aansluiting, kon in 2024 het WKO systeem in gebruik genomen worden en de locatie van het gas afgekoppeld worden.

Impact

Met de energiebesparingsmaatregelen en aanpassingen in het productieproces kon de benutting van de aansluiting van 580kW van 80-100% op de piek teruggebracht worden tot 50%. Daardoor ontstond ruimte voor 2 WKO systemen van 160kW elk. Door de WKO installatie wordt de aansluiting weer 80-100% benut, maar nu zonder gasverbruik en met een uitbreiding van de productiecapaciteit. Hierdoor is een verzwaring van de elektriciteitsaansluiting niet langer nodig. Door over te gaan op een continu productieproces is de productie van de locatie uitgebreid en zijn de kosten per product verlaagd, waardoor deze locatie concurrerend blijft met buitenlandse concurrenten. Naast de impact op capaciteit en verbruik, heeft het project sociale impact gehad: medewerkers zijn omgeschoold en het personeelsbestand is uitgebreid.

Randvoorwaarden voor opschaling

ABB benadrukt het belang van inzichten om gedragsverandering mogelijk te maken. Er zijn nog veel schaalbare interventies die weinig geavanceerde technologie vragen, maar die door relatief eenvoudige aanpassingen in processen veel besparing kunnen opleveren. Positieve voorbeelden en kennis delen kunnen helpen om nog meer ondernemers en installateurs stappen te laten zetten.

Daarnaast is het betrekken van medewerkers en het creëren van een lerende cultuur een belangrijke randvoorwaarde om succesvol aanpassingen aan productieprocessen te maken.

6 Conclusies en aanbevelingen

De conclusies gaan in op de verschillende onderzoekslijnen in het project en de bevindingen over de potentie van decentrale interventies. We zetten de belangrijkste aanbevelingen op een rij, gevolgd door een opsomming van vraagstukken voor mogelijk vervolgonderzoek.

We beginnen met het herhalen van de definitie van decentrale interventies:

Decentrale interventies in het energiesysteem zijn interventies waarmee regionale en lokale productie van energie en de veranderende vraag naar energie zo veel mogelijk bij elkaar worden gebracht, in tijd en ruimte, zodat er minder energie getransporteerd hoeft te worden op momenten van piekbelasting, en er bespaard kan worden op de verzwaring van het elektriciteitsnet.

Om de zoektocht naar de effecten van decentrale interventies af te bakenen is een keuze gemaakt voor de deelsectoren bestaande bouw (woningen en utiliteit, inclusief mobiliteit) en bedrijventerreinen (inclusief mobiliteit). In drie onderzoekslijnen is de potentie daarvan onderzocht:

1. Op basis van de berekeningen van BCG en de netbeheerders over besparingen op netinvesteringen in het kader van het IBO (kwantitatief);
2. Op basis van literatuuronderzoek, aangevuld met TNO-beelden (kwantitatief verkennend);
3. Op basis van ervaring van betrokkenen in de praktijk (kwalitatief).

Dat er een besparingspotentieel als gevolg van decentrale interventies is, is duidelijk. Op basis van de berekeningen door BCG en de netbeheerders schatten we dat potentieel in op 4,5 tot 24,5 mld., afhankelijk van hoe sterk er op de interventies gestuurd wordt. Maar hoe compleet dat beeld over decentrale interventies is en vooral wat er in de praktijk van verwacht mag worden, verdient meer aandacht.

Een divers beeld van potentieel van decentrale interventies

BCG heeft een uitgebreide kwantitatieve analyse gedaan van mogelijke besparingen, en daarin een mix meegenomen van centrale en decentrale interventies die niet volledig te onderscheiden zijn. De literatuur beperkt zich vaak tot energetische grootheden, in termen van GW opgesteld vermogen, of globale piekreducties. Het is niet mogelijk om op basis daarvan het besparingspotentieel in te schatten zonder uitgebreide berekeningen te doen. De praktijkcases richten zich niet op het besparingspotentieel, maar veel meer op het nut van maatregelen voor de gebruikers. Besparingseffecten op de investeringen kunnen wel optreden, maar die zijn niet het primaire doel.

Geen garantie dat potentieel ook wordt ingevuld

Het potentieel berekenen is nog wat anders dan het potentieel verzilveren. Het verzilveren van het potentieel betekent veelal dat naast de netbeheerders ook gebruikers aan de slag moeten, individueel of collectief. Dat betekent dat ze daarvoor tijd, aandacht en kennis nodig hebben en ook het economische aspect speelt een belangrijke rol. De doelen van de gebruikers zijn niet gericht op het besparen op investeringen in het net, die immers door de netbeheerders worden gedaan. Zo kan een gebruiker flexibiliteit inzetten op de

energiemarkten om gebruik te maken van de prijsschommelingen zonder dat dat ook maar enig positief effect heeft op het gebruik van de infrastructuur. Een aspect wat ook meespeelt is dat de realisatie van interventies ook weer kosten met zich meebrengt. Maar dan voor andere partijen dan de netbeheerders. Dit kan de potentiële besparingen ook weer drukken als vanuit maatschappelijk oogpunt wordt gekeken.

Aanvullende maatregelen kunnen helpen het potentieel te verzilveren en zijn gebaseerd op bewustwording (communicatie), normering van bijvoorbeeld de aanstuurbaarheid van flexibele apparaten, nettarieven, marktgebaseerde maatregelen zoals dynamische energietarieven, of directe sturing zoals afschakeling bij overbelasting. Dit vertaalt zich dan in het sturen op gedragsverandering (zachte sturing), financiële compensaties (sturing) of verplichtingen (harde sturing). Met elk van deze stappen zal de voorspelbaarheid van het effect van de maatregelen toenemen, ook al zijn absolute garanties nooit te geven. Uit de resultaten van dit onderzoek blijkt dat het inzicht over het daadwerkelijk te verwachten effect van maatregelen nog nader onderzoek verdient.

Bovenstaande conclusie wordt onderbouwd door de resultaten van de verschillende onderzoekslijnen:

Lijn 1: Potentieel besparingen decentrale interventies uit analyse BCG rapportage

In de BCG-studie is het besparingspotentieel bepaald van interventies voor de hele infrastructuur. Het totale potentieel komt uit tussen de 5 en 29,5 mld. Deze bandbreedte is groot, en met name ook afhankelijk van hoe sterk er gestuurd wordt op de inzet van de interventies. Decentrale interventies leveren een deel van die besparingen op. Per netvlak in het elektriciteitssysteem zijn er besparingen mogelijk. Op laag- en middenspanning bedragen die 3-18,5 mld. euro en op hoogspanning is dat 1,5-6 mld. door indirecte effecten veroorzaakt door interventies op laag en middenspanning. Bij elkaar is dat 4,5-24,5 mld. aan potentiële besparingen die relateren aan decentrale interventies.

Hoe realistisch het is om de bovenkant van de bandbreedte te bereiken is heel afhankelijk van het soort interventie en de maatregelen die worden genomen om het effect te verzilveren. Voor kleinverbruikers is het potentieel 0-4,5 mld. Om daarvan het maximum te halen is het nodig met name het potentieel van flex voor de grootvermogen vragers/opwekkers (laadpalen, warmtepompen en zon-PV) te ontsluiten. Stimulerende maatregelen helpen daarbij, maar op technisch vlak moet ook gewerkt worden aan afspraken en standaarden (TNO, 2024). Voor grootverbruikers is het potentieel 1-4,5 mld. En daar is de bandbreedte voornamelijk afkomstig van de mate van compensatiemaatregelen voor flexibiliteit en de handhaving van verplichting tot energie besparen. Voor locatiekeuzes is de besparing 1-2,5 mld. Dit is vooral afhankelijk van de mate waarin de locaties goed te plannen zijn, en valt daarmee onder de vlag van energieplanologie i.c.m. ruimtelijke ordening.

Lijn 2: Potentieel decentrale interventies op basis van de literatuur

Potentieel van interventies uit gebouwde omgeving inclusief utiliteit: impact groter dan berekend door BCG

In de literatuur is vooral gekeken naar interventies over bidirectioneel laden, ook vehicle to grid/home (V2G/V2H) genoemd, warmtepompen in de utiliteitssector, opslag van elektriciteit of warmte. Deze interventies zijn aanvullend op de interventies meegenomen in de BCG-studie. We zien dat deze interventies een substantiële bijdrage kunnen leveren aan het beperken van netverzwaring in energetische zin. Bijvoorbeeld bij V2G komt er een geschat flexibel vermogen beschikbaar van 2,5GW. Uit de BCG-studie hebben alle interventies bij elkaar een piekreductie van ca. 16GW, dus de 2,5GW extra is significant. Hoe dat lokaal

weer uitpakt is natuurlijk wel de vraag. Bij warmtepompen is de verwachte extra piekvraag volgens TenneT 2,5GW tot 3,5GW in 2030. Aansturing van warmtepompen – al dan niet collectief – kan tot piekreducties leiden (10-40% van de warmtepomppiek). Een studie CE Delft wees uit dat warmtenetten 1GW kunnen reduceren (CE Delft, 2024). Echter, deze besparingen worden door verschillende studies genuanceerd vanwege discussie over de aannames in warmtenetten- en warmtepompen scenario's. Zowel aannames over warmtepompen als over warmtenetten blijken in de praktijk (en per locatie) anders uit te pakken dan in de studies, bijvoorbeeld wat betreft gelijktijdigheid en piekvraag. Batterijen kunnen in de gebouwde omgeving nog voor extra piekreducties zorgen (5-15/25% afname/opwek) en warmtebatterijen nog voor 20-40% van de warmtepiek. De piekreducties van deze interventies is in vergelijking met het eerdergenoemde totaal van alle interventies (16GW) niet te negeren. Hoe dit zich exact vertaalt naar besparingen op investeringen in termen van euro's is nog onduidelijk en verdient nader onderzoek.

Potentieel van interventies bedrijventerreinen: impact waarschijnlijk merkbaar

Elektrificatie van warmte en logistiek vervoer zal een belangrijke motor zijn achter de toenemende vraag naar elektriciteit. Een deel van deze vraag kan flexibel worden gemaakt, wat kansen biedt voor een efficiënter gebruik van het elektriciteitsnet en inpassing van lokale energiebronnen, al is deze flexibiliteit tot nu toe nog niet gekwantificeerd. Warmtepompen en e-boilers dragen hieraan bij en bieden bovendien extra potentie. Het belang van opslag van warmte en elektriciteit neemt toe, juist om de groeiende vraag naar elektriciteit beter te kunnen opvangen. Het is echter niet volledig duidelijk in hoeverre deze factoren al zijn meegenomen in het baselinescenario van de BCG-studie. Daarnaast kunnen initiatieven zoals energiehubbs, cable pooling en verschillende typen transportovereenkomsten (nettariëven) een aanvullende rol vervullen in het reduceren van piekbelasting, waarbij succesvolle casestudies de potentie hiervan aantonen, zoals blijkt uit studies naar het potentieel. Deze interventies overlappen deels met andere maatregelen uit het BCG-rapport, wat het inzicht in het aanvullende effect bemoeilijkt. Uit het overzicht van onderzochte interventies is wel af te leiden dat de interventies in de orde grootte van GW zitten, en daarmee ten opzichte van het BCG totaal van 16GW reductie in 2040 merkbare impact kunnen hebben. Of de interventies succesvol zullen zijn, hangt sterk af van de mate van adoptie en de verdere ontwikkelingen binnen het energiesysteem. De effecten hangen ook sterk af van de mate waarin het bedrijfsproces wordt beïnvloed. Flexibiliteit wordt daardoor regelmatig beperkt. Daarnaast is de invulling van de randvoorwaarden van belang, zoals voor vraagsturing: technische, economische en regelgevende factoren. Over het algemeen blijft het lastig om effecten van aanvullende interventies nauwkeurig te kwantificeren; in de literatuur zijn veelal alleen nationale inschattingen beschikbaar terwijl hier de specificiteit van de lokale situatie van groot belang is.

Lijn 3: Ervaring uit de praktijk: meerdere en verschillende factoren van belang

Bedrijven en bewoners richten zich in de praktijk vooral op het inpassen van hun activiteiten binnen de beschikbare ruimte op het net, waarbij het perspectief van het energiesysteem over het algemeen niet centraal staat. Niet zo zeer het verminderen van, maar het omgaan met netcongestie vormt hierbij de belangrijkste drijfveer voor decentrale interventies. Dergelijke interventies dragen niet alleen bij aan het verlichten van de investeringsdruk rondom netverzwaring, maar zijn ook essentieel voor het behalen van klimaatdoelen, het faciliteren van duurzame ontwikkelingen en het mogelijk maken van economische groei en snellere woningbouw. Een bredere rol voor netbeheerders, waarbij zij opereren als lokale system integrators, is noodzakelijk om decentrale ontwikkelingen optimaal te kunnen integreren en benutten. Daarbij zijn automatische aansturing en digitalisering cruciale bouwstenen, al bestaan er nog aanzienlijke uitdagingen op het gebied van standaardisatie, interoperabiliteit, cybersecurity, normering en wetgeving. Voor het verlagen van de piekvraag

naar elektriciteit zijn en worden verschillende tijdafhankelijke overeenkomsten en financiële prikkels ontwikkeld. Echter, het stimuleren van kortere transportafstanden door vraag en aanbod in ruimtelijke zin bij elkaar te brengen wordt momenteel niet tot onvoldoende beloond. Bovendien bestaat er nog discussie over de netimpact van verschillende type warmtenetten ten opzichte van alternatieve oplossingen voor warmte, wat vraagt om aanvullend onderzoek. Tot slot blijkt de governance van collectieve oplossingen, zoals collectieve warmtesystemen, complex; zowel bewoners als bedrijven hebben behoefte aan ontzorging, vooral wanneer dergelijke oplossingen opgeschaald moeten worden.

Aanbevelingen

Op basis van de resultaten uit de onderzoekslijnen en onze reflectie doen we de volgende aanbevelingen:

- Zet in op beleidsmaatregelen die flexibiliteit, energiebesparing en locatiekeuzes, , stimuleren. Het berekende potentieel van deze decentrale interventies is dermate groot dat het nut heeft de maatregelen maximaal in te zetten. De kanttekening is hier wel dat de maatregelen het beter benutten van bestaande en nieuwe infrastructuur moet stimuleren, wat bij flexibiliteitsmaatregelen zoals dynamische tarieven voor energie, niet altijd het geval hoeft te zijn. In de IBO-rapportage is een aantal beleidsmaatregelen genoemd die voor een deel dit effect kunnen hebben. Aangezien een analyse daarvan geen onderdeel was van dit onderzoek is het aan te bevelen de correlatie te onderzoeken tussen de benoemde interventies in dit rapport en beleidsinterventies uit het IBO-rapport.
- Richt je op het beheersbaar en voorspelbaar maken van piekvraag. De piekvraag is direct te relateren aan de maximale capaciteit die nodig is, en is daarmee een ontwerpcriterium voor het netwerk. ..Hoe lager de benodigde capaciteit, hoe lager de investeringen kunnen uitvallen. Het is vooral aan de markt met ondersteuning van de netbeheerders om ervoor te zorgen dat de pieken beheersbaar zijn, en daarmee het net beter benutten, maar vooral ook voorspelbaar op de langere termijn. In dat geval kunnen netbeheerders ook daadwerkelijk hun investeringsplannen erop aanpassen. Maak daarbij ook het maatschappelijke kostenplaatje inzichtelijk. Niet alleen besparen op net-investeringen maar ook de kosten van piekvraagbeheersing zijn relevant. En daarbij hoort dan ook het zoeken van de balans tussen het verzwaren van het net versus interventies en de afgeleide effecten (waaronder de afweging centraal versus decentraal inclusief de ruimtelijke impact)
- Het terugdringen van transport van elektriciteit tussen en over verschillende netvlakken door vraag en aanbod in ruimtelijke zin bij elkaar te brengen wordt momenteel onvoldoende beloond. Zorg ervoor dat er mechanismen komen die zowel bij de planning als in de operationele situatie de waarde hiervan kunnen benutten.
- Verbeter de werkwijze voor het krijgen van inzicht in het besparingspotentieel met de voortschrijdende inzichten. Dit onderzoek heeft aangetoond dat er nog veel vragen liggen die verduidelijking behoeven en ook ontwikkelingen zijn die aanvullend potentieel hebben. Een berekening zoals BCG heeft uitgevoerd is wenselijk om periodiek het nut van de geïdentificeerde en nog te identificeren interventies te actualiseren. Het aandeel van decentrale interventies binnen die totale besparingen is lastig uit te splitsen maar die uitsplitsing lijkt minder van belang.
- Het is zinvol om te bepalen hoe de effecten van de interventies zijn te monitoren, zoals bijvoorbeeld in hoeverre vraag en aanbod bij elkaar zijn komen te liggen, in tijd en ruimtelijke zin.

- In de praktijk liggen er nog veel vragen bij de ontwikkelingen op lokaal niveau. Heb aandacht voor ontzorging, opschaling (standaardisatie), verdienmodellen, planmatige samenwerking, visie en standvastigheid in beleid en regelgeving en nieuwe vormen van netbeheer.:
- Uit ons onderzoek blijkt dat een bredere rol voor netbeheerders, waarbij zij opereren als lokale system integrators, wenselijk is om decentrale ontwikkelingen optimaal te kunnen integreren en benutten in het energiesysteem. Houd ontwikkelingen zoals de Local Service Provider (LSP) op lokaal niveau in de gaten (Edwin Edelenbos, Eva Winters-TNO). De LSP is gericht op het beheersen van het lokale energiesysteem voor kleinverbruikers. Dit LSP-concept is een uitbreiding op de energiegemeenschappen.

Onderzoekslijnen voor vervolg

Dit verkennende onderzoek heeft geleid tot een aantal aandachtspunten voor vervolgonderzoek, gebaseerd op onder andere de aanbevelingen en op de uitdagingen die we zelf tijdens het onderzoek hebben ervaren. Hieronder volgt een lijst van deze onderwerpen in willekeurige volgorde:

- Toetsen en vastleggen van aannames onder de (vele) studies naar impact van (decentrale) interventies.
- Bepalen van de verzilveringscapaciteit van interventies. Een vertaling maken van het technisch potentieel van decentrale interventies naar te verwachte daadwerkelijke verzilvering van het potentieel.
- Meenemen van de aanvullende interventies in berekeningen van het besparingspotentieel
- Vertalen van GW naar indicatoren die daadwerkelijk leiden tot een handelingsperspectief over de netinvesteringen. Uit literatuur blijkt dat studies verschillende aannames doen en daar ook niet altijd transparant over zijn en vaak blijven hangen in GW of percentages. Dit maakt dat het appels met peren vergelijken wordt. Een aanbeveling zou zijn om in onderzoeken (en het uitzetten ervan) te sturen op transparantie over de aannames.
- Een manier vinden om de uitgebreide berekeningen van BCG te kunnen herhalen op een makkelijkere of efficiëntere manier, zodat regelmatige actualisatie mogelijk wordt. Gevoeligheidsanalyses kunnen inzicht geven in bepalende factoren en afhankelijkheden en daarmee aanvullend handelingsperspectief bieden voor beleidsvorming.
- Verfijning van een onderzoek naar de potentie van opslag en aansturing elektrisch vervoer specifiek voor de sector utiliteit. Nu wordt nog te vaak naar de utiliteitssector gekeken als geheel, terwijl daar ook een deel productie van goederen in zit die niet onder de gebouwde omgeving valt. De sector utiliteit valt wel integraal onder de gebouwde omgeving.
- De maatschappelijke impact en kosten van verschillende types warmtenetten versus warmtepompen
- Inzicht in wérkelijk gedrag als gevolg van verschillende energieprijcontracten en nettarieven om een realistischer inschatting te kunnen geven van flexpotentieel en 'verzilvering' daarvan.
- Het ontwikkelen van innovatieve business cases die de maatschappelijke impact van decentrale oplossingen een plaats geven.
- Bepalen van balans tussen centraal en decentraal interventies, gezien vanuit beschikbare fysieke ruimte, netcapaciteit en kosten voor alle partijen.
- Effecten van Local Service Provider (LSP) ontwikkelingen voor decentrale interventies.

Referenties

- Aalborg Universiteit. (n.d.). *Carnot Batteries*. Opgehaald van <https://www.aalborgcsp.com/business-areas/thermal-energy-storage-tes/carnot-batteries>
- Aalto University. (2013). Effectiveness of smart charging of electric vehicles under power limitations. *International Journal of Energy Research*(3), pp. 404-414.
doi:10.1002/er.3130
- ACM. (2025). Locatiesturing belangrijk; implementatie van andere maatregelen nu eerst op orde brengen. Opgehaald van <https://www.acm.nl/system/files/documents/verkenning-locatieafhankelijke-nettarieven.pdf>
- Arjen Zuijderduijn, J. K. (2025). *Laveren tussen ambitieuze doelen en de weerbarstige werkelijkheid: Geleerde lessen uit de praktijk van de eerst energy hubs*. In opdracht van Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO) op verzoek van de Topsector Energie .
- Art.1.1 Energiewet. (2026). *Energiewet*. Opgehaald van Overheid.nl:
<https://wetten.overheid.nl/BWBR0050714/2026-01-01>
- BCG. (2025). *Slimme Keuzes voor een betaalbaar en robuust energiesysteem*. Netbeheer Nederland.
- Berenschot. (2023). *Bouwstenen elektriciteitsinfra: Achtergrond rapport ter ondersteuning van de visievorming over toekomstige ontwikkeling en gebruik elektriciteitsinfrastructuur*.
- Berenschot. (2024). *Onderzoek: Warmtenetten aanzienlijk goedkoper dan warmtepompen*. Opgehaald van <https://www.ebn.nl/feiten-en-cijfers/kennisbank/onderzoek-warmtenetten-aanzienlijk-goedkoper-dan-warmtepompen/>
- Boström, T., Babar, B., Berg Hansen, J., & Good, C. (2021, February). The pure PV-EV energy system - A conceptual study of a nationwide energy system based solely on photovoltaics and electric vehicles. *Smart Energy*.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.segy.2021.100001>
- Brinkel, N., AlSkaif, T., & Sark, W. v. (2022, april). Grid congestion mitigation in the era of shared electric vehicles. *Journal of Energy Storage*.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103806>
- CBS. (2021). *Elektriciteitsproductie stijgt in 2020 naar recordhoogte*. Opgehaald van <https://www.cbs.nl/nl-nl/nieuws/2021/09/elektriciteitsproductie-stijgt-in-2020-naar-recordhoogte>
- CE Delft . (2024). *Wat is de toegevoegde waarde van energy hubs? MKBA, businesscases en belemmeringen voor 2025 tot 2035*.
- CE Delft & Merosh. (2024). *Oplossingen voor netcongestie bij bedrijven: Praktijkvoorbeelden met toekomstig potentieel en kosten per oplossing*.
- CE Delft. (2022). *Effecten van elektrische voertuigen op het elektriciteitsnet*.
- CE Delft. (2023). *The impact of ToU-grid tariffs on home batteries, electric cars and grid congestion*.
- CE Delft. (2024). *Effecten van prijsprykkels op flexibiliteit in huishoudens*.
- CE Delft. (2024). *Het effect van het stagneren van de groei van warmtenetten. Wat als de ontwikkeling van warmtenetten niet op gang komt?* Opgehaald van https://ce.nl/wp-content/uploads/2025/01/CE_Delft_240411_Het_effect_van_het_stagneren_van_de_groei_van_warmtenetten_Def.pdf

- CE Delft. (2024). *Oplossingen voor de ruimtelijke inpassing van zon-pv. Wat is er nodig om meer zon-pv te ontwikkelen op maatschappelijk vastgoed, bedrijventerreinen, parkeerplaatsen en water?*
- CE Delft. (2025). *Mkba energiehubs. Maatschappelijke waarde van twaalf archetypes voor 2.500 energiehubs in Nederland.*
- CE Delft. (2025). *MKBA energiehubs. Maatschappelijke waarde van twaalf archetypes voor 2.500 energiehubs in Nederland.*
- Child, M., Nordling, A., & Breyer, C. (2018, August). The impacts of high V2G participation in a 100% renewable Aland energy system. *Energies*(9).
doi:<https://doi.org/10.3390/en11092206>
- De Boer, R., Smeding, S., & Zondag, H. (2025). *Overzicht industriële warmteopslagtechnologie en toepassing.*
- Delft, C. (2023). *Thuisbatterijen in de energietransitie: Netcongestie, elektriciteitshandel en overheidsbeleid.*
- Dijkstra, P., Kopányi, D., Montfoort, F. v., & Mulder, M. (2025). Alternatieve nettarieven kunnen piekvraag sturen en netcongestie verminderen. *ESB*. Opgehaald van <https://esb.nu/alternatieve-nettarieven-kunnen-piekvraag-sturen-en-netcongestie-verminderen/>
- DNE Research. (2025). *Nationaal Warmtepomp Trendrapport 2025.*
- DNV GL. (2020). *De mogelijke bijdrage van industriële vraagrespon op leveringszekerheid: De Nederlandse elektriciteitsvoorziening in Noordwest-Europese context.*
- DNV-GL. (2020). *De mogelijke bijdrage van industriële vraagrespon op leveringszekerheid.*
- Edwin Edelenbos, T. (2025). *Met nieuw perspectief naar 2030: Een verhaal over echte waardering van energieoplossingen vanuit decentraal perspectief.*
- ElaadNL. (2023). *Analyse netimpact van elektrische mobiliteit.*
- ElaadNL. (2023). *Regulier en netbewust laden.*
- ElaadNL. (2024). *Bidirectioneel laden en netimpact van elektrische voertuigen.*
- ElaadNL. (2025). *Monitor Smart Charging en Vehicle-to-Grid potentieel in Nederland 2050.*
- Enexis. (2024). *Onze visie op elektriciteitsopslag.*
- Enexis. (2025). *Energiegemeenschappen: samen zorgen voor een flexibel energienet.*
Opgehaald van <https://www.enexis.nl/over-ons/nieuws/2025/10/energiegemeenschappen-samen-zorgen-voor-een-flexibel-energienet>
- FAN; RVO. (2023). *pumps, Connected heat pumps in the Netherlands - update 2023. Market insight on flexible connected heat.* Opgehaald van https://flexible-energy.eu/wpcms/wp-content/uploads/2023/08/Final-report_Connected-HPs-in-NL-FAN-version-1.02.pdf
- Fraunhofer-Gesellschaft. (2021). Impacts of electric road systems on the German and Swedish electricity systems - An energy system model comparison.
doi:10.3389/fenrg.2021.631200
- Gemeente Arnhem. (2025). *Energie voor Arnhem - Koerstdocumetrn 2025-2030.* Arnhem.
- Hammingh, P., Sebille, M. v., Hoff, M., Volkers, C., & Koutstaal, P. (2024). *Klimaat- en Energieverkenning 2024 (KEV).* Opgehaald van <https://www.pbl.nl/downloads/pbl-2024-klimaat-en-energieverkenning-2024-5490pdf>
- IBO Bekostiging Elektriciteitsinfrastructuur. (2025). *Schakelen naar de toekomst.*
- KGG. (2025). *Schakelen naar de toekomst.*
- KWR. (2024). *Verkenning Power-to-X voor drie bedrijventerreinen in de provincie Utrecht.*
- Lobregt, S. (2025). *Openbare voortgangsrapportage MOOI622007.* Sparkling Projects.
Parkmanagement Ecofactorij U.A. Opgehaald van <https://projecten.topsectorenergie.nl/storage/app/uploads/public/67c/6cf/90c/67c6cf90c180a684961892.pdf>

- Merosch. (2024). *Onderzoek Merosch: meer collectieve aandacht voor het individuele spoor*. Opgehaald van <https://merosch.nl/actueel-kennis/onderzoek-merosch-meer-collectieve-aandacht-voor-het-individuele-spoor>
- Ministerie van EZK. (2023). Nationaal Plan Energiesysteem. Opgehaald van <https://open.overheid.nl/documenten/2f5cbb52-0631-4aad-b3dd-5088fab859c5/file>
- Ministerie van Klimaat en Groene Groei. (2025, oktober 6). *Kamerbrief Aanpak netcongestie*. Opgehaald van pen Overheid: <https://open.overheid.nl/documenten/8ed00aed-ba0b-459b-8d8b-68204ea1f58f/file>
- Ministerie van Klimaat en Groene Groei. (2025). *Kamerbrief Decentrale ontwikkeling van het energiesysteem*.
- NEN. (2025). *Aankondiging start NTA 'Slimme warmtepompen'*. Opgehaald van <https://www.nen.nl/nieuws/actueel/aankondiging-start-nta-slimme-warmtepompen/>
- Netbeheer Nederland. (2023). *Integrale Infrastructuur - verkenning 2030-2050*.
- Netbeheer Nederland. (2023). *Sturing op lokaal netgebruik*.
- Netbeheer Nederland. (2024). *Financiële Impact Energietransitie voor Netbeheerders ("FIEN+")*. 's-Gravenhage: Strategy& PWC. Opgehaald van https://www.netbeheernederland.nl/sites/default/files/2024-12/241216_fien_eindrapport.pdf
- NP RES. (2025). *Decentraal is niet alleen maar kleinschalig*. Opgehaald van <https://www.regionale-energiestrategie.nl/energiesysteem/dewereldvanb/blogs/2145383.aspx?t=Decentraal-is-niet-alleen-maar-kleinschalig>
- NP RES. (2025). *Het decentrale deel van het energiesysteem*. Opgehaald van <https://www.regionale-energiestrategie.nl/energiesysteem/de+decentrale+kant+van+ons+energiesysteem/default.aspx>
- PBL. (2009). *Decentrale elektriciteitsvoorziening in de gebouwde omgeving. Evaluatie van transitie op basis van systeemopties*. Opgehaald van <https://www.rvo.nl/sites/default/files/bijlagen/Decentrale%20elektriciteitsvoorziening%20in%20de%20gebouwde%20omgeving%20-%20beleidsstudie%20PBL%20-%20april%202009.pdf>
- Pfeifer, A., Dobravec, V., Pavlinek, L., Krajačić, G., & Duić, N. (2018, October 15). Integration of renewable energy and demand response technologies in interconnected energy systems. *Energy*, pp. 447-455. doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.07.134>
- Polen, S. v., & Blok, J. (2025). *Informatieblad netverzwaring en netcongestie. Toelichting op hoe elektriciteitsnetten terugkomen in de Actualisatie van de Startanalyse*. PBL. Opgehaald van <https://www.pbl.nl/system/files/document/2025-03/pbl-2025-informatieblad-netverzwaring-en-netcongestie-5667.pdf>
- PWC. (2021). *Unlocking Industrial Demand Side Response*.
- PWC. (2024). *Financiële impact energietransitie voor netbeheerders (FIEN+)*. PWC. Opgehaald van <https://publications.tno.nl/publication/34645265/7On5cdyH/TNO-2025-P12526.pdf>
- RHDHV. (2025). *Lokale seizoensopslag energie*. Opgehaald van https://topsectorenergie.nl/documents/1404/Rapport_Lokale_Seizoensopslag_Energie.pdf
- Royal Haskoning DHV. (2024). *De Families van Energy Hubs in Nederland*.
- Royal HaskoningDHV; WarmtelinQ. (2025, april 9). *Maatschappelijke kosten & Eindgebruikerskosten Analyse WarmtelinQ+*.
- RVO. (2025). *Flexibilisering van elektriciteitsverbruik door bedrijven en instellingen: huidige status en beleidsacties*.

- Schilt, R. (2024, november 11). Onderzoek Merosch: meer collectieve aandacht voor het individuele spoor. Opgehaald van <https://merosch.nl/actueel-kennis/onderzoek-merosch-meer-collectieve-aandacht-voor-het-individuele-spoor>
- Stichting Cluster Zes. (2025, januari). *Van inzicht naar actie. Landelijke Cluster Energie Strategie*. Opgehaald van <https://files.enflow.nl/26b93bd8-4832-473a-bb56-a58f7d707680/4b3523bb-d6a0-46ba-81d4-74c07242b9b7/publications/landelijke-cluster-energie-strategie-cluster-6-final.pdf>
- Strijker, B. (2025). *1 jaar operationele e-hub Lage Weide Utrecht EMCU*. Utrecht. Opgehaald van https://drive.google.com/drive/folders/1wGUSFWAs_WM60tSHzBFbUptfLqSMFJzm
- TenneT. (2025). *Monitor Leveringszekerheid*.
- Terpstra, E. (2025). *Batterijen bieden de industrie kansen in een overvol energienetwerk*. Novar. Opgehaald van <https://www.novar.nl/kennisbank/industrie/batterijen-bieden-de-industrie-kansen-in-een-overvol-energienetwerk/>
- TKI Energie en Industrie. (2022). *Whitepaper industriële flexibiliteit. De complexe opgave van de flex*. Opgehaald van https://topsectorenergie.nl/documents/33/TKI_Energie__Industrie_-_Whitepaper_industriele_flexibiliteit_-_221201.pdf
- TNO. (2023). *Flexibiliteit in het elektriciteitssysteem*.
- TNO. (2024). *De bereidheid van consumenten om flexibiliteit te leveren in het energiesysteem in de gebouwde omgeving*. TNO.
- TNO. (2024). *De rol van slimme apparaten bij netcongestie op het laagspanningsnet. Een analyse van flexibiliteitsmogelijkheden, interoperabiliteit en beleidsopties*. TNO.
- TNO. (2024). *Potentie energiebesparing bedrijventerreinen*. Amsterdam: TNO.
- TNO. (2025). *Actieagenda Digitalisering energiesysteem*. Den Haag: KGG.
- TNO. (2025). *Barrières voor flexibiliteit in de voedingsmiddelen en chemische industrie*.
- TNO. (2025). *De potentiële rol van energiegemeenschappen in het energiesysteem*. Opgehaald van <https://energy.nl/publications/energiegemeenschappen-in-het-energiesysteem/#:~:text=Energiegemeenschappen%20dragen%20met%20hun%20huidige,de%20impact%20op%20hun%20leefomgeving>.
- TNO. (2025). *Flexibiliteit en energie assets op bedrijventerreinen: een toekomstverkenning*.
- TNO. (2025). *Verkenning van vraagrespons in de Nederlandse energie-intensieve industrie*. Publicatie verwacht.
- TNO. (2025, juli 29). Voor het huishoudboekje is woningisolatie belangrijker dan kosten netverzwaring. *ESB*. Opgehaald van <https://esb.nu/voor-het-huishoudboekje-is-woningisolatie-belangrijker-dan-kosten-netverzwaring/>
- TNO e.a. (2024). *Routekaart Samenwerken in Energy Hubs: de nulmeting*.
- Transform. (2024). *Het energiesysteem decentraal in goede banen: Een gedeeld beeld van wat het decentrale energiesysteem is en hoe we er samen aan kunnen werken*.
- Transform. (2025). *Verslag Driedaagse Deepdive Decentraal*.
- Trinomics B.V. (2024). *WKK-onderzoek. Onderzoek naar de effecten van de beperking van de inputvrijstelling voor warmtekrachtkoppelingssystemen*. Eerste Kamer der Staten-Generaal. Opgehaald van https://www.eerstekamer.nl/overig/20241220/bijlage_4_onderzoek_naar_de/document3/f=vmjvef6gumzc.pdf
- Vliet, J. v., Suilen, J., & Wurpel, G. (2025). *Inspiratieboek warmtenetten en netcongestie*. TKI Urban Energy.
- Wieczorek, A., Bommel, N. v., El-Feiaz, A., Kluskens, N., Niet, I., Summeren, L. v., . . . Di Somma, M. (2024). Energy Communities as an alternative way of organizing the energy system in Europe: Key societal aspects. *Integrated local energy communities: From concepts and enabling conditions to optimal planning and operation*, pp. 353-388.

Bijlage A

Lijst met geïnterviewde organisaties en personen

Tabel A.1: Geïnterviewde organisaties en personen

Organisatie	Contact
Alliander	Bart van der Laan
NP RES	Arjan Zuiderduin
Provincie Utrecht	Hans Rijnten
Onafhankelijk consultant energiecoöperaties	Anne-Marieke Schwenke
TKI Urban Energy	Lennart Lalieu
ABB Ede	Kees Jan 't Mannetje
REFORMERS Bedrijventerrein Boekelermeer	Bart Kaas (TNO) Joep Sanderink (NEC) Cees Groot (Groot Ecobouw)
Gemeente Utrecht	Gertjan Geurts
De Warmte Maatschappij	Hubert Bloemen

Bijlage B

Interviewprotocollen

Voor het interviewen van betrokkenen in de praktijk zijn interviewprotocollen opgesteld en gebruikt. B.1 geeft het interviewprotocol dat gehanteerd is voor betrokkenen bij de vier cases. B.2 geeft het interviewprotocol gebruikt voor het interviewen van experts over de algemene potentie van decentrale ontwikkelingen.

B.1 Interviewprotocol casestudies

Interviewprotocol – Decentrale ontwikkelingen energiesysteem

Duur: ± 60 minuten

Doel: Inzicht verkrijgen in motivatie, aanpak, impact, kosten, schaalbaarheid, risico's en geleerde lessen van decentrale energie-initiatieven.

Introductie – 10 min

[introductie project en onderzoekers

Toestemming audio-opname en verwerking gegevens etc.]

Inleiding case: Wie, Waarom & Wat (15 min)

Doel: Begrijpen van de motivatie en aanpak van het project.

Vragen:

1. Wie heeft initiatief genomen om dit project te starten?
2. Wat was voor jullie de aanleiding om met dit project te starten?
 - a. Evt. Wat was voor andere betrokkenen de aanleiding?
3. Wat was het doel van het project/de aanpak? Waar optimaliseren jullie met elkaar voor?
4. Kun je kort beschrijven wat er tot nu toe is gedaan en wat er nog gepland staat?
 - a. Welke installaties zijn betrokken?
 - b. Kan je de activiteiten beschrijven vanuit het oogpunt van het business model?
 - c. En vanuit het oogpunt van het energiesysteem? Activiteiten, denk aan levering warmte/elektriciteit/flexibiliteit, opslag, besparing, etc.
 - d. Fase van ontwikkeling
 - e. Grootste uitdaging volgende stap

Impact (20 min)

Doel: Inzicht in de concrete impact van het project.

Vragen:

2. Wat is de belangrijkste impact van het project?
3. Wat zijn de belangrijkste resultaten tot nu toe op het gebied van **energiebesparing**?
 - a. Heb je daar cijfers of schattingen van?
 - b. Energiebesparing voor afnemers?
 - c. Energiebesparing voor hele case?
4. Hoeveel is de **toename van gebruik van lokale energiebronnen**?
5. Heeft het project nieuwe aansluitruimte op het net gecreëerd? E.g. voor laadinfrastructuur, PV op dak, uitbreiding?
 - a. Heb je daar cijfers van? E.g. vermogens.
6. Welke invloed heeft dit gehad in termen van **impact op het elektriciteitsnet**?
 - a. *afname van capaciteitspiek, netaansluiting, nieuwe contractvormen*

b. hoe lang kan de case draaien op lokale bronnen of opgeslagen energie in geval van dunkelflaute?

c. in welke gevallen is belasting op het 'centrale' net het grootste?

7. Zijn er **andere vormen van impact** die jullie zien of nastreven?

Bijvoorbeeld: samenwerking in de buurt, betrokkenheid van werknemers, kostenbesparing, nieuwe activiteiten, nieuwe inkomstenbronnen?

1. Welke negatieve impact is er?
9. Waar zitten volgens jullie de **grootste risico's** in deze oplossing? *Bijvoorbeeld: dunkelflaute, extreme kou, technische afhankelijkheden, conflicten op werkvloer of met bewoners?*

Business case (10 min) (min 45)

Doel: Begrijpen van de financiële en operationele haalbaarheid.

Vragen:

2. Welke investeringen zijn er nodig geweest voor dit project?
Vanuit welke partij?
3. Welke opbrengsten levert het op?
 - a. Voor welke partij? (lagere kosten, nieuwe inkomstenstromen)

Randvoorwaarden (10 min) (min 50)

10. Welke randvoorwaarden zijn/waren essentieel om dit project te laten slagen? (juridisch, samenwerking & governance, beleid, financieel, technisch, digitaal,...)
Hoe hebben jullie dit voor elkaar gekregen? Welke succesfactoren waren daarvoor nodig?
11. Wat moet geregeld zijn om dit op andere plekken voor elkaar te krijgen? (juridisch, samenwerking & governance, beleid, financieel, technisch, digitaal,...)

Geleerde lessen (10 min) (min 60)

Doel: Reflectie op het proces en leerpunten.

Vragen:

13. Wat zijn de belangrijkste lessen die jullie hebben geleerd tijdens dit project?
 - a. Waar lagen de grootste uitdagingen?
 - b. Wat was essentieel om de oplossing voor elkaar te krijgen?
 - a. Zijn er dingen die jullie anders zouden doen als je opnieuw zou beginnen?
 - b. Wat is de volgende stap? Waarom?

Opschaling (10 min) (min 70)

9. Denk je dat deze aanpak schaalbaar is naar andere wijken of bedrijven? Wat zijn belangrijke overwegingen/uitdagingen daarbij?

Documentatie

Welke documentatie is er beschikbaar over het ontwikkelproces en prestaties tijdens de exploitatiefase?

Afsluiting

Dank + planning meedelen.

B.2 Interviewprotocol overige betrokkenen

Interviewprotocol decentrale ontwikkelingen

Doelgroep: Beleidsmakers & netbeheerders

Duur: ± 60 minuten

Verfijnen en aanpassen per interview

Introductie (10 min)

Definitie decentrale ontwikkelingen (15 min)

Doel: Begrip krijgen van de visie en definitie van het decentrale energiesysteem en mogelijke decentrale interventies die de organisatie veelbelovend vindt.

1. Hoe definieert uw organisatie 'decentrale ontwikkelingen in het energiesysteem'? Welke ontwikkelingen vallen daar wel en niet onder? *Telkens doorvragen: heb je hier voorbeelden van?*
2. Het ministerie ziet in bepaalde decentrale interventies een kans om op infrastructuurinvesteringen in het elektriciteitsnet te besparen.

Wij vertrekken nu vanuit dit lijstje interventies:

- *Energiebesparing kleinverbruikers*
- *Flexibiliteit kleinverbruikers*
 - a. *Sturing zonnepanelen (dimmen)*
 - b. *Sturing warmtepompen (verschuiving vraag/pieken)*
 - c. *Sturing publieke en private laadpalen (verschuiving vraag/pieken)*
 - d. *Sturing thuisbatterijen (verschuiving vraag/pieken)*
- *Energiebesparing grootverbruikers*
- *Flexibiliteit grootverbruikers*
 - a. *Aftopping piekvraag / verschuiving vraag*
 - b. *Aanbod dimmen*
- *Flexibiliteit groepen afnemers*
 - a. *Gezamenlijk sturen op maximale piekvraag*
 - b. *Gezamenlijk sturen op gebruik van eigen / lokaal aanbod*
- *Realisatie van (collectieve) opslag*
- *Locatiesturing aanbodontwikkeling*
- *Energiehubs (is eigenlijk een combinatie van bovenstaande dingen)*
- *Lokale warmtenetten*

Welke decentrale interventies vinden jullie het meest veelbelovend? En waarom?

- b. Zo wel, waardoor wordt die besparing dan vooral gerealiseerd?
- c. Zo wel, van welke orde grootte?
- d. Zo nee, waarom niet?

Impact op het elektriciteitsnet – per interventie (20 min)

Doel: Inzicht krijgen in de verwachte en gewenste impact.

[Volgende vragen stellen over de meest veelbelovende interventie. Als tijd het toelaat, herhalen voor volgende interventie. Eventueel vergelijken tijdens de beantwoording met impact andere interventies]

3. Wat is volgens u de mogelijke verwachte impact van deze decentrale interventie(s) op het elektriciteitsnet?
 - a. Verwacht u vermindering noodzaak voor netverzwaring? Waarom wel/niet?
 - b. Verwacht u meer lokale benutting van lokale bronnen? Hoeveel?
4. Hoe vaak is er toch een grote vraag vanuit bronnen elders / transport via het hoogspanningsnet? *Denk aan dunkelflaute of extreme kou?*
5. Welke andere mogelijke impact ziet u van **deze** decentrale interventie(s)?

Bijvoorbeeld: samenwerking lokaal, draagvlak bedrijven/burgers, economische kansen, versnelling woningbouw, nieuwe markten, etc. Telkens doorvragen: heb je hier voorbeelden van?

Schaalbaarheid, randvoorwaarden, risico's (15 min) – per interventie

Doel: Inzicht in de haalbaarheid, randvoorwaarden en risico's.

[Volgende vragen stellen over de meest veelbelovende interventie. Als tijd het toelaat, herhalen voor volgende interventie. Eventueel vergelijken tijdens de beantwoording met impact andere interventies]

Telkens doorvragen: heb je hier voorbeelden van?

6. Waar is de impact (op besparingen op infrastructuurinvesteringen) van afhankelijk?
7. Waar liggen de grootste uitdagingen om deze interventies te realiseren? (juridisch, technisch, digitaal, governance, sociaal, financieel, etc) Welke randvoorwaarden zijn essentieel
8. Hoe schaalbaar acht u de genoemde decentrale interventie(s)? Wat is er volgens u nodig om deze op te schalen?
9. Welke uitdagingen ziet u op vlak van beleid? Waar is een aanpassing of aanvullend beleid gewenst?
10. Welke risico's ziet u bij deze interventie(s)?

Benodigde investeringen (10)

[Volgende vragen stellen over de meest veelbelovende interventie. Als tijd het toelaat, herhalen voor volgende interventie. Eventueel vergelijken tijdens de beantwoording met impact andere interventies]

Telkens doorvragen: heb je hier voorbeelden van?

11. Vanuit welke partijen zijn er investeringen nodig voor deze oplossingen?
 - a. Waar zijn die investeringen voor nodig
 - b. En welke orde grootte?
12. Hoe verhouden deze investeringen zich tot investeringen in een scenario met een minder decentraal energiesysteem?

Reflectie, geleerde lessen (10 min)

Doel: Lessen, aanbevelingen en afsluitende opmerkingen.

13. Wat zijn volgens u de belangrijkste lessen of inzichten tot nu toe rondom decentrale ontwikkelingen en interventies?
14. Is er nog iets dat u wilt toevoegen dat niet aan bod is gekomen?

Afsluiting (2 min)

Energy & Materials Transition

Radarweg 60
1043 NT Amsterdam
www.tno.nl

TNO innovation
for life