

Visiepaper

# Toekomstbestendige lokale energiesystemen voor wijken en buurten



**TNO** innovation  
for life

TNO-2026-16647  
1 mei 2026

# Samenvatting

## 1. Lokale energiesystemen per buurt of wijk

Wij pleiten voor lokale energiesystemen per buurt of wijk waarin elektriciteit, warmte en koude integraal worden ontworpen en lokaal worden gestuurd. Ze blijven gekoppeld aan de centrale infrastructuur, maar benutten lokale opwek, opslag en slimme sturing om vraag en aanbod te balanceren. Dit ontlast het net, versnelt verduurzaming en vergroot draagvlak.

## 2. Waarom nu?

De energievraag groeit door elektrificatie (mobiliteit, gebouwen, data); duurzame opwek neemt toe maar schommelt; het elektriciteitsnet zit vol. Klassieke grootschalige warmtenetten bieden niet overal uitkomst en zijn op veel plekken gestopt. Ondertussen zijn bewoners bezorgd over gasprijzen en kiezen ze voor isolatie, warmtepompen, airco's en zonnepanelen, en er ontstaan kleine collectieve systemen. Nieuwe wetgeving geeft meer ruimte voor lokaal energiedelen en flexibiliteit. Dit is het moment om lokaal te ontwerpen, sturen en op te schalen.

## 3. Wat is een lokaal energiesysteem?

Een samenhangend systeem binnen een wijk waarin opwek, opslag, distributie en sturing samenwerken. Het benut lokale bronnen (zon-PV, zonnewarmte, omgevingswarmte uit bodem, buitenlucht en water (aquathermie), geothermie, restwarmte), lokale opslag (WKO, warmtebuffers, batterijen) en energiedragers (warmte, koude, elektriciteit) in samenhang. Niet autarkisch: het blijft verbonden met het hoofdnet.

## 4. Richtinggevende publieke waarden

- Duurzaam: geen terugval op fossiele bronnen.
- Betrouwbaar: passend bij de wijkvraag en flexibel bij pieken en dalen.
- Rechtvaardig: eerlijk in kosten/baten, zorgvuldig proces, ruimte voor erkenning van verschillende groepen.
- Betaalbaar: transparante kosten, prikkels voor kostendaling en redelijk rendement als basis voor governance.

## 5. Ontwerpprincipes (kort en concreet)

- Vraaggestuurd en integraal: begin bij de lokale warmtevraag en pas de 'right tool for the job' toe (geen one-size-fits-all).

- Maximaal lokaal, slim gekoppeld: benut lokale opwek eerst lokaal; gebruik het hoofdnet als aanvulling.
- Flexibiliteit in de wijk: warmtebuffers en WKO voor seizoensbalans; batterijen en EV's voor kortcyclische balans.
- Opbouw is modulair en plug-and-play componenten: standaardcomponenten, eenvoudig te plaatsen, goed te schalen.
- Eigendom en vertrouwen: meer publiek/gemeenschappelijk eigendom geeft lagere rentes en dus lagere kapitaallasten, en vergroot draagvlak.

## 6. Twee routes voor uitrol

1. Kleine stappen vooruit  
Start met isolatie en (hybride) individuele warmtepompen; koppel later aan een collectieve bron. Combineer met deelmobiliteit en lokale opslag.
2. Kralen rijgen  
Begin klein (enkele woningen of blok), bewijs succes, verbind modules en breid stapsgewijs uit.

Beide routes kunnen naast elkaar bestaan en sluiten aan bij de praktijk in wijken én schaarse uitvoeringscapaciteit.

## 7. Maatschappelijke inbedding: de kritieke succesfactor

De techniek is vaak beschikbaar (hoog Technology Readiness Level), maar projecten stranden op betaalbaarheid, transparantie, governance, standaardisatie en ruimtelijke inpassing (laag Societal Embeddedness Level).

Prioriteiten:

1. Standaardiseren en transparant maken  
Heldere prestatie-eisen, transparante kosten/baten, vergelijkbare businesscases.
2. Lokaal zeggenschap borgen  
Rol van gemeente en coöperatie helder; beslis- en toezichtmomenten; procedurele rechtvaardigheid.
3. Financiering realistischer  
Lage rente via garanties/waARBorgfonds, langere afschrijving, bundeling van projecten.
4. Meervoudige waarde  
Combineer energie met ruimtelijke kwaliteit, klimaatadaptatie en sociale doelen; leg keuzes participatief vast.

## 8. Cruciale technieken en 'no-regret'

- No-regret: isolatie en lagetemperatuurafgifte (vloerverwarming of LT-convectoren).
- Bouwstenen: warmtepompen, elektrische boilers, infraroodpanelen, warmtebuffers, WKO, PV + batterij.
- Slimme sturing: energiemangement dat goedkope lokale stroom koppelt aan warmtevraag (bijv. buffers laden buiten piekuren).
- Let op: leg temperatuurzones, prestatie-indicatoren en kostenopties van LT/ZLT-systemen helder vast.

## 9. Rollen en spelregels

- Gemeente: regie, gebiedskaarten (vraag/aanbod/opslag), selecteren van routes per wijk of bepalen randvoorwaarden vanuit groter belang, borging van publieke waarden.
- Coöperaties/warmtegemeenschappen: eigendom/zeggenschap, participatie, lokale exploitatie.
- Netbeheerder: afstemming netcapaciteit, flexibilitiediensten, koppeling met hoofdnnet.

- Marktpartijen: gestandaardiseerde proposities, uitvoering, prestatiecontracten.
- Rijk/Provincie: kaders en instrumenten voor financiering, standaardisatie en tariefsystematiek.

Zo leggen we de basis voor lokale energiesystemen die niet alleen technisch kloppen, maar óók functioneren voor bewoners, bedrijven en bestuurders.



# Inhoud



1. [Doel, scope en doelgroep van de visie](#)
2. [Lokale energiesystemen als sleutel voor het energiesysteem van de toekomst](#)
3. [Veranderende context](#)
4. [Kenmerken van lokale energiesystemen](#)
5. [Realisatiepaden collectieve warmtevoorziening en de plek van lokale energiesystemen](#)
6. [Maatschappelijke inbedding als kritieke ontwikkelvoorwaarde](#)
7. [Wat leren we hieruit?](#)
8. [Draft Kennisagenda](#)

Bronnen

# 1. Doel, scope en doelgroep van de visie

Deze visie dient als basis voor kennisagenda over lokale energiesystemen, en om binnen (en buiten) TNO uit te dragen wat bijdrage van lokale energiesystemen kan zijn. Een gedeelde visie draagt bij aan het beter stroomlijnen en coördineren van de kennisontwikkeling.

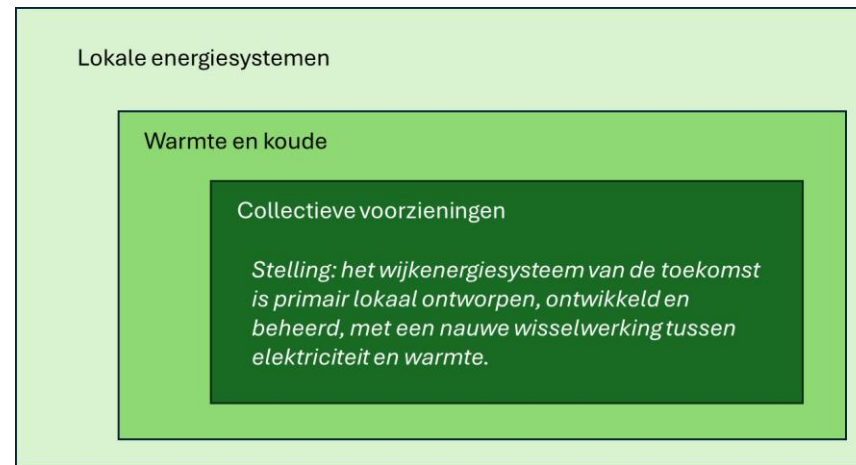
Lokale energiesystemen zijn samenhangende systemen binnen een afgebakend gebied waarin verschillende componenten – zoals opwekking, opslag, distributie en sturing – samenwerken om de energievoorziening te realiseren. Ze omvatten zowel elektriciteit als warmte en koude, en maken gebruik van lokale bronnen en infrastructuur om vraag en aanbod op elkaar af te stemmen<sup>1</sup>. Daarnaast speelt de participatie van lokale partijen en burgers een cruciale rol. Lokale energiesystemen zijn niet compleet zelfvoorzienend, maar maken deel uit van de transitie van een centraal aangestuurd systeem naar een gekoppeld netwerk van lokale systemen. Deze systemen blijven verbonden met het centrale net, maar binnen deze netwerken kan lokaal gestuurd worden, zodat zij bij kunnen dragen aan de integratie van lokale hernieuwbare bronnen, flexibiliteit, veerkracht én uitnodigen tot gebruikersparticipatie.

In deze visie richten wij ons op één belangrijk onderdeel van het lokale energiesysteem: warmte- en koude.

We focussen daarbij op een specifieke oplossingsrichting, namelijk collectieve warmte- en koudevoorzieningen. Onze analyse richt zich op wat er nu en in de toekomst nodig is om deze voorzieningen te ontwikkelen, waar ze het beste passen, en hoe ze zich verhouden tot alternatieve oplossingen en de elektriciteitsvoorziening, met specifieke aandacht voor collectieve warmte en koudevoorzieningen.

Wij hanteren voor deze visie de volgende stelling: het wijkenergiesysteem van de toekomst is primair lokaal ontworpen, ontwikkeld en beheerd, met een nauwe wisselwerking tussen elektriciteit en warmte. Wij benadrukken dat dit een stelling is, geen voorspelling, maar een perspectief dat helpt om kansen te identificeren en oplossingen te verkennen voor de huidige uitdagingen in het energiesysteem.

Dit plaatsen we vervolgens in de context van de transitie van een historisch centraal georganiseerd energiesysteem naar een systeem dat ook op lokaal niveau nieuwe technieken kan integreren en beter



Figuur 1: Focus van deze visie in relatie tot lokale energiesystemen

aansluit bij de wensen van eindgebruikers. De kenmerken van lokale energiesystemen en mogelijke manieren hoe die lokale energiesystemen tot stand komen beoordelen we op technologische aspecten (Technology Readiness Level) en op de mate van maatschappelijke inbedding (Societal Embeddedness Level). Ten slotte beschrijven we de kansen en uitdagingen voor lokale energiesystemen, om van daaruit te komen tot een kennisagenda.

Doelgroep van deze visie zijn in de eerste plaats de TNO collega's. Zo bouwen we met elkaar aan een collectief beeld over de te ontwikkelen kennis. In de tweede plaats kunnen dit ook externe stakeholders zijn, om hen bekend te maken met de visie van TNO over ontwikkelpaden naar een toekomstbestendige warmtevoorziening.

<sup>1</sup> Expertteam Energiesysteem 2050. (2023). Adviesrapport Energiesysteem 2050: Naar een robuust, duurzaam en betaalbaar energiesysteem. Den Haag: Ministerie van Economische Zaken en Klimaat. Beschikbaar via: <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2023/06/30/adviesrapport-energiesysteem-2050>

## 2. Lokale energiesystemen als sleutel voor het energiesysteem van de toekomst

Het wordt steeds relevanter om nieuwe energiesystemen in de gebouwde omgeving vanuit een lokale schaal te ontwerpen en (her)ontwikkelen. Er wordt veel gevraagd van het centrale elektriciteitsnetwerk en de partijen die dit beheren. De netcongestie maakt duidelijk dat beschikbaarheid van energie een belangrijke voorwaarde is voor nieuwe economische activiteiten. Lokale energiesystemen met elektriciteit, warmte en koude kunnen de centrale infrastructuur ontlasten.

Lokale netwerken worden ook aantrekkelijker door de toenemende en steeds goedkopere lokale opwek van hernieuwbare elektriciteit, de toename van assets zoals elektrische auto's, batterijen, WKO's en warmtelussen voor energie-opslag en -uitwisseling. Daarnaast kunnen kleinschalige initiatieven een kraamkamer zijn van innovatie, waar met slimme ideeën steeds weer betere invullingen komen voor elke lokale situatie, en er 'systemisch' geleerd wordt.

Lokale systemen kunnen ten slotte ook weerbaarder zijn in een wereld met toenemende geopolitieke spanningen: ze kunnen gemakkelijker zelf in hun energie voorzien, zijn minder afhankelijk van prijsfluctuaties op een volatiele markt en zijn minder verbonden met het grotere netwerk.

Veranderende wetgeving vormt een bepalende factor, vanuit condities en mogelijkheden. De WCW<sup>2</sup>, Energiewet en aankomende Europese richtlijn over energiedelen bieden burgers, bedrijven en overheden de mogelijkheid om energie lokaal op te wekken, beheren en delen. De ontwikkelingen van centrale collectieve warmte is ook door deze wetgevingstrajecten behoorlijk stilgevallen; veel initiatieven zijn weer gestopt.

Een aantal maatschappelijke principes zijn van belang voor deze lokale energiesystemen, aansluitend bij de NPE<sup>3</sup>-doelen.

- **Duurzaam:** de toekomstige energievoorziening in de wijk hoeft niet terug te vallen op fossiele bronnen.
- **Betrouwbaar:** kan voorzien in een redelijke vraag, heeft voldoende flexibiliteit om schommelingen in vraag en aanbod op te vangen en is in staat schokken op te vangen.
- **Rechtvaardig:** het systeem houdt rekening met distributieve, procedurele en erkennende rechtvaardigheid.
- **Betaalbaar:** Transparantie van kosten, incentives voor kostendalingen, en redelijk financieel rendement zijn voorwaardelijk voor de governance.

<sup>2</sup> WCW: Wet Collectieve Warmte

<sup>3</sup> NPE: Nationaal Plan Energiesysteem

## 3. Veranderende context

Energie is een noodzakelijke voorwaarde voor wonen en werken. Decennialang was deze energie vanzelfsprekend beschikbaar in woonwijken en bedrijventerreinen. Steeds vaker is dit een beperkende factor voor nieuwe ontwikkelingen. Tegelijkertijd lopen decentrale oplossingen vast vanwege een exclusieve focus op warmte. Juridische kaders maken lokale uitwisseling tussen energiedragers binnenkort makkelijker. Daarnaast zijn er nog een aantal aanvullende en technische ontwikkelingen die relevant zijn. Deze paragraaf schetst deze uitdagingen voor lokale energiesystemen.

### Samenspel van centrale systemen en lokale systemen

Het centraal in Groningen gewonnen gas en grote elektriciteitscentrales bepaalden jarenlang de inrichting van het Nederlands energiesysteem als een centraal gestuurd systeem. Door het wegvallen van het Gronings gas, maken we op dit moment gebruik van geïmporteerd gas uit het buitenland, met geopolitieke afhankelijkheden en hoge prijzen als gevolg.

Het aandeel van alternatieven als zonnepanelen en windmolens groeit rap. En de kosten zijn nog steeds aan het dalen. Op veel momenten in het jaar is er een overproductie aan duurzame elektriciteit met negatieve prijzen als gevolg. Omdat de productie van zon en windenergie volatiel is, kan deze echter niet altijd de vraag beantwoorden.

### Uitdagingen ontwikkeling traditionele warmtenetten

Gemeenten die bezig zijn met het energiesysteem, richten zich voornamelijk op de warmtevoorziening. Bestaande decentrale energiesystemen zijn hoofdzakelijk warmtenetten. Echter, klanten van warmtenetten betalen in Nederland veel meer dan in andere landen<sup>4</sup>, en zijn afhankelijk van een monopolie. Vaak is het onduidelijk wat warmtenetten kosten<sup>5</sup>, terwijl huiseigenaren aangeven dat transparantie over de kosten heel belangrijk is<sup>6</sup>. Daardoor is ook het draagvlak verslechterd<sup>7</sup>. De huidige generatie warmtenetten sluiten niet aan op behoeftes van de eindgebruikers. Kortom, veel warmtenetprojecten liggen stil.

### Opkomst lokale technieken

Ondertussen zijn warmtepompen in de bestaande bouw wél aan een succesvolle opmars bezig<sup>8</sup> en neemt het aantal individuele oplossingen toe. De prognose voor dit jaar is 170.000 nieuwe warmtepompen en in 2024 zijn er 268.000 airco's verkocht. Daarnaast worden kleinere collectieve warmtesystemen met een tiental woningen ontwikkeld<sup>9</sup>.

In wijken waar de levering van gas op enig moment stopt, moet de energie-infrastructuur ook aangepast worden. Woningeigenaren isoleren hun huizen voor comfort, energiebesparing en beschermen zich zo ook tegen hoge gasprijzen. Ook Europese regels zetten in op steeds meer isolatie<sup>10</sup>. Huishoudens installeren massaal warmtepompen.



<sup>4</sup> <https://www.tno.nl/nl/newsroom/insights/2024/03/nederlandse-tarief-stadsverwarming/>

<sup>5</sup> <https://www.acm.nl/system/files/documents/review-gegevens-rendementsmonitor-tno.pdf>

<sup>6</sup> TNO (2026): <https://publications.tno.nl/publication/34645570/268h18ws/TNO-2025-R13167.pdf>

<sup>7</sup> <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421523004457>  
<https://publications.tno.nl/publication/34642203/KET3mG/TNO-2024-P10466.pdf>  
<https://www.pbl.nl/publicaties/aardgasvrij-eeen-goed-idee-maar>

<sup>8</sup> Centraal Bureau voor de Statistiek (CBS). (2025). Monitor Warmtepompen 2025. Geraadpleegd van <https://www.cbs.nl/nl-nl/longread/aanvullende-statistische-diensten/2025/monitor-warmtepompen-2025>

<sup>9</sup> HIER & Energie Samen. (2024). Lokale Energie Monitor 2024. Utrecht: Klimaatstichting HIER.

<sup>10</sup> <https://www.rvo.nl/onderwerpen/wetten-en-regels-gebouwen/epbd-iv>

Zonnepanelen worden niet alleen goedkoper, maar ook gemakkelijker aan te brengen op allerlei plekken, met bijvoorbeeld folies en wandpanelen. Er is ook veel potentie die nog niet wordt benut.

Overtollige elektriciteit hoeft niet weggegooid te worden, maar kan lokaal worden opgeslagen, als elektriciteit of warmte, en kan later weer gebruikt worden. Restwarmte van supermarkten, ziekenhuizen, zwembaden of het metrostelsel kan opnieuw worden gebruikt in woningen. De kosten van de bijbehorende technieken, zoals warmtepompen, opslag van elektriciteit en warmte blijven dalen<sup>11</sup>.

Opslag wordt bij hernieuwbare opwek steeds belangrijker, omdat de wind niet altijd waait, en de zon niet altijd schijnt. Ook de technologie ontwikkelt zich, waardoor oplossingen hiervoor steeds meer beschikbaar komen. Hier bieden de verschillende energiedragers verschillende rollen: zo kan warmte veel makkelijker voor langere tijd en in grote schaal worden opgeslagen dan elektriciteit.<sup>12</sup>

We zien dat ook terug in de opkomst van WKO<sup>13</sup>-systemen en batterijen in Nederland, en de toenemende

implementatie van hernieuwbare warmte, zoals geo- en aquathermie.<sup>14</sup>

Vanuit deze ontwikkelingen geredeneerd, moeten we van alleen warmte naar integrale systemen met elektriciteit, warmte en koude. Wetenschappelijke literatuur laat zien dat kostendalingen bij zon, wind, batterijen en warmtepompen de mogelijkheid van een duurzaam en betrouwbaar energiesysteem tegen lage kosten ontsluiten indien warmte, elektriciteit en koeling op de juiste manier met elkaar samenwerken<sup>15</sup>. Die ‘juiste manier’ wordt bepaald door de kenmerken van de gebouwen en haar bewoners.

### Veranderende kaders vanuit wetgeving

In de tussentijd zijn de belangrijkste juridische kaders voor de levering van warmte en elektriciteit aan het verschuiven. Hierdoor ontstaat steeds meer ruimte voor lokaal georganiseerde netten. In de WCW krijgen lokale burgers, bedrijven en overheden de mogelijkheid om zich te organiseren in een warmtegemeenschap en zo een eigen warmtebedrijf op te richten.

De Energiewet<sup>16</sup> biedt ruimte aan actieve afnemers en energiegemeenschappen om actief te worden op en rondom

elektriciteitsmarkten. Met nieuwe congestie-managementproducten en met alternatieve aansluit- en transportrechten wordt het mogelijk om te sturen op efficiënter netgebruik.<sup>17</sup>

Eveneens is er nieuwe wetgeving aanstaande die het delen van energie mogelijk gaat maken.<sup>18</sup> Actieve afnemers kunnen dan onderling energie met elkaar ‘delen’ onafhankelijk van bij welke leverancier ze zitten.<sup>19</sup>

In het Nationaal Plan Energiesysteem<sup>20</sup> krijgen collectieve warmte-oplossingen een belangrijk aandeel in het energiesysteem van de toekomst. De ontwikkelingen op lokaal niveau worden verder gestimuleerd door energiehubs en energiegemeenschappen actief te ondersteunen.<sup>21</sup> Netbeheerders krijgen met de Energiewet ook bevoegdheden om actief opslag- en productiefaciliteiten te beheren en integreren in congestie en systeembeheermechanismen.

### Lokale energiesysteem als oplossing voor de veranderende context

De waargenomen uitdagingen en ontwikkelingen in het energiesysteem vragen om aanpassingen in de aanpak van de warmtetransitie.

Het is verstandig om meer uit te gaan van lokale geïntegreerde energiesystemen dan van warmtenetten als losstaand energiesysteem. Er zijn internationaal al veel voorbeelden van goed functionerende lokale energiesystemen<sup>22</sup>. De warmtenetten zijn daarbij op steeds lagere temperaturen ingericht, zodat zij niet alleen kunnen verwarmen maar ook koelen. Voor de toekomst waarin de opwarming van de aarde zich naar alle waarschijnlijkheid nog decennialang zal doorzetten wordt dit steeds belangrijker.

Dergelijke lokale systemen verschillen per wijk. De inrichting en het ontwerp is afhankelijk van wat de lokale bronnen en het lokale gebruik is. De wensen van de gebruikers spelen ook mee.

Grote stakeholders in de wijk kunnen vaak als restwarmtebron dienen, denk aan een ziekenhuis. Maar het ziekenhuis moet dat dan wel willen, anders lukt het niet. Voor gebruikers geldt dat het collectieve systeem ook voor hen aantrekkelijk moet zijn. Anders blijft een warmtepomp aantrekkelijker.

<sup>11</sup> Way, R., Ives, M. C., Meisl, G., & Sharpe, S. (2022). Empirically grounded technology forecasts and the energy transition. *Nature Energy*, 7(2), 151–160. <https://doi.org/10.1038/s41560-021-00934-z>

<sup>12</sup> National Renewable Energy Laboratory (NREL). (2023). Economic long-duration electricity storage by using low-cost thermal energy storage and high-efficiency power cycle (ENDURING) (NREL/TP-5700-84728). Golden, CO: U.S. Department of Energy. <https://www.nrel.gov/docs/fy23osti/84728.pdf>

<sup>13</sup> WKO: Warmte Koude opslag

<sup>14</sup> Jongerius, J. & Cuypers, R. (2024, 14 november). Innovatieroadmap warmteopslag voor de gebouwde omgeving in Nederland (TNO Rapport 2024 R11963). Delft: TNO. Retrieved from [https://topsectorenergie.nl/documents/1314/TNO\\_Innovatieroadmap\\_warmteopslag\\_voor\\_de\\_gebouwde\\_omgeving\\_in\\_Nederland\\_v241007\\_final.pdf](https://topsectorenergie.nl/documents/1314/TNO_Innovatieroadmap_warmteopslag_voor_de_gebouwde_omgeving_in_Nederland_v241007_final.pdf)

<sup>15</sup> <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9837910/>

<sup>16</sup> <https://wetten.overheid.nl/BWBR0050714/2026-01-01>

<sup>17</sup> Netcode Elektriciteit

<sup>18</sup> Implementatie van de art. 15a van de EMD-richtlijn 2024/1711; Lees ook [Energiedelen, wat is het?](#) - Energy.nl

<sup>19</sup> [Implementatie van energiedelen](#) - Energy.nl

<sup>20</sup> Hoofdkeuze 1: Nu maxi- male inzet op aanbod van duurzame energie en energie-infrastructuur: Centraal en Decentraal.

<sup>21</sup> Stimuleringsfonds Energiehubs, Kamerbrief Decentrale ontwikkeling van het energiesysteem, 18 juli 2025, Kamerbrief De rol van energiegemeenschappen in het energiesysteem, 25 september 2025

<sup>22</sup> <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544220304965>

## 4. Kenmerken van lokale energiesystemen

Op basis van de veranderende context en literatuur zien wij op dit moment de volgende kenmerken voor lokale energiesystemen:

- Veel wijken kunnen met lokale energiesystemen energie positief worden; dat betekent dat ze meer opwekken dan verbruiken<sup>23,24</sup>
  - Wijken zijn in principe niet autarkisch, maar ze functioneren als onderdeel van een groter lokaal (warmte of koude) of nationaal (elektriciteits-)systeem, in een zogeheten holarchisch energiesysteem
  - Er is een verscheidenheid aan bronnen die voorzien in warmte en koude
  - Er zijn veel taken voor het realiseren en exploiteren: infrastructuur aanleggen, bronnen opereren, contact met afnemers, optimalisatie, enzovoorts. Bij de verscheidenheid aan systemen hoort ook een verscheidenheid aan diensten door verschillende dienstverleners
  - In de wijk wordt ruimte gemaakt voor opslag van energie. bijvoorbeeld: warmte wordt opgeslagen in een WKO, elektriciteit met een buurt- of thuisbatterij of in een warmteopslag.
  - Ook de energie in flexbronnen zoals buffervaten, warmte in de woning en in elektrische auto's kan slim benut worden
  - Toename van meer plug- and play assets, zoals zonnepanelen in folies; maar ook gehele op elkaar afgestemde systemen: zoals zonnepanelen in combinatie met batterijen.
  - Toename aan lokale collectieve samenwerkingen gericht op samen delen en samen doen: gemeenschappen en hubs
  - Er zijn zowel actieve als meer passieve consumenten. De actieve consumenten krijgen regelruimte, de passieve worden ontzorgd
  - Nieuwe financieringsvormen zijn mogelijk omdat verhouding investeringen/operationele kosten veranderen
  - Eigendom van publiek of gemeenschap inclusief lagere rentepercentages.
- De ontwerpprincipes voor de inrichting van lokale energiesystemen zijn:
- Een lokaal energiesysteem **houdt** bij het ontwerp **rekening met de sterke en zwakke punten van** verschillende energiedragers (warmte, elektriciteit, gas), en de vorm waarin energie wordt gevraagd. Een belangrijk principe dat hierbij ontbreekt is 'the right tool for the job': iedere energievorm (profiel, aard, kwaliteit, temperatuur) heeft eigen krachten en zwaktes, en door af te stappen van one-size-fits-all is toe te werken naar effectievere en efficiëntere energiesystemen. Dat betekent integraal vanuit de vraag kijken naar warmte, elektriciteit én eventueel gas. Daarbij kan het systeem modulair en 'plug and play' zijn opgebouwd.
  - Een lokaal **energiesysteem gaat uit van zoveel mogelijk lokale opwek die ook lokaal gebruikt wordt**, centrale opwek waar nodig.<sup>25</sup>
- Deze kenmerken en ontwerpprincipes van lokale energiesystemen passen goed bij diverse (maatschappelijke) ontwikkelingen.
- Innovatie: warmtepompen, zon-PV batterijen, EV worden goedkoper, integratie afleverset (warmtewisselaar)/monitoring/ventilatie in één eindgebruikerstoestel
  - Systeemintegratie: Overtollige elektriciteit opslaan in het warmtesysteem, flexibiliseringsmogelijkheden en inpassing lokale elektriciteit
  - Digitalisering: Toenemende digitalisering maakt optimalisatie via aansturing van bronnen en warmtepompen mogelijk
  - Veranderende vraag: Toenemen koelvraag, veranderende warmtevraag
  - Beperkte transportcapaciteit; Mogelijkheden om vraag en aanbod lokaal op elkaar aan te passen (via slimme sturing bronnen, netten, pompen, vraag en opslag)
  - Wetgeving: publiek + lokaal eigendom, tariefregulering (WCW), energie delen (Energiewet)
  - Krapte op de arbeidsmarkt, eenvoudigere en goedkopere aanleg
  - Geopolitiek: Gebruik van lokale bronnen en wisselwerking met een centraal systeem maakt minder afhankelijk van één centrale bron of brandstof.

<sup>23</sup> [https://jpi-urbaneurope.eu/wp-content/uploads/2021/10/setplan\\_smartcities\\_implementationplan-2.pdf](https://jpi-urbaneurope.eu/wp-content/uploads/2021/10/setplan_smartcities_implementationplan-2.pdf)

<sup>24</sup> Psarra, I., Figueroa, A., Mfurakazi, E., Tonu, L., van Spyk, A., & Zuidema, C. (2025). Towards an integrated positive energy district landscape: technical and financial analysis for a case study in Hoogkerk, Northern Netherlands. *Energy, Sustainability and Society*, 15, Article 30. <https://doi.org/10.1186/s13705-025-00534-y>

<sup>25</sup> Kamerbrief decentrale ontwikkelingen (Rijksoverheid, 2025): <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/kamerstukken/2025/06/19/decentrale-ontwikkeling-van-het-energiesysteem>



## 5. Realisatiepaden collectieve warmtevoorziening en de plek van lokale energiesystemen

De bestaande kennis rondom collectieve warmtevoorzieningen heeft vooral betrekking op warmtenetten. Ook binnen TNO is hierop veel kennis beschikbaar. We zien echter meerdere routes om die collectieve warmtevoorziening te realiseren, vanuit het doel om de warmtevoorziening van gebouwen te verduurzamen en op het perspectief op individueel en collectief. Deze routes kunnen naast elkaar bestaan.

- **‘Kleine stappen vooruit’**  
Warmteprojecten waar bewoners-eigenaren eerst (individueel of collectief) beginnen met isoleren, met een individuele (hybride) warmtepomp en dan later aangesloten willen worden op een collectieve bron. Met het isoleren van de woningen zetten ze al een stap richting warmte, met het installeren van zonnepanelen beginnen huishoudens ook duurzame energie te produceren en met het aanschaffen van een elektrische deelauto zetten ze al een stap richting ‘samen delen’. Warmte en elektriciteit worden integraal bekeken.

- **‘Kralen rijgen’**  
Warmteprojecten die klein beginnen met een zeer beperkt aantal woningen, daarmee succesvol zijn en vervolgens snel willen uitbreiden naar aansluiten van andere woningen in de buurt. Deze beginnen als kleine systemen die – via het zogenaamde kralen rijgen – met elkaar verbonden worden.
- **‘Grote netten’**: Warmteprojecten voor projecten met hoge dichtheid, eenvormigheid, en beperkte verscheidenheid aan eigenaren, zodat schaal en omvang van warmteproject ook past bij de kenmerken van het vastgoed.
- **‘Opportunistisch aansluiten’**  
Warmteprojecten voor dichtbebouwde gebieden, waaronder appartementencomplexen met een VvE, die aan een hoofdleiding van een warmtenet liggen. In de woningen (en waarschijnlijk ook op het E-net) is te weinig ruimte voor een individuele warmtepompinstallatie, en het dakoppervlak is te beperkt om elektriciteit lokaal op te wekken. Aantakking op het naastliggende warmtenet is een ‘must’.

Onze visie op lokale energiesystemen in dit document betreft vooral de eerste twee routes. Dat neemt niet weg dat voor de 3e en 4e route ook de geïntegreerde benadering van elektriciteit en warmte/koude nodig is. Elementen uit de kennisagenda zullen dus ook voor die routes bruikbaar zijn.

In het geval van warmte komt deze nadruk op lokale systemen logischerwijs voort uit de aard van de energievorm: warmte laat zich slecht over langere afstanden transporteren. Daardoor ligt de potentie juist in het redeneren vanuit de vraag. Er is al waardevolle kennis ontwikkeld over lokale energievraag in de vorm van warmte én elektriciteit, en de mogelijke beschikbare bronnen, en van daaruit naar de benodigde energievormen en infrastructuur<sup>26</sup>. Die kennis vullen we aan met ervaring in het identificeren van lokale behoeftes (stakeholder participatie) en kennis van de oplossingsruimte (?) en het bottom-up organiseren van financiering; gebiedsontwikkeling; zowel als het abstraheren naar de randvoorwaarden die hiervoor nodig zijn vanuit wettelijke kaders, techniek en innovatie.

<sup>26</sup> Energize (2025) Review of existing energy communities, UNEP (2021) District Energy in Cities, Unlocking the potential of Energy Efficiency and Renewable Energy, TNO (2025) Decentrale ontwikkelingen in het energiesysteem

## 6. Maatschappelijke inbedding als kritieke ontwikkelvoorwaarde

Energiesystemen zijn een cruciale infrastructuur voor de samenleving, en aanpassingen daarvan kunnen grote impact hebben op hoe we wonen en werken. Het is daarom belangrijk dat aanpassingen niet alleen technologisch, maar ook maatschappelijk doorontwikkeld zijn.

Huishoudens moeten bijvoorbeeld bereid zijn om elektrisch te koken, en

weerstand daartegen kan ook leiden tot weerstand tegen een warmtenet.

Een collectieve voorziening betekent dat bewoners en woningeigenaren afhankelijk zijn van elkaar en van partijen zoals warmtebedrijven en gemeenten.

Beslissingen over investeringen en onderhoud moeten door meerdere partijen genomen worden.

Nast technological readiness (TRL) hebben we daarom ook aandacht voor maatschappelijke inbedding als kritieke voorwaarde bij de ontwikkeling van nieuwe systemen.

Met ‘maatschappelijke inbedding’ bedoelen we wat nodig is om een techniek niet alleen technisch, maar ook maatschappelijk te realiseren.

Het gaat dus niet om de techniek zelf, maar om randvoorwaarden en de impact op de samenleving, zoals draagvlak en acceptatie, ruimtelijke inpassing, interactie met gebruikers, juridische kaders en (financiële) middelen.



Om te beoordelen hoe goed een techniek op dit moment maatschappelijk is ingebed, in verhouding tot de huidige mate van technische ontwikkeling, en om te bepalen waar de belangrijkste aandachtspunten liggen, gebruiken we de SEL methode. Daarmee drukken we in een SEL-score (Societal Embeddedness Level)<sup>27</sup> uit, in hoeverre de maatschappelijke randvoorwaarden aansluiten bij de technische volwassenheid, uitgedrukt in een TRL-score (Technology Readiness Level). Een mismatch, bijvoorbeeld een lage SEL bij een vergevorderde techniek, wijst op een risico dat (verdere) implementatie stagneert door onvoldoende maatschappelijke inbedding.

De SEL-score is gebaseerd op vier dimensies:

- De impact op de (natuurlijke, gebouwde en sociale) omgeving;
- De betrokkenheid van het publiek en (directe en indirecte) belanghebbenden;
- Het beleid en de regelgeving;
- De markt en (financiële) middelen.

Naast de gemiddelde SEL-score, die een indicatie geeft van het algemene niveau van maatschappelijke inbedding op een

gegeven peildatum, is het van belang om naar het evolutiebeeld te kijken: de huidige situatie vergelijken met een gewenst toekomstscenario, en naar de zwakste schakel: de dimensie met de laagste score.

Deze aspecten bepalen meestal waar de grootste belemmering voor implementatie ligt en welke voorwaarden moeten worden ingevuld en waar dus nog gerichte actie nodig is.

Deze SEL methodiek hebben we voor dit rapport gebruikt om te komen tot deze voorwaarden. In workshops zijn TNO-collega's geconsulteerd om hun input te leveren.

De 4 dimensies van de SEL-score hebben we vertaald naar 4 aspecten, en die aangevuld met de technische uitdagingen. Dat leidt tot de volgende aspecten : (1) technisch (2) markt en financiering (3) wet en regelgeving (4) ruimte en omgeving (5) stakeholders.

Op hoofdlijnen levert de maatschappelijke inbedding van lokale energiesystemen het volgende beeld:

De specifieke kenmerken van de warmtesector en de snelle ontwikkelingen in de techniek en maatschappij zorgen ervoor dat de ontwikkeling en exploitatie van warmtenetten vooral lokaal plaats moet vinden, in overleg met in ieder geval de grote producenten en gebruikers van warmte in de wijk, maar ook met burgers. Zo kan draagvlak ontstaan.

Gemeenten en burgercoöperaties zijn bij uitstek in staat tot regie hierover. Wetgeving dient hierom lokale inbreng, samenwerking en een vorm van zeggenschap te garanderen (dat is anders dan bij bijvoorbeeld aardgas of drinkwater). Via regulering kan duidelijkheid gegeven worden over het proces richting de aanleg. Aanbieders van diensten zoals aanleg, planning, onderhoud of beheer kunnen dan onderling concurreren om de aantrekkelijkste warmte te helpen realiseren in een levendige markt bij warmte.

Het Rijk kan verder ondersteunen door een goede gereedschapskist te bieden aan gemeenten en coöperaties. Ondersteuning is nodig bij de exploitatie over kosten, processen, planning, governance en financiering.

Standaardiseren vergemakkelijkt het gesprek tussen de gemeente, het warmtebedrijf, de netbeheerders en dienstverleners. Een studie (Wattopia, 2024) laat bijvoorbeeld zien dat het doorrekenen van dezelfde business case door vijf adviesbureaus vijf zeer uiteenlopende resultaten gaf.

Standaarden voor het rekenen aan plannen kan helpen kwaliteit en transparantie te verhogen. Door de hele keten heen is behoefte aan dergelijke transparante kennis, afstemming en standaardaanpakken die aansluiten op de nieuwste en beste technieken. Standaardisering en het creëren van flow en risicomitigatie kunnen verder helpen om de kosten van warmtenetten te verlagen. Dit lijkt spanning op te leveren met een lokale aanpak maar met een procesgerichte en modulaire aanpak kan toch bereikt worden dat in elke wijk het wiel niet opnieuw uitgevonden wordt.

<sup>27</sup> Sprenkeling, M., Geerdink, T., Slob, A., & Geurts, A. (2022). Bridging social and technical sciences: Introduction of the Societal Embeddedness Level. *Energies*, 15(17), 6252.

## 7. Wat leren we hieruit?

De zwakste schakels voor lokale, geïntegreerde warmte-elektriciteitssystemen liggen niet primair in techniek, maar in betaalbaarheid en transparantie, lokale governance en zeggenschap, operationele vertaling van wetgeving, en ruimtelijke en organisatorische coördinatie. Waar TRL hoog is (warmtepompen, WKO, buffers), kan SEL achterblijven door onduidelijke kosten, beperkte zeggenschap en gebrek aan standaardisatie.

De SEL-lens maakt zichtbaar dat vraagaanbod-integratie en lokale bronnen pas maatschappelijk landen als bewoners heldere keuzes zien, rechtvaardige processen ervaren en lokale regie vertrouwen. Prioriteit is dus: standaardiseren en transparant maken, lokale zeggenschap borgen, financiering realistischer maken en ruimtelijk meervoudige waarde creëren—zodat de technische opties daadwerkelijk acceptabel, rechtvaardig en betaalbaar worden in de wijkpraktijk. Meer in detail geldt het volgende:

### **Integrale warmte–elektriciteit architectuur met lokale bronnen**

Lokale energiesystemen functioneren holarchisch: niet autarkisch maar lokaal gestuurd, blijvend verbonden met het centrale net. Kern is de nauwe wisselwerking tussen warmte, koude en elektriciteit, waarin lokale hernieuwbare bronnen (zon-PV, zonnewarmte, omgevingswarmte uit bodem, buitenlucht en water (aquathermie), geothermie, restwarmte) en lokale infrastructuur (WKO, warmtelussen) samen de balans tussen vraag en aanbod ondersteunen. Deze integratie vergroot flexibiliteit en veerkracht, en maakt gebruikersparticipatie vanzelfsprekender.

**SEL implicatie:** ruimtelijke inpassing van bronnen/opslag, rechtvaardige verdeling van baten/lasten, transparantie over prestaties en kosten, en duidelijke governance over wie lokaal mag sturen en hoe dat gebeurt.



### Vraag-aanbodmatching en flexibiliteit op wijkniveau

Door lokale opslag en vraagsturing kan opwek (volatiel) worden ontkoppeld van vraag (variabel). Warmteopslag (buffers, WKO) maakt seizoensbalancering mogelijk met lage milieu impact; batterijen ondersteunen kortcyclische elektriciteitsbalans. Slimme EMS sturing koppelt goedkope, nabij opgewekte elektriciteit aan warmtevraag (bijv. laden van warmtebuffers buiten piekuren) en reduceert netcongestie.

**SEL implicatie:** de evolutie van gedrag en prikkels (tariefstructuren, energiedelen, lokale flexibiliteitsmarkten) moet aansluiten op technische opties, anders ontstaat een mismatch (hoge TRL, lage SEL) en stopt implementatie.

### Cruciale technieken en 'no regret' maatregelen

Lage temperatuur afgifte en een bepaalde mate van isolatie zijn no regret: ze verhogen comfort, verlagen kosten en maken woningen toekomstbestendig voor LT/ZLT netten én individuele warmtepompen.

**SEL implicatie:** bewoners moeten begrijpen en vertrouwen dat deze keuzes hen betaalbaarheid en comfort bieden; zonder transparante info over performance/kosten daalt acceptatie; automatisering en standaardisatie gewenst in relatie tot arbeidsintensiteit.

### Organisatie, governance en lokale zeggenschap

Succes vereist lokale regie: gemeenten en warmtegemeenschappen/coöperaties organiseren samenwerking tussen producenten, afnemers en dienstverleners en borgen zeggenschap (direct of indirect). Omdat collectieve warmte vaak monopolistisch is in een wijk, zijn transparantie, procedurele rechtvaardigheid en controle mechanismen cruciaal. Een gecoördineerde aanpak (heldere rollen, beslismomenten, aansluiting op bewoners' stapsgewijze investeringspad) voorkomt frictie en versnelt uitrol.

**SEL implicatie:** draagvlak groeit als lokale belangen zichtbaar worden meegenomen en bewoners reële invloed hebben op keuzes rond tarieven, investeringen en uitbreidingen

### Markt, financiering en regulering als randvoorwaarde

Huidige tarieven en ontransparante kosten ondermijnen acceptatie; daarom zijn standaardisatie van kostendata, uniforme businesscase formats (bron/infra/operatie/financiering) en bundeling van projecten nodig voor voorspelbaarheid en lagere kosten. Laagrentende financiering (waarborgfonds, gemeentelijke garanties, langere afschrijving) en een tariefsystematiek die kosten gelijkheid nastreeft met redelijk rendement maken schaalbare implementatie mogelijk. Nieuwe kaders (WCW, WGIW, energiedelen, congestiemanagement) moeten operationeel worden gemaakt op wijkniveau.

**SEL implicatie:** zonder betaalbaarheid en heldere spelregels ontstaat lage SEL, ook als techniek beschikbaar is.

### Ruimtelijke inpassing en meervoudige waarde

Afstemming start met kartografie van vraag, aanbod en opslaglocaties en het verbinden van gebiedsdoelen (bv. restwarmte van ziekenhuis, koeling uit oppervlaktewater) aan het energiesysteem.

Ruimteschaarste in woningen/gebouwen maakt collectieve oplossingen vaak logischer; tegelijk moeten ingroeimodellen voorkomen dat individuele investeringen (warmtepompen) latere collectieve benefits blokkeren.

**SEL implicatie:** ruimteclaims en omgevingskwaliteit vragen participatieve afweging, waarin effecten op natuur, bebouwing en sociale context expliciet worden meegewogen.

### Uitrolpaden die aansluiten op de werkelijkheid in wijken

Routes als 'kleine stappen' (isolatie → individuele warmtepomp → later collectieve bron) en 'kralen rijgen' (klein beginnen, modulair verbinden) sluiten aan op stapsgewijze verduurzaming door bewoners en op schaarste bij uitvoerders. Flow in uitvoering (ploegen van wijk naar wijk, gestandaardiseerde aanbiedingen per archetype wijk) verhoogt efficiëntie.

**SEL implicatie:** fasering en modulariteit verminderen implementatierisico's en vergroten het gevoel van controle bij stakeholders, wat draagvlak versterkt.

# 8. Kennisagenda

## 1. Lokale regie en governance

**Beschrijving:** Ontwikkel modellen voor lokale regie, inclusief rollen van gemeenten, coöperaties en bovenlokale partijen, en mechanismen voor directe of indirecte zeggenschap van bewoners. En ondersteun lokale energiegemeenschappen met duidelijke stappenplannen en kennis.

**Waarom belangrijk:** Zonder duidelijke governance en zeggenschap ontstaat onvoldoende draagvlak en vertraging in besluitvorming.

## 2. Implementatie van WCW en WGIW

**Beschrijving:** Onderzoek hoe nieuwe wetgeving praktisch kan worden toegepast: kavelaangepak, tariefregulering, besluitvormingsprocessen en strategische inzet van instrumenten door gemeenten.

**Waarom belangrijk:** Wetgeving biedt kaders, maar de praktijk is nog onduidelijk; dit belemmert opschaling.

## 3. Betaalbaarheid en transparantie van kosten

**Beschrijving:** Ontwikkel standaarden voor kostendata en businesscases, inclusief formats voor bron-, infra- en operationele kosten en prikkels voor zuinig verbruik.

**Waarom belangrijk:** Betaalbaarheid en transparantie zijn cruciaal voor bewonersacceptatie en investeringsbeslissingen.

## 4. Standaardisatie en bundeling van projecten

**Beschrijving:** Ontwikkel modulaire standaarden voor aanleg, organisatie en tarifiering; bundel projecten per archetype wijk om schaalvoordelen en continuïteit in uitvoering te realiseren.

**Waarom belangrijk:** Standaardisatie verlaagt kosten, vergroot voorspelbaarheid en maakt efficiënt gebruik van schaarse capaciteit.

## 5. Integrale systeemarchitectuur warmte–koude–elektriciteit

**Beschrijving:** Ontwikkel ontwerpprincipes voor holarchische systemen die warmte, koude en elektriciteit slim combineren, inclusief temperatuurzones en lokale bronnen.

**Waarom belangrijk:** Integratie verhoogt betrouwbaarheid, benut flexibiliteit en verbetert de businesscase.

## 6. Energieopslag en flexibiliteit

**Beschrijving:** Onderzoek rollen van collectieve warmtebuffers, WKO, batterijen en flexbronnen; focus op seizoensopslag en koppeling met vraagsturing.

**Waarom belangrijk:** Opslag ontkoppelt vraag en aanbod, vergroot veerkracht en vermindert netcongestie.

## 7. Lage-temperatuur afgiftesystemen en isolatie

**Beschrijving:** Analyseer kostenstructuren en ontwerpconcepten voor LT-afgiftesystemen (vloerverwarming, convectoren), inclusief communicatie en inkoopstrategieën.

**Waarom belangrijk:** LT-systemen zijn een no-regret optie en maken woningen toekomstbestendig en geschikt voor (Z)LT collectieve netten.

## 8. Afwegingskaders en toekomstbestendige modellen

**Beschrijving:** Ontwikkel modellen die rekening houden met isolatietrends, koelvraag, kostendalingen, comfort & gezondheidsaspecten en gedrag; inventariseer lokale bronnen, lokale wensen; meet comfort, binnen temperaturen en energiegebruik om sneller te kunnen leren,

**Waarom belangrijk:** Voorkomt bias naar traditionele oplossingen en ondersteunt betere besluitvorming.



### 9. Ruimtelijke inpassing en gebiedssynergie

**Beschrijving:** Ontwikkel methoden om vraag, aanbod en opslaglocaties te koppelen aan ruimtelijke plannen en meervoudige waarde-creatie (bijv. restwarmte ziekenhuis).

**Waarom belangrijk:** Ruimtelijke haalbaarheid en synergie bepalen uitvoerbaarheid en maatschappelijk draagvlak.

### 10. Stakeholderstrategie en communicatie

**Beschrijving:** Ontwikkel formats voor transparante vergelijking collectief vs. individueel, inclusief kosten, comfort en toekomstscenario's; stimuleer bewonersdialoog.

**Waarom belangrijk:** Heldere communicatie en inzicht in voordelen zijn essentieel om lage acceptatie om te buigen naar deelname.

### 11. Innovatie in normen en certificering

**Beschrijving:** Pas normen en certificering aan voor LT-netten en flexibele leidingen; ontwikkel richtlijnen die innovatie faciliteren.

**Waarom belangrijk:** Versnelt aanleg, verlaagt kosten en maakt arbeidscapaciteit vrij.

### 12. Uitrolpaden en ingroeimodellen

**Beschrijving:** Ontwikkel strategieën voor stapsgewijze opschaling ('kleine stappen', 'kralen rijgen') en aansluiting op bewonersinvesteringen (isolatie, PV, warmtepomp).

**Waarom belangrijk:** Sluit aan op realiteit in wijken en voorkomt lock-in door gefaseerde aanpak.

Belangrijk aandachtspunt is het systemisch leren, niet zozeer als kennisvraag, maar wel als een belangrijke activiteit. Het is van belang voor snelle leercurves en opdoen van overdraagbare kennis om daarmee de uitrol van lokale energiesystemen en collectieve systemen te versnellen en faalkosten te verminderen.

# Bronnen

- Akos Revesz, Phil Jones, Chris Dunham, Gareth Davies, Catarina Marques, Rodrigo Matabuena, Jim Scott, Graeme Maidment (2020) Developing novel 5th generation district energy networks, *Energy*, Volume 201, 2020, 117389, ISSN 0360-5442.
- Anna Billerbeck, Barbara Breitschopf, Sabine Preuß, Jenny Winkler, Mario Ragwitz, Dogan Keles, (2024) Perception of district heating in Europe: A deep dive into influencing factors and the role of regulation, *Energy Policy*, Volume 184, 2024, 113860, ISSN 0301-4215, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113860>.
- Arvanitopoulos, T., Wilson, C., & Ferrini, S. (2022). Local conditions for the decentralization of energy systems. *Regional Studies*, 57(10), 2037–2053. <https://doi.org/10.1080/00343404.2022.2131756>
- Autoriteit Consument & Markt (ACM). (2024). Review gegevens rendementsmonitor TNO. <https://www.acm.nl/system/files/documents/review-gegevens-rendementsmonitor-tno.pdf>
- Centraal Bureau voor de Statistiek (CBS). (2025). Monitor Warmtepompen 2025. Geraadpleegd van <https://www.cbs.nl/nl-nl/longread/aanvullende-statistische-diensten/2025/monitor-warmtepompen-2025>
- Emmanuel-Yusuf, D., & Wehrmeyer, W. (2022). Pathways for the upscaling of smart local energy systems. Energy Revolution Research Centre, University of Strathclyde Publishing. ISBN: 978-1-914241-22-2.
- HIER & Energie Samen. (2024). Lokale Energie Monitor 2024. Utrecht: Klimaatstichting HIER.
- Jongorius, J., & Cuypers, R. (2024, 14 november). Innovatieroadmap warmteopslag voor de gebouwde omgeving in Nederland (TNO Rapport 2024 R11963). Delft: TNO. [https://topsectorenergie.nl/documents/1314/TNO\\_Innovatieroadmap\\_warmteopslag\\_voor\\_de\\_gebouwde\\_omgeving\\_in\\_Nederland\\_v241007\\_final.pdf](https://topsectorenergie.nl/documents/1314/TNO_Innovatieroadmap_warmteopslag_voor_de_gebouwde_omgeving_in_Nederland_v241007_final.pdf)
- JPI Urban Europe. (2021). SET-Plan Smart Cities Implementation Plan. [https://jpi-urbaneurope.eu/wp-content/uploads/2021/10/setplan\\_smartcities\\_implementationplan-2.pdf](https://jpi-urbaneurope.eu/wp-content/uploads/2021/10/setplan_smartcities_implementationplan-2.pdf)
- National Renewable Energy Laboratory (NREL). (2023). Economic long-duration electricity storage by using low-cost thermal energy storage and high-efficiency power cycle (ENDURING) (NREL/TP-5700-84728). Golden, CO: U.S. Department of Energy. <https://www.nrel.gov/docs/fy23osti/84728.pdf>
- Pappas, D., Brauholtz-Speight, T., Hannon, M., Webb, J., Fuentes González, F., & Sharmina, M. (2023). Business models for smart local energy systems—a triple layered perspective. *Frontiers in Sustainable Energy Policy*, 1, 1058534. <https://doi.org/10.3389/fsuep.2022.1058534>
- Planbureau voor de Leefomgeving (PBL). (2024). Aardgasvrij: een goed idee, maar... <https://www.pbl.nl/publicaties/aardgasvrij-een-goed-idee-maar>
- Psarra, I., Figueroa, A., Mfurakazi, E., Tonu, L., van Spyk, A., & Zuidema, C. (2025). Towards an integrated positive energy district landscape: technical and financial analysis for a case study in Hoogkerk, Northern Netherlands. *Energy, Sustainability and Society*, 15, Article 30. <https://doi.org/10.1186/s13705-025-00534-y>
- RVO. (2022). Aardgasvrije gebouwde omgeving: de realisatie en beïnvloedende factoren. Den Haag: Rijksoverheid. <https://www.rvo.nl/files/file/2022-11/74812-RVO-Aardgasvrij-2022-PDF-UA.pdf>
- Rijksoverheid. (2025). Schakelen naar de toekomst: Interdepartementaal beleidsonderzoek bekostiging van de elektriciteitsinfrastructuur.
- Rijksoverheid. (2025, 19 juni). Kamerbrief decentrale ontwikkelingen. <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/kamerstukken/2025/06/19/decentrale-ontwikkeling-van-het-energiesysteem>

- Soutar, I., Devine-Wright, P., Rohse, M., Walker, C., Gooding, L., Devine-Wright, H., & Kay, I. (2022). Constructing practices of engagement with users and communities: Comparing emergent state-led smart local energy systems. *Energy Policy*, 171, 113279. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.113279>
- Sprenkeling, M., Geerdink, T., Slob, A., & Geurts, A. (2022). Bridging social and technical sciences: Introduction of the Societal Embeddedness Level. *Energies*, 15(17), 6252.
- Stichting Warmtenetwerk. (2025). Nieuwe Warmte Nu: Vergelijkende analyse van warmtenetpraktijken – Lessen uit Denemarken voor Nederland.
- TNO. (2024). Nederlandse tarief stadsverwarming. <https://www.tno.nl/nl/newsroom/insights/2024/03/nederlandse-tarief-stadsverwarming/>
- TNO. (2025). Sturen op betaalbaarheid met de WCW en WGIW.
- TNO (2025) Decentrale ontwikkelingen in het energiesysteem, TNO 2025 R11978 – december 2025
- TNO (2026) Houding woningeigenaren ten opzichte van tariefregulering en prijsverschillen bij warmtenetten, TNO 2025 R13167 – Januari 2026
- Topsector Energie (2023) systeemintegratie. Naar een holarchisch energiesysteem!?, Utrecht
- UNEP (2021) District Energy in Cities – unlocking the potential of Energy Efficiency and Renewable Energy, UNEP, Parijs
- Way, R., Ives, M. C., Meisl, G., & Sharpe, S. (2022). Empirically grounded technology forecasts and the energy transition. *Nature Energy*, 7(2), 151–160. <https://doi.org/10.1038/s41560-021-00934-z>
- Wettenbank Overheid.nl. (2026). Energiewet. <https://wetten.overheid.nl/BWBR0050714/2026-01-01>
- Marten Witkamp (2024) Rekenmodellen warmtenetten vergeleken, TKI Urban Energy/Wattopia/RVO, Utrecht

**Auteurs**

Nienke Maas  
Luuk Beurskens  
Joris van Diemen  
Laure Itard  
Jacob Janssen,  
Maarten van Schie  
Pieter Verstraten  
Eva Winters

**Rapportnummer**

TNO-2026-16647