

Maatschappelijke rentabiliteit van ZLT-uitwisselnetten



Maatschappelijke rentabiliteit van ZLT-uitwisselnetten

Dit rapport is geschreven door:

Benno Schepers, Frederique de Groen (CE Delft),
Francesco Franchimon (2RC), Herman Eijdens,
Jibbe Bertholet (Tri-Es)

Delft, CE Delft, februari 2026

Publicatienummer: 26.240372.032

Opdrachtgever: RVO & TKI Urban Energy

Alle openbare publicaties van CE Delft zijn
verkrijgbaar via www.ce.nl

Meer informatie over de studie is te verkrijgen bij de
projectleider Benno Schepers (CE Delft)

© copyright, CE Delft, Delft

CE Delft – Committed to the Environment

CE Delft draagt met onafhankelijk onderzoek en advies bij aan een duurzame samenleving. Wij zijn toonaangevend op het gebied van energie, transport en grondstoffen. Met onze kennis van techniek, beleid en economie helpen we overheden, ngo's en bedrijven structurele veranderingen te realiseren. Al sinds 1978 werken betrokken en kundige medewerkers bij CE Delft om dit waar te maken.

Inhoud

	Samenvatting	5
	Aanleiding en doel	5
	Belangrijkste inhoudelijke inzichten	5
	Conclusies	7
	Aanbevelingen	7
	Management summary	8
1	Inleiding	9
	1.1 Achtergrond en aanleiding	9
	1.2 Doel en onderzoeksvragen	11
	1.3 Afbakening	12
	1.4 Leeswijzer	12
2	Een maatschappelijke vergelijking	14
	2.1 Wat en hoe vergelijken we?	14
	2.2 Vergelijken op meer dan euro's	15
	2.3 Zes oplossingen voor warmte en koude	16
	2.4 Maatschappelijke effecten	24
	2.5 Directe effecten	24
	2.6 Drie scenario's	25
	2.7 Vier cases	25
3	Maatschappelijke en directe effecten	27
	3.1 Inleiding	27
	3.2 Maatschappelijke effecten en thema's	29
	3.3 Volksgezondheid	29
	3.4 Bestaanszekerheid	37
	3.5 Ruimte- en brongebruik	42
	3.6 Sociale cohesie	47
	3.7 Samenvattend overzicht maatschappelijke effecten	50
	3.8 Directe effecten	50

4	ZLT-U in de toekomst	57
	4.1 Inleiding	57
	4.2 Scenarioanalyse	57
	4.3 Theory of Change	65
5	Conclusies en aanbevelingen	68
A	Kennisdag ZLT-warmte- en koudenetten workshop	77
B	Beoordeling maatschappelijke effecten	79
C	Theory of Change	94
	Literatuur	106

Samenvatting

Aanleiding en doel

De warmtetransitie in Nederland vereist keuzes tussen diverse gasloze warmte- en koudeoplossingen. Naast de veelgebruikte routes - individuele warmtepompen, hybride systemen en middentemperatuur-warmtenetten - onderzoekt dit rapport een vierde route: zeer-lagetemperatuur-(uitwissel)netten (ZLT-U). Deze netten combineren een collectieve lage-temperatuur infrastructuur met individuele warmtepompen en benutten onder andere de mogelijkheid om warmte en koude actief tussen gebouwen uit te wisselen, passen (Z)LT-bronnen in en slaan warmte en koude voor de korte termijn en de lange termijn (seizoen) op. Daarmee kunnen ze zowel de warmtevraag in de winter als de toenemende koelvraag in de zomer efficiënt invullen.

Doel van het onderzoek

Het onderzoek vergelijkt zeer-lagetemperatuur-(uitwissel)netten (ZLT-U) met vier andere gasloze warmte- en koudetechnieken op zowel **directe effecten** (kosten, energiegebruik, investeringen) als **maatschappelijke effecten** (volksgezondheid, bestaanszekerheid, ruimtegebruik, sociale cohesie). De analyse is uitgevoerd voor vier representatieve Nederlandse buurttypen en aangevuld met drie toekomstscenario's die belangrijke onzekerheden in vraag, bronnen en beleid verkennen.

Belangrijkste inhoudelijke inzichten

Uit het onderzoek komen de volgende inzichten naar voren:

Directe kosten verschillen minder dan vaak wordt aangenomen

Hoewel de technische configuraties van de systemen sterk uiteenlopen, blijken de totale investeringskosten tussen de onderzochte opties in de meeste buurten relatief beperkt van elkaar te verschillen (vaak binnen ca. 30%).

Individuele lucht-waterwarmtepompen zijn op dit moment vaak goedkoper, terwijl MT-warmtenetten doorgaans het duurst zijn. De variatie tussen buurttypen blijkt groot, wat bevestigt dat lokale omstandigheden zwaar wegen. Bij de individuele oplossing wordt echter geen rekening gehouden met extra netverzwakingskosten per huishouden en ontstaat een situatie waarin niet iedereen kan worden aangesloten.

Maatschappelijke effecten maken de echte verschillen

Het rapport laat zien dat maatschappelijke effecten vaak bepalender zijn dan de directe kosten. Belangrijke uitkomsten:

- **Volksgezondheid**
ZLT-U scoort zeer gunstig doordat het warmte aan de stad onttrekt (vermindering hitte-eiland), koude kan leveren zonder airco's, en lage netwerktemperaturen kent. MT-netten (met airco's) en lucht-waterwarmtepompen verergeren hittestress of warmtelast, zowel in de lucht als in de bodem.
- **Bestaanszekerheid**
ZLT-U vermindert piekbelasting op het elektriciteitsnet door buffering en warmte/koude-uitwisseling. Dit verkleint toekomstige netinvesteringen en maakt systemen minder gevoelig voor volatiele elektriciteitsprijzen.
- **Ruimtegebruik**
Door lage temperaturen en andere type leidingen is de ondergrondse inpassing van ZLT en ZLT-U eenvoudiger dan bij MT-netten. In woningen blijft wel apparatuur nodig (water-waterwarmtepomp en boiler), maar zonder buitenunits.
- **Sociale cohesie**
Collectieve systemen (MT-netten, ZLT, ZLT-U) ontzorgen bewoners en zijn toegankelijker voor huishoudens die niet zelf kunnen investeren of minder organisatiekracht hebben. Individuele systemen kunnen ongelijkheid vergroten en kunnen zwaarder drukken op het elektriciteitsnet.

ZLT-U biedt unieke voordelen door uitwisseling en buffering

Uitwisseling van warmte en koude tussen gebouwen kan een aanzienlijke reductie van energiekosten opleveren, afhankelijk van de mix van functies en vraagprofielen in een wijk. Hierdoor:

- verbetert het rendement van individuele warmtepompen;
- daalt de elektriciteitsvraag op piekmomenten;
- ontstaat flexibiliteit om te reageren op laaggeprijsde duurzame elektriciteit;
- kunnen lokale restwarmte en LT-bronnen optimaal worden benut.

Toekomstscenario's benadrukken flexibiliteit als doorslaggevend criterium

Geen enkele techniek heeft in ieder scenario de meest positieve uitkomst. Wel blijkt uit de scenarioanalyse dat:

- ZLT-U en ZLT robuust zijn bij veranderende warmtevraag/piekprofielen;
- MT-netten kwetsbaar zijn bij afnemende warmtevraag en toenemende koelvraag;
- individuele warmtepompen flexibel zijn, maar in grote aantallen leiden tot zware extra belasting van het elektriciteitsnet tenzij deze netbewust worden aangestuurd.

De combinatie van lage temperaturen, uitwisseling, buffering en flexibiliteit maakt ZLT-U relatief toekomstbestendig.

Conclusies

- ZLT-U vormt een kansrijke vierde route die collectieve betrouwbaarheid combineert met individuele flexibiliteit.
- Maatschappelijke effecten zijn doorslaggevend in situaties waarin directe kosten vergelijkbaar zijn. ZLT-U scoort op meerdere maatschappelijke thema's beter dan alternatieven.
- Toekomstbestendigheid is een belangrijke meerwaarde: ZLT-U kan omgaan met dalende warmtevraag, stijgende koelvraag, volatiele elektriciteitsprijzen en veranderende bronstrategieën.
- Collectieve systemen blijven inclusiever dan volledig individuele oplossingen en beperken structureel netverzwaring.

Aanbevelingen

Naar aanleiding van het onderzoek, worden de volgende aanbevelingen gedaan:

1. ZLT-U expliciet op te nemen in warmteprogramma's en rekenmodellen, inclusief koudevraag.
2. Een gestandaardiseerd maatschappelijk afwegingskader te ontwikkelen zodat maatschappelijke baten structureel meewegen.
3. Lokale pilots op te schalen en prestaties (uitwisselfactoren, buffering, netimpact) systematisch te monitoren.
4. Financiële en juridische randvoorwaarden te verbeteren, waaronder stimulering van maatschappelijke baten via subsidies, passend tariefkader en flexibele governance.
5. Technologische ontwikkeling en standaardisering van water-waterwarmtepompen, buffering en energiemanagementsystemen te versterken om kosten te verlagen en toepassing te versnellen.

| Management summary

The transition to a sustainable built environment requires heating and cooling solutions that are efficient, affordable, and resilient under future societal and technological developments. Alongside the established routes of individual heat pumps, hybrid systems, and medium-temperature (MT) district heating, very-low-temperature exchange networks (ZLT-U) are emerging as a promising fourth pathway. These networks combine collective low-temperature infrastructure with individual heat pumps and enable the exchange of heat and cold between buildings, allowing optimal use of local ambient and residual energy sources.

This study compares five gas-free heating and cooling options - ZLT-U, ZLT with individual heat pumps, individual air-source heat pumps, MT-TEO (aquathermal) networks, and MT-geothermal networks - across four representative Dutch neighbourhood typologies. The comparison includes both direct effects (investment costs, energy use, system performance) and societal effects such as public health, energy security, spatial quality, and social inclusiveness. Three future scenarios were assessed to test robustness under changing demand patterns, resource availability, and market or policy conditions.

ZLT-U performs strongly in several areas. It reduces urban heat stress by removing heat from the built environment, lowers electricity peak loads through local exchange and buffering, and enables efficient integration of low-temperature energy sources. Compared with fully individual solutions, ZLT-U offers greater potential for collective optimisation and reduced net congestion, while maintaining flexibility for building-level installations. MT-geothermal networks outperform ZLT-U on climate impact and inclusiveness, while individual heat pumps score well on phaseability and user autonomy but perform weaker on net congestion, spatial impact, and social equity.

No single technology emerges as universally superior. However, ZLT-U is particularly future-resilient when heating demand decreases and cooling demand increases, and where diverse building functions coexist. The study highlights the need for a broader societal assessment framework, improved data on exchange performance, and targeted pilots to further develop ZLT-U as a fully recognised option in municipal heat strategies.

1 Inleiding

1.1 Achtergrond en aanleiding

Als onderdeel van de energietransitie wordt de laatste jaren hard gewerkt aan de warmte-transitie. Nagenoeg alle gemeenten hebben voor 2022 een Transitievisie Warmte (TVW) geformuleerd en zijn nu bezig met wijkuitvoeringsplannen en de volgende versie van de TVW: het Warmteprogramma. Voor het verkrijgen van een aardgasvrije warmte- en koudevoorziening is daarbij vooral ingezet op drie routes, namelijk individueel hybride gas (cv-ketels voor de piek, aangevuld met warmtepompen, op termijn met groen gas of waterstof), individuele lucht-/waterwarmtepompen en MT/HT-warmtenetten.

In het Klimaatakkoord is de ambitie vastgelegd om in 2030 500.000 extra aansluitingen te realiseren op een warmtenet. Inmiddels is dat doel bijgesteld naar 200.000 aansluitingen. Op dit moment blijkt dat ruim 90% van de projecten voor de aanleg van nieuwe aansluitingen in Nederland tijdelijk stilligt. Het gevolg van de huidige impasse is dat steeds meer woningeigenaren de stap naar individuele warmte- en koudeopties zetten, zoals een airco of een individuele combiwarmtepomp. De airco's worden vaak ook gebruikt om basislast-warmte te leveren in het stookseizoen. Door het afschaffen van de salderingsregeling voor zonnepanelen ontstaat er een aanvullende prikkel om ook warm tapwater in de zomer zoveel mogelijk met eigen installaties op te wekken. Zowel individuele airco's als pv-daken kennen inmiddels een penetratiegraad van 30% of meer. Deze consumenten zullen een aansluiting op een collectief systeem vanuit kosten oogpunt voornamelijk gaan gebruiken om in warm tapwater te voorzien. Dit is een bedreiging voor de businesscase van HT- en MT-warmtenetten.

Een mogelijkheid om deze impasse te doorbreken is het formuleren van *een vierde route*: namelijk een basisinfrastructuur met (zeer)lage temperatuur(bron)netten, waarop eindgebruikers met individuele installaties kunnen aansluiten. Dit geldt voor zowel 'nieuwkomers' – de gebouwen die voor het eerst van het aardgas afgaan –, maar ook voor gebouwen die al aardgasvrij gemaakt zijn met een luchtwarmtepomp. Deze groep kan voor de aansluiting op een bronnet kiezen vanwege bijvoorbeeld een hoger rendement, met meer mogelijkheden om dynamische tarieven te benutten, en om nadelig geluid en lage esthetiek van de buitenunit van de luchtwarmtepomp te vermijden.

Tekstkader 1 – Keuzes in configuraties van ZLT-uitwisselnetten

Verschillende configuraties van ZLT-uitwisselnetten

Net als bij de andere warmte- en koudetechnieken, kennen ook ZLT-uitwisselnetten meerdere uitvoeringsmogelijkheden. De verschillen zitten in bronnen, ontwerptemperaturen en positionering van de onderdelen van het systeem. Een belangrijke variatie bij ZLT-U is de positie van de warmtepompen of energiecentrales. Deze kunnen individueel zijn, maar ook meer en minder collectief. In overleg met de expertgroep van deze studie is gekozen om voor de analyse te kiezen voor de variant met de individuele warmtepomp. In Paragraaf 2.3 wordt de configuratie van ZLT-U nader toegelicht.

Uit de studie blijkt dat ZLT-netten, en dan met name de netten die gebruikmaken van onderlinge uitwisseling, ZLT-uitwisselnetten (ZLT-U-netten), kansrijke mogelijkheden bieden voor de Nederlandse gebouwde omgeving. ZLT-uitwisselnetten kunnen niet alleen een collectief net combineren met individuele warmtepompen, maar bieden ook de mogelijkheid van gelijktijdige warmte- en koudelevering en verkleinen de impact op meerdere uitdagingen in de gebouwde omgeving, zoals bijvoorbeeld netcongestie. Deze netten bieden het voordeel om warmte- en koudelevering onderling uit te wisselen, wat een besparing van 10 tot 30% op primaire energie kan opleveren. Ook bieden de collectieve netten de mogelijkheid om een grote hoeveelheid laagwaardige restwarmte nuttig te gebruiken voor het verwarmen van gebouwen volgens het principe van cascadering van de hoogwaardige bronnen. Ze worden eerst toegepast voor processen die hoogwaardige energie nodig hebben en de reststroom wordt ingezet voor laagwaardige toepassing in gebouwen.

Op dit moment worden ZLT-uitwisselnetten door beleidsmakers nog amper meegenomen als optie voor het verduurzamen van de warmte- en koudevoorziening in bestaande wijken en buurten. Enerzijds is de koudevoorziening geen standaard onderdeel in Warmteprogramma's, anderzijds kunnen ZLT-uitwisselnetten nog maar heel beperkt gekozen worden in instrumenten als de Startanalyse voor het formuleren van een warmtestrategie. Hierbij speelt mee dat ZLT-uitwisselnetten zowel warmte als koude leveren en de Startanalyse in haar strategieën alleen gaat over warmtelevering. Het achterliggende model (Vesta MAIS) biedt nog niet de mogelijkheid om de koelvraag integraal mee te nemen in de afweging van een warmteconcept voor een wijk en haar effect op het middenspannings- en hoogspanningsnet.

Ook bestaat er nog geen gedragen kader waar oplossingen worden vergeleken op een aantal *maatschappelijke effecten*. Een kader zou helpen om de maatschappelijke voordelen van onder andere ZLT(-U) in beeld te brengen bij lokale beleidsmakers voor het opstellen van de warmteprogramma's. Desondanks vormen deze maatschappelijke effecten een belangrijke factor voor lokale gemeenschappen en kunnen zelfs tot 'lock-in'-situaties leiden, waardoor uitsluiting dreigt van volgers. Dit is bijvoorbeeld het geval als een kopgroep van early adaptors de beschikbare bronnen of geluidruimte in een gebied

heeft uitgeput. Wij constateren dat het huidige instrumentarium onvoldoende handvaten biedt om hierin een uniforme en integrale afweging te maken.

Met deze rapportage op basis van de uitgevoerde studie, zetten CE Delft, To Realize Concepts (2RC) en Tri-Es Consultancy een eerste stap in het uitwerken van de maatschappelijke rentabiliteit van ZLT-uitwisselnetten. Hiernaast vergelijken we ZLT-uitwisselnetten met een aantal gangbare alternatieven voor de levering van warmte en koude, waarbij we verder gaan dan alleen de directe financiële aspecten.

De vergelijking dient aanvullend aan de kosten (bijvoorbeeld laagste nationale kosten of laagste kosten voor de eindgebruiker) juist ook de maatschappelijke effecten (voor- en nadelen) van de verschillende opties zichtbaar te maken. Meer en meer wordt duidelijk dat de investeringen in het elektriciteitsnet en het gasnet de komende jaren een substantiële omvang krijgen, die uiteindelijk ook door de burger betaald moeten worden. Hierbij is voor elektriciteit met name een congestieverzachtende aanpak van belang voor de gebieden die de komende jaren geen prioriteit krijgen voor netverzwaring. Voor het gasnet geldt dat de kosten van de infrastructuur over een afnemend verbruik en steeds minder aansluitingen verrekend moeten worden. Dit leidt tot een maatschappelijke discussie over de beste aanpak (*most value for money and society*). Daarnaast loopt een aantal ontwikkelingen tegen begrenzings op, zoals gelijktijdige koelvraag (zowel individueel als op stadsniveau), geluidhinder, fijnstof en NO_x, (ondergronds) ruimtegebruik, veiligheid, maakbaarheid, etc. Inzicht in deze effecten is belangrijk voor een succesvolle verdere uitrol van de warmtetransitie en de leefbaarheid van woongebieden in Nederland.

1.2 Doel en onderzoeksvragen

Het centrale doel van de studie is antwoord te geven op de volgende hoofdvraag:
Hoe vergelijken ZLT-uitwisselnetten met alternatieve, gasloze warmte- en koude-technieken op basis van economische én maatschappelijke effecten?

Met als subvraag:

Wat kan het meenemen van maatschappelijke effecten van warmte- en koudetechnieken, naast de nationale kosten, opleveren?

Om deze vragen te beantwoorden, hebben wij een onderzoek uitgevoerd naar de volgende aspecten:

- Wat zijn de financiële kenmerken van ZLT-U en van de vergeleken gasloze warmte- en koudetechnieken?
- Welke maatschappelijke waarden zijn relevant in relatie tot de warmte- en koude-transitie?
- Hoe verandert het effect van de vergeleken warmtetechnieken op deze waarden in verschillende aannemelijke toekomstscenario's?
- Waarin onderscheidt ZLT-U zich ten opzichte van de andere drie routes?

- Hoe krijgen we inzicht in de mogelijke impact van ZLT-U, gebruikmakend van de methodiek van 'Theory of Change'?
- Welke aanbevelingen kunnen worden gedaan voor innovatie en beleid?

De hoofd- en subvragen worden verder uitgewerkt en beantwoord in deze rapportage.

Met het beantwoorden van deze vragen willen we een bijdrage leveren aan (1) het meenemen van ZLT in de afwegingen/keuzes in de warmtetransitie, en (2) laten zien dat en afweging van maatschappelijke waarden een meerwaarde geeft bij de keuzes.

1.3 Afbakening

Deze rapportage geeft de uitkomsten van het onderzoek én proces van het beantwoorden van de onderzoeksvragen. In het proces zijn, in overleg met de stuurgroep, keuzes gemaakt voor aspecten die meer en minder aandacht verdienen. Eén van die aspecten is de analyse van de route waarbij wordt ingezet op de hybride warmtepomp. In overleg met de stuurgroep is besloten dat deze studie zich richt op (aard)gasvrije alternatieven. De toekomstige inzet van groen gas of waterstofgas lijkt slechts op beperkte schaal mogelijk en het is onbekend of biogas en waterstof voor de gebouwde omgeving voldoende beschikbaar komen.

Andere keuzes en afstemmingen hebben onder andere plaatsgevonden bij de selectie van te analyseren maatschappelijke effecten. Het aantal effecten dat bekeken *kan* worden is zeer talrijk. In overleg met de stuurgroep is hieruit een selectie gemaakt, dat werkbaar is voor deze studie.

Het is verleidelijk om te spreken van een maatschappelijke kosten-batenanalyse (mkba) als het gaat om het vergelijken van financiële en maatschappelijke effecten. In deze studie is echter géén mkba gemaakt. Voor het uitvoeren van een mkba gelden strikte richtlijnen en rekenmethoden voor hoe en wat meegenomen wordt. De essentie van deze studie is om de ontwikkelingen van ZLT-U in een veel breder perspectief te bezien dan enkel de euro's en het monetariseren van maatschappelijke kosten en baten. In de studie wordt gekeken naar de directe financiële aspecten, aangevuld met maatschappelijke effecten, zowel kwantitatief als kwalitatief.

1.4 Leeswijzer

Deze rapportage is als volgt opgebouwd. In Hoofdstuk 2 wordt toegelicht hoe een maatschappelijke vergelijking van diverse warmte- en koudeoplossingen wordt uitgevoerd, waarbij zowel financiële als bredere maatschappelijke effecten, zoals sociale en gezondheidsaspecten, worden beschouwd.

In de daaropvolgende hoofdstukken worden de maatschappelijke en directe effecten uitgewerkt en beoordeeld (Hoofdstuk 3 hieronder) en worden verschillende toekomstscenario's behandeld (Hoofdstuk 4). De rapportage sluit af met conclusies en aanbevelingen voor innovatie en beleid. Tot slot is in de bijlagen aanvullende informatie opgenomen, waaronder een overzicht van gebruikte bronnen, methodieken en samenvattingen van expertbijeenkomsten.

2 Een maatschappelijke vergelijking

2.1 Wat en hoe vergelijken we?

Het hoofddoel van deze studie is inzichtelijk te maken welke maatschappelijke effecten er zijn bij diverse oplossingen voor warmte- en koudelevering in de gebouwde omgeving. En hoe inzicht hierin kan bijdragen aan het maken van goed onderbouwde keuzes die verder gaan dan alleen een financiële afweging.

In dit onderzoek kijken we daarom vanuit diverse perspectieven naar de verschillende mogelijkheden voor warmte en koude. Deze perspectieven zijn niet alleen technisch en economisch, maar juist ook sociaal, praktisch, eerlijk en bijvoorbeeld vanuit gezondheidsoverwegingen.

Omdat veel van de onderzochte effecten relatief nieuw zijn voor de warmtetransitie, zijn deze ook nog niet uitputtend onderzocht in relatie tot de warmte- en koudevoorziening. Daarom is in het proces om te komen tot een onderbouwde analyse gebruikgemaakt van meerdere gremia van expertise, zoals expertbijeenkomsten, met onder andere netbeheerders, gemeenten, GGD, etc. Maar ook interviews en workshops, waaronder die op de ZLT Kennisdag (6 maart 2025), Impulsdag Warmtenetten (19 juni 2025) en de webinar (11 november 2025).

De input van zowel deze pluriforme groep van experts als bestaande literatuur is in deze studie zoveel mogelijk samengenomen en afgewogen. Het projectteam heeft aan de hand daarvan de afwegingen gemaakt voor de brede, maatschappelijke beoordeling van de diverse warmte- en koudetechnieken.

In de komende paragrafen wordt toegelicht hoe we naar meerdere maatschappelijke perspectieven en effecten hebben gekeken. Toegepast op een zestal warmte- en koudeoplossingen, die zijn uitgewerkt voor een viertal (typische) buurten in Nederland en vergeleken met drie scenario's.

2.2 Vergelijken op meer dan euro's

Op dit moment worden veel afwegingen voor toekomstige keuzes in de warmtetransitie gebaseerd op de directe kosten en baten van de technieken. Of het nu gaat om nationale kosten of om eindgebruikerskosten, de euro's zijn dominant in de afweging voor verduurzaming. Echter, bij de grootschalige transformatie, die de warmtetransitie is, komen veel meer maatschappelijke effecten kijken dan alleen maar de directe kosten en baten. Deze effecten kunnen zowel een direct als indirect gevolg hebben door te kiezen voor de ene of andere techniek. Het belang zit erin dat dit soort effecten een verdergaande opschaling verhinderen, waardoor de warmtetransitie op enig moment vast zou kunnen lopen.

Op dit moment zijn die effecten zo goed als nooit in beeld en worden ze niet meegewogen door de beleidsmakers en bestuurders. Deels omdat zij hier simpelweg geen weet van hebben en deels omdat de voor- en nadelen op andere plekken liggen dan waar zij over gaan. Zo kan bijvoorbeeld de wethouder die gaat over de warmtetransitie niet de voordelen meenemen die een bepaalde warmtetechniek oplevert voor de gezondheid van bewoners. En dat terwijl de maatschappelijke winst daarvan aanzienlijk is. Of, vice versa, de gemeente kan op forse kosten worden gejaagd als er een techniek wordt gekozen die weliswaar de laagste directe kosten heeft voor warmte, maar indirect de leefomgevingskwaliteit in een gebied nadelig beïnvloedt.

In deze studie kijken we daarom naar méér dan de directe euro's. Dat doen we niet alleen om een eerlijke, brede maatschappelijke vergelijking te maken van de verschillende mogelijkheden, maar ook omdat dit helpt in het proces van de warmtetransitie. Door in een vroeg stadium al te kijken naar zoveel mogelijk maatschappelijke aspecten, wordt de kans op vertraging in vervolgstappen kleiner. Met deze analyse worden de hordes zichtbaar die zich achter de financiële horde bevinden. Met een goed beeld hiervan kan uiteindelijk de route naar de finish worden gekozen die de minste, totale weerstand heeft.

In Hoofdstuk 3 worden de geselecteerde maatschappelijke effecten verder uitgewerkt. Dit is een gelimiteerde lijst van effecten die in samenspraak met de stuurgroep¹ van dit project is opgesteld. De set van effecten is een selectie uit enkele tientallen geïdentificeerde effecten. De selectie is gemaakt aan de hand van de verwachting van enerzijds de impact en anderzijds de beschikbaarheid van inzichten in de effecten. Dit laatste is gedaan omdat het toepassen van een breed maatschappelijke perspectief op warmte- en koudetechnieken nog niet vaak is uitgevoerd en omdat veel informatie eenvoudigweg niet beschikbaar is om het functioneel toe te passen.

¹ De stuurgroep omvatte: RVO, TKI-UE, ministerie van VRO, ministerie van KGG.

2.3 Zes oplossingen voor warmte en koude

Het startpunt van deze studie zijn de ZLT-uitwisselnetten. Deze netten, die voorzien in warmte en koude, worden vergeleken met vier andere technieken die ook warmte en koude kunnen leveren aan woningen en andere gebouwen. Een zesde optie (hybride warmtepomp) wordt indicatief meegenomen, maar is geen onderdeel van de vergelijking.

Van bijna alle technieken zijn meerdere variaties mogelijk, daarom lichten we in de komende paragrafen deze opties toe en hoe zij zijn meegenomen in de analyse.

2.3.1 ZLT-uitwisselnetten

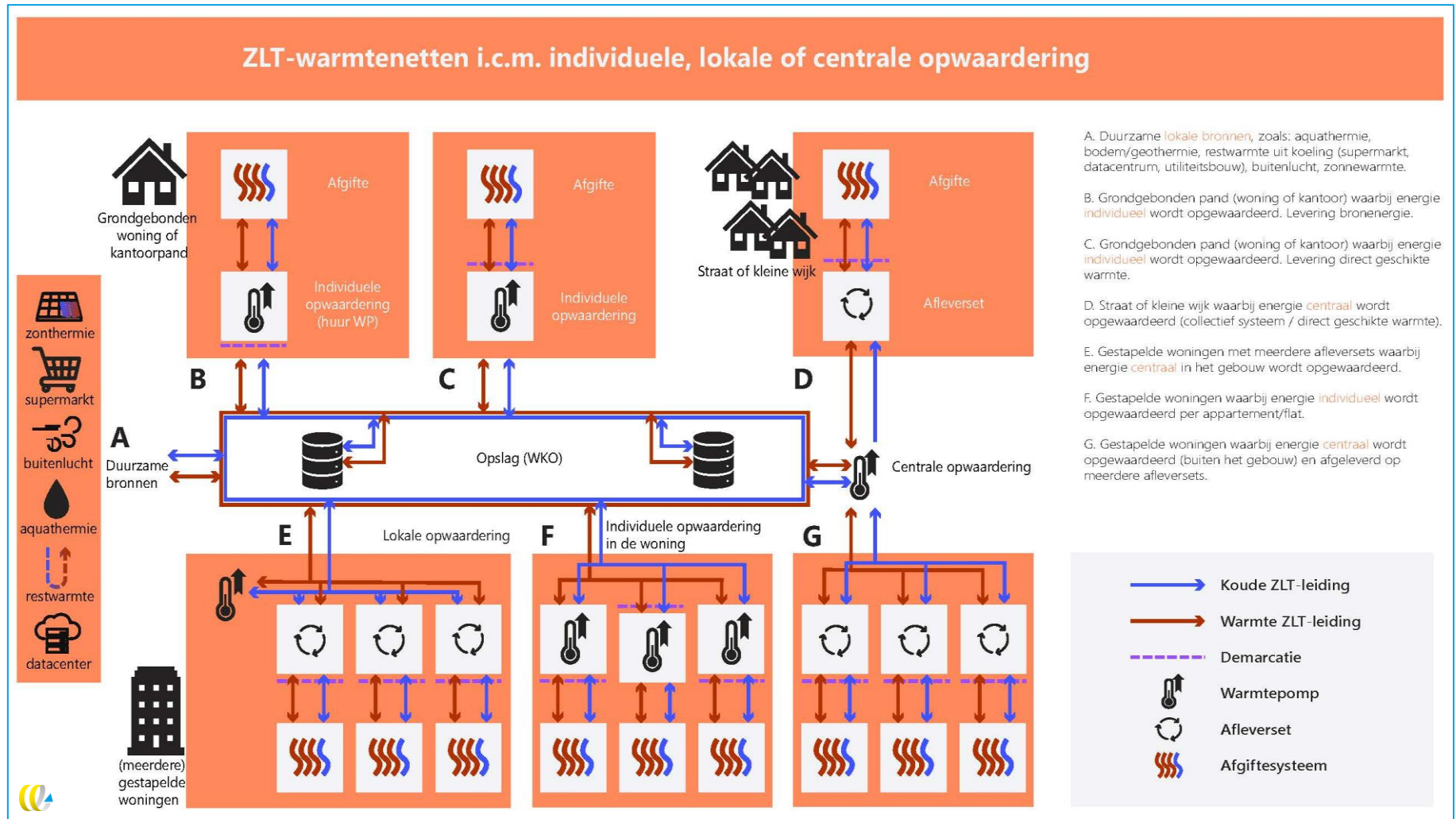
Een ZLT-uitwisselnet (ZLT-U) verschilt ten opzichte van een ZLT-net door de mogelijkheid dat warmte en koude uitgewisseld kunnen worden tussen zowel woningen en gebouwen binnen een wijk (met verschillende vraagprofielen) als tussen wijken onderling (bijvoorbeeld een woonwijk ten opzichte van kantoren, winkels of bedrijventerreinen). Als warmtepompen warmte leveren om water te verwarmen naar een bruikbare temperatuur voor ruimteverwarming of warm tapwater dan ontstaat er koude. Gebeurt dit met een omgevingsbron, zoals buitenlucht of oppervlaktewater, dan gaat deze koude verloren. In een ZLT-net wordt de koude weliswaar teruggeleverd aan het netwerk, maar dan voor lange termijn (laagwaardig) opgeslagen in de wko. In een ZLT-U-net kan daarentegen de koude direct gebruikt worden, indien er gelijktijdig een koudevraag is van een andere afnemer (denk aan een kantoor, winkel, goed geïsoleerde nieuwbouwwoningen, horeca, etc.). De afnemer van deze koude hoeft daardoor die koude niet zelf op te wekken of gebruikt in ieder geval minder elektriciteit voor koeling. Het deel dat niet direct wordt uitgewisseld, kan in een gebouw- of wijkbuffer worden opgeslagen voor kortetermijnhergebruik (dag/nachten weekcyclus). Het overige deel wordt uitgewisseld met andere wijken of opgeslagen in een wko. Door een thermische scheiding aan te brengen tussen de (LT-) bronnen en het distributienet in de wijk, kunnen de temperaturen in de warme en koude leidingen zich ontwikkelen, waarbij de warme buis warmer wordt en de koude buis kouder. De teruglevering van warmte en koude (actief door de individuele warmtepompen) zorgt dus voor een grotere dT (delta in temperatuur, ofwel temperatuurverschil) in het distributienet. Dit wordt nog versterkt door lokale bronnen (bijvoorbeeld PVT-panelen) en het invoeden van restwarmte.

Behalve decentrale opwekking zijn ook de pompen decentraal, waarbij een bi-directionele stroming kan optreden. De transportenergie (pompenenergie) neemt af doordat zo'n netwerk meer vraaggestuurd werkt, maar ook omdat niet alle energiestromen door het hele netwerk gedistribueerd hoeven te worden. Immers, bij uitwisseling tussen burens legt deze waterhoeveelheid maar een korte afstand af. Voor grotere energiecentrales (woningcomplexen en utiliteit) blijkt dit goed te werken (bij Mijwater in Heerlen zijn vier clusters met circa 2.500 weq operationeel). Voor individuele woningen is dit nog niet grootschalig toegepast. Een tussenvorm kan zijn dat een centrale pomp voor een basisstroming zorgt met relatief lage drukverschillen, en dat dit wordt aangevuld met individuele decentrale

pompen. Zo'n ZLT-U wijknetwerk wordt ook wel aangeduid met een *reservoirnet*, in tegenstelling tot een transportnet. Extra flexibiliteit ontstaat bovendien doordat (door de lage temperaturen) ook de koude buis kan worden ingezet voor verwarming en andersom. Normaal heeft dat niet de voorkeur omdat daardoor de energetische efficiëntie lager wordt.

Hoeveel warmte en koude er uitgewisseld kan worden binnen een ZLT-uitwisselnet, hangt af van de vraagprofielen van alle aangesloten afnemers. In het Mijwaterenetwerk in Heerlen was de schatting dat ongeveer de helft van de warmte- en koudevraag van de gebouwen ingevuld kan worden door uitwisseling. Echter, er zijn veel factoren die bepalen wat de uitwisseling in een gebied daadwerkelijk kan zijn. Meer onderzoek en meer meet-data is noodzakelijk om tot een meer gefundeerd kengetal te komen. Maar door beter geïsoleerde woningen en gebouwen en door een toenemende hittestress in steden wordt de koudevraag en de koudepiek wel een steeds belangrijker aandachtsgebied, hetgeen de uitwisselpotentie groter maakt. Hoe meer er een gelijktijdige vraag naar warmte en koude is op een bepaald moment, hoe meer er kan worden uitgewisseld en hoe minder warmte en koude opgewekt hoeft te worden met warmtepompen en koelmachines.

Figuur 1 – Schematische weergave van een ZLT-uitwisselnet



Er zullen gedurende het jaar perioden zijn waarin er te veel aanbod is van warmte en/of koude en een overschot ontstaat, zelfs als het uitwisselingspotentieel volledig is benut is. Dit overschot wordt dan op gebiedsniveau opgeslagen in een warmte-koudeopslag (wko) in aquifers of een andere vorm van seizoensopslag, en bewaard voor het navolgende seizoen. Om ook warmte en koude op te slaan voor een kortere periode, zijn aanvullende warmte- en koudebuffers gewenst op wijk/buurt/gebouwniveau, omdat veel warmte en/of koude op korte termijn kan worden hergebruikt (denk ook aan voor- en naseizoen, waarbij overdag koeling nodig is en 's nachts verwarming). Zo'n buffer kan ook in een gebouwen-complex worden geplaatst. Door deze combinatie van opslag op verschillende aggregatieniveaus ontstaat een grote flexibiliteit om warmte en koude uit te wisselen tussen vraag- en aanbodprofielen (bijvoorbeeld ook industriële restwarmte) en daarmee te sturen op daluren van elektriciteitsgebruik. De daluren leiden niet alleen tot lagere kosten en minder netcongestie, maar bevatten ook 'groenere' stroom, omdat meer gebruik kan worden gemaakt van (lokale) wind en pv. Dit impliceert dat ook warmte- en koudebuffers voor het kortstondiger opslaan van warmte en/of koude onderdeel zijn van een ZLT-uitwisselnet.

Een ZLT-uitwisselnet reduceert dus de opwekcapaciteit en het gebruik van warmtepompen en koelmachines, maar zorgt ook voor kleinere diameters van de ZLT-U-infrastructuur (door lokale uitwisseling en een hogere dT ten opzichte van ZLT) en daarmee tot lagere investeringen en betere inpasbaarheid. Dit werkt alleen als het temperatuurverschil tussen de warme en koude leiding groot genoeg blijft, maar omdat met name tijdens vraagpieken veel warmtepompen actief zijn, drijven deze met hun retourstroom de temperaturen van warme en koude buizen uit elkaar. De grootste beperking zit in de temperatuur van de koude buis, die niet onder 0°C mag komen.

Door wijken met elkaar te verbinden, kunnen regeneratievoorzieningen en buffervoorzieningen in meerdere wijken gedeeld worden, zodat niet iedere wijk daarin zelf moet investeren. De infrastructuur om buurten of wijken (op termijn) te verbinden en de buffervoorzieningen vragen wel om een voorinvestering, met mogelijk 'split incentives' in de verrekening van kosten van die voorinvestering. Split incentives treden ook op als op individueel niveau de warmtepomp minder efficiënt draait (bijvoorbeeld als hij eerder voor de ochtendpiek gaat verwarmen), maar dat dit op collectief niveau toch tot een optimalisatie leidt. Ook als een warmtepomp actief gaat koelen door de koelfunctie van de warmtepomp te gebruiken in plaats van passief koelen met de koude vanuit het ZLT-net dan verbruikt die bewoner wel meer elektriciteit, maar levert daarmee ook extra warmte terug aan het net, waar anderen profijt van hebben.

De kostenreductie op de warmtepompen, koelmachines en de kleinere diameters van het ZLT-net moeten opwegen tegen investeringen in buffers en het koppelen van meerdere wijken aan elkaar.

Een ZLT-uitwisselnet heeft door de hogere efficiëntie (CoP: *Coefficient of Performance*) van de warmtepompen en door minder leidingverliezen, onder andere door de uitwisseling van warmte en koude en haar buffervoorzieningen, minder vermogen nodig uit de bronnen

(ook elektrisch). Andere typen warmtenetten kunnen weliswaar ook warmte bufferen, door de hoge temperatuurniveaus wel met groter vermogen, maar beperkt in volume/duur. De mogelijkheden van uitwisseling zijn door deze hoge temperaturen wel beperkter. Individuele oplossingen kunnen alleen op woningniveau warmte (beperkt) bufferen. Daarbij speelt mee dat veel individuele warmtepompen niet altijd in koeling voorzien. De mate van uitwisseling is afhankelijk van de vraag- en aanbodprofielen van warmte en koude en de capaciteit van de buffervoorzieningen. We noemen dit de 'uitwisselfactor'. Hoe hoger de uitwisselfactor, hoe lager de elektriciteitsvraag van de warmtepompen.

Het laden van warmte- en koudebuffers gebeurt door de retourstroom van warmtepompen en koelmachines, aangevuld met duurzame lokale bronnen (zoals PVT-panelen of droge koelers), maar kan ook actief met de warmtepompen gebeuren op momenten dat er veel capaciteit over is op het elektriciteitsnet. Economisch kan dit gewaardeerd worden via de onbalansmarkt of in de toekomst de congestiemarkt, waarbij bijvoorbeeld de toepassing van een MLOEA-bemetering² een mogelijkheid biedt om het elektriciteitsgebruik van verwarmen en koelen bij de individuele gebruiker centraal aan te sturen.

Ook kan in een ZLT-uitwisselnet elektrische energie ingekocht worden op de energiehandelmarkt als de energieprijzen relatief laag zijn. Bij MT-warmtenetten en individuele warmtepompen op lucht is eveneens een interactie met de energiemarkten mogelijk. Echter, doordat bij een ZLT-U oplossing zowel in de zomer (koude) als winter (warmte) gebufferd kan worden, en door afstemming op de individuele situatie en optimalisatie met het collectief, biedt dit aanvullende mogelijkheden. Deze kosten hebben betrekking op de exploitatiekosten, waarvoor de businesscase van warmtenetten zeer gevoelig is. Hoe meer er uitgewisseld kan worden en hoe meer flexibiliteit er ontstaat door buffervoorzieningen, hoe lager de energiekosten van het ZLT-uitwisselnet.

ZLT-uitwisselnet met individuele warmtepompen

ZLT-uitwisselnet met individuele warmtepompen worden de gebouwen verwarmd met een zeerlagetemperatuur-(ZLT) uitwisselnet, gevoed met een TEO-installatie en warmte-koudeopslag-(wko)systeem. De warmte wordt bij woningen en gebouwen geleverd op een temperatuurniveau die op dat moment beschikbaar is de warmte leiding van het ZLT-U-net. Binnen het gebouw wordt een combiwarmtepomp geplaatst, die de warmte op individueel gebouwniveau opwaardeert tot 50°C. Voor warm tapwater wordt combiwarmtepomp ingezet om de temperatuur naar een niveau op te waarderen dat geschikt is voor warm tapwater. Voor koeling wordt gebruikgemaakt van de koude in het ZLT-net of wordt er met de combiwarmtepomp actief gekoeld om warmte te genereren die in het systeem nodig is.

² MLOEA staat voor Meerdere Leveranciers Op Eén Aansluiting.

Tekstkader 2 – 5GDHC

ZLT-U en vijfde generatie warmte- en koudenetten (5GDHC)

Een ZLT-uitwisselnet past sterk in de definitie van een vijfde generatie warmte- en koudenet (5GDHC):

“5GDHC is een zeer innovatief en geïntegreerd energiesysteem dat is ontworpen om efficiënte en duurzame verwarmings- en koeloplossingen te bieden voor stedelijke gebieden, op een efficiëntere en duurzamere manier dan traditionele stadsverwarmings- en koelsystemen. Het combineert een reeks geavanceerde technologieën, waaronder gecentraliseerde en gedecentraliseerde warmtepompen, grootschalige warmte-opslag, slimme netwerksystemen en thermische netwerken, om flexibele energieopwekking, -distributie en -gebruik mogelijk te maken. In tegenstelling tot eerdere generaties stadsverwarming en -koeling richt 5de generatie warmte- en koudenet zich op het optimaliseren van de energie-efficiëntie, het verminderen van de CO₂-uitstoot en het verbeteren van de veerkracht tegen klimaatverandering door de integratie van verschillende warmte- en koelbronnen en geavanceerde regelstrategieën” (Dang et al., 2024).

De vijf principes van vijfde generatie warmte- en koudenetwerken (5GDHC) zijn (Boesten et al., 2019):

1. De energiekringloop zoveel mogelijk sluiten, om energieverstopping te voorkomen.
2. Gebruik van laagwaardige bronnen voor laagwaardige vraag, zoals verwarmen en koelen van gebouwen.
3. Warmte op de gewenste temperatuur brengen precies op de plek waar en het tijdstip waarop dat nodig is.
4. Een geïntegreerde aanpak van energiestromen over verschillende sectoren.
5. Lokale bronnen benutten als prioriteit.

2.3.2 Alternatieven

We vergelijken ZLT-U met vijf andere warmte- en koudetechnieken. In overleg met de stuurgroep zijn we gekomen tot de warmte- en koudetechnieken in Tabel 1.

Om een eerlijke vergelijking te maken, moeten alle alternatieven in staat zijn om een soortgelijke service te leveren. Daarom vergelijken we ZLT-U met de alternatieven in een configuratie die de volgende services levert:

- warmte voor ruimteverwarming;
- warmte voor warm tapwater;
- koude voor ruimtekoeling.

Tabel 1 – Overzicht van te vergelijken warmtetechnieken

Warmtetechniek	Ruimteverwarming	Warm tapwater	Koelen
ZLT-U	ZLT-uitwisselnet	Combiwarmtepomp	ZLT-uitwisselnet
Individuele warmtepomp (lucht-water)	Combiwarmtepomp	Combiwarmtepomp	Combiwarmtepomp
MT-warmtenet op basis van LT-aquathermie (TEO)	MT-warmtenet	MT-warmtenet	Airco
MT-warmtenet op basis van MT-geothermie	MT-warmtenet	MT-warmtenet	Airco
ZLT-warmtenet (TEO) met individuele warmtepompen	ZLT-warmtenet	Combiwarmtepomp	ZLT-warmtenet
<i>Hybride warmtepomp met groengas</i>	<i>Hybride warmtepomp en hr-ketel</i>	<i>Hr-ketel</i>	<i>Airco</i>

Voor de beschrijving van de technieken sluiten we voor de warmtevoorziening grotendeels aan bij de omschreven varianten in de Startanalyse van het PBL (2025a). Dit wordt aangevuld met een koudetechniek, die niet worden omschreven/meegenomen in de Startanalyse.

Individuele warmtepomp (lucht-water)

Startanalyse-variant S1a: een combiwarmtepomp voor de verwarming van het gebouw. De combiwarmtepomp onttrekt daarvoor warmte aan de buitenlucht. De combiwarmtepomp waardeert de warmte op individueel gebouwniveau op tot het gewenste temperatuurniveau voor ruimteverwarming en warm tapwater. Om te kunnen voorzien in de vraag naar warm tapwater wordt daarnaast een buffervat geplaatst. Voor koeling wordt gebruik gemaakt van de combiwarmtepomp, eventueel met een aangepast afgiftesysteem.

MT-warmtenet op basis van LT-aquathermie (TEO)

Startanalyse-variant S3c: in deze variant worden de gebouwen verwarmd met een zeerlagetemperatuur-(ZLT)warmtenet, gevoed met een TEO-installatie en warmte-koudeopslag (wko-)systeem. De warmte wordt met een collectieve warmtepomp opgewaardeerd tot 70°C voordat die aan gebouwen geleverd wordt. De warmte is direct geschikt voor ruimteverwarming en warm tapwater. Voor koeling wordt gebruik gemaakt van een aanvullende airco-installatie (lucht-lucht).

MT-warmtenet op basis van MT-geothermie

Startanalyse-variant S2c: hierbij worden de gebouwen verwarmd met een warmtenet dat gevoed wordt door geothermiebronnen die aardwarmte leveren van 70°C of hoger.³ Met dit isolatieniveau is de warmte met het temperatuurniveau van 70°C direct geschikt

³ In de Startanalyse wordt bij deze variant aangenomen dat de piek- en back-upvoorziening door groen gas wordt gedaan. Omdat wij in deze studie echter kijken naar (aard)gasvrije opties, nemen we aan dat de piek- en back-upvoorziening wordt gedaan door een elektrische uitvoering. Een uitzondering hierop maken we bij het bepalen van de directe kosten. Omdat er op dit moment nog geen bruikbare kengetallen zijn voor het doorrekenen van een volledig elektrische piek- en back-upvoorziening, rekenen we hierbij nog wel met een gasgebaseerde voorziening.

voor zowel ruimteverwarming als warm tapwater. Voor koeling wordt gebruikgemaakt van een aanvullende airco-installatie (lucht-lucht).

ZLT-warmtenet (bronnet) met individuele warmtepompen

Startanalyse-variant S3e: hierbij worden de gebouwen verwarmd met een zeerlage-temperatuur-(ZLT)warmtenet, gevoed met een TEO-installatie en warmte-koudeopslag-(wko)systeem. De warmte wordt bij woningen en gebouwen geleverd op een temperatuurniveau van 15°C. Binnen het gebouw wordt een combiwarmtepomp geplaatst, die de warmte op individueel gebouwniveau opwaardeert tot 50°C. Voor warm tapwater wordt een combiwarmtepomp ingezet om de temperatuur naar een niveau op te waarderen dat geschikt is voor warm tapwater. Voor koeling wordt gebruikgemaakt van de koude in het ZLT-net.

Hybride warmtepomp met groen gas

Startanalyse-variant S4a: binnen het gebouw wordt een hybride warmtepomp geplaatst, die warmte levert tot het gewenste temperatuurniveau voor ruimteverwarming en warm tapwater. De levering van aardgas wordt vervangen door de levering van groen gas of waterstof. Omdat op dit moment de meeste verkochte hybride warmtepompen geen mogelijkheid hebben voor koeling, wordt voor koeling gebruikgemaakt van een aanvullende airco-installatie (lucht-lucht).

De hybride warmtepomp nemen we alleen mee in de vergelijking op directe effecten, omdat deze techniek alleen aardgasvrij is als er groen gas kan worden ingezet. Het is nog onduidelijk of en hoeveel groengas er in de toekomst beschikbaar zal zijn voor de gebouwde omgeving (Ministerie van VRO, 2023).

Tekstkader 3 – Isolatie en gebouwaanpassingen

Isolatie en gebouwaanpassingen

Omwille van de vergelijkbaarheid van de vijf aardgasvrije warmte- en koudetechnieken is voor de analyse gekozen om eventuele isolatiemaatregelen en aanpassingen aan het afgiftesysteem buiten beschouwing te laten. We nemen aan dat de woningen in de casussen bij iedere techniek gelijkwaardig zijn geïsoleerd en een passend afgiftesysteem hebben.

In werkelijkheid zit er wel onderscheid tussen de benodigde isolatie en gebouwaanpassingen. De MT-opties vergen weinig/geen aanpassingen. De (Z)LT-opties vergen doorgaans vergaande isolatie en een aangepast afgiftesysteem. Indien de woningen op dit moment dus niet geschikt zijn voor (Z)LT-opties, dan zijn er nog aanzienlijke kosten om dit wel mogelijk te maken.

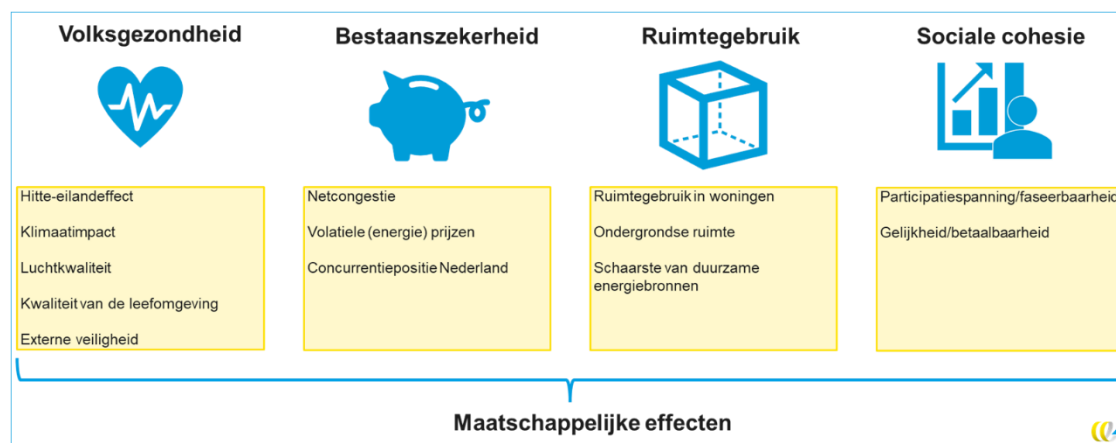
2.4 Maatschappelijke effecten

Strategieën voor aardgasvrij verwarmen worden vaak vergeleken op basis van de laagste kosten, zo schrijft ook de Wcw (Wet collectieve warmte), voordat B&W van een gemeente de omvang van een warmtekavel vaststellen, zodanig dat een collectieve warmtevoorziening wordt gerealiseerd met de laagste nationale kosten. De voorkeursstrategie houdt dan geen rekening met de maatschappelijke baten, die minstens zo belangrijk kunnen zijn. Daarom brengen wij in Hoofdstuk 3 eerst de verschillen in de maatschappelijke effecten in beeld voor de vijf oplossingen voor warmte en koude.

De warmtetransitie in de gebouwde omgeving heeft impact op zeer veel verschillende maatschappelijke effecten. Echter, niet ieder effect heeft een grote invloed op *maatschappelijke rentabiliteit* van de warmte- en koudetechnieken. Tijdens het onderzoek is daarom eerst een niet-limitatieve longlist opgesteld en vervolgens is in samenspraak met de opdrachtgever en stuurgroep gekomen tot een definitieve lijst van maatschappelijke effecten die in deze studie zijn meegenomen.

In Figuur 2 staan de gekozen maatschappelijke effecten. Deze zijn onderverdeeld naar vier thema's.

Figuur 2 – Overzicht gehanteerde maatschappelijke thema's en effecten



2.5 Directe effecten

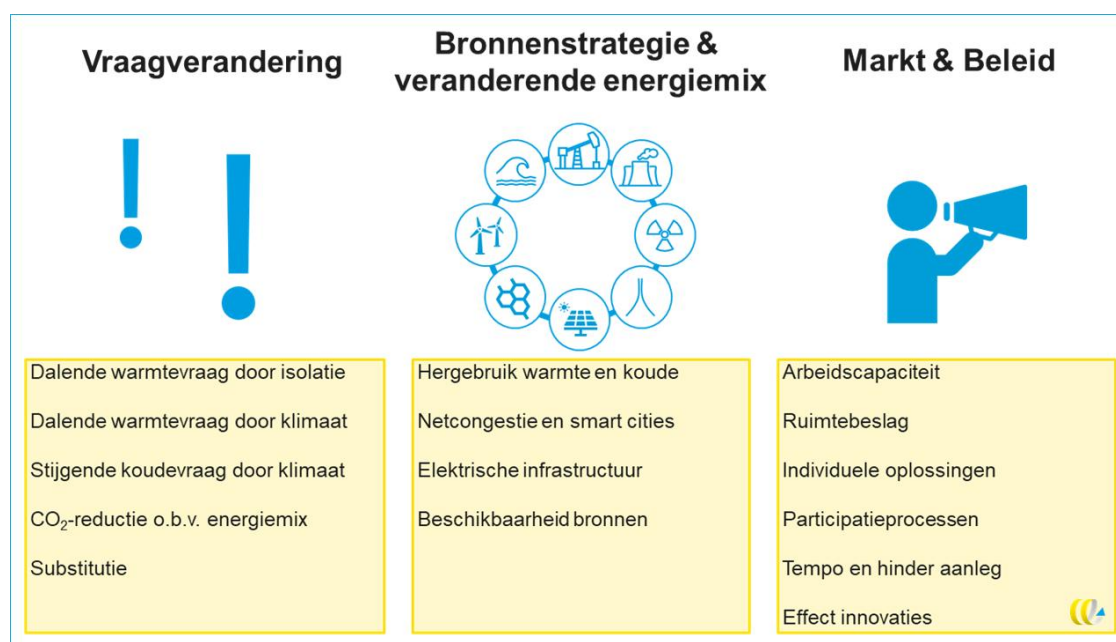
De directe effecten van de strategieën voor gasvrij verwarmen en koelen hebben vooral betrekking op kosten en energieverbruik. Deze effecten krijgen vaak de meeste aandacht, omdat ze direct meetbaar en financieel tastbaar zijn. In dit onderzoek beschouwen we de directe en maatschappelijke effecten als gelijkwaardig. Om te laten zien dat wanneer de afweging tussen alternatieven meer omvat dan de directe kosten en baten, de keuze voor 'de beste optie' mogelijk anders kan zijn. De vergelijking van de directe effecten van de verwarmingstechnieken staan in Hoofdstuk 3.

2.6 Drie scenario's

Naast de vergelijking van de vijf oplossingen voor warmte en koude, op de maatschappelijke en directe effecten, willen we kwalitatief onderzoeken wat de invloed is van verschillende toekomstige scenario's op de maatschappelijke effecten. De scenario's vormen een kader om te beoordelen welke warmtetechnieken onder uiteenlopende maatschappelijke en technologische omstandigheden het meest toekomstbestendig zijn. De effecten van de scenario's op de casussen staan in Paragraaf 3.8.3.

In de volgende figuur worden de scenario's op hoofdlijnen weergegeven. In Hoofdstuk 4 worden deze verder toegelicht.

Figuur 3 – Overzicht van scenario's en parameters



2.7 Vier cases

Om een goede analyse uit te voeren voor zowel individuele als collectieve warmte- en koudetechnieken, is het wenselijk dat deze worden uitgewerkt voor duidelijke cases. We kijken hierbij naar buurten, waarvoor we zogenaamde archetypen hebben gekozen.

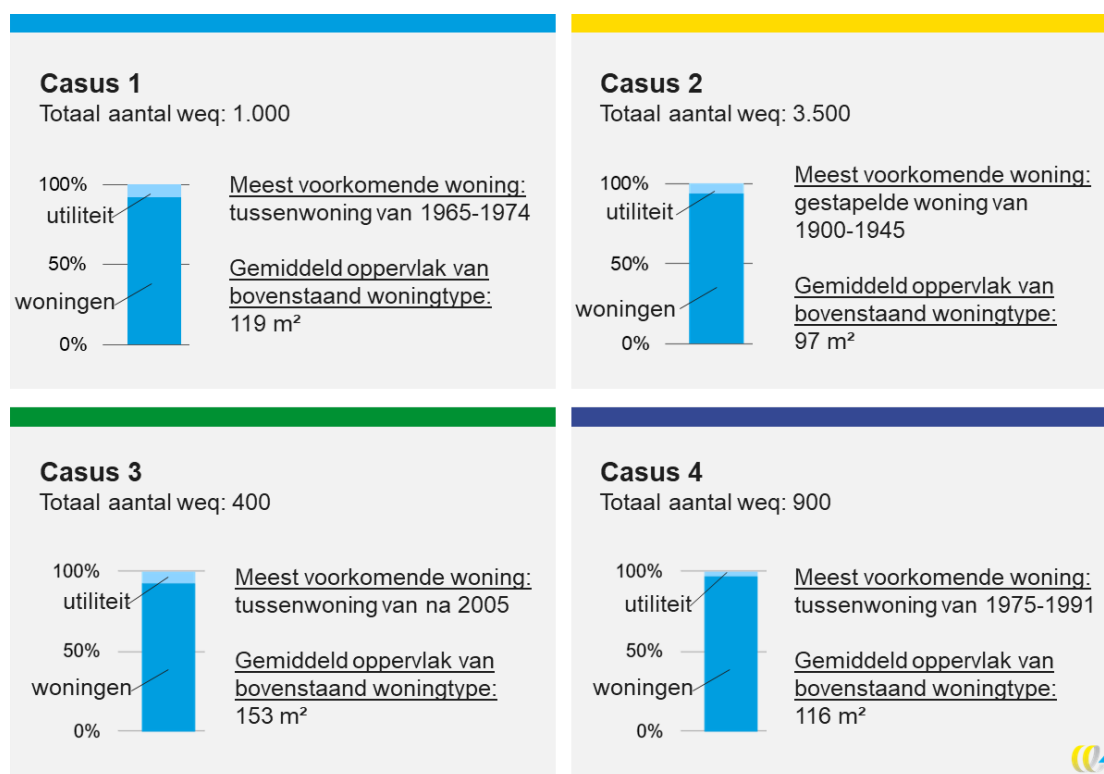
In Nederland bestaan er verschillende buurtomschrijvingen die gebruikt kunnen worden als 'archetype'. Voor de analyses in dit onderzoek hebben we een beperkt aantal (vier) archetype buurten uitgewerkt. De reken- en analysemethoden die we hebben gebruikt, kunnen echter voor *alle* Nederlandse buurten toegepast worden. We gebruiken de kleine set van archetypen vooral ter illustratie van de uitkomsten.

In overleg met de stuurgroep zijn de volgende cases uitgekozen, op basis van de volgende criteria. We benoemen niet de locatie van de buurten, omdat dit niet relevant is voor het onderzoek.

1. **Een buurt van het meest voorkomende wijktype in Nederland** (CAS & Hogeschool van Amsterdam, lopend): het wijktype 'naoorlogse woonwijk'.
2. **Een stedelijke buurt**: een stedelijke buurt met bijna uitsluitend vooroorlogse bouw.
3. **Een buurt die op het eerste gezicht erg goed lijkt voor ZLT-U**: een buurt met nieuwere woningen.
4. **Een buurt die op het eerste gezicht niet goed lijkt voor ZLT-U**: een buurt met bijna uitsluitend grondgebonden woningen.

De cases verschillen in aantallen woningequivalenten (weq)⁴, woningtypes, bouwjaar en woninggrootte, zie Figuur 4. De verdeling van woningen en utiliteitsgebouwen is soortgelijk.

Figuur 4 – Overzicht van de cases



⁴ Eén woning is één weq en 130 m² utiliteitsbouw is één weq.

3 Maatschappelijke en directe effecten

3.1 Inleiding

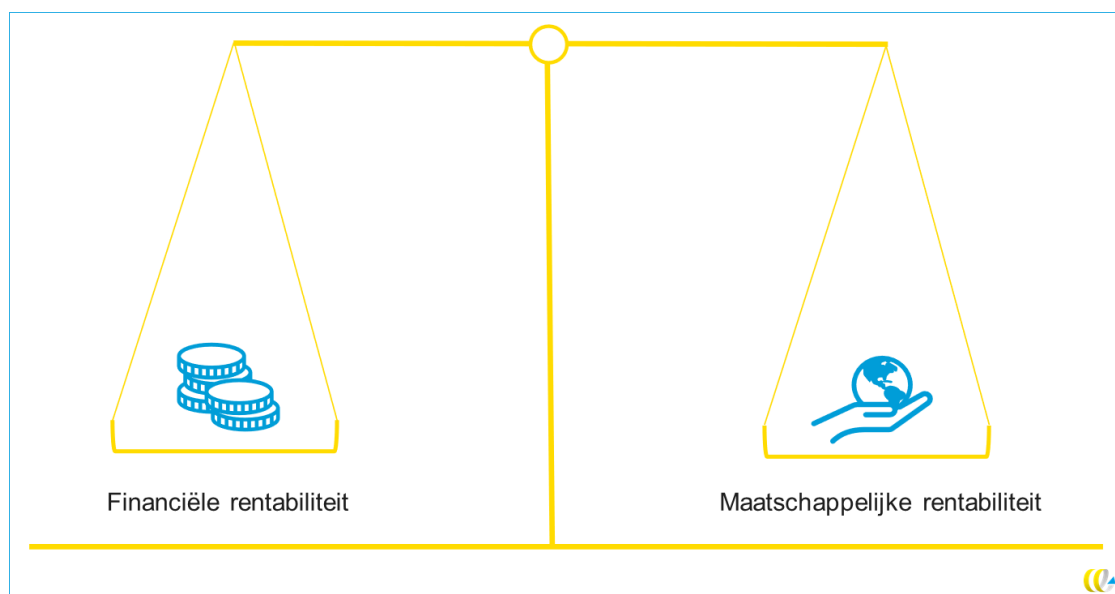
In dit hoofdstuk beschrijven we de maatschappelijke en directe effecten van de vijf warmte- en koudetechnieken. Dit doen we aan de hand van de vier casussen die zijn bekeken. Bij de meeste maatschappelijke effecten is er geen onderscheid in de beoordeling per casus: ze 'scoren' in elke casus gelijk. In de praktijk kan het echter wel voorkomen dat er verschillen ontstaan of dat niet alle effecten een even grote impact hebben of eenvoudig te mitigeren zijn. Bij de directe effecten is wel onderscheid gemaakt tussen de casussen.⁵

Het doel van dit onderzoek is om te laten zien dat maatschappelijke en directe effecten op een gelijkwaardige wijze meegewogen moeten worden bij de keuze voor de toekomstige warmte- en koudevoorziening in de gebouwde omgeving. In dit hoofdstuk wordt daarom zo veel mogelijk invulling gegeven aan beide typen effecten. Een kwantitatieve invulling is daarbij wenselijk, maar veel van de maatschappelijke effecten zijn nog niet uitgewerkt of van toepassing gemaakt voor een analyse van de warmte- en koudetransitie. Daarom is in het proces om te komen tot een onderbouwde analyse gebruikgemaakt van meerdere gremia van expertise, waaronder expertbijeenkomsten met onder andere netbeheerders, gemeenten, GGD, etc., en interviews, workshops, webinars en presentaties.

Het uiteindelijke pleidooi is voor een betere afweging, met een balans tussen financiële en maatschappelijke rentabiliteit. Het benoemen van maatschappelijke thema's en het vastleggen van onderliggende maatschappelijke effecten vormen een maatschappelijk afwegingskader. Met dit maatschappelijk afwegingskader kunnen warmte- en koude-technieken ook in kwalitatieve zin met elkaar vergeleken worden.

⁵ Voor het bepalen de directe kosten is wél gebruikgemaakt van specifieke buurten, in plaats van archetype buurten. Deze specifieke buurten zijn in samenspraak met de opdrachtgever vastgesteld.

Figuur 5 – Balans tussen financiële en maatschappelijke rentabiliteit



In dit hoofdstuk worden de maatschappelijke en directe effecten beoordeeld per warmte- en koudetechniek door middel van een **relatieve score**. Deze score wordt uitgedrukt in plussen en minnen en heeft ofwel kwantitatieve, ofwel kwalitatieve onderbouwing. Deze onderbouwingen zijn terug te vinden in de bijlagen. In dit hoofdstuk geven we de uitkomsten hiervan weer.

Tekstkader 4 – Disclaimer voor het interpreteren van de vergelijking

Eerlijk vergelijken

De vergelijking tussen ZLT-U en de alternatieven is een relatieve vergelijking. We vergelijken de vijf opties met elkaar. Het is geen absolute beoordeling en het is géén beoordeling ten opzichte van de huidige situatie. Alle bekeken opties zijn haalbare, relevante technieken voor een duurzame warmte- en koudevoorziening zonder aardgas. Maar op de bekeken maatschappelijke effecten scoren ze wisselend ten opzichte van elkaar. Deze vergelijking heeft niet als doel om bepaalde technieken te positioneren als 'goed' of 'slecht'. Het enige doel is het in beeld brengen van de verschillen op meerdere dimensies dan alleen de financiële.

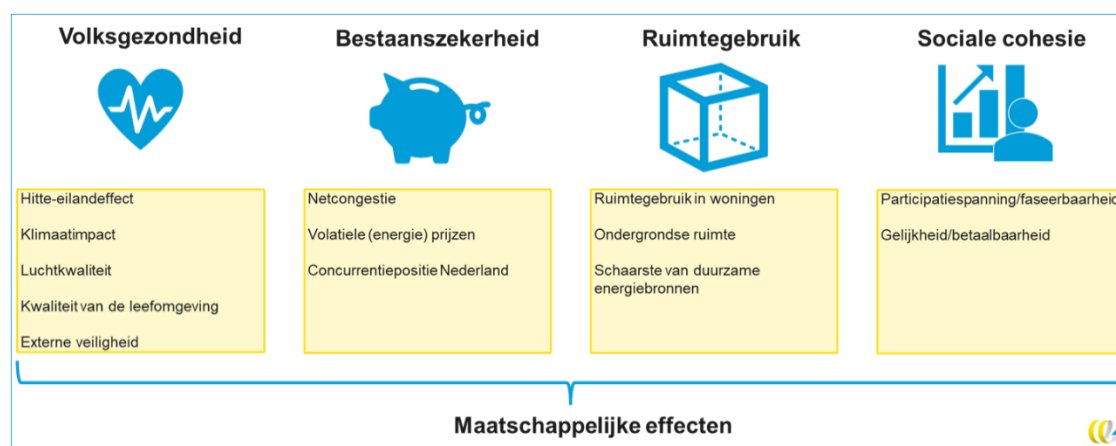
In de komende paragrafen worden de warmte- en koudetechnieken als volgt afgekort:

- Individuele all-electric warmtepomp (lucht-water): L/W-WP
- MT-warmtenet op basis van LT-TEO: MT-TEO
- MT-warmtenet op basis van MT-geothermie: MT-Geo
- ZLT-warmtenet met individuele warmtepompen: ZLT-TEO

3.2 Maatschappelijke effecten en thema's

Een keuze voor een bepaalde warmteoptie heeft ook effect op andere maatschappelijke uitdagingen waarvoor Nederland gesteld staat. Maatschappelijke thema's als **volksgezondheid, bestaanszekerheid, ruimte- en brongebruik** en **sociale cohesie** beïnvloeden de toekomstige welvaart en het welzijn van Nederland. Keuzes die wij vandaag maken voor de energie-infrastructuur, werken vanwege de lange levensduur decennialang door in onze toekomst. Om die reden worden een aantal maatschappelijke effecten hier in beeld gebracht, zodat de keuze voor een bepaalde optie mede gemaakt kan worden op basis van de maatschappelijke rentabiliteit.

Figuur 6 – Overzicht gehanteerde maatschappelijke thema's en effecten



3.3 Volksgezondheid

Voor de **volksgezondheid** wordt het effect van hittestress, klimaatimpact, luchtkwaliteit, kwaliteit van de leefomgeving en externe veiligheid in beeld gebracht. Hittestress, klimaatimpact en luchtkwaliteit hebben een direct effect op ziekte en sterfte. De kwaliteit van de leefomgeving is een wat bredere gezondheidsdeterminant, maar heeft indirect wel invloed op de volksgezondheid. De externe veiligheid is gerelateerd aan incidenten die kunnen worden veroorzaakt door bepaalde warmtetechnieken.

Specifiek voor deze effecten heeft nog kwalitatieve afstemming/aanscherping plaatsgevonden met de GGD.

3.3.1 Hitte-eiland

Dit maatschappelijke effect beschouwt het effect van een warmte- en koudetechniek op het versterken of verbeteren van het stedelijk hitte-eiland in de gebouwde omgeving. Hierbij wordt gekeken naar twee dimensies van het stedelijk hitte-eiland:

- directe gezondheidseffecten door warmere nachten (en dagen);
- opwarming van drinkwaterleidingen.

Twee hoofdaspecten daarbij zijn:

- Opwarming van de buitenruimte met gevolgen voor temperatuur *in* gebouwen. Dit heeft ook gevolgen voor de bruikbaarheid van de buitenruimte.
- Opwarming van de bodem als functie van bodembedekking, beplanting, warmtebronnen zoals warmteleidingen en elektriciteitskabels, met gevolgen voor biodiversiteit en drinkwaterveiligheid.

Door klimaatverandering neemt hittestress in stedelijke gebieden (lees: versteende gebieden) toe, wat leidt tot meer gezondheidsklachten en oversterfte. Het is aangetoond dat antropogene oorzaken: warmte afkomstig van voertuigen, koeling van gebouwen en metabolisme van mensen bijdraagt aan een stedelijk hitte-eiland (Allen et al., 2010) (McGregor et al., 2017). Met name de warmte-emissie van gebouwen kent een oorzaak-gevolg-effect dat zichzelf versterkt. Dit komt omdat de airco's elektriciteit gebruiken, die uiteindelijk als warmte in de stedelijke omgeving vrijkomt. Hoe meer koeling er nodig is, hoe meer warmte er wordt geëmitteerd en hoe warmer het buiten wordt (Allen et al., 2010). In een Amerikaanse studie is voor een halfdroog klimaat voor tien dagen een simulatie uitgevoerd om te zien wat het effect was van de warmte-emissie van airconditioners. De airconditioners veroorzaakten een temperatuurverhoging van 1°C (Salamanca et al., 2014). Een andere modellering, waarvoor Parijs de casestudie vormde, gaf een temperatuurstijging van 2,4°C, uitlopend tot 3,6°C gedurende een meerdaagse hittegolf (Viguié et al., 2020). In een Nederlandse studie is voor de stad Amsterdam voor verschillende klimaatscenario's voor het zichtjaar 2050 het effect van airconditioners bij een penetratie van 100% berekend: de temperatuur stijgt door airconditioners in het milde klimaatscenario 1,1°C, tot 2,9°C in het warmste klimaatscenario (Willemse & Steeneveld, 2021). De verschillende studies laten zien dat het gebruik van airconditioners waarbij warme lucht geëmitteerd wordt aan de omgeving, een zichtbaar effect heeft op de temperatuurstijging in de stad.

De verschillende beoordeelde technieken hebben een verschillende invloed op het hitte-eilandeffect. Het hitte-eilandeffect is sterk contextafhankelijk; dit speelt vooral in de omgeving van woonwijken en kantoorwijken, waar dit de overlast van warmte versterkt en leefbaarheid ten nadele komt. De context (locatie en omgeving) waar de casussen worden toegepast, valt buiten de scope van deze studie.

Door toepassing van individuele airco's voor warmteoplossingen die geen koeling bieden, vindt er een warmte-emissie plaats van de buitenunit. Dit heeft direct effect op het hitte-eilandeffect. Voor een middentemperatuurnet vindt er ondanks de isolatielaag van de leidingen warmteoverdracht plaats naar de ondergrond. Dit heeft effect op het hitte-eiland-effect doordat de bodem opwarmt. Afhankelijk van de toevoer en aanvoertemperatuur, de bodemtemperatuur en de isolatiegraad van de leidingen bedraagt dit warmteverlies van de leidingen en daarmee de opwarming van de bodem 55 tot 70 W/m'.⁶ Voor een ZLT-net is dit warmteverlies significant lager (6 tot 12 W/m') vanwege de lagere temperaturen in het netwerk, ondanks de ongeïsoleerde leidingen, maar wel uitgaande van een aanvoertemperatuur van 20°C. Wanneer de aanvoertemperatuur 35°C bedraagt dan is het warmteverlies van ongeïsoleerde leidingen vergelijkbaar met middentemperatuurnetten. Met deze hogere aanvoertemperatuur kan het wel verstandig zijn om de warme leiding van een ZLT-U-net te isoleren.

Een ZLT/ZLT-U-oplossing voert de warmte van koeling af via de buizen naar de bron of een wko op lage temperatuur. Hierdoor kan 24 uur per dag energie aan de stedelijke omgeving worden onttrokken, die uiteindelijk de hittestress vermindert.

In de onderstaande balk wordt weergegeven hoe we dit maatschappelijk effect scoren.

Score van maatschappelijk effect				
++	+	+/-	-	--
Heeft een verbeterend effect op hitte-eiland			Heeft een verslechterend effect op hitte-eiland	

In Tabel 2 staat de beoordeling van de warmte- en koudetechnieken.

Tabel 2 – Score hitte-eiland

Hitte-eiland		
ZLT-U	++	Vermindert hittestress doordat warmte wordt afgevoerd uit de stedelijke omgeving. Minimale uitstraling in bodem door lage temperaturen.
Lucht-WP	-	Door de koeling wordt met de buitenunit warme lucht in de leefomgeving uitgestoten.
MT-TEO	--	Door de koeling met de airco wordt warme lucht in de leefomgeving uitgestoten. Relatief grote warmteverliezen in de bodem, waardoor hogere uitstraling naar drinkwaterleidingen.
MT-Geo	--	Door de koeling met de airco wordt warme lucht in de leefomgeving uitgestoten. Relatief grote warmteverliezen in de bodem, waardoor hogere uitstraling naar drinkwaterleidingen.
ZLT-TEO	++	Vermindert hittestress doordat warmte wordt afgevoerd uit stedelijke omgeving. Minimale uitstraling in bodem door lage temperaturen.

⁶ Geschat door middel van de formule $Q = 2\pi \cdot \lambda \cdot \frac{(T_{water} - T_{bodem})}{\ln(r2/r1)}$

3.3.2 Klimaatimpact

Het gebruik van energie kan een negatieve klimaatimpact hebben. Deze impact hangt af van een aantal factoren:

- Het energieverbruik per casus: het energieverbruik is afhankelijk van de functionele vraag en het rendement van de warmte- en koudetechniek.
- De mate waarop een energiedrager bijdraagt aan klimaatverandering: dit noemen we ook wel de *emissiefactor*. Bijvoorbeeld: het bronwater uit de bodem kent in principe geen emissies aan de lucht, maar zal opgewaardeerd moeten worden met behulp van elektriciteit naar een temperatuur die bruikbaar is voor ruimtekoeling, ruimteverwarming of bereiden van warm tapwater. Elektriciteitsopwekking genereert wel CO₂-emissies.

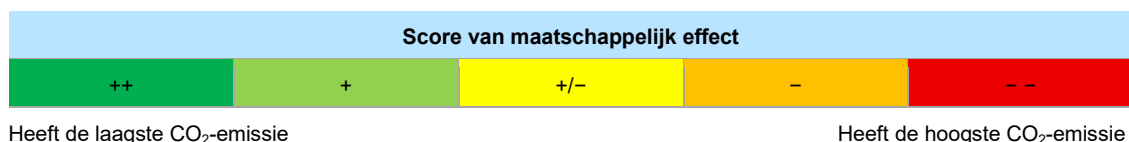
Het energieverbruik per casus hangt af van de gebouwkenmerken en het rendement van de warmte- en koudetechniek. Hoe efficiënter een techniek aan de functionele vraag naar warmte en koude kan voldoen, hoe beter dit is voor het klimaat.

De klimaatimpact van de energiedrager hangt af van hoe deze wordt geproduceerd en/of verbrand. Voor aardgas geldt een vaste emissiefactor, gebaseerd op de verbrandingswaarde van aardgas. Voor elektriciteit hangt dit af van de elektriciteitsmix in Nederland. Er bestaan uiteraard diverse elektriciteitscontracten, maar voor het verbruik rekenen we met de mix die uit het stopcontact komt. Het is de verwachting dat door meer duurzame opwek van elektriciteit de emissiefactor van elektriciteit de komende jaren (verder) zal dalen. Hiervoor maken we gebruik van de zogenoemde 'integrale methode'-prognose uit de Klimaat- en Energieverkenning 2024 (PBL, 2024). Dit betekent ook dat de klimaatimpact van elektriciteit naar de toekomst zal afnemen.

We vergelijken de warmtetechnieken met elkaar in het zichtjaar 2030. We rekenen met een CO₂-emissiefactor van 27,8 kg CO₂/GJ voor elektriciteit in 2030.

De hoogtes van de CO₂-emissies zijn bepaald aan de hand van doorrekeningen met de modellen CEGOIA en nPro. Deze modellen zijn gebruikt voor technische en financiële doorrekeningen van de warmte- en koudetechnieken.

In de onderstaande balk wordt weergegeven hoe we dit maatschappelijke effect scoren.



In Tabel 3 staat de beoordeling van de warmte- en koudetechnieken.

Tabel 3 – Score klimaatimpact in zichtjaar 2030, met een emissiefactor van 0,11 kg CO₂/kWh

Klimaatimpact		
ZLT-U	–	210 kg CO ₂ /weq/jaar
Lucht-WP	– –	275 kg CO ₂ /weq/jaar (relatief de hoogste emissies)
MT-TEO	– –	275 kg CO ₂ /weq/jaar (relatief de hoogste emissies)
MT-Geo	++	90 kg CO ₂ /weq/jaar (relatief de laagste emissies)
ZLT-TEO	–	210 kg CO ₂ /weq/jaar

Bron: (PBL, 2025b).

De scores in de tabel zijn gebaseerd op de gemiddelde emissies van de vier casussen.

3.3.3 Luchtkwaliteit

Het verbranden van fossiele brandstoffen zorgt voor luchtvervuiling en beïnvloedt daarmee de luchtkwaliteit. Met name fijnstof heeft een negatieve impact op gezondheid. In het algemeen is veel bekend over de gezondheidseffecten van luchtverontreiniging, evenals over de medische kosten, de impact op de kwaliteit van leven en de levensduur. Er zijn bovendien meerdere studies uitgevoerd en methodes ontwikkeld om luchtkwaliteit te kwantificeren, bijvoorbeeld door schaduwkosten toe te kennen aan de uitstoot van verschillende luchtverontreinigingen (CE Delft, 2010).

Het effect van een slechte (binnen-) luchtkwaliteit op de gezondheid van inwoners is groot. Deze stoffen komen vrij bij verbranding, lokaal of regionaal. Lokale emissies treden op bij warmtetechnieken waarbij ter plaatse gassen worden verbrand, terwijl regionale emissies ontstaan bij de opwekking van elektriciteit in energiecentrales. Het grote verschil met CO₂-uitstoot is dat deze wereldwijd effect heeft, terwijl de luchtkwaliteit vooral een lokale of regionale impact kent. Uitgaande van de energiemix hebben ook warmtetechnieken die uitsluitend elektriciteit verbruiken invloed op de luchtkwaliteit. Naast de uitstoot van fijnstof, speelt ook de uitstoot van NO_x een rol in de luchtkwaliteit. Deze komt onder andere voor bij aardgasverbranding.

De technieken hebben geen van allen een directe emissie van fijnstof of NO_x. Er worden geen fossiele of duurzame energiebronnen verbrand. Indirect vindt echter wel verbranding plaats, bij de (de)centrale elektriciteitsproductie in Nederland, door kolen-, biomassa- en gascentrales. Deze staan verspreid over het land en vormen daarmee een geconcentreerde bron van luchtvervuiling. De laatste jaren zijn de emissies van de energievoorziening echter sterk afgenomen.⁷

⁷ www.clo.nl/indicatoren/nl012137-emissies-naar-lucht-door-de-energievoorziening-1990-2022

De omvang van het elektriciteitsgebruik is bepaald aan de hand van doorrekeningen met de modellen CEGOIA en nPro. Deze modellen zijn gebruikt voor technische en financiële doorrekeningen van de warmte- en koudetechnieken.

In de onderstaande balk wordt weergegeven hoe we dit maatschappelijk effect scoren.



In Tabel 4 staat de beoordeling van de warmte- en koudetechnieken.

Tabel 4 – Score luchtkwaliteit

Luchtkwaliteit		
ZLT-U	-	7 GJ/weq/jaar
Lucht-WP	--	9 GJ/weq/jaar
MT-TEO	--	9 GJ/weq/jaar
MT-Geo	++	3 GJ/weq/jaar
ZLT-TEO	-	7 GJ/weq/jaar

Dit effect heeft in principe een gelijke score als het klimateffect, op het detailniveau waarop dit wordt bekeken. Verschillen kunnen voorkomen door te kijken het verschil in gebruik in zomer en winter (elektriciteit heeft in de zomer een lagere emissie dan in de winter) en wanneer alternatieven bijvoorbeeld gebruikmaken van biomassa.

3.3.4 Kwaliteit van de leefomgeving

De kwaliteit van de leefomgeving beoordelen we op drie aspecten:

- **Ruimtelijke kwaliteit:** de mate waarin het toepassen van bepaalde warmte-technieken bijdraagt aan het verbeteren van de openbare ruimte, zoals minder trafo's voor netverzwaring, maar ook het aanleggen of verbeteren van (groen)voorzieningen.
- **Bovengronds ruimtebeslag:** de mate waarin het alternatief een ruimteclaim doet op de openbare bovengrondse ruimte.
- **Esthetiek:** de mate waarin de toepassing van het alternatief impact heeft op de esthetische eigenschappen van de gebouwen in de stedelijke omgeving.

Ruimte in de stedelijke omgeving is schaars, zowel boven- als ondergronds. Voor dit effect kijken we naar het bovengrondse ruimtebeslag. Het ondergrondse ruimtebeslag wordt verderop in Paragraaf 3.5.2 behandeld.

Huidige analyses ten aanzien van het aanleggen van stadsverwarming, maar ook het versterken van het elektriciteitsnetwerk, laten zien dat dit ondergronds en bovengronds ruimtebeslag vergt (Netbeheer Nederland, 2019). Deze ruimte kan niet voor andere doelen worden gebruikt, zoals stedelijk groen, speelplaatsen, ontmoetingsruimte, opvang regenwater, etc. Door deze ruimteclaim kan het voorkomen dat sommige opties bij opschaling simpelweg niet passen in de beschikbare ruimte of dat er harde keuzes moeten worden gemaakt in wat maatschappelijk wenselijker is (bijvoorbeeld een keuze tussen een parkeerplaats, transformatorhuisje of speelplaats). Het ruimtebeslag is een complex stedelijk vraagstuk, waar we met deze studie maar een beperkte diepgang in kunnen bereiken.

Het ruimtebeslag heeft invloed op de mogelijkheden om de ruimtelijke kwaliteit te behouden en/of verbeteren. Veel bovengronds ruimtebeslag biedt weinig mogelijkheid om andere kwaliteiten toe te voegen. Hierdoor heeft het een negatief gevolg op de aspecten die bij ruimtelijke kwaliteit worden meegenomen, zoals belevingskwaliteit of functionele kwaliteit. Een goed ingerichte ruimte met groen, water en schone lucht bevordert fysieke en mentale gezondheid. Slechte ruimtelijke kwaliteit (bijvoorbeeld veel verkeer, weinig groen) kan stress en gezondheidsproblemen veroorzaken.

Aan ruimtebeslag en ruimtelijke kwaliteit is de esthetische waarde gekoppeld. Sommige technieken kunnen alleen uitgevoerd worden met veel impact op de esthetische waarde van bijvoorbeeld gebouwen, gevels of binnenruimtes.

De ruimtelijke impact van warmtesystemen verschilt sterk per warmtetechniek. MT-warmtenetten op basis van geothermie of TEO scoren het relatief licht negatief. Dit komt vooral door de benodigde buitenunits voor de koeling. Verder zijn ze vrijwel onzichtbaar en stil, wat de leefomgeving aantrekkelijk houdt (Lygnerud et al., 2023). Voor luchtwarmtepompen geldt dat zowel de warmtepomp als de benodigde netverzwaring negatief scoren. De ZLT-opties scoren relatief gezien positief. Zij hebben weliswaar geen buitenunits, maar wel wijkcentrales, buffers, (ondergrondse) wko-installaties en aquathermiecentrales in of nabij een buurt.

In de onderstaande balk wordt weergegeven hoe we dit maatschappelijk effect scoren.



In Tabel 5 staat de beoordeling van de warmte- en koudetechnieken.

Tabel 5 – Score kwaliteit van de leefomgeving

Kwaliteit van de leefomgeving		
ZLT-U	++	Beperkte zichtbaarheid in openbare ruimte. Geen esthetische verrommeling door buitenunits. Beperkt ruimtebeslag door benodigde netverzwaring/trafo's.
Lucht-WP	--	Grote zichtbaarheid in openbare ruimte en impact op esthetiek. Indirect ruimtebeslag door benodigde netverzwaring/trafo's.
MT-TEO	-	Beperkte zichtbaarheid en ruimtebeslag in openbare ruimte. Esthetische verrommeling door buitenunits. Zichtbaarheid aquathermiecentrale.
MT-Geo	-	Beperkte zichtbaarheid en ruimtebeslag in openbare ruimte. Esthetische verrommeling door buitenunits. Zichtbaarheid geothermiecentrale.
ZLT-TEO	+	Beperkte zichtbaarheid in openbare ruimte. Geen esthetische verrommeling door buitenunits. Beperkt ruimtebeslag door benodigde netverzwaring/trafo's. Zichtbaarheid aquathermiecentrale.

3.3.5 Externe veiligheid

Externe veiligheid beschrijft de risico's die een energiesysteem met zich meebrengt voor de omgeving. Dit kan betrekking hebben op zaken zoals brandgevaar, explosierisico's, trillingen of andere veiligheidsaspecten bij het transporteren, opslaan en gebruiken van energiedragers. Dit geldt ook voor de aanleg en onderhoud van deze systemen. Ook voor dit aspect geldt dat voorkomen beter is dan genezen. Dus relatief veilige technieken zullen de kans op incidenten verlagen. Het vermijden van aardgas, H₂-gas, biomassa, hoge temperaturen, etc. dragen bij aan de veiligheid in de leefomgeving. De kwantificering van deze effecten vergt een wat uitgebreidere studie en valt buiten de scope van dit onderzoek. We beoordelen het effect daarom kwalitatief.

In de onderstaande balk wordt weergegeven hoe we dit maatschappelijk effect scoren.

Score van maatschappelijk effect				
++	+	+/-	-	--
Nauwelijks tot geen externe veiligheidsrisico's			Grote en/of niet te mitigeren veiligheidsrisico's	

In Tabel 6 staat de beoordeling van de warmte- en koudetechnieken.

Tabel 6 – Score externe veiligheid

Externe veiligheid		
ZLT-U	+/-	Laag/geen risico door lage temperaturen en drukken. Beperkt risico door graafwerkzaamheden.
Lucht-WP	++	Nauwelijks/geen externe veiligheidsrisico's.
MT-TEO	-	Beperkt risico door hogere temperaturen en drukken. Beperkt risico door graafwerkzaamheden.
MT-Geo	--	Beperkt risico door hogere temperaturen en drukken. Beperkt risico door graafwerkzaamheden. Kans op verstoring ondergrond.

Externe veiligheid

ZLT-TEO	+/-	Laag/geen risico door lage temperaturen en drukken. Beperkt risico door graafwerkzaamheden.
---------	-----	---

De externe veiligheidsrisico's verschillen aanzienlijk tussen de onderzochte warmte-technieken. Een MT-warmtenet op basis van geothermie scoort het slechtst op externe veiligheid, vooral vanwege het risico op verstoring van de ondergrond (Staatstoezicht op de Mijnen, 2024) en lekkages van warm water of minerale stoffen. Hoewel deze risico's in Nederland goed beheersbaar zijn door strenge procedures en toezicht en de kans klein is, blijft het een techniek met een relatief grote impact bij incidenten. MT-warmtenetten op basis van LT-TEO hebben een licht negatief risicoprofiel, vooral door de temperatuur, en drukken in het warmtenet. ZLT-warmtenetten (met of zonder uitwisseling) scoren neutraal: ze werken op lage temperatuur en druk, bevatten geen gevaarlijke stoffen en brengen vrijwel geen externe veiligheidsrisico's met zich mee. Voor alle collectieve warmtetechnieken geldt dat graafwerkzaamheden risico's op bodemverstoring en trillingen veroorzaken, maar deze zijn over het algemeen goed beheersbaar. Individuele lucht-waterwarmtepompen hebben een licht positief profiel: er zijn nauwelijks externe veiligheidsrisico's, al blijft de inzet van (brandbare) koudemiddelen een aandachtspunt. Maar dit geldt voor alle opties waar warmtepompen/airco's onderdeel zijn.

3.4 Bestaanszekerheid

Voor de **bestaanszekerheid** worden de effecten van netcongestie, volatiele (energie-) prijzen en de concurrentiepositie van Nederland in beeld gebracht. De uiteindelijke eindgebruikerslasten bepalen in hoeverre een strategie betaalbaar is voor burgers en ondernemers. Als voor verschillende groepen de eindgebruikerslasten onbetaalbaar zijn, ontstaat er een bepaalde mate van ongelijkheid. De eindgebruikerslasten worden onder andere bepaald door hogere netwerkkosten door verzwaring van het elektriciteitsnetwerk ten gevolge van netcongestie, en onvoorspelbare verbruikerskosten van het elektriciteitsverbruik door de toename van volatiele prijsontwikkelingen op de elektriciteitshandelsmarkt. De betaalbaarheid wordt zeker ook bepaald door de prijsontwikkelingen van producten. De (groene) groei van het bbp kan de betaalbaarheid positief beïnvloeden. Om die reden is de concurrentiepositie van Nederland onderdeel van het maatschappelijk thema *bestaanszekerheid*.

3.4.1 Netcongestie

Het elektriciteitsnet in Nederland wordt zwaar belast en op veel plekken is op dit moment al sprake van netcongestie. Met de verwachte elektrificatie (zoals elektrische auto's) en toename van duurzame opwek (zoals zon-pv) zal deze druk op netten in de wijk verder stijgen. Door ongereguleerde elektrificatie van de warmte- en koelvraag zal de vraag naar capaciteit verder toenemen. De verschillende opties voor verwarmen en koelen hebben

meer of minder mogelijkheden om het elektriciteitsgebruik te reguleren, maar ook een verschillende verbruiksvraag door de systeemefficiëntie.

De belasting van het elektriciteitsnet wisselt gedurende de dag. De lage elektriciteitsbehoefte wordt ook wel de *basislast* genoemd. De pieklast vindt op bepaalde momenten plaats met een hoge vraag (of hoog aanbod). Met name de pieklast heeft de meeste impact op het net, omdat op die momenten de capaciteit onder druk kan komen te staan.

De basis- en pieklast verschillen tussen warmtetechnieken. Met name lucht-waterwarmtepompen kunnen een pieklast veroorzaken op koude momenten waarop de temperatuur van de buitenlucht laag is en de CoP (*Coefficient of Performance*, het rendement) van de warmtepomp afneemt, of zelfs elektrische elementen moeten worden ingezet. De maatschappelijke kosten van deze pieklast zijn zeer locatieafhankelijk. Dit hangt sterk samen met de specifieke belasting op het netwerk binnen een bepaald gebied.

De keuze voor een warmte- en koudetechniek heeft dus gevolgen voor de belasting op het elektriciteitsnet. Warmtenetten die gebruikmaken van hoge- of middentemperatuurbronnen zorgen voor een lagere piekvermogensvraag in de winter dan individuele warmtepompen. Zelfs als er rekening wordt gehouden met verbeteringen in efficiëntie of zachtere winters, blijft de netbelasting door individuele warmtepompen hoger dan bij warmtenetten met hoge- of middentemperatuurbronnen. De zomerpieken van de airco's bij MT-netten en de warmtepompen die koelen, zijn min of meer gelijk en minder relevant door het aanbod van zon-pv. De winterpiek is daarom dominant bij het bepalen van de netimpact.

In de onderstaande balk wordt weergegeven hoe we dit maatschappelijke effect scoren.

Score van maatschappelijk effect				
++	+	+/-	-	--
Lage vermogensvraag en lage pieken			Hoge vermogensvraag en/of hoge pieken	

In Tabel 7 staat de beoordeling van de warmte- en koudetechnieken.

Tabel 7 – Score netcongestie

Netcongestie		
ZLT-U	+	Beperkte vermogensvraag door onder andere uitwisseling, buffering, relatief kleine warmtepompen.
Lucht-WP	--	Op koude momenten (zeer) hoge vermogensvraag en beperkt beïnvloedbare gelijktijdigheid. Netbewuste aansturingen bieden een oplossing maar is op dit moment niet de standaard.
MT-TEO	-	Grote centrale warmtepomp, met groot vermogen. Collectief wel minder vermogen dan individueel en beter stuurbaar.
MT-Geo	++	Beperkt effect op netcongestie. Vooral vermogen voor bron- en circulatiepompen.
ZLT-TEO	+/-	Neutraal. Relatief kleine warmtepompen.

Warmtenetten die gebruikmaken van een ZLT-bron en warmte op middentemperatuur leveren, vereisen de inzet van een collectieve warmtepomp. De piekvermogensvraag van dit type warmtenet is iets beter dan van individuele warmtepompen, vanwege het betere rendement. Een voordeel van een collectieve warmtepomp is dat deze op het midden-spanningsnet wordt aangesloten. Hierdoor hoeft het laagspanningsnet mogelijk niet verzaamd te worden, wat aanzienlijk kan schelen in de kosten (CE Delft, 2025).

Een MT-warmtenet op basis van geothermie scoort het best: het vraagt vooral elektriciteit voor transportpompen, veroorzaakt relatief weinig netcongestie en scoort daarmee positief voor gebieden waar het net al zwaar belast is in de winter.

Individuele lucht-waterwarmtepompen verergeren netcongestie het meest, vooral tijdens piekuren, omdat ze meestal niet centraal gestuurd kunnen worden en massaal tegelijk aan kunnen slaan. Gebiedsgerichte aansturing kan netcongestieverzachtend werken, maar is nog geen gemeengoed. Een NTA voor slim aanstuurbare warmtepompen wordt binnenkort wel verwacht. Hiervoor zijn op dit moment wel diverse nationale en internationale ontwikkelingen, wat kan betekenen dat deze score in de toekomst verbetert. ZLT-warmtenetten hebben een veel lagere netimpact dankzij een warmtebron die minder afhankelijk is van de buitentemperatuur. Het kunnen daarom relatief kleinere water-waterwarmtepompen zijn met de mogelijkheid om de belasting slim te spreiden, wat overigens ook kan bij lucht-waterwarmtepompen. ZLT-U-systemen (met uitwisseling) bieden zelfs extra voordelen: door energie-uitwisseling tussen gebouwen en daarmee hogere temperaturen in het ZLT-net, waardoor de COP van de warmtepompen verbetert. Hierdoor kan de netbelasting verder worden verminderd, mits buffering goed wordt toegepast. Overigens kan buffering voor alle technieken netcongestieverzachtend zijn.

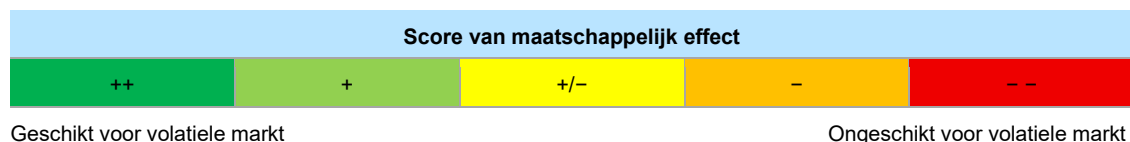
3.4.2 Volatiele (energie)prijzen

De mate waarin de warmtetechniek geschikt is om in te spelen op de variabele energie-handelsprijzen en onbalans- en congestievergoedingen, door enerzijds buffering (individueel of collectief) van warmte en koude en anderzijds van de inzet van flexibel vermogen. Bij de collectieve warmte- en koudetechnieken gaat het om het inkopen van elektriciteit op de energiehandsmarkten en het verzwaren van flexibiliteit van vermogen op de balanceringsmarkt of de congestiemarkt. Op basis van de kosten plus systematiek zoals bedoeld in de Wet collectieve warmte, komt dit voordeel ook bij de afnemers.

Bij individuele warmte- en koudetechnieken is het veelal de bewoner die in de toekomst te maken kan krijgen met volatiele elektriciteitsprijzen en variabele vastrechtkosten. Thermische bufferring kan een krachtig (en relatief goedkoop) middel zijn om energie tijdelijk op te slaan en daarmee de benodigde elektriciteit te gebruiken als de prijs laag is of dat er vergoedingen kunnen ontstaan door flexibiliteit. Voor de verschillende warmtetechnieken is gekeken naar hoe goed een techniek in kan spelen op het moment van gebruik van elektriciteit (door bijvoorbeeld centrale of decentrale buffering). En anderzijds de impact van de gebruikte elektriciteit: bij een techniek die meer elektriciteit gebruikt, is de impact

van de prijs van elektriciteit groter. Helemaal als dat gebruik ook nog eens beperkt te sturen is.

In de onderstaande balk wordt weergegeven hoe we dit maatschappelijke effect scoren.



In Tabel 8 staat de beoordeling van de warmte- en koudetechnieken.

Tabel 8 – Score volatiele (energie)prijzen

Volatiele (energie)prijzen		
ZLT-U	++	Centrale aansturing individuele warmtepompen. Goede buffermogelijkheden.
Lucht-WP	-	Beperkte centrale aansturing op dit moment maar nieuwe richtlijnen zullen dat verbeteren. Beperkte buffermogelijkheden.
MT-TEO	+	Goede buffermogelijkheden.
MT-Geo	++	Minst gevoelig. Beperkt elektriciteitsverbruik. Goede buffermogelijkheden.
ZLT-TEO	+	Efficiënte warmtepompen, beperkt elektriciteitsverbruik.

De gevoeligheid voor prijsschommelingen van energie verschilt sterk per warmtetechniek. Een MT-warmtenet op basis van geothermie biedt de meeste bescherming tegen prijsvolatiliteit omdat het relatief beperkt elektriciteit of aardgas gebruikt. Als er echter substantieel gebruik is gemaakt van de SDE++-subsidie (die gelinkt is aan de energieprijzen) dan ontstaat indirect alsnog een koppeling met prijsschommelingen. Verder is deze techniek alleen gevoelig voor schommelende energietarieven ten gevolge van pompenenergie en elektriciteit voor de individuele airco's. MT-warmtenetten op basis van LT-TEO zijn gevoeliger voor prijsfluctuaties, omdat ze afhankelijk zijn van zowel elektriciteit (voor de warmtepomp) als voor transportpompen en regeltechniek. Door langjarige afspraken rond centrale inkoop kunnen prijsschommelingen deels worden voorkomen. Het risico ligt dan bij de leverancier. Individuele lucht-waterwarmtepompen zijn het meest kwetsbaar: bewoners zijn volledig afhankelijk van hun eigen stroomcontract, met alleen bufferingsmogelijkheden in de eigen woning. In geval van dynamische energiecontracten kan de levering van elektriciteit bij dunkelflaute en tijdens pieken tot hoge kosten leiden. ZLT-warmtenetten bieden meer bescherming: door efficiënte, water-waterwarmtepompen. ZLT-U-systemen (met uitwisseling) kunnen zorgen voor hogere temperaturen in het ZLT-net, waardoor de warmtepompen minder elektriciteit verbruiken en wijkbuffers de mogelijkheid geven om de piekuren te vermijden.

3.4.3 Concurrentiepositie Nederland

Dit maatschappelijke effect beoordeelt de impact van warmtetechnieken op de economische positie van Nederland als kennisland, maakland en innovatieland. De mate waarin een techniek bijdraagt aan werkgelegenheid, strategische autonomie en exportpotentieel, speelt hierbij een rol. In de beoordeling wordt onderscheid gemaakt tussen twee onderliggende dimensies:

1. **Materiaalcomponent:** het aandeel van de technische onderdelen dat in Nederland geproduceerd of geassembleerd wordt (zoals leidingen, installaties of regeltechniek).
2. **Kenniseconomiecomponent:** het aandeel van Nederlandse kennis en arbeid in het ontwerp, de engineering, de aanleg en het beheer van het systeem.

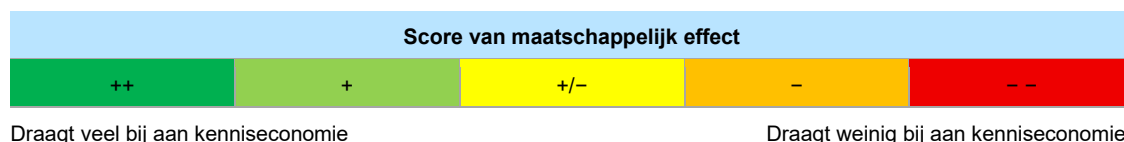
Sommige technieken zijn sterk afhankelijk van buitenlandse producenten. Een voorbeeld hiervan is de all-electric lucht-waterwarmtepomp. In Nederland zijn ongeveer tien warmtepompfabrikanten; daarmee zit Nederland in de middenmoot van Europa. Het grootste deel wordt geïmporteerd van buitenlandse producenten (zoals Nibe, BDR Thermea, Vaillant, Daikin Mitsubishi of HiTech). De import van individuele lucht-waterwarmtepompen vindt grotendeels plaats binnen Europa, maar ook voor een groot deel uit Azië (voornamelijk Zuid-Korea en China) (bron: Dutch New Energy Research en Warmte365 (DNE Research, 2025)). Hierdoor blijft de economische waarde grotendeels buiten Nederland. Er zijn mogelijkheden voor de Nederlandse bedrijven om zich te onderscheiden, bijvoorbeeld door te innoveren in efficiëntere, stillere of compacter gebouwde warmtepompen, of door slimme integratie met andere duurzame technologieën (zoals warmtenetten, zonnepanelen, slimme sturing). Met betrekking tot warmtepompen is Nederland echter geen koploper en veel van de Nederlandse fabrikanten zijn onderdeel van een grotere groep, die veelal niet uit Nederland of Europa komt (CE Delft, 2023b).

Daartegenover staan collectieve warmtenetten, zoals ZLT en ZLT-U, die relatief veel ontwerp- en aanlegwerk vragen en vaak projectmatig ontwikkeld worden in Nederland. Deze systemen worden afgestemd op lokale omstandigheden, waardoor Nederlandse ingenieurs, installateurs en kennisinstellingen een belangrijke rol vervullen. Omdat ZLT en ZLT-U zich nog in een vroege ontwikkelfase bevinden, biedt nu investeren in deze techniek een kans voor Nederland om internationaal koploper te worden. De systemen vragen om complexe technologische oplossingen zoals innovatieve sturing, ICT-systeemintegratie en wko, domeinen waarin Nederland zich al onderscheidt, maar waarin het zich ook verder kan ontwikkelen en profileren.

Voor MT-warmtenetten ligt de positie ertussenin. De infrastructuur wordt grotendeels lokaal aangelegd, maar gebruikt vaak gestandaardiseerde componenten en is minder sterk verbonden met de Nederlandse kennissector. MT op basis van geothermie heeft een zeer goede kennisbasis in Nederland, maar kent daarnaast beperkingen qua locatie

(niet overal toepasbaar), terwijl LT-TEO-systemen wel schaalbaar zijn, maar een relatief hoge inzet van buitenlandse technologie kennen (centrale warmtepompen).

In de onderstaande balk wordt weergegeven hoe we dit maatschappelijke effect scoren.



In Tabel 9 staat de beoordeling van de warmte- en koudetechnieken.

Tabel 9 – Score concurrentiepositie Nederland

Concurrentiepositie Nederland		
ZLT-U	++	Goede kennisbasis op (Z)LT-bronnen en wko.
Lucht-WP	-	Kennisontwikkeling beperkt in Nederland. Vooral in buitenland.
MT-TEO	+/-	Neutraal. Goede kennisbron. Matige componentontwikkeling.
MT-Geo	+/-	Neutraal. Goede kennisbron. Matige componentontwikkeling.
ZLT-TEO	++	Goede kennisbasis op (Z)LT-bronnen en wko.

De markt voor individuele warmtepompen speelt zich grotendeels af op de buitenlandse markt en de benodigde kennis om deze toe te passen is relatief beperkt, wat tot een negatieve score leidt op onze concurrentiepositie. ZLT en ZLT-U scoren beter, met name op de dimensie *kenniseconomie*, vanwege onze kennis over ZLT-bronnen en wko's. De MT-warmtenetten scoren neutraal, het kenniscomponent (kennis en arbeid) is wel lokaal, maar de materialisatie (bijvoorbeeld leidingen) is grotendeels internationaal.

3.5 Ruimte- en brongebruik

Voor het ruimte- en brongebruik wordt het effect van **ruimtegebruik in woningen**, **ruimtegebruik in de ondergrond** en de **schaarste van duurzame energiebronnen** in beeld gebracht. Het gebruik van een oppervlakte heeft een economische waarde. Meer benutbaar woonoppervlak leidt tot een hogere waarde van een woning. Maar ook het ruimtegebruik in de ondergrond is een belangrijk aspect; er zijn meerdere (infrastructurale) opgaves die ruimte vragen. Naast de ruimte die nodig is voor de energietransitie kent Nederland ook een woonopgave en moet zij klimaatadaptieve maatregelen nemen die ruimte vragen. Duurzame bronnen zijn binnen de warmtetransitie (vooralsnog) schaars. Het efficiënt benutten van bronnen en deze eerlijk verdelen vraagt om goed beleid en goede plannen om hiermee rekening te houden.

3.5.1 Ruimtegebruik voor woningen

Ruimtegebruik voor woningen betreft de fysieke ruimte die de warmtetechnieken nodig hebben in en om de woningen en gebouwen. Dit kan variëren van compacte installaties tot systemen die meer ingrijpend zijn in ruimtegebruik of die aanpassingen van de verwarmingsinstallatie vereisen. Collectieve technieken hebben vaak minder ruimte nodig binnen gebouwen en meer daarbuiten. Individuele technieken hebben juist ruimte binnen en om gebouwen nodig. Een voor sommigen onvoorziene ruimte vraag is de ruimte die nodig is voor uitbreiding van het elektriciteitsnet, zoals in de situatie van all-electric oplossingen. Deze ruimtebehoefte in de wijk wordt meegenomen in het maatschappelijk effect *kwaliteit van de leefomgeving*.

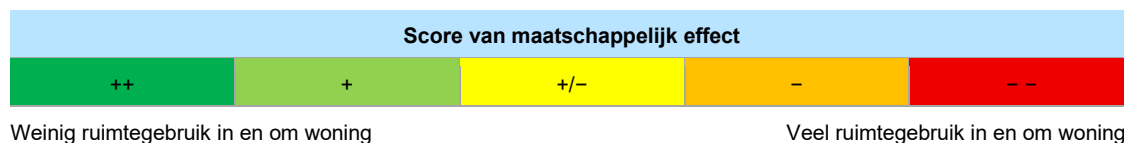
Het gemiddelde ruimtebeslag in en om een woning is bij een all-electric warmtepomp het grootst, zie Tabel 10. De warmtepomp heeft over het algemeen een binnen- en buitenunit, een boiler voor tapwater en een buffervat voor het cv-systeem. De all-electric warmtepomp scoort dan ook het laagst.

Het ZLT-net en ZLT-uitwisselnet hebben beide ook ruimte nodig in huis voor een warmtepomp en boilervat. Omdat dit een water-waterwarmtepomp is, is er geen buitenunit nodig, maar wel leidingwerk en een hydraulische scheiding voor aansluiting op het ZLT-warmte- en koudenetwerk. Deze varianten scoren dus iets beter op dit criterium dan de all-electric warmtepomp.

Voor het MT-warmtenet is alleen een afleverset en leidingwerk nodig in huis. De twee variaties van MT-warmtenetten scoren dan ook het beste.

De beide MT-opties hebben daarnaast ook nog ruimte om de woning nodig voor de binnenunit en buitenunit. De impact op het ruimtegebruik daarvan is zeer afhankelijk van de positionering.

In de onderstaande balk wordt weergegeven hoe we dit maatschappelijke effect scoren.



In Tabel 10 staat de beoordeling van de warmte- en koudetechnieken.

Tabel 10 – Score ruimtegebruik voor woningen

Ruimtegebruik voor woningen: gemiddeld ruimtebeslag in en om woning of gebouw (m ² /weq)		
ZLT-U	–	1,4
Lucht-WP	– –	1,7 + buitenunit
MT-TEO	++	0,1 + buitenunit
MT-Geo	++	0,1 + buitenunit
ZLT-TEO	–	1,4

Inschatting gedaan op basis van grootte van componenten (CE Delft, 2021).

3.5.2 Ondergrondse ruimte

Dit is een beoordeling van de warmtetechnieken op de inpassingmogelijkheid in de ondergrond, in relatie tot overige leidingen en buizen, ofwel een indicatie van de eenvoud waarmee de benodigde infrastructuur ingepast kan worden in de bestaande straten.

In het verlengde van bovengronds ruimtegebruik geldt ook hier: hoe kleiner het ruimtebeslag, hoe eenvoudiger de oplossing. Voor de all-electric warmtetechniek is alleen het elektriciteitsnet nodig, dat wellicht verzaamd moet worden. De andere technieken hebben ook een warmte-infrastructuur nodig die ruimte vraagt in de ondergrond.

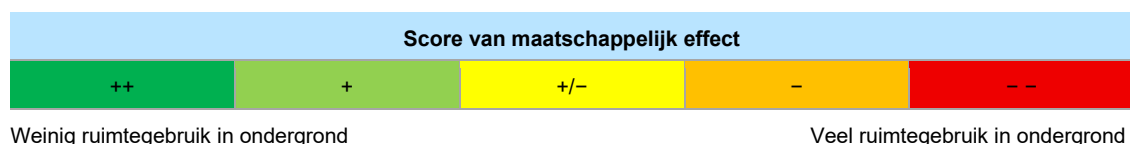
In algemene zin is het echter moeilijk hierover een uitspraak te doen, omdat een en ander erg situationeel afhankelijk is. Bij de afweging speelt bij warmtenetten niet alleen het temperatuurniveau van de leidingen mee (in verband met de afstand tot bijvoorbeeld drinkwaterleidingen), maar uiteraard ook de afmeting van de (geïsoleerde) buizen, de grondsoort, grondwaterstand en eventuele vervuiling of archeologische waarden.

Desondanks zijn er criteria voor de ligging van kabels en leidingen in de straat, die een minimale afstand van warmteleidingen geven ten opzichte van andere infrastructuren (voor telecom, elektriciteit, aardgas, riool en water) en groenvoorzieningen. De NEN 7171-1 'Ordering van ondergrondse netten' geeft dwarsprofielen en afstanden voor nieuwbouw en is recentelijk (februari 2024) vernieuwd. Veel gemeenten hanteren straatprofielen die afgeleid zijn van deze norm. In algemene zin wordt (nog) geen onderscheid gemaakt tussen de temperaturen die in de warmteleidingen getransporteerd en gedistribueerd worden (WarmingUp, 2022). Specifiek voor drinkwaterleidingen heeft VEWIN en Energie Nederland een afsprakenkader opgesteld (2024) dat de basisafstand voor parallelle ligging van de warmteleiding en drinkwaterleiding vastlegt op minimaal 1,5 meter. Onder voorwaarden kan daarvan worden afgeweken, met name over korte afstanden. Voor warmteleidingen met een maximale temperatuur van 20°C gelden deze afstandsnormen niet. Wel wordt geadviseerd een minimale afstand van 0,25 m aan te houden.

Een ZLT-net zal doorgaans altijd onder de 20°C blijven of kan daarop worden begrensd. In een ZLT-U-net kan de temperatuur van de warme buis oplopen, maar deze wordt ook begrensd door materiaalgebruik en expansievoorzieningen. Met name kunststof leidingen zijn gevoelig voor hogere temperaturen (sterke afname van de levensduur). In een ZLT-U-net is het daarom zinvol de warme buis te isoleren en de temperatuur te begrenzen op bijvoorbeeld 40°C. Voor aanleg dicht tegen een drinkwaterleiding is per project een onderzoek naar relatieve opwarming noodzakelijk. Overigens zorgen ook (verzwaaarde) elektriciteitsleidingen voor opwarming van de bodem en gelden hiervoor afstandsnormen ten opzichte van drinkwaterleidingen en warmteleidingen. In een locatieonderzoek moeten al deze effecten worden meegenomen.

Een ander verschil tussen een MT-warmtenet en een ZLT-warmtenet is de noodzaak van expansielussen. Deze vergen veel ruimte en zijn voor ZLT- en ZLT-U-netten niet vereist. Dit heeft een direct effect op de ruimte in de ondergrond.

In de onderstaande balk wordt weergegeven hoe we dit maatschappelijke effect scoren.



In Tabel 11 staat de beoordeling van de warmte- en koudetechnieken.

Tabel 11 – Score ondergronds ruimte

Ondergrondse ruimte		
ZLT-U	+/–	Neutraal. Leidingen hebben relatief lage temperatuur.
Lucht-WP	++	Heeft (bijna) geen aanvullende ruimteclaim in de ondergrond.
MT-TEO	--	Heeft grotere afstandseisen tot overig bodemgebruik.
MT-Geo	--	Heeft grotere afstandseisen tot overig bodemgebruik.
ZLT-TEO	+	Lage temperatuur, weinig impact op overig bodemgebruik.

All-electric scoort het hoogst, omdat het alleen gebruikmaakt van het elektriciteitsnet. De MT-warmtenetten scoren het laagst vanwege de vereiste afstand tot andere infrastructuur, de afstand tot bomen (standaard 2 m) en de noodzaak van expansielussen. De ZLT-warmtenetten scoren beter dan MT-warmtenetten, aangezien zij dichter gelegd kunnen worden tegen andere infrastructuur, aanwezige bomen en er geen expansielussen nodig zijn. Doordat de temperatuur van een ZLT-U hoger kan zijn dan een ZLT-warmtenet, scoort deze iets lager.

3.5.3 Schaarste van duurzame energiebronnen

Schaarste van duurzame energiebronnen verwijst naar de beschikbaarheid van hernieuwbare energie (bijvoorbeeld zon en wind), de beschikbaarheid van omgevingswarmte (bijvoorbeeld lucht en water) en de beschikbaarheid van restwarmte (bijvoorbeeld industrie, datacenters en supermarkten). Sommigen bronnen zijn maar beperkt beschikbaar, andere bronnen zijn misschien ruimer beschikbaar, maar hebben hogere kosten. Om optimaal gebruik te maken van de schaarse energiebronnen en om de kosten niet te hoog op te laten lopen, is het wenselijk dat er zo zuinig mogelijk om wordt gegaan met deze bronnen.

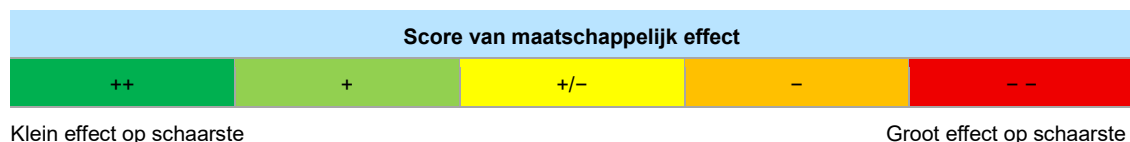
Daar komt bij dat sommige bronnen geografisch gebonden zijn. Zo is een wko niet zomaar tien kilometer verderop te verplaatsen. En is geothermie niet overal in Nederland beschikbaar of onvoldoende in kaart gebracht. En er zijn locaties waar de vraag het aanbod overtreft. Hiermee wordt de schaarste dus bepaald door de totale beschikbaarheid, de kosten en de locatie.

Bij dit maatschappelijke effect kijken we naar de combinatie van deze eigenschappen van schaarste:

- Beschikbaarheid van hernieuwbare energie (bijvoorbeeld zon en wind).
- Beschikbaarheid van omgevingswarmte (bijvoorbeeld lucht en water).
- Beschikbaarheid van restwarmte (bijvoorbeeld industrie en supermarkten).
- De mate van beschikbaarheid (oneindig of eindig).
- Daarnaast wordt gekeken naar de geografische gebondenheid: hoe sterk is het alternatief verbonden aan een specifieke locatie?

Omdat alle alternatieven gebruikmaken van elektriciteit, en dit al in andere maatschappelijke effecten is meegenomen als sturend concept voor de beoordeling, wordt bij dit effect het elektriciteitsgebruik buiten beschouwing gelaten.

In de onderstaande balk wordt weergegeven hoe we dit maatschappelijke effect scoren.



In Tabel 12 staat de beoordeling van de warmte- en koudetechnieken.

Tabel 12 – Score schaarste van duurzame energiebronnen

Schaarste van duurzame energiebronnen		
ZLT-U	+	Grote veelzijdigheid aan bronnen.
Lucht-WP	++	Onbeperkte bron (buitenlucht).
MT-TEO	-	Oppervlaktewater beschikbaar, maar complexiteit met thermische lozingen.
MT-Geo	+	Grote beschikbaarheid aan bronnen.
ZLT-TEO	+/-	Neutraal. Oppervlaktewater beschikbaar, minder complexiteit met thermische lozingen.

ZLT-U kan gebruikmaken van een grote verscheidenheid aan bronnen. Hierbij zijn ook LT-bronnen voor het oogsten van warmte- en koude benutbaar in een gebied. Er zijn namelijk veel meer bronnen beschikbaar op lage temperatuur dan op midden- of hoge temperatuur. Een ZLT-net is daarentegen vaak aangesloten op één of enkele (regeneratie-) bronnen. Het systeem is daar over het algemeen op gedimensioneerd. Daarom scoren we deze op 'neutraal'. Een MT-net met TEO haalt de warmte uit oppervlaktewater. Het beschikbare oppervlaktewater in Nederland is weliswaar aanzienlijk, maar dicht bij bebouwing ook eindig, mede door ecologische eisen, zoals een beperkte dT bij lozing.

Een MT-net met geothermie, daar waar dit kan, heeft een zeer grote bron van energie ter beschikking. Vele duizenden woningen kunnen op één geothermieput worden aangesloten. Als de put goed werkt, dan is de beschikbaarheid groot en voorspelbaar. Een lucht-waterwarmtepomp maakt gebruik van de buitenlucht. Dit is een oneindige bron van warmte. Fluctuaties en lage temperaturen hebben wel invloed op het rendement en het elektriciteitsgebruik, maar vormen geen belemmering voor een werkende techniek (in Nederland).

In deze analyse is niet gekeken naar de beschikbaarheid van de gebruikte elektriciteit, omdat deze al terugkomt in andere effecten.

3.6 Sociale cohesie

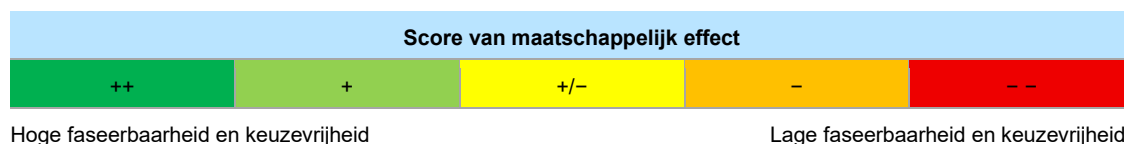
Voor het versterken van sociale cohesie zijn de **participatiespanning/faseerbaarheid** en de **inclusiviteit** van de warmtetechnieken in beeld gebracht.

3.6.1 Participatiespanning/faseerbaarheid

Participatiespanning verwijst naar de mate waarin inwoners, bedrijven en overheden betrokken moeten worden bij de besluitvorming en implementatie van een warmtetechniek. Bijvoorbeeld: is er een minimale deelname nodig voor succesvolle implementatie? Is er één moment waarop een bepaald aantal huishoudens moet toezeggen om aan te sluiten om de warmtetechniek mogelijk te maken?

De **faseerbaarheid** is de mogelijkheid die een warmtetechniek heeft om met verschillende mate van participatie of fasen uitgevoerd te worden. Anders gezegd, in welke mate het systeem het technisch, energetisch en financieel toelaat om klein te starten en in de tijd op te schalen.

In de onderstaande balk wordt weergegeven hoe we dit maatschappelijk effect scoren.



In Tabel 13 staat de beoordeling van de warmte- en koudetechnieken.

Tabel 13 – Score participatiespanning/faseerbaarheid

Participatiespanning/faseerbaarheid		
ZLT-U	+/-	Vereist volloop. Faseerbaar in kleine aantallen. Vereist een mix van gebruikers.
Lucht-WP	++	Veel keuzevrijheid. Goed faseerbaar.
MT-TEO	-	Vereist hoge volloop. Zeer beperkt faseerbaar.
MT-Geo	--	Vereist hoge volloop. Zeer beperkt faseerbaar. Bron is niet schaalbaar.
ZLT-TEO	+	Vereist volloop. Faseerbaar in kleine aantallen.

Een MT-warmtenet op basis van geothermie scoort het laagst: het vereist een hoge volloop, kan technisch nauwelijks moduleren en vraagt om een massale, gelijktijdige overstap van bewoners – wat vaak leidt tot sociale druk en weerstand. Ook een MT-warmtenet op basis van LT-TEO is beperkt faseerbaar en vraagt een relatief hoge volloop, waardoor vrijwillige deelname lastig is. Individuele lucht-waterwarmtepompen scoren het best: deze zijn volledig modulair, bewoners kunnen zelfstandig en op eigen tempo overstappen, en er is (bijna) geen collectieve druk, mits een aansluiting op het elektriciteitsnet geleverd kan worden. ZLT-warmtenetten bieden een goede middenweg: ze zijn technisch en energetisch beter faseerbaar, kunnen klein starten (minimaal 200 aansluitingen) en later worden uitgebreid, en vragen geen massale gelijktijdige deelname. ZLT-U-systemen (met uitwisseling) zijn technisch faseerbaar, maar vragen voor optimaal functioneren een goede mix van gebruikers, waardoor de participatiespanning iets hoger ligt dan bij standaard ZLT. Voor beide ZLT-opties zou een aanpak analoog aan de glasvezelaanpak kunnen werken.

3.6.2 Inclusiviteit

Inclusiviteit in de energietransitie betekent dat alle groepen binnen de samenleving toegang hebben tot een betrouwbaar en betaalbaar energiesysteem, ongeacht inkomensniveau, woningtype of locatie. Het betekent ook dat huishoudens die niet meteen aardgasvrij kunnen worden, bijvoorbeeld door gebrek aan investeringsvermogen, later wel over kunnen op een aardgasvrije verwarmingstechniek.

Dit criterium gaat over de invloed van de warmtetechnieken op inclusiviteit. We beoordelen de warmtetechnieken op:

- **Cognitieve belasting en complexiteit** van de benodigde aanpassingen in de woning.
- **Financiële ongelijkheid**: de mate waarin systemen huishoudens uitsluiten vanwege investeringsvermogen.
- **De mate van ontzorging** door warmteleveranciers, overheden of andere partijen.

In de onderstaande balk wordt weergegeven hoe we dit maatschappelijke effect scoren.



In Tabel 14 staat de beoordeling van de warmte- en koudetechnieken.

Tabel 14 – Score inclusiviteit

Inclusiviteit		
ZLT-U	+/-	Neutraal. Individuele oplossing die collectief wordt ontzorgd.
Lucht-WP	--	Zeer grote diversiteit van oplossingen. Financieel complex.
MT-TEO	+	Geschikt voor vrijwel alle woningen. Ontzorging voor alle woningen.
MT-Geo	++	Geschikt voor vrijwel alle woningen. Ontzorging voor alle woningen.
ZLT-TEO	+/-	Neutraal. Individuele oplossing die collectief wordt ontzorgd.

De toegankelijkheid en het ontzorgingsniveau voor bewoners verschillen sterk per warmtetechniek. Een MT-warmtenet op basis van geothermie scoort het hoogst: het systeem is geschikt voor vrijwel alle woningen zonder aanpassingen, vereist minder individuele investeringen of technische kennis, en biedt volledige collectieve ontzorging – iedereen kan meedoen, ongeacht inkomen of vaardigheden. MT-warmtenetten op basis van LT-TEO bieden vergelijkbare voordelen, maar zijn aan de bronzijde iets complexer en daardoor iets minder laagdrempelig. Individuele lucht-waterwarmtepompen scoren het laagst: ze vragen om hoge individuele investeringen, technische kennis en begeleiding van bewoners, en vergroten de kans op uitsluiting van bewoners met een lager inkomen of beperkte actieradius. Deze techniek kan beter scoren als het meer als collectief georganiseerd wordt met een bepaald aanbod van ontzorging door een aanbieder. Dit gebeurt in de praktijk echter nog weinig. ZLT-warmtenetten en ZLT-U-systemen zitten daar tussenin: ze vereisen woningaanpassingen en bieden minder laagdrempeligheid dan MT-systemen, maar zijn collectief georganiseerd en bieden enige mate van ontzorging. Wel blijft er kans op ongelijkheid, afhankelijk van woninggeschiktheid en kosten.

3.7 Samenvattend overzicht maatschappelijke effecten

In Tabel 15 worden de scores van de technieken op de verschillende maatschappelijke effecten weergegeven. De kleuren geven de relatieve scores van de warmte- en koude-technieken weer.

Tabel 15 – Overzicht van beoordeling op maatschappelijke effecten

	ZLT-U	Lucht-WP	MT-TEO	MT-Geo	ZLT-TEO
Maatschappelijke effecten					
Hitte-eiland	++	–	--	--	++
Klimaatimpact	–	--	--	++	–
Luchtkwaliteit	–	--	--	++	–
Kwaliteit leefomgeving	++	--	–	–	+
Externe veiligheid	+/-	++	–	--	+/-
Netcongestie	+	--	–	++	+/-
Volatiele (energie)prijzen	++	–	+	++	+
Concurrentiepositie NL	++	–	+/-	+/-	++
Ruimtegebruik voor woningen	–	--	++	++	–
Ondergrondse ruimte	+/-	++	--	--	+
Schaarste duurzame bronnen	+	++	–	+	+/-
Participatiespanning/faseerbaarheid	+/-	++	–	--	+
Inclusiviteit	+/-	--	+	++	+/-

3.8 Directe effecten

Directe effecten spelen een belangrijke rol binnen de warmtetransitie, omdat ze vaak beter meetbaar zijn dan de bredere maatschappelijke effecten. Volgens de Wet gemeentelijke instrumenten warmtetransitie (Wgiw) moeten gemeenten per buurt of gebied de warmte-techniek met de laagste nationale kosten als voorkeurs techniek aanwijzen, tenzij er een goede reden voor is dit niet te gebruiken. Voor deze studie kijken wij echter niet naar de ‘nationale kosten’, zoals die bijvoorbeeld in de Startanalyse zijn opgenomen, maar naar investeringskosten, energieverbruik en onderhoudskosten. Dit doen we omdat dit beter aansluit bij de aanpak van een maatschappelijke kosten-batenanalyse. Het verschil met de nationale kosten is echter beperkt. Daarin worden de genoemde kosten omgerekend naar jaarlijkse annuïteiten en kosten. Omdat dit echter voor alle alternatieven op (bijna) dezelfde manier plaatsvindt, is hier gekozen om de volledige investeringen en jaarlijkse kosten te laten zien. Dit lijkt de meest zuivere weergave.

Er bestaat geen model waarmee de vijf verschillende warmte- en koudetechnieken op een gelijke leest berekend kunnen worden. Daarom rekenen we met twee verschillende modellen: nPro voor de ZLT-U-variant en CEGOIA voor de alternatieven, zie Tekstkader 5. Omdat deze modellen de doorrekening op verschillende manieren doen en niet beide geschikt zijn om de kosten op gelijke manier te berekenen, worden deze doorrekeningen alleen gebruikt voor de parameters zoals leidinglengtes, capaciteiten en energiegebruik. Op basis van praktijkervaring bij voorgaande warmtenetprojecten (interne expertise) worden deze parameters omgezet naar de ordegrootte van de investeringskosten. Naast de investeringskosten kijken we ook naar het energiegebruik en de operationele kosten. Een recente studie van Siers (september 2025) is gebruikt om de aanlegkosten van het MT-net en het ZLT/ZLT-U-net te bepalen. De hybride warmtepomp is zijdelings meegenomen in deze vergelijking, maar staat niet in de grafieken, omdat we alleen aardgas-vrije technieken vergelijken.

Tekstkader 5 – Vergelijking met twee modellen

Appels met peren vergelijken met CEGOIA en nPro

We gebruiken twee verschillende modellen voor het berekenen van (nationale) investeringskosten en energiegebruik: [CEGOIA](#) en [nPro](#). De modellen verschillen op allerlei aspecten. Het grootste verschil zit in het berekenen van de leidinginfrastructuur, de vermogens en het energieverbruik. CEGOIA baseert het distributienetwerk op het huidige gasnetwerk, terwijl nPro naar individuele aansluitingen kijkt en zelf een distributienetwerk ontwerpt. Een studie van Siers is gebruikt om de kosten te bepalen van de leidinginfrastructuur per buurt en per type (MT-net en ZLT-net), waarbij zo goed mogelijk rekening is gehouden met goedkopere aanlegmethoden per techniek.

Verder rekent CEGOIA op jaarbasis en nPro met tijdreeksen. Door deze verschillen is op dit moment alleen een vergelijking van de technieken mogelijk op ordegrootte.

3.8.1 Investeringskosten

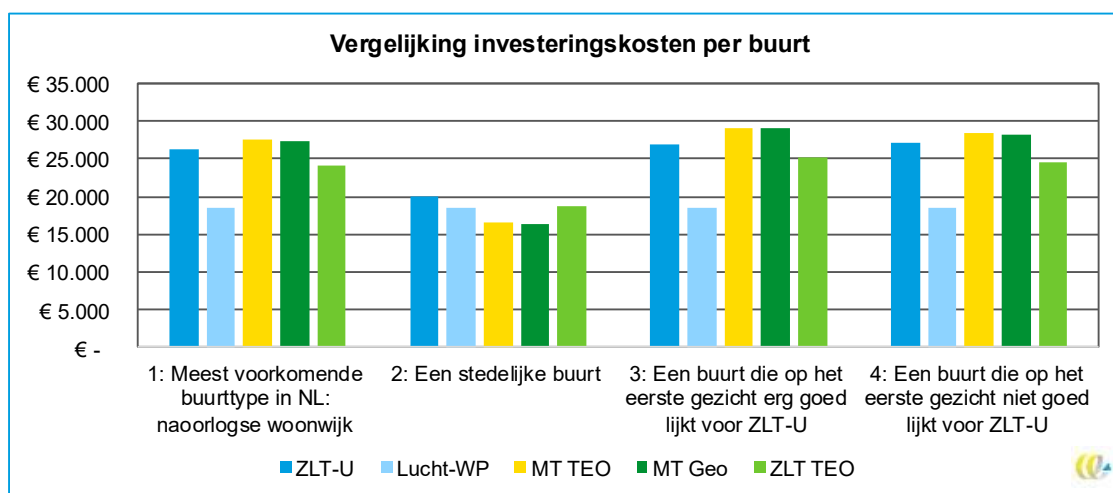
Voor elke warmtetechniek berekenen we de investeringskosten. Dit zijn alle kosten die gemaakt moeten worden om over te stappen naar een bepaalde duurzame warmtetechniek, onafhankelijk van wie ze betaalt. In deze investeringskosten worden bijvoorbeeld ook kosten voor het aanleggen van een warmtenet, de investeringskosten van een warmtebron en het isoleren van gebouwen meegenomen.

Om een vergelijking te maken op techniekniveau nemen we aan dat alle gebouwen moeten isoleren naar een lagetemperatuurniveau. De kosten voor isoleren zijn dus gemiddeld per buurt hetzelfde voor alle technieken.⁸

⁸ Voor casussen 1, 2 en 4 bedragen deze kosten tussen € 25 en 30k per woning. In casus 3 zijn de woningen al voldoende geïsoleerd.

De totale investeringskosten per buurt en per warmtetechniek staan in Figuur 7. De lucht-warmtepomp heeft in bijna alle gevallen de laagste investeringskosten, maar de verschillen zijn niet groot. De twee MT-warmtenetvarianten (MT-TEO en MT-Geo) hebben in drie van de vier casussen de hoogste investeringskosten. Per casus verschillen de kosten van de vijf warmtetechnieken gemiddeld 30%. In de stedelijke buurt verschillen de investeringskosten maximaal 18%.

Figuur 7 – Totale investeringskosten, exclusief isolatiekosten. De kosten zijn weergegeven als gewogen gemiddelde van utiliteitsgebouwen en woningen in €/weq per casus⁹



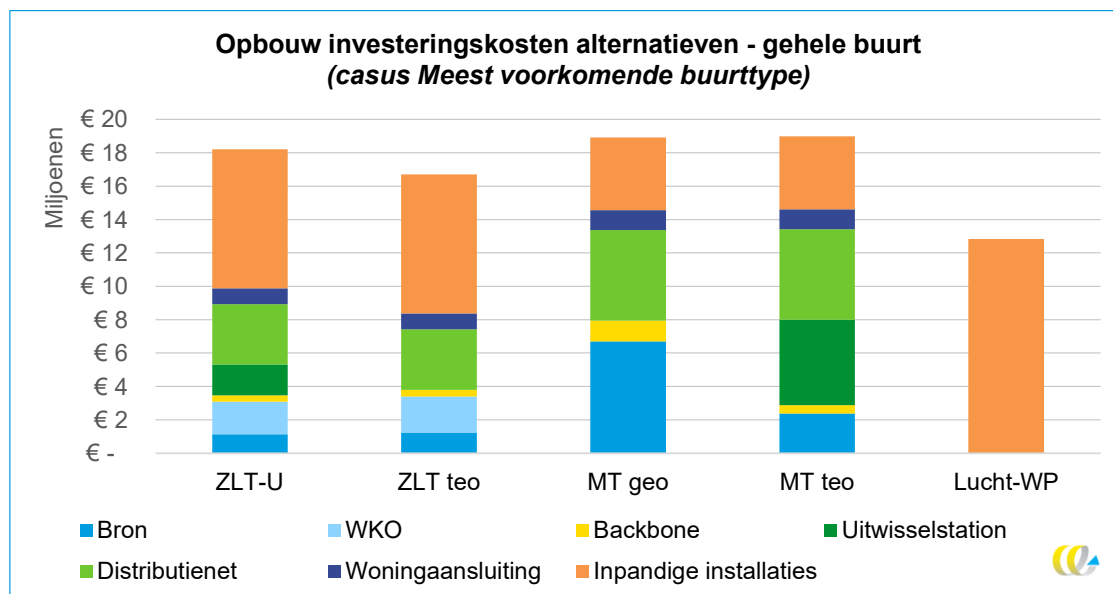
De opbouw van de investeringskosten verschilt sterk per warmte- en koudetechniek. In Figuur 8 wordt de opbouw van de totale kosten van de technieken weergegeven voor het type *Meest voorkomende buurttype*. In de opbouw is goed te zien dat iedere techniek een andere verdeling van kostenposten heeft¹⁰.

In Bijlage B.2 staat ook de opbouw van de investeringen bij de andere drie casussen.

⁹ De investeringskosten van een hybride warmtepomp zijn ongeveer € 13.500 voor alle casussen.

¹⁰ Voor de vergelijkbaarheid zijn veel details samengevoegd in de genoemde hoofdkostenposten.

Figuur 8 – Opbouw van de investeringskosten van de verschillende warmte- en koudetechnieken voor de gehele buurt van de casus Meest voorkomende buurttype



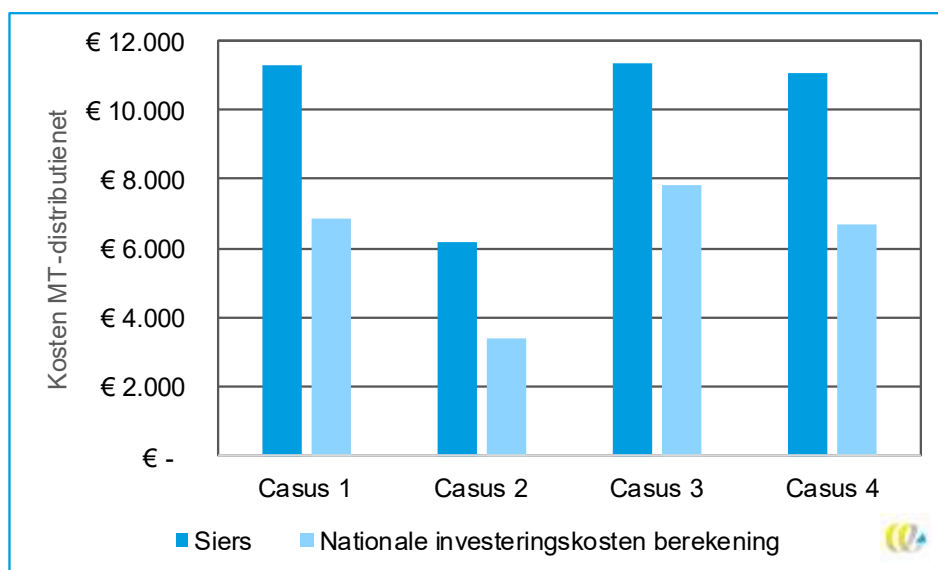
Vergelijking met kostenindicatie Siers

Het ingenieursbureau van aannemersbedrijf Siers heeft voor de vier archetypen buurten een berekening gemaakt van de kosten voor het aanleggen van een warmtenet. Zij hebben daadwerkelijke opnames uitgevoerd in deze buurten om onder andere naar het type bestrating te kijken en praktische hindernissen te observeren. Zij hebben voor iedere buurt een berekening gemaakt van zowel een MT- als ZLT-net voor de directe en indirecte kosten van materiaal, materieel en arbeid.

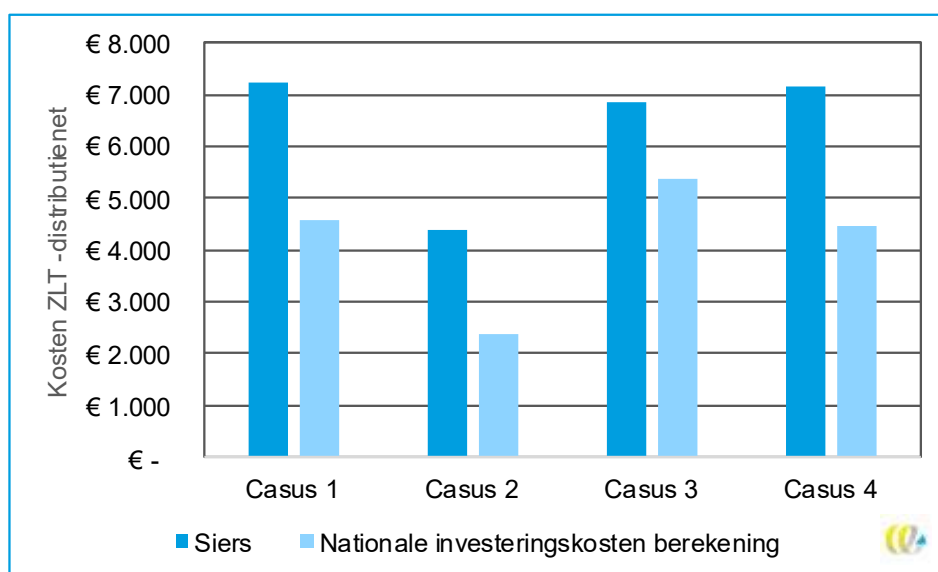
Als gevolg van verschillende aannames en verschil in demarcaties (welke onderdelen wel en niet in de berekening zitten) is een goede vergelijking (appels met appels) niet volledig mogelijk. Er zijn in Nederland echter niet eerder dergelijke vergelijkingen (modelberekening vs. aannemerscalculatie) openbaar beschikbaar gesteld. Het is daarom wel zinvol om hier een korte reflectie op te geven.

We hebben de begrotingen van Siers vergeleken met de berekende nationale investeringskosten voor de distributienetten van het MT- en ZLT-net, zie Figuur 9 en Figuur 10. Gemiddeld zijn de kosten berekend door Siers 65% hoger bij een MT-net en 60% bij een ZLT-net. Dit komt door veel verschillen in aannames en de manier van berekenen, waar we in deze studie niet verder op ingaan. De afwijking is redelijk consequent tussen de berekeningen, wat zou kunnen aangeven dat bepaalde componenten consequent wel of niet meegenomen zijn in de kostenberekening.

Figuur 9 – Kostenvergelijking MT-net Siers en nationale-investeringskostenberekening



Figuur 10 – Kostenvergelijking ZLT-net Siers en nationale-investeringskostenberekening



MT-infra versus (Z)LT-infra

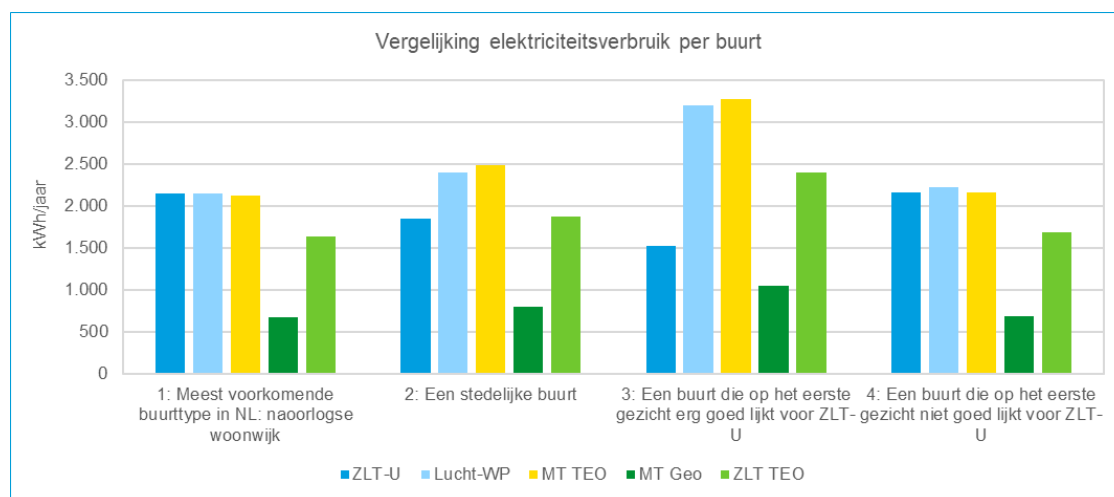
Op basis van de berekeningen van Siers is ook een eerste indicatie te geven wat het verschil in de investering is tussen het aanleggen van een MT-warmtenet en een warmtenet op basis van ZLT. De twee voorgaande figuren geven dit al aan: het aanleggen van het distributienet voor een ZLT-net is ongeveer een derde goedkoper dan het aanleggen van een distributienet voor een MT-net.

3.8.2 Energieverbruik

In alle casussen is de energievraag van de woningen voor het verwarmen en koelen voor alle technieken gelijk. Maar doordat ze allemaal een andere efficiëntie hebben en anders gebruikmaken van de energiebronnen, verschilt het energieverbruik per techniek wel. Hierbij kijken we alleen naar het gebruik van elektriciteit voor het verwarmen en koelen van de woning en verwarmen van tapwater. Het energieverbruik voor de vergeleken technieken staat in Figuur 11. Bij alle opties betreft het gebruik van elektriciteit. De overige energie om de energievraag in te vullen komt uit een grotere of kleinere bijdrage van de duurzame bronnen, zoals lucht, water of bodem.

Het elektriciteitsverbruik is berekend met CEGOIA voor alle technieken behalve ZLT-U. Voor ZLT-U is nPro als model gebruikt. Het energieverbruik verschilt per techniek en per buurt. Het is opvallend dat in de nieuwe buurt ('op het eerste gezicht goed voor ZLT-U') de verbruiken veelal hoger liggen. In deze casus zijn de woningen gemiddeld het grootst, waarmee ook de energievraag gemiddeld hoger ligt. De luchtwarmtepomp en het MT-warmtenet op basis van TEO verbruiken meer energie dan ZLT-uitwisselingsnetten. Het ZLT-warmtenet met individuele warmtepompen verbruikt ongeveer hetzelfde als de ZLT-uitwisselingsnetten, maar dit verschilt per casus. Het MT-warmtenet op basis van MT-geothermie heeft de laagste elektriciteitsvraag. In de buurt met veel naoorlogse tussenwoningen is de elektriciteitsvraag vaak het laagst. Echter zijn de verschillen klein. Tot slot zijn de uitkomsten van het energieverbruik van ZLT-U minder goed vergelijkbaar, omdat met twee verschillende modellen gewerkt is.

Figuur 11 – Gemiddeld energieverbruik van woningen en utiliteitsgebouwen¹¹

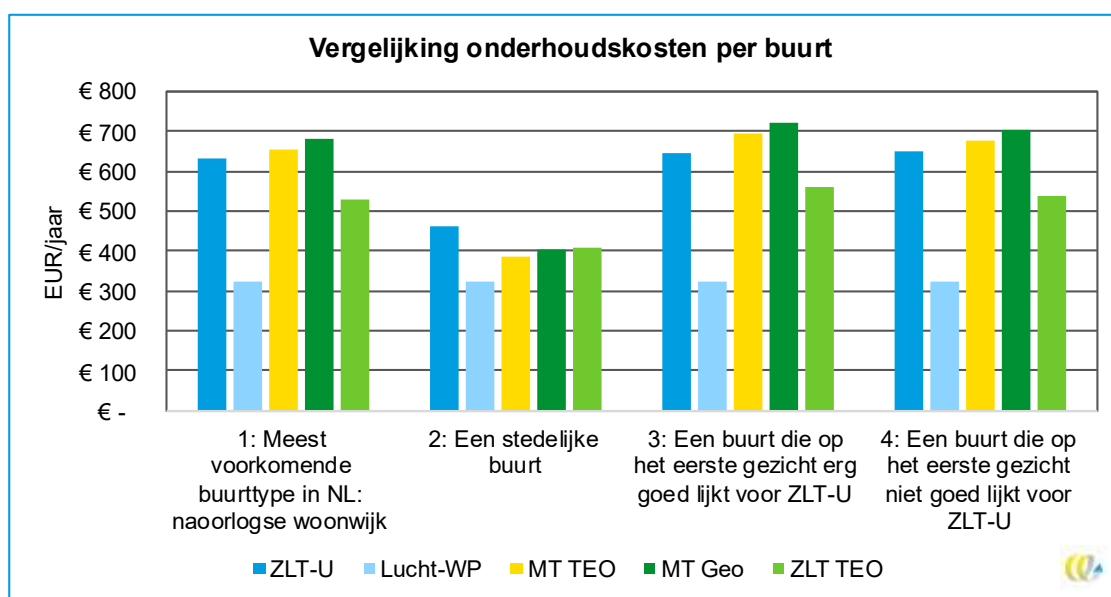


¹¹ De hybride warmtepomp verbruikt over alle casussen gemiddeld 1.300-3.200 kWh elektriciteit en 10-17 GJ (groen) gas.

3.8.3 Onderhoudskosten

Naast investeringen vooraf is er jaarlijks onderhoud nodig aan de warmtetechnieken. De jaarlijkse kosten hiervan staan in Figuur 12. Het verschil in onderhoudskosten van de technieken in een buurt is gemiddeld 50%. Over de jaren kunnen deze kosten dus uiteenlopen. In de stedelijke buurt is het verschil weer het kleinst. De MT-warmtenetvarianten hebben veelal de hoogste onderhoudskosten, de luchtwarmtepomp de laagste.

Figuur 12 – Onderhoudskosten (% van investeringskosten uit CEGOIA)¹²



¹² De onderhoudskosten van een hybride warmtepomp zijn ongeveer € 470 voor alle casussen. Deze liggen hoger dan de onderhoudskosten van de luchtwarmtepomp, omdat naast de hybride warmtepomp ook de cv-ketel onderhouden moet worden.

4 ZLT-U in de toekomst

4.1 Inleiding

In het voorgaande hoofdstuk zijn de maatschappelijke en directe effecten van de vijf warmte- en koudetechnieken beschreven en beoordeeld. In dit hoofdstuk kijken we naar de *robuustheid* van die beoordeling door een drietal toekomstscenario's kwalitatief toe te passen op deze beoordeling. Aan de hand van de methode van Theory of Change kijken we aanvullend wat we leren van de analyses en welke stappen mogelijk/nodig zijn om ZLT-U breder toepasbaar te maken in Nederland.

4.2 Scenarioanalyse

De toekomst laat zich niet (goed) voorspellen, maar we weten wel dat toekomstige veranderingen effect gaan hebben op de maatschappelijke effecten uit het vorige hoofdstuk. Deze veranderingen hebben we uitgewerkt in drie scenario's, die hieronder worden gepresenteerd. Gezamenlijk vormen deze scenario's een kader om te beoordelen welke warmtetechnieken onder uiteenlopende maatschappelijke en technologische omstandigheden het meest toekomstbestendig zijn.

1. **Vraagverandering:** een dalende warmtevraag door isoleren en klimaatverandering, en een stijgende koelvraag door klimaatverandering.
2. **Veranderende bronnen voor warmte en energiemix:** veranderingen door:
 - hergebruik van lokaal beschikbare (laagwaardige) restwarmte;
 - netcongestie;
 - beperkte stuurbaarheid van warmtetechnieken;
 - de benodigde uitbreiding van elektriciteitsinfrastructuur;
 - schommelingen en beperkte beschikbaarheid van duurzame energiebronnen.
3. **Markt en beleid:** veranderingen door beperkte beschikbaarheid en planbaarheid van bouw- en arbeidscapaciteit, door het onder- en bovengrondse ruimtebeslag van leidingen, pomphuizen en boorlocaties en de noodzaak tot ruimtelijke inpassing, en door de eigen keuzes van woningeigenaren als gevolg van een toenemende koelvraag. Ook zijn er veranderingen door volloop- en leegloopscenario's in combinatie met de inzet van de Wet gemeentelijke instrumenten warmtetransitie (Wgiw) en de vrijheid in het moment van aansluiten, door verschillen in participatieprocessen (individueel versus collectief aansluiten), door het tempo en de hinder van aanleg, met gevolgen voor arbeidsinzet en doorlooptijd, en door het effect van technologische innovaties.

Niet alle scenario's zijn relevant voor of hebben effect op de maatschappelijke effecten van de onderzochte verwarmingstechnieken. In Tabel 16 geven we aan welke scenario's relevant zijn voor welke maatschappelijke effecten.

In de volgende paragrafen geven we per criterium aan wat het verwachte effect is van de scenario's op de relevante criteria. We hanteren de scenario's als gedachtenexperiment en beoordelen deze kwalitatief en beschrijvend.

Tabel 16 – Relevantie van scenario's per maatschappelijk effect

	Scenario 1: Vraagverandering	Scenario 2: Veranderende bronnen voor warmte en energiemix	Scenario 3: Markt en beleid
Hitte-eiland			
Klimaatimpact			
Luchtkwaliteit			
Kwaliteit van de leefomgeving			
Externe veiligheid			
Netcongestie			
Volatiele (energie)prijzen en flexibiliteitsvergoedingen			
Concurrentiepositie Nederland			
Ruimtegebruik in woningen			
Ondergrondse ruimte			
Schaarste van duurzame energiebronnen			
Participatiespanning/ faseerbaarheid			
Inclusiviteit			

4.2.1 Scenario 1: Vraagverandering

In dit scenario verandert de warmtevraag als gevolg van betere isolatie en klimaatverandering. De totale warmtevraag daalt, terwijl de koelvraag stijgt. Dit heeft gevolgen voor de benutting en rendabiliteit van warmtesystemen. Warmtenetten krijgen te maken met lagere warmtevraag in de winter, waardoor de efficiëntie en financiële prestaties kunnen dalen. Individuele warmtepompen gebruiken door het warmere klimaat en goede isolatie minder elektriciteit in de winter. Daarnaast neemt de druk op de elektriciteitsvoorziening in de zomer toe door toenemend elektriciteitsverbruik voor koeling, maar dit kan (deels) gecompenseerd worden voor zon-pv.

De verandering in warmtevraag heeft een impact op de volgende maatschappelijke effecten:

- **Hitte-eiland:** de toegenomen koelvraag in de zomer in stedelijke gebieden draagt bij aan hittestress door de buitenunits van airco's en luchtwarmtepompen die warme lucht naar buiten blazen. Dit effect is groter naarmate het warmer wordt en kan zelfversterkend zijn.
- **Klimaatimpact:** de efficiëntie van warmtepompen neemt toe naarmate de winters warmer zijn. Hierdoor is er minder elektriciteitsverbruik, waardoor de klimaatimpact van warmtepompen tot aan 2050 daalt in de winters. In de zomer neemt het verbruik juist toe. Door het hogere aandeel zonnestroom in de zomer is de klimaatimpact van het elektriciteitsverbruik minder groot, alhoewel veel mensen ook in de nacht zullen koelen, waarbij thuisbatterijen en/of de accu van de elektrische auto worden ingezet.
- **Netcongestie:** de hogere koudevraag kan leiden tot pieken op het elektriciteitsnet, maar kan ook (deels) gecompenseerd worden door zon-pv. Alle vergeleken warmte- en koudetechnieken koelen door middel van elektriciteit, alhoewel de elektriciteitsvraag bij een ZLT-uitwisselnet lager is dan de airco en luchtwarmtepomp. In de warmere winters dragen de warmte- en koudetechnieken, vooral de technieken met een groot elektriciteitsverbruik (MT-warmtenet op basis van LT-TEO, all-electric warmtepomp en ZLT-uitwisselnet), minder bij aan netcongestie.
- **Volatiele (energie)prijzen en flexibiliteitsvergoedingen:** een lagere warmtevraag in de winter leidt tot een lagere elektriciteitsvraag op momenten met weinig wind en zon. Voor warmtetechnieken met een hoge elektriciteitsvraag leidt dit tot lagere energielasten, tenzij de volatiliteit sterk toeneemt door meer onbalans tussen vraag en aanbod. Ervan uitgaande dat het aandeel duurzaam opgewekte energie toeneemt in de energiemix, is dit een aannemelijk scenario. Warmtetechnieken die flexibiliteit kunnen creëren, kunnen daarmee hogere vergoedingen krijgen en inspelen op eventueel dynamische vastrechtstarieven.
- **Participatiespanning/faseerbaarheid:** woningeigenaren die investeren in eigen warmtepompen kunnen eerder profiteren van een lagere energierekening en het comfort van koeling, wat spanningen kan geven in collectieve trajecten.
- **Luchtkwaliteit:** vraagverandering heeft geen noemenswaardig effect op de luchtkwaliteit.

ZLT-netten en all-electric warmtepompen komen er beter uit bij vraagverandering

ZLT-uitwisselnetten, all-electric luchtwarmtepompen en ZLT-netten met individuele warmtepompen zijn systemen die redelijk goed kunnen reageren op de veranderingen in dit scenario, wat betreft bovenstaande maatschappelijke effecten. Voor MT-warmtenetten kan de daling van warmtevraag en stijging van koelvraag juist negatievere impact hebben op de maatschappelijke effecten.

4.2.2 Scenario 2: Meer inzet bronnen voor warmte en veranderende energiemix

In dit scenario staat de energietransitie centraal: het gebruik van restwarmte, geothermie, elektrische boilers en warmtepompen, pv-panelen en EV neemt toe (meer inzet), terwijl fossiele bronnen verdwijnen (veranderende energiemix). Dit zorgt voor een meer gedecentraliseerde en variabele energievoorziening. Netcongestie, beperkte stuurbaarheid en schaarste aan duurzame bronnen spelen een belangrijke rol. We zoeken in dit scenario naar de hoeken van het speelveld: wat als netverzwaring langer duurt dan verwacht? Wat als er alleen maar lokale warmte- en energiebronnen worden ontwikkeld in plaats van grootschalige warmte- en energiebronnen?

De verandering in veranderende bronnen voor warmte en energiemix heeft een impact op de volgende maatschappelijke effecten:

- **Externe veiligheid:** risico's kunnen verschuiven van opslag van aardgas naar bijvoorbeeld opslag van warmte of elektriciteit. Als netverzwaring langer duurt dan verwacht, zou er wellicht meer grote batterijopslag en grootschalige warmteopslag bij kunnen komen als oplossing voor opweknetcongestie (CE Delft, 2023a). Door de inzet van laagwaardigere warmte en meer lokale bronnen (minder transport) neemt de externe veiligheid toe.
- **Netcongestie:** veranderende bronnen voor warmte en een veranderende energiemix kunnen de netcongestie versterken of verminderen. Meer duurzame bronnen kunnen bij ZLT en ZLT-uitwisselnetten leiden tot een lagere stroomvraag, maar een veranderende energiemix kan netcongestie vergroten voor technieken waarin een warmtepomp onderdeel is van de techniek.
- **Volatiele (energie)prijzen en flexibiliteitsvergoedingen:** prijsschommelingen door variabele beschikbaarheid van duurzame energie, zoals zon- en windenergie. Warmtetarieven kunnen ook verhoogd worden, door redenen vastgelegd in de algemene voorwaarden in de warmteovereenkomst (ACM & Consuwijzer, 2025). Er ontstaat een spanningsveld als de ingekochte energie sterk in prijs stijgt, terwijl de verkoop van warmte niet kan meebewegen met deze prijsschommelingen, vanwege kostprijsgebaseerde tarieven, maar ook leveringscontracten met eindgebruikers.
- **Ruimtegebruik in woningen:** extra ruimtebehoefte binnenshuis door meer gedecentraliseerde energievoorziening, onder andere ook voor lokale opslag (buffervaten en accu's). Door meer gebruik te maken van restwarmte en water in plaats van lucht als bron, kunnen de individuele warmtepompen kleiner worden. Door verlaging van netwerktemperaturen neemt het ruimtebeslag toe ten opzichte van MT-netwerken. Een ZLT-U-netwerk zit tussen het MT- en ZLT-bronnet in. Door vrije koeling uit ZLT-netten wordt het ruimtebeslag in de woning kleiner voor ZLT en ZLT-U.
- **Ondergrondse ruimte:** er is extra ruimte nodig voor warmtenetten ondergronds en in mindere mate voor de verzwaring van elektriciteitskabels. Dit hangt af van de

techniek. Met name om grote centrale bronnen te ontsluiten, zoals restwarmte en geothermie en de inzet van TEA, TEO, TED en wko's.

- **Schaarste van duurzame energiebronnen:** geothermie, aquathermie en duurzame restwarmte vormen kansrijke, duurzame bronnen, maar zijn afhankelijk van lokale beschikbaarheid en ruimtelijke inpassing. Hierdoor komt een hogere druk op deze lokale bronnen voor warmtenetten, met een noodzaak tot afstemming tussen gemeentes en deze zo efficiënt mogelijk te benutten. Dit speelt vooral bij regionale energiebronnen en afspraken daarover worden vastgelegd in de Regionale Structuur Warmte. Met name zeerlagetemperatuurbronnen en lage-temperatuurbronnen zijn lokaal veel aanwezig. Een ZLT-uitwisselnet kan gebruikmaken van meerdere bronnen, afhankelijk van het aanbod van de duurzame bronnen en de (toekomstige) warmte- en koudevraag. Aanspraak op meerdere bronnen kan leiden tot complexere regie.
- **Participatiespanning/faseerbaarheid:** collectieve infrastructuur vraagt om samenwerking en fasering. Goede participatietrajecten zijn essentieel voor het succesvol realiseren van collectieve warmtetechnieken. Afhankelijk van het type bron/bronnen spelen participatiespanning en faseerbaarheid een kleinere of grotere rol bij de bijbehorende warmtetechniek.
- Voor geothermie zijn veel afnemers nodig, wat direct druk zet op de participatiespanning, en daarmee nauwelijks faseerbaar is in de tijd. Aquathermie als bron voor een MT-warmtenet vraagt ook om een groot aantal afnemers, wat – weliswaar in mindere mate ten opzichte van geothermie – druk zet op de participatiespanning en slechts beperkt faseerbaar is in de tijd. ZLT-U en een ZLT-warmtenet, uitgaande van individuele warmtepompen, is beter te faseren. Indien het ZLT-net met de duurzame bron(nen) wordt aangelegd als basisinfrastructuur, neemt dat de druk op participatiespanning weg en is daarmee sterk faseerbaar. Wanneer in het geval van ZLT-U meerdere bronnen gebruikt worden, kunnen ook de verschillende bronnen in tijd gerealiseerd worden.
- **Luchtkwaliteit:** een veranderende bronnenmix heeft geen noemenswaardig effect op de luchtkwaliteit, zolang er geen biomassaverbranding bij komt.

Alle vergeleken warmtetechnieken hebben veel nodig in een transitie naar een andere bronnen- en energiemix

ZLT-uitwisselnetten, ZLT-netten met individuele warmtepompen en MT-warmtenetten gebruiken bronnen. Bij meer gebruik van lokale warmte- en energiebronnen is er over het algemeen meer infrastructuur en wellicht (warmte-) opwaardering nodig in het systeem. Een veranderende energiemix vraagt om meer opslag en meer flexibiliteit. ZLT-uitwisselnetten en ZLT-netten met individuele warmtepompen kunnen daar goed op inspelen, bij MT-netten kan er ook meer ingezet worden op opslag. Samenwerken is ook nodig voor de individuele technieken, namelijk door de nodige netverzwaring en opslag. Dus alle technieken hebben in meer of mindere mate hiermee te maken. Collectieve warmtetechnieken vereisen wel meer samenwerking tussen meer verschillende partijen.

4.2.3 Scenario 3: Markt en beleid

In dit scenario spelen ruimtelijke inpassing, marktwerking, beleid en planmatige uitvoering een hoofdrol. Beschikbaarheid van arbeidskrachten, ruimtelijke beperkingen en beleidskeuzes bepalen het tempo en de kosten van de warmtetransitie. De mate van overheidssturing via de Wet gemeentelijke instrumenten warmtetransitie (Wgiw) en de keuzevrijheid van bewoners bij het aansluiten op collectieve systemen beïnvloeden de uitvoering.

De verandering in markt en beleid heeft een impact op de volgende maatschappelijke effecten:

- **Kwaliteit van de leefomgeving:** het aantal transformatorhuisjes en warmteoverdrachtstations zal toenemen in de leefomgeving. Dit is van toepassing bij alle vergeleken technieken. Daarnaast hebben de opties verschillende effecten op de kwaliteit van de leefomgeving. Het is de vraag of er veranderend beleid komt of marktwerking ten aanzien van de leefomgeving, die ten gunste of nadelig is van een van de beschouwde technieken. Bijvoorbeeld: de luchtwarmtepomp zal stiller worden, maar er zullen wel eisen aan geluid gesteld worden, mogelijk ook welstand ten aanzien van gevelvervuiling. Opwarming van bodem en de lucht wordt een steeds groter probleem, waar aanvullend beleid is te verwachten in verband met onder andere drinkwaterveiligheid.
- **Externe veiligheid:** kan verbeteren bij zorgvuldige ruimtelijke inpassing. Regelgeving en beleid ten aanzien van veiligheid hangen vaak samen met calamiteiten. Dat betekent dat een explosie, brand/verbranding of vergiftiging kan leiden tot drastische maatregelen. De technieken met minder risico's zijn daardoor toekomstbestendiger. Hoge veiligheidsrisico's vergen ook extra inzet van (hoogwaardige) arbeid, dat in de toekomst waarschijnlijk minder beschikbaar is. Het vermijden van hoge temperaturen en hoge voltages/vermogens vermindert deze veiligheidsrisico's.
- **Netcongestie:** beleidskeuzes en marktwerking bepalen in hoeverre deze problemen worden verminderd of versterkt. Netcongestie beïnvloedt alle vergeleken warmtetechnieken. Samenwerking tussen gemeentes en regionale netbeheerders is essentieel voor het aanpassen van het elektriciteitssysteem om warmtetechnieken te realiseren. De verwachting is dat het probleem van netcongestie vermindert door innovatieve producten. De technieken die hier beter op in kunnen spelen (door slimme sturing, buffering en uitwisseling) zullen daardoor in de toekomst aantrekkelijker worden. De investeringen voor netcongestie zullen wellicht (politieke) weerstand oproepen, omdat deze via het vastrecht over alle eindgebruikers worden verrekend. Bedrijven zullen eerder gebruik willen maken van restwarmte (van andere bedrijven) via warmtenetten, als dit een elektriciteitsaansluiting mogelijk maakt, en kunnen als *launching customers* voor warmtenetten gaan fungeren.

- **Volatiele (energie)prijzen en flexibiliteitsvergoedingen:** beleidskeuzes en marktwerking bepalen in hoeverre de prijzen schommelen. Een beleidskeuze voor bijvoorbeeld het invoeren van dynamische vastrechtstarieven kan bepalend zijn op energiekosten. Subsidie-instrumenten voor bijvoorbeeld opslag kunnen leiden tot een beter gebruik van het aanbod van duurzame energie. De marktwerking met meer aanbod van duurzame energie-opwek (zon-pv en wind) zorgt voor volatiele energieprijzen. Warmtetechnieken, zoals individuele warmtepompen en ZLT-netten, die meer afhankelijk zijn van de elektriciteitsmarkt, zijn gevoeliger voor beleidskeuzes en marktwerking. Mitigatie met het inpassen van opslagstechnieken en slimme sturingen met Energie Management Systemen zijn daarvoor belangrijk.
- **Concurrentiepositie Nederland:** wordt beïnvloed door energieprijzen, innovaties en beleidsondersteuning. Er is een toenemende behoefte aan verminderde internationale afhankelijkheid. De verwachting is daardoor dat technieken met een hogere lokale productiefactor in de toekomst een betere marktpositie krijgen. Veel van de genoemde maatschappelijke effecten treden ook buiten Nederland/Europa op. Daardoor bestaat er een grote kans voor innovatieve producten. Dit is positief voor de technieken die daar meer gebruik van maken.
- **Inclusiviteit:** beleidskeuzes rond subsidies en verplichtingen bepalen de verdeling van kosten en baten. Bij warmtenetten speelt ook de participatiegraad een grote rol in de verdeling van kosten en baten. Hoe meer mensen meedoen, hoe meer de kosten van de infrastructuur verdeeld kunnen worden. Individuele technieken zoals de luchtwarmtepomp zijn aantrekkelijk bij hoge beleidsvrijheid; met het risico dat ongelijkheid wordt vergroot door de hoge investeringsdrempel en fluctuerende energieprijzen. De overheid wil garanties bieden om energiearmoede te voorkomen en de lasten voor de burger laag te houden. De technieken die stabiele kosten en een laag energiegebruik kennen, zijn hierbij in het voordeel.

Naast de effecten op bovenstaande maatschappelijke effecten is het verschil tussen beleidsondersteuning van de verschillende warmtetechnieken in dit scenario relevant om een veranderende markt antwoord te bieden. Warmtenetten worden op strategisch niveau ondersteund door onder andere de aanvankelijke doelstelling van 500.000 nieuwe aansluitingen op warmtenetten in bestaande huizen/gebouwen in 2030 (inmiddels bijgesteld naar 200.000 aansluitingen), de Wet collectieve warmte en subsidies. Daartegenover staat dat warmtenetten in de praktijk tegen uitvoerings-, kosten- en marktknelpunten aanlopen. Met behulp van subsidie steeg het aantal warmtepompen de afgelopen jaren sneller dan het aantal warmtenetaansluitingen, ondanks dat er ook subsidie was voor aansluitingen op een warmtenet. Het aandeel van individuele warmtepompen in een buurt waar een collectieve warmtetechniek gepland is, resulteert in minder afnemers die zullen aansluiten.

Meer knelpunten voor warmtenetten in markt en beleid

Marktwerking en beleidskeuzes bepalen het tempo en de richting van de warmtetransitie, en daarmee ook de impact op maatschappelijke effecten. Warmtenetten krijgen strategische steun, maar groeien traag door verschillende knelpunten in de uitvoering, kosten en markt. Warmtepompen profiteren van directe subsidies en groeien sneller, met risico op grotere ongelijkheid. Beleidskeuzes moeten gericht zijn op de verschillende warmtetechnieken die nodig zijn in de warmtetransitie en mitigerend zijn voor een veranderende markt.

4.2.4 Conclusie

De drie scenario's laten zien dat geen enkele warmte- en koudetechniek onder alle omstandigheden positieve maatschappelijke effecten heeft.

- Warmtevraagverandering (Scenario 1) benadrukt de noodzaak van **flexibele en adaptieve systemen** die kunnen omgaan met veranderende vraag en kunnen koelen. De ZLT-uitwisselingsnetten, ZLT-netten met individuele warmtepomp en de individuele luchtwarmtepomp kunnen hier beter mee omgaan.
- Meer inzet van bronnen voor warmte en veranderende energiemix (Scenario 2) laat de afhankelijkheid van **duurzame energie en infrastructuur** zien en hoe dit verandert in een decentraal systeem (decentrale warmtebronnen en decentrale elektriciteitsopwekking, zoals windturbines en zonneparken). De infrastructuur en energie- en warmtevraag van alle warmtetechnieken verandert daardoor, en heeft vooral meer ruimte in het publieke domein nodig (zoals infrastructuur van warmte- en koudetransport en distributie en trafo's). Er is hier geen duidelijk onderscheid te maken tussen de effecten van de verschillende warmtetechnieken op de maatschappij.
- Verandering in markt en beleid (Scenario 3) toont dat **knelpunten in de markt en beleid de verdere uitrol van warmtenetten in de weg kunnen staan, meer dan voor luchtwarmtepompen. Maar nieuwe knelpunten met betrekking tot netcongestie hebben weer invloed op warmte- en koudetechnieken die gebruikmaken van warmtepompen.** Beleidskeuzes beïnvloeden maatschappelijke effecten als netcongestie, energieprijzen en gelijkheid. Om de innovatiekracht van fabrikanten te benutten, is stabiel beleid voorwaardelijk, waardoor de afzet van deze nieuwe producten de productontwikkelkosten kan dekken.

Samen vormen deze scenario's een kader om te beoordelen welke warmtetechnieken het meest toekomstbestendig zijn onder verschillende maatschappelijke en technologische omstandigheden. Wij concluderen dat ZLT- en ZLT-U-netten en individuele luchtwater-warmtepompen hierbij het meest toekomstbestendig zijn, omdat deze het beste inspelen op individuele vraagveranderingen door vanuit één systeem zowel warmte als koude te leveren. Ook zien we dat specifiek bij ZLT en ZLT-U veel mogelijkheden geboden worden voor de inzet van een veelvoud aan duurzame bronnen, zoals ook laagwaardige rest-

warmte, en dat deze door marktontwikkelingen en beleidsmaatregelen in de toekomst verder gestimuleerd worden.

4.3 Theory of Change

Theory of Change (ToC) is een methode om gestructureerd na te denken over hoe je van een ambitie naar impact komt. Het beschrijft de verandering die je wilt bereiken en laat zien hoe jouw activiteiten tot die verandering leiden. Kortom, het is een veranderpad van oorzaak en gevolg: *als we X doen, en aan voorwaarden Y is voldaan, dan bereiken we Z*. In het geval van ZLT-uitwisselnetten betekent dit dat we aangeven welke beleidsmatige, financiële en technische wijzigingen nodig zijn om deze netten een volwaardige plek te geven in de warmtetransitie. De volgende stappen vormen samen een stappenplan voor beleidsmakers, gebaseerd op de analyses van de maatschappelijke en directe effecten en de voorgenoemde scenario's, om deze Theory of Change te realiseren.

In Bijlage C staat een uitgebreide uitwerking van Theory of Change. Hierna worden de belangrijkste elementen van de analyse genoemd.

In de ToC beschrijven we veranderingen die op drie niveaus nodig zijn om het doel van een bredere inbedding van ZLT-U te bereiken: beleidsmatig, financieel en technisch.

4.3.1 Beleidsmatige veranderingen

Het **doel** van de beleidsmatige veranderingen is het structureel erkennen van ZLT-uitwisselnetten als volwaardige warmte- en koudeoptie.

De voorgestelde **stappen** hiervoor zijn:

- **Opnemen in beleid en rekenmodellen**
Gemeenten en het Rijk moeten ZLT-uitwisselnetten expliciet meenemen in warmteprogramma's, wijkuitvoeringsplannen, Vesta-MAIS, Startanalyse, PBL-scenario's en andere modellen die nu de koudevraag niet meenemen.
- **Ontwikkelen van een uniform beoordelingskader (MKBA+)**
Een brede evaluatiemethode waarin ook maatschappelijke effecten worden meegenomen (geluid, netcongestie, hittestress, luchtkwaliteit), zodat ZLT-U eerlijk kan worden vergeleken met warmtepompen, hybride systemen en conventionele warmtenetten.
- **Vergroten van kennis en bewustwording**
Actieve communicatie, pilots en 'living labs' zijn nodig om beleidsmakers en bewoners vertrouwd te maken met de techniek en de voordelen.
- **Aanpassen van regelgeving en tariefstructuren**
Wet- en regelgeving moet ruimte bieden voor warmte- én koudetariefstructuren, flexibele exploitatiestructuren en gemeentelijke sturingsmogelijkheden binnen Wgiw en Warmtewet.

Het beoogde **effect** van deze verandering is: ZLT-uitwisselnetten krijgen een vaste positie in de beleidskaders, waardoor gemeenten en marktpartijen duidelijkheid en vertrouwen hebben om projecten te starten.

4.3.2 Financiële veranderingen

Het **doel** van de financiële veranderingen is de businesscases van ZLT-uitwisselnetten rendabel en aantrekkelijk maken.

De voorgestelde **stappen** hiervoor zijn:

- **Vergoeden van maatschappelijke baten**
ZLT-U levert voordelen (minder netverzwaring, koeling, milieuwinst), maar krijgt daar nu geen financiële vergoeding voor. Hiervoor is het nodig dat subsidies, bijdragen van netbeheerders of impact-financiering beschikbaar komen om deze baten te verzilveren.
- **Risicoreductie en ondersteuning van ‘volloop’-fase**
De eerste jaren zijn financieel risicovol door beperkte aansluiting. Mogelijke oplossingen die hier voor beschikbaar zijn:
 - investerings- of exploitatiesubsidies;
 - garantieregelingen;
 - aansluitplicht of afnamegarantie na bepaald dekkingspercentage;
 - slimme verdeling van kosten tussen exploitant en gebruiker (split-incentive oplossen).
- **Nieuwe inkomstenbronnen**
Zoals flexibiliteit in energiemarkten (balancering, congestiemanagement) of het dynamisch gebruik van goedkope stroom via slimme aansturing. Maar bijvoorbeeld ook betalen voor actieve koeling. Potentieel: premiumtarief vanwege comfort en duurzaamheid.
- **Nieuwe samenwerkingsmodellen**
Coöperatieve warmtegemeenschappen, ESCO-constructies, concessiemodellen.

Het beoogde **effect** van deze verandering is: (pilot)projecten komen van de grond, risico's dalen en ZLT-uitwisselnetten worden op termijn economisch concurrerend met andere warmteopties.

4.3.3 Technische veranderingen en innovatie

Het **doel** van deze veranderingen is ZLT-uitwisselnetten technisch robuust, betaalbaar en breed toepasbaar maken.

De voorgestelde **stappen** hiervoor zijn:

- **Warmtepompen en componenten verbeteren**
Compacte, betaalbare water-water-warmtepompen met hoge COP bij 15–25°C bronnen. Geïntegreerde verwarmings- en koeloplossingen, standaardisatie en modulariteit.
- **Opslag en uitwisselingsmechanismen optimaliseren**
 - efficiëntere wijkbuffers en verbeterde WKO-technologie;
 - betere koppelingen tussen wijken (LT-backbones);
 - slimme meet- en regeltechniek voor realtime balans tussen warmtevraag en koude-aanbod.
- **Gebouwkant verbeteren**
Renovatie en isolatie moeten hand in hand gaan met ZLT-netten. Hiervoor is het nodig dat er lage-temperatuurafgifte (vloerverwarming, LT-radiatoren) en modulaire renovatiepakketten komen.
- **Digitalisering en smart control**
Zelflerende energiebeheersystemen, vraagrespons, forecasting, bidirectionele warmtemeters, data-platforms, cybersecurity.
- **Pilots en leercurve**
Living Labs en demonstratieprojecten voor verschillende gebouwtypen en wijken, met als doel toe te werken naar standaardoplossingen die schaalbaar zijn en kosten laten dalen.

Het beoogde **effect** van deze verandering is: systemen worden betrouwbaarder, goedkoper, efficiënter en toepasbaar in uiteenlopende situaties, waardoor ze richting 2030 mainstream kunnen worden.

5 Conclusies en aanbevelingen

5.1 Inleiding

In dit hoofdstuk bespreken we de conclusies op verschillende niveaus. Ten eerste beantwoorden we de hoofdvraag: *Hoe vergelijken ZLT-uitwisselnetten met alternatieve, gasloze warmte- en koudetechnieken op basis van economische én maatschappelijke effecten?* We kijken hierbij ook naar hoe deze vergelijking kan veranderen in verschillende toekomstscenario's. Hierna beantwoorden we de subvraag: *Wat kan het meenemen van maatschappelijke effecten van warmte- en koudetechnieken, naast de nationale kosten, opleveren?*

Naar aanleiding van het onderzoek en de conclusies zijn er aanbevelingen opgesteld. Hierbij is ook een losse analyse gemaakt op basis van het onderzoek en de Theory of Change. Een verdere uitwerking van dit laatste is opgenomen in de bijlagen.

5.2 Hoe vergelijken ZLT-uitwisselnetten met de onderzochte alternatieven?

De voorgaande hoofdstukken laten een analyse zien van vijf verschillende warmte- en koudetechnieken voor de gebouwde omgeving. Deze zijn beschouwd in vier cases voor karakteristieke buurten in Nederland. Aanvullend worden toekomstige ontwikkelingen verkend in drie scenario's. In al deze situaties is gekeken wat de verschillende maatschappelijke effecten zijn van de technieken. Het doel hiervan is om een vergelijking van technieken te maken op basis van economische aspecten én een breder maatschappelijk perspectief. Dit bredere perspectief is noodzakelijk om ervoor te zorgen dat er niet alleen naar de nationale en/of eindgebruikerskosten wordt gekeken, maar dat er een brede afweging is, die rekening houdt met relevante maatschappelijke effecten.

Vanuit de vergelijking van ZLT-uitwisselnetten met de verschillende andere technieken op basis van economische en maatschappelijke effecten komt een vraag naar voren: moeten technieken die weliswaar hogere directe en indirecte kosten hebben, alsnog de voorkeur krijgen omdat deze grote maatschappelijke voordelen hebben? Voordelen die nu nog niet goed te kwantificeren of valoriseren zijn, maar die in de komende decennia wel belang-

rijk(er) worden? Hierbij is specifiek gekeken of de ZLT-U-netten deze maatschappelijke meerwaarde hebben en of zij in de komende periode als aanvullende optie in de warmte-transitie meegenomen moeten worden.

Hierna volgen de conclusies die wij naar aanleiding van dit onderzoek hebben getrokken.

1. Directe kosten verschillen minder dan vaak wordt aangenomen

Hoewel de technische configuraties van de systemen sterk uiteenlopen, blijken de totale investeringskosten tussen de onderzochte opties in de meeste buurten relatief beperkt van elkaar te verschillen (vaak binnen ca. 30%). Individuele lucht-waterwarmtepompen zijn vaak iets goedkoper, terwijl MT-warmtenetten doorgaans het duurst zijn. De variatie tussen buurttypen blijkt groot, wat bevestigt dat lokale omstandigheden zwaar wegen.

2. ZLT-uitwisselnetten bieden een kansrijke vierde route voor de warmte-transitie

Naast de bestaande routes (hybride, individuele water-luchtwarmtepomp (of bodemwarmtepomp), MT-/HT-warmtenetten) vormen ZLT-uitwisselnetten een kansrijke, vaak onderbelichte optie voor de verduurzaming van de gebouwde omgeving. Ze combineren collectieve infrastructuur met individuele installaties en bieden unieke voordelen, zoals gelijktijdige levering van warmte en koude, vermindering van netcongestie en verbetering van de leefbaarheid. ZLT-U komt in de brede maatschappelijke vergelijking als beste optie naar voren, mits aan de ontwerpvoorwaarden wordt voldaan (voldoende mix in warmte/koelvraag, buffercapaciteit, slimme sturing en zorgvuldige inpassing).

3. ZLT-U scoort gunstig op veel maatschappelijke thema's

ZLT-uitwisselnetten scoren positief op thema's als hitte-eilandreductie, luchtkwaliteit, netcongestie, flexibiliteit bij volatiele energieprijzen en concurrentiepositie van Nederland. Ze bieden bovendien mogelijkheden voor buffering en load shifting, wat de energiekosten en netbelasting verlaagt.

4. ZLT-U is toekomstbestendig bij veranderende vraag en klimaat

ZLT-U-systemen zijn flexibel en kunnen goed omgaan met veranderende warmtevraag (door isolatie en klimaatverandering) en een toenemende koelvraag. Dit maakt ze robuust voor toekomstige scenario's. Hierbij moet wel aan een aantal voorwaarden worden voldaan. Belangrijk is een verdere marktintroductie, zodat geschikte producten worden ontwikkeld en prijsdalingen optreden. Ook is er een grote behoefte aan voorbeeldprojecten, om de juiste werking op grote schaal te testen en barrières te slechten (zoals toepassing van goedkopere materialen en aanlegmethoden). Ten slotte is het van belang dat de infrastructuur (netwerkleidingen en bronnen) vanwege hun lange levensduur voldoende redundantie krijgen voor toekomstige ontwikkelingen. Hierbij dient meer gekozen te worden naar 'one size fits all'-oplossingen, dan naar maatwerk voor de situatie anno 2025.

Door de mogelijkheden om lokale bronnen en buffering te integreren, bieden ZLT-U-netwerken hier meer zekerheid. In de vergelijking kan een individuele lucht-warmtepomp ook goed inspelen op veranderende vraag en klimaat, zolang de verdere uitrol niet wordt gehinderd door netcongestie of eisen aan geluid en esthetiek.

5. **ZLT-U vermindert netcongestie en benut duurzame bronnen efficiënt**

Door uitwisseling van warmte, koude en buffering wordt de piekbelasting op het elektriciteitsnet verlaagd. ZLT-U maakt optimaal gebruik van lokaal beschikbare (duurzame) bronnen en draagt zo bij aan een robuust en toekomstbestendig energiesysteem. Bijvoorbeeld als de capaciteit van het netwerk (de afmeting van de leidingen) in de toekomst tekortschiet, kan dit worden opgevangen door lokaal bronnen en buffers toe te voegen.

6. **Ruimtelijke en esthetische impact is beperkt bij ZLT-U**

ZLT-U-systemen hebben geen buitenunits en veroorzaken weinig geluidsoverlast in vergelijking met individuele luchtwarmtepompen. Ze zijn beter inpasbaar in de ondergrond vergeleken met MT-warmtenetten.

7. **Collectieve systemen, inclusief ZLT-U, bieden meer inclusiviteit dan individuele oplossingen**

MT-warmtenetten, ZLT- en ZLT-U-systemen bieden meer ontzorging en toegankelijkheid voor verschillende groepen bewoners dan individuele lucht-waterwarmtepompen, die juist ongelijkheid kunnen vergroten door hoge investeringsdrempels. Een soortgelijk fenomeen is zichtbaar bij elektrische auto's. Weliswaar kunnen ook individuele lucht-waterwarmtepompen vanuit een collectiviteit aangeboden worden met ontzorgingsdiensten door een aanbieder, waardoor deze beter toegankelijk worden. In de praktijk gebeurt dit echter maar beperkt. Er is wel minder keuzevrijheid met betrekking tot MT-warmtenetten door de monopolypositie van de warmteleverancier, tenzij het eigendom of de zeggenschap deels bij een energie-gemeenschap ligt.

5.2.1 De lokale context speelt een belangrijke rol in de afweging tussen technieken

Bij deze vergelijking horen meerdere nuanceringen. De verschillende warmtetechnieken hebben allemaal plus- en minpunten op de verschillende effecten. Hoe zwaar deze wegen is vaak situatie- en locatieafhankelijk. Dat betekent dat uiteindelijk niet de 'totaalscore' maar de context een belangrijke rol speelt in de uiteindelijke keuze voor een optie. Zo kan de lokale context ertoe leiden dat een individuele aanpak wenselijker is dan een collectieve, bijvoorbeeld omdat het aanleggen van leidingen in de bodem moeilijk of heel kostbaar is. Of dat een MT-net op geothermie de voorkeur heeft, boven een ZLT-U, omdat er bijvoorbeeld onvoldoende uitwisseling mogelijk is. Daarnaast laten ook de grote verschillen

in de uitkomsten van de directe effecten over de casussen (zie Paragraaf 3.7) zien dat de lokale eigenschappen een belangrijke rol spelen.

Aan de hand van de toegepaste methodiek wordt het mogelijk om deze context volwaardig mee te wegen, naast de directe effecten. Dit zal ertoe leiden dat de keuzes die gemaakt worden beter toekomstbestendig zijn.

De maatschappelijke effecten van de vergeleken technieken kunnen veranderen in de toekomst

In het onderzoek is er aan de hand van een drietal scenario's gekeken naar de robuustheid van de beoordeling van de warmte- en koudetechnieken op maatschappelijke effecten. Hieruit komen de volgende conclusies naar voren:

- **ZLT-netten en all-electric warmtepompen komen er beter uit bij vraagverandering**
ZLT-uitwisselnetten, all-electric luchtwarmtepompen en ZLT-netten met individuele warmtepompen zijn systemen die redelijk goed kunnen reageren op de veranderingen in dit scenario, wat betreft bovenstaande maatschappelijke effecten. Voor MT-warmtenetten kan de daling van warmtevraag en stijging van koelvraag juist negatievere impact hebben op de maatschappelijke effecten.
- **Alle vergeleken warmtetechnieken kunnen met behulp van technische aanpassingen een transitie maken naar een andere bronnen- en energiemix**
ZLT-uitwisselnetten, ZLT-netten met individuele warmtepompen en MT-warmtenetten gebruiken allemaal warmtebronnen. Bij meer gebruik van lokale warmte- en energiebronnen is er over het algemeen meer infrastructuur en wellicht (warmte-) opwaardering nodig in het systeem. Een veranderende energiemix vraagt om meer opslag en meer flexibiliteit. ZLT-uitwisselnetten, ZLT-netten met individuele warmtepompen kunnen daar goed op inspelen, bij MT-netten kan er ook meer ingezet worden op opslag. Samenwerken is ook nodig voor de individuele technieken, namelijk door de nodige netverzwaring en opslag. Dus alle technieken hebben hier in meer of mindere mate mee te maken, en het is afhankelijk van de precieze configuratie van de warmtetechniek en gebruikte bronnen- en energiemix of dit positieve of negatieve maatschappelijke effecten heeft. Collectieve warmtetechnieken vereisen wel meer samenwerking tussen meer verschillende partijen.
- **Meer knelpunten voor warmtenetten in markt en beleid**
Marktwerving en beleidskeuzes bepalen het tempo en de richting van de warmtetransitie, en daarmee ook de impact op maatschappelijke effecten. Warmtenetten krijgen strategische steun, maar groeien traag door verschillende knelpunten in de uitvoering, kosten en markt. Warmtepompen profiteren van directe subsidies en groeien sneller, met risico op grotere ongelijkheid. Beleidskeuzes moeten gericht zijn op de verschillende warmtetechnieken die nodig zijn in de warmtetransitie en

mitigerend zijn voor een veranderende markt.

Samen vormen de scenario's een kader om te beoordelen welke warmtetechnieken het meest toekomstbestendig zijn onder verschillende maatschappelijke en technologische omstandigheden. Wij concluderen dat ZLT- en ZLT-U-netten en individuele lucht-water-warmtepompen hierbij het meest toekomstbestendig zijn, omdat deze het beste inspelen op individuele vraagveranderingen door vanuit één systeem zowel warmte als koude te leveren. Specifiek bij ZLT en ZLT-U worden veel mogelijkheden geboden voor de inzet van een veelvoud aan duurzame bronnen, zoals ook laagwaardige restwarmte. Deze zullen door marktontwikkelingen en beleidsmaatregelen in de toekomst verder gestimuleerd worden.

5.3 Wat levert het op om naast directe effecten, maatschappelijke effecten mee te nemen?

Tijdens het beoordelen van ZLT-uitwisselnetten en alternatieven op directe en maatschappelijke effecten, hebben we de volgende conclusies getrokken over de meerwaarde van het meenemen van deze maatschappelijke effecten.

Ten eerste worden beleidskeuzes nu vaak gemaakt op basis van de laagste (nationale) kosten, maar zijn maatschappelijke effecten (zoals gezondheid, leefomgeving, sociale cohesie) minstens zo bepalend voor de uiteindelijke maatschappelijke rentabiliteit van warmteoplossingen. De analyse van de directe effecten laat zien dat op basis van kosten de verschillen tussen de alternatieven beperkt zijn (en soms binnen de onzekerheidsmarges vallen). Dit onderstreept de noodzaak om ook de maatschappelijke effecten mee te nemen in de afweging.

Ten tweede dient een collectieve infrastructuur te worden afgewogen over de benutbaarheid tijdens een levensduur van 30 tot 50 jaar. De uitwerking van verschillende warmtetechnieken op diverse maatschappelijke aspecten kan door middel van het onderzochte afwegingskader worden meegenomen in de keuze om toekomstbestendigheid te waarborgen.

Ten derde kunnen de maatschappelijke baten (zoals CO₂-reductie, netontlasting, comfort) wellicht helpen om draagvlak te vinden voor bepaalde warmtetechnieken.

5.4 Aanbevelingen uit het onderzoek

Gedurende het onderzoek is zeer veel onderzocht en zijn veel verschillende partijen gesproken. Dit waren experts die ieder een eigen expertiseveld hebben en rapportages die gingen over afgezonderde onderdelen van een maatschappelijke inbedding van de warmte- en koudetransitie. In dit proces is gebleken dat er nog veel onbekend is. Dat er nog veel kennis ontbreekt. En dat praktijkgegevens over ontwerp, techniek, kosten en organisatie niet beschikbaar zijn. Om van ZLT-uitwisselnetten een volwaardige optie in de warmtetransitie te maken, moet er in de komende periode nog veel ontwikkeld worden.

Hiervoor hebben wij de volgende aanbevelingen:

1. **Vergroot de kennis en zichtbaarheid van ZLT-uitwisselnetten bij beleids-makers**

Uit de analyse blijkt dat ZLT-U-netten vaak niet worden meegenomen in beleidsafwegingen, mede door onbekendheid en het ontbreken van standaardmodellen en het ontbreken van historische data. Organiseer daarom gerichte kennissessies, workshops en publicaties voor gemeenten en adviesbureaus om de werking, voordelen en toepassingsmogelijkheden van ZLT-U beter onder de aandacht te brengen. Haal data op over de prestaties van bestaande ZLT-netten die zijn toegepast in nieuwbouwwijken.

2. **Ontwikkel een uniforme methodiek voor het vergelijken van maatschappelijke effecten**

Hoofdstuk 2 en 3 laten zien dat maatschappelijke effecten nu versnipperd en niet-uniform worden beoordeeld. Ontwikkel een gestandaardiseerde methodiek (bijvoorbeeld een multicriteria-analyse of MKBA) waarmee gemeenten en adviseurs de maatschappelijke effecten van verschillende warmte- en koudetechnieken op een transparante en vergelijkbare manier kunnen beoordelen.¹³ En kijk hierbij bijvoorbeeld ook naar het Besluit kwaliteit leefomgeving. Dat vraagt ook expliciet om een bredere afweging, waarbij 'betrouwbaar en veilig', 'duurzaam', 'rechtvaardig en participatief' en 'ruimte en milieu' worden meegewogen.

Door een gestructureerde aanpak in een afwegingskader wordt het ook mogelijk om bij specifieke buurten meer recht te doen aan de lokale situatie. Zo kan er bijvoorbeeld meer rekening worden gehouden met maatschappelijke effecten die aansluiten bij maatschappelijke problemen in een buurt. En kunnen effecten die eigenlijk geen rol spelen achterwege gelaten worden. Maar om dit mogelijk te maken, is eerst goed inzicht nodig in de breedte van de effecten en de manier waarop deze beoordeeld kunnen worden.

¹³ Het Centrum voor Ondergronds Bouwen (COB) heeft hier al diverse aanpakken voor ontwikkeld (Taselaar, 2019). Deze zijn onder andere gericht op integraal denken, samenwerking, goede informatievoorziening, toepassing van normen en richtlijnen, en ruimte voor innovatie en duurzaamheid. Dit zou een start kunnen vormen van verdere uitwerking voor warmte- en koude-infrastructuren.

3. Stimuleer lokale pilots met monitoring van maatschappelijke effecten

De rapportage toont aan dat veel effecten contextafhankelijk zijn en dat praktijkervaring ontbreekt. Start daarom lokale pilots op voldoende grote schaal met ZLT-U in verschillende wijktypen, waarbij niet alleen technische en financiële prestaties, maar ook maatschappelijke effecten (zoals hittestress, netcongestie, sociale cohesie) systematisch worden gemonitord en geëvalueerd.

4. Verzamel en deel praktijkdata over uitwisselfactoren en buffercapaciteit

Hoofdstuk 2 en 3 benadrukken het belang van uitwisselfactoren en buffering voor de prestaties van ZLT-U. Verzamel praktijkdata uit bestaande netten (zoals Mijnwater Heerlen) en nieuwe pilots, en deel deze data breed met gemeenten, netbeheerders en marktpartijen om realistische ontwerp- en businesscaseparameters te kunnen hanteren.

5. Integreer scenario-analyse structureel in de afweging van warmtetechnieken

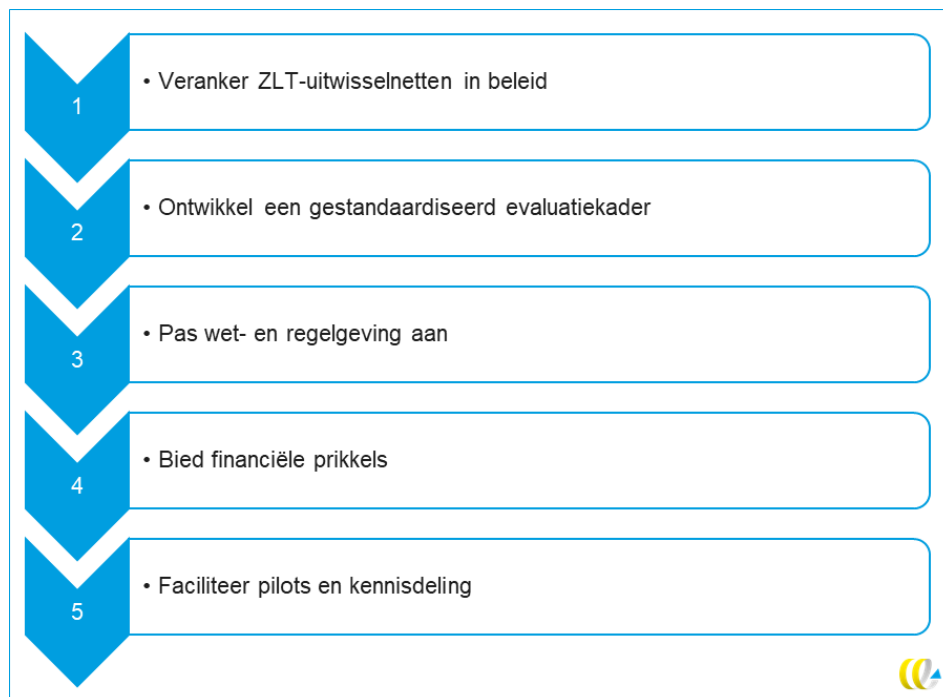
Hoofdstuk 4 laat zien dat de prestaties van warmte- en koudeopties sterk afhankelijk zijn van toekomstige ontwikkelingen (vraagverandering, energiemix, markt/beleid). Maak het uitvoeren van scenario-analyses een standaardonderdeel van de besluitvorming, zodat beleidskeuzes robuust zijn onder verschillende toekomstbeelden.

5.5 Aanbevelingen uit Theory of Change

Theory of Change (ToC) is een methode om gestructureerd na te denken over hoe je van een ambitie naar impact komt. Het beschrijft de verandering die je wilt bereiken en laat zien hoe jouw activiteiten tot die verandering leiden. In het geval van ZLT-uitwisselnetten betekent dit dat we aangeven welke beleidsmatige, financiële en technische wijzigingen nodig zijn om deze netten een volwaardige plek te geven in de warmtetransitie.

De volgende stappen bevatten de aanbevelingen voor beleidsmakers om deze Theory of Change toe te passen op het vlak van beleid, financiën en techniek.

Figuur 13 – ToC-stappen van ambitie naar impact: ZLT-uitwisselnetten hebben een volwaardige plek in de warmtetransitie



1. Veranker ZLT-uitwisselnetten in beleid

Gemeenten moeten ZLT-U expliciet opnemen in warmteprogramma's en wijkplannen. Landelijke modellen moeten koudevraag en uitwisselingsvoordelen meenemen. Ook PBL-scenario's moeten worden aangevuld met deze vierde route. Hiervoor zijn nieuwe data en parameters nodig om ZLT-U eerlijk te vergelijken met andere warmteopties. Zo ontstaat een gelijkwaardig beleidskader waarin ZLT-U volwaardig wordt meegewogen.

2. Ontwikkel een gestandaardiseerd evaluatiekader

Een breder maatschappelijk afwegingskader is nodig naast enkel kosten voor de eindgebruiker of nationale kosten. Milieu-impact, netinvesteringen en sociale effecten moeten worden meegewogen. Deze studie biedt al eerste maatschappelijke scores per alternatief. Rijk en gemeenten moeten een uniform kader zoals MCA gaan toepassen. Een duidelijke definitie van ZLT-U voorkomt misverstanden en bevordert eenduidige besluitvorming.

3. Pas wet- en regelgeving aan

ZLT-U vraagt om wettelijke ruimte voor exploitatie, inclusief flexibele warmte- en koudetarieven. De Wgiw biedt nieuwe sturingsmogelijkheden, maar vereist goede kennis en afwegingskaders. Omdat ZLT-U niet voorkomt in de Startanalyse is aanvullend beleid nodig. Gemeenten kunnen ZLT-U verder stimuleren via instrumenten van de Omgevingswet. Zo wordt implementatie juridisch en praktisch beter ondersteund.

4. Bied financiële prikkels

Gerichte subsidies en financiering kunnen de businesscase verbeteren. Investerings- en exploitatiesubsidies verlagen risico's en stimuleren deelname. Hierdoor worden projecten sneller rendabel en groeit de bereidheid om te investeren. Dit versnelt de ontwikkeling van ZLT-U-netten.

5. Faciliteer pilots en kennisdeling

Pilotprojecten moeten actief worden ondersteund en de resultaten breed gedeeld. Succesvolle voorbeelden vergroten draagvlak en versnellen de leerontwikkeling. Publiek-private samenwerking is essentieel om kennis op alle niveaus te benutten. Hierdoor kunnen gemeenten en marktpartijen sneller en beter met ZLT-U aan de slag.

Belangrijk is dat alle betrokken stakeholders de *gezamenlijke voordelen* inzien: ZLT-uitwisselnetten dragen bij aan klimaatdoelen (CO₂-reductie door efficiëntie en uitwisseling), aan energiebesparing en betaalbaarheid (lagere systeemkosten op lange termijn) en aan comfort en leefbaarheid (voorzien in koeling, minder geluidshinder, etc.). Daarmee passen ze naadloos in de bredere doelstellingen van een duurzame én rechtvaardige energietransitie.

De geschetste Theory of Change is geen eindpunt, maar een levend proces: tijdens de uitvoering moeten we leren en bijsturen. Als bepaalde aannames niet uitkomen (bijvoorbeeld: mocht de technologie trager verbeteren dan voorzien, of beleidsprioriteiten verschuiven), dan moeten de strategieën worden aangepast. Flexibiliteit en samenwerking staan centraal. Overheidsinstanties, onderzoeksinstituten, bedrijven en burgerinitiatieven moeten de handen ineenslaan om deze vierde route te realiseren.

A Kennisdag ZLT-warmte- en koudenetten workshop

A.1 Opzet workshop

Op de kennisdag 'Zeerlagetemperatuurwarmte- en koudenetten', georganiseerd door NPLW, RVO en TKI Urban Energy op 6 maart 2025, hebben Jibbe Bertholet en Frederique de Groen een workshop gegeven. De workshop bestond uit een multicriteria-analyse van de maatschappelijke effecten van warmtetechnieken die samen met de deelnemers is ingevuld. De deelnemers spraken in kleine subgroepen over de beoordeling die zij aan de warmtetechnieken willen geven, voor een aantal maatschappelijke effecten. Al deze beoordelingen zijn hierna plenair samengevoegd.

A.2 Uitkomsten workshop

De uitkomsten van de beoordeling staan in Tabel 17. We hebben de uitkomsten niet overgenomen in deze studie maar hebben wel *argumentaties* voor bepaalde beoordelingen meegenomen in de beoordeling van de warmtetechnieken.

Tabel 17 – Beoordeling van warmtetechnieken op maatschappelijke effecten

Effect	ZLT-warmtenet met individuele warmtepompen	Luchtwarmte pomp	MT-warmtenet	Huidige situatie
Hitte-eilandeffect	5	1	3	1
Effecten op het elektriciteitsnet	4	2	2	4
Klimaatteffect	5	4	3	1
Gelijkheid	3	2	3	5
Schaarste van duurzame bronnen	5	4	3	1

Effect	ZLT-warmtenet met individuele warmtepompen	Luchtwarmte pomp	MT- warmtenet	Huidige situatie
Kwaliteit van de leefomgeving	4	1	2	2
Ondergrondse ruimte	2	3	1	3
Participatiespanning/fasee rbaarheid	5	5	1	1
Ruimtegebruik in woningen	2	1	5	4

B Beoordeling maatschappelijke effecten

Kwalitatieve effecten zijn beoordeeld door middel van interne expertise. Kwantitatieve effecten zijn beoordeeld door middel van berekeningen. In de volgende paragrafen wordt de onderbouwing gegeven van de scoring van de vijf bekeken warmte- en koudeopties op de diverse maatschappelijke effecten.

B.1 ZLT-U: maatschappelijke impact en scoring

B.1.1 Hitte-eilandeffect

Beoordelingskaders:

1. Warmteverlies naar de bodem en omgeving door leidingen of installaties.
2. Mate waarin het energiesysteem bijdraagt aan lokale opwarming van straten, pleinen en bodem.
3. Koelvermogens of passieve koeling als tegengewicht (actieve verkoeling).

MT-warmtenet op basis van geothermie; score: – –

- Hoge aanvoertemperaturen (70-90°C) en dus veel warmteverlies naar de bodem en omgeving.
- Leidt tot structurele opwarming van ondergrond → risico op versterking van hitte-eilandeffect.
- Wordt door Deltares en andere partijen erkend als risicofactor bij MT-systemen, zeker in steden met veel verharding.

MT-warmtenet op basis van LT-TEO; score: –

- Iets lagere temperaturen (rond 55°C), dus iets minder verlies, maar nog steeds significant.
- Niet geschikt voor actieve verkoeling of uitwisseling van koude → draagt niet bij aan mitigatie van hitte-eilandeffect.
- Netto-effect: lichte opwarming van bodem en omgeving.

Individuele lucht-waterwarmtepomp; score: +/-

- Geen warmtedistributie in de ondergrond → geen warmteverlies daar.
- Wel mogelijke lokale opwarming rondom buitenunits (luchtverhitters), maar beperkt tot gevel of tuin.
- Geen verkoelende werking, dus effect is neutraal tot licht negatief, afhankelijk van schaal.

ZLT-warmtenet; score: +

- Werkt met lage temperaturen (~20°C), waardoor nauwelijks warmteverlies optreedt.
- Biedt ook mogelijkheid tot passieve koeling en koude-uitwisseling.
- Bodem en straat warmen niet op, en er is zelfs potentieel voor verkoelend effect in de zomer.

ZLT-U (ZLT met uitwisseling); score: ++

- Dezelfde voordelen als ZLT, maar met extra uitwisseling van koude en warmte tussen gebruikers.
- Actieve koeling van gebouwen kan zelfs leiden tot netto warmte-onttrekking aan de omgeving.
- Ideaal systeemtype om hitte-eilandeffecten tegen te gaan, vooral in versteende omgevingen.

B.1.2 Klimaatimpact (CO₂)

Beoordelingskaders:

1. Totale CO₂-reductiepotentieel ten opzichte van aardgasgebruik.
2. Gebruik van duurzame versus fossiele bronnen voor de gebruikte elektriciteit (inclusief piekvoorziening).
3. Indirecte CO₂-uitstoot via elektriciteitsverbruik (rekening houdend met netmix of vergroening van de stroom).

MT-warmtenet op basis van geothermie; score: ++

- 100% duurzame bron met zeer lage CO₂-uitstoot.
- Piekvoorziening nodig door middel van centrale warmtepomp.
- Maximale impact op reductie van broeikasgasemissies.
- Gunstig, ook bij toekomstige verdere vergroening van stroommix (irrelevant voor geothermie).

MT-warmtenet op basis van LT-TEO; score: +

- 85% van de warmte geleverd via warmtepompen op elektriciteit.
- 15% van de warmtevraag komt uit piekvoorziening door middel van centrale warmtepomp.

- Warmtepompen gebruiken elektriciteit, maar SCOP is gunstig (~3,4), dus lage indirecte uitstoot.
- Reductie ten opzichte van de cv-ketel is significant.

Individuele lucht-waterwarmtepomp; score: +/-

- Geen directe uitstoot, maar elektriciteitsgebruik volledig op individueel niveau.
- CO₂-impact is afhankelijk van type woning, gebruikspatroon en efficiëntie (COP varieert sterk).
- In slecht geïsoleerde woningen of bij ongunstig gedrag: hogere stroomvraag → hogere CO₂.
- Bij goede omstandigheden en groene stroom: goede prestaties, maar variabel → neutrale score.

ZLT-warmtenet; score: +

- Voornamelijk gevoed met duurzame bronnen (wko, TEO, etc.).
- Warmtepompen draaien collectief of decentraal, meestal op duurzame stroom.
- Geen fossiele piekbron nodig → CO₂-uitstoot is laag.
- Kan verder geoptimaliseerd worden met buffering en smart control → stabiel positief effect.

ZLT-U (ZLT met uitwisseling); score: ++

- Dezelfde voordelen als ZLT, maar met extra efficiëntie door uitwisseling tussen warmte- en koudevraag.
- Minder energieverbruik door lagere pieken en betere benutting van restwarmte.
- Kan zelfs tot negatieve marginale emissies leiden bij ideale omstandigheden.
- Hoogste potentieel voor structurele CO₂-reductie op systeemniveau.

B.1.3 Luchtkwaliteit

Beoordelingskaders:

1. Directe of indirecte uitstoot van fijnstof, NO_x, of andere luchtvervuilende stoffen.
2. Gebruik van fossiele brandstoffen (zoals gasgestookte piekvoorzieningen).
3. Lokale effecten (schoorstenen, buitenunits, verkeer voor onderhoud) versus centrale of upstream emissies.

MT-warmtenet op basis van geothermie; score: ++

- Volledig duurzame bron zonder verbranding → géén lokale uitstoot.
- Geen buitenunits of schoorstenen in de wijk.
- Bij 100% geothermie is de luchtkwaliteit positief beïnvloed; draagt bij aan schone buitenlucht.

MT-warmtenet op basis van LT-TEO; score: +

- Voor ~85% duurzaam via TEO en warmtepomp; echter: 15% piekvraag gedekt met gasketels.
- Die piekvoorziening zorgt voor lokale uitstoot van NO_x en CO₂.
- Desondanks veel schoner dan individuele gasoplossingen; significant positief effect op luchtkwaliteit, zij het iets minder dan geothermie.

Individuele lucht-waterwarmtepomp: score: +/-

- Geen verbranding → geen uitstoot bij gebruik.
- Maar: gebruik van buitenunits kan leiden tot fijnstofvorming door luchtbeweging, en extra energiegebruik in piekuren (mogelijk met fossiele stroom).
- Geen verbetering van luchtkwaliteit, maar ook geen duidelijke verslechtering → neutraal.

ZLT-warmtenet; score: +

- Wordt gevoed met duurzame bron (zoals wko, TEO), zonder lokale verbranding.
- In woningen geen uitstoot meer, en geen piekvoorziening met fossiel.
- Bij goed ontwerp en gebruik van groene stroom is er netto verbetering van luchtkwaliteit.

ZLT-U (ZLT met uitwisseling); score: +

- Dezelfde kenmerken als ZLT.
- Mogelijkheid tot actieve koeling en warmteterugwinning versterkt de duurzaamheid, maar geen extra effect op luchtkwaliteit ten opzichte van ZLT.
- Geen lokale uitstoot, dus positief effect.

B.1.4 Kwaliteit van de leefomgeving

Beoordelingskaders:

1. Esthetische en fysieke impact in de wijk (zoals installaties in de openbare ruimte of gevels).
2. Geluid, visuele overlast en ingrepen in straten en tuinen.
3. Perceptie van rust, netheid en ruimtekwaliteit in de leefomgeving.

MT-warmtenet op basis van geothermie; score: ++

- Centrale bron en warmtelevering zonder zichtbare of hoorbare elementen in de wijk.
- Alleen ondergrondse leidingen, geen buitenunits of technische installaties in het straatbeeld.
- Zeer lage impact op esthetiek en geluidsbeleving → goed voor beleving van rust en ruimte.

MT-warmtenet op basis van LT-TEO; score: +

- Vergelijkbaar met geothermie qua inrichting van de wijk.
- Wel wat meer technische ruimte of bufferinstallaties nodig, maar die kunnen buiten zicht geplaatst worden.
- Geen buitenunits bij woningen → lage overlast, esthetisch acceptabel.

Individuele lucht-waterwarmtepomp; score: – –

- Buitenunit nodig bij elke woning → geluidsoverlast en visuele verstoring (vooral bij hogere dichtheid).
- Boilervaten en binnenunits nemen plek in binnenshuis.
- In straten met veel installaties aan de gevels of in tuinen kan de leefomgeving sterk achteruitgaan.
- Perceptie van versnipperde of rommelige omgeving.

ZLT-warmtenet; score: +/-

- Afleverset en e-booster zijn volledig inpandig → geen buitenunit.
- Wel mogelijk ruimtebeslag in meterkast of technische ruimte binnen.
- Ondergrondse infrastructuur beperkt zichtbaar, maar enige overlast bij aanleg.
- Neutrale score omdat er geen grote negatieve of positieve impact is op straatbeeld of geluid.

ZLT-U (ZLT met uitwisseling); score: +/-

- Dezelfde zichtbare impact als ZLT: geen buitenunits, alleen inpandige techniek.
- Eventuele aanvullende buffers of decentrale units kunnen beperkt extra ruimte vragen, maar worden vaak uit het zicht geplaatst.
- Geen directe verbetering, maar ook geen verslechtering van de leefomgeving.

B.1.5 Externe veiligheid

Beoordelingskaders:

1. Risico's op ongevallen met effect op omgeving (explosie, lekkage, brand).
2. Aanwezigheid van gevaarlijke stoffen (zoals gas of ammoniak).
3. Veiligheidsafstanden, vergunningen en publieke zorgen (perceptie van risico).

MT-warmtenet op basis van geothermie; score: – –

- Geothermie kent een beperkt veiligheidsrisico, maar er zijn wel aandachtspunten:
 - mogelijkheid op aardbevingen, lekkages van warm water of minerale stoffen;
 - veiligheidsprocedures en toezicht zijn goed in Nederland.
- Er vinden graafwerkzaamheden plaats voor de aanleg van de warmte- en koude-leidingen. Dit heeft een risico op bodemverstoring en overlast van trillingen.
- Klein risico, maar professioneel beheersbaar (kleine kans, groot gevolg) bij boring naar geothermie.

- Voor externe veiligheid heeft deze optie de slechtste score.

MT-warmtenet op basis van LT-TEO; score: –

- Centrale warmtepompen voor piekvermogen brengen risico's met zich mee:
 - Warmtepompen op basis van synthetische koudemiddelen kunnen bij een lek risico's vormen.
- Er vinden graafwerkzaamheden plaats voor de aanleg van de warmte- en koudeleidingen. Dit heeft een risico op bodemverstoring en overlast van trillingen.
- Score is licht negatief: geen grote externe risico's, maar wél relevante veiligheidscomponenten.

Individuele lucht-waterwarmtepomp; score: +

- Meestal lage risico's, maar:
 - In woningen worden koudemiddelen (zoals R32) toegepast die bij lekkage licht ontvlambaar kunnen zijn.
 - Koudemiddelen blijven een aandachtspunt, vooral bij slechte ventilatie of foutieve plaatsing.
- Geen extern veiligheidsrisico zoals gas, maar ook geen nulrisico → licht positieve score.

ZLT-warmtenet; score: +/-

- Lage temperatuur, lage druk → nagenoeg geen risico op brand, explosie of lekkage.
- Geen gevaarlijke stoffen, geen verbranding, geen gas.
- Er vinden graafwerkzaamheden plaats voor de aanleg van de warmte- en koudeleidingen. Dit heeft een risico op bodemverstoring en overlast van trillingen.

ZLT-U (ZLT met uitwisseling); score: +/-

- Dezelfde voordelen als ZLT: lage temperaturen, lage druk, geen gevaarlijke stoffen.
- Extra componenten (zoals buffervaten of warmtepompen) kunnen lokaal toegevoegd worden, maar dat verandert de risicoklasse niet wezenlijk.
- Er vinden graafwerkzaamheden plaats voor de aanleg van de warmte- en koudeleidingen. Dit heeft een risico op bodemverstoring en overlast van trillingen.

B.1.6 Netcongestie

Beoordelingskaders:

1. Impact op de elektriciteitsvraag op piekmomenten.
2. Mate van spreiding of concentratie van belasting op het elektriciteitsnet.
3. Mogelijkheid tot flexibiliteit, buffering of smart control om netbelasting te verminderen.

MT-warmtenet op basis van geothermie; score: ++

- Geothermie levert warmte zonder gebruik van elektriciteit.
- Alleen kleine pompen nodig in distributienet → minimale belasting van het elektriciteitsnet.
- Geen risico op netcongestie → ideale optie in overbelaste netgebieden.

MT-warmtenet op basis van LT-TEO; score: –

- Grote centrale warmtepomp vereist hoge netaansluiting (160-630 kVA in Oostoever).
- Wordt direct belast bij warmtevraag → moeilijk om flexibel aan te sturen zonder buffer.
- Netcongestie vormt serieuze realisatiebelemmering (zoals gesignaleerd door Liander).

Individuele lucht-waterwarmtepomp; score: – –

- Hoge elektriciteitsvraag in piekuren (koude ochtenden).
- Geen centrale sturing mogelijk → iedereen verwarmt tegelijk.
- Zorgt voor verergering van netcongestie, zeker als dit op wijkniveau massaal wordt toegepast.

ZLT-warmtenet; score: +/-

- Lage temperatuurdistributie → decentrale warmtepompen met relatief laag vermogen.
- Door buffering en slimme sturing (bijvoorbeeld buiten piekuren verwarmen) kan belasting gespreid worden.
- Veel lagere netimpact dan all-electric, en flexibeler dan centrale TEO-opwek.

ZLT-U (ZLT met uitwisseling); score: +

- Dezelfde voordelen als ZLT, met extra potentieel:
 - Warmte- en koudevraag kunnen elkaar deels opvangen.
- Energie-uitwisseling tussen gebouwen vermindert netbelasting.
- Kan goed gecombineerd worden met slimme aansturing en opslag, wat congestie verder helpt reduceren.

- In de sessie werd nog wel besproken dat buffering cruciaal is om dit potentieel waar te maken.

B.1.7 Volatiele energieprijzen

Beoordelingskaders:

1. Kwetsbaarheid van het systeem voor fluctuaties in elektriciteits- of gasprijzen.
2. Mogelijkheid om slim om te gaan met prijschommelingen (bijvoorbeeld met buffering of sturing).
3. Collectieve inkoop vs. individuele blootstelling aan marktprijzen.

MT-warmtenet op basis van geothermie; score: ++

- Geothermie gebruikt heel weinig elektriciteit of gas voor warmteproductie → hierdoor bijna volledig immuun voor prijsvolatiliteit.
- Enkel vaste kosten voor pompen en onderhoud.
- Maximale bescherming voor gebruikers tegen schommelende energietarieven.

MT-warmtenet op basis van LT-TEO; score: +/-

- Warmtepompen gebruiken elektriciteit en piekvoorziening.
- Daarmee gevoelig voor prijsfluctuaties van twee energiedragers.
- Wel centrale inkoop mogelijk, wat prijschommelingen enigszins dempt.
- Buffering (thermisch) zou helpen, maar is vaak beperkt toegepast.

Individuele lucht-waterwarmtepomp; score: --

- Volledig afhankelijk van individuele stroomcontracten en dagprijzen.
- Geen buffering of centrale inkoop → bewoners volledig blootgesteld aan prijschommelingen.
- In koude perioden leidt dit tot hoge kosten, vooral bij slechte woningisolatie of weinig sturing.

ZLT-warmtenet; score: +

- Warmtepompen (centraal of decentraal) draaien grotendeels op stroom, maar:
 - Lage aanvoertemperaturen → efficiënt.
 - Buffering en load shifting mogelijk → warmte maken als stroom goedkoop is.
 - Collectieve sturing of inkoop biedt bescherming tegen prijsspieken.

ZLT-U (ZLT met uitwisseling): Score: +

- Zelfde voordelen als ZLT, met extra potentieel:
 - Uitwisseling van warmte/koude tussen gebruikers beperkt de netvraag.
- Systemen kunnen slimmer en meer autonoom inspelen op prijsfluctuaties.
- Buffering is essentieel voor voordeel, maar potentieel zeer groot bij goede aansturing.

B.1.8 Ruimtegebruik in woningen

Beoordelingskaders:

1. Benodigde fysieke ruimte in huis voor installaties (zoals e-boosters, afleversets, warmtepompunits).
2. Impact op gebruiksgemak en esthetiek (zoals grote apparaten in woonruimtes).
3. Technische integratie in bestaande woningen: gemak of moeite van inpassen in diverse woningtypes.

MT-warmtenet op basis van geothermie; score: ++

- Alleen compacte afleverset nodig; vergelijkbaar met huidige gasmeterkast (in grootte).
- Geen e-booster, geen buffervat, geen technische complicaties.
- Past goed in bestaande woningen zonder noemenswaardige ruimteclaims.

MT-warmtenet op basis van LT-TEO; score: +/-

- Heeft vaak centrale warmtepomp → geen individuele boosters nodig.
- Wel afleverset nodig, maar minder binnenruimte dan bij ZLT.
- Afhankelijk van afgiftesysteem en tapwatervoorziening kan extra apparatuur nodig zijn, maar meestal bescheiden.

Individuele lucht-waterwarmtepomp; score: --

- Vraagt veel ruimte: grote binnen- en buitenunits, vaak inclusief boiler of buffervat.
- Vereist soms aanpassing van ruimtes of bouwkundige ingrepen.
- Storend in woningen met beperkte ruimte, zoals appartementen of rijtjeshuizen.

ZLT-warmtenet; score: -

- Benodigd: afleverset + e-booster voor tapwater (of voor verwarming).
- Booster moet op een geschikte plek worden geplaatst met extra groep in de meterkast.
- Minder ruimte-impact dan een volledige warmtepomp, maar nog altijd significant in vergelijking met MT.

ZLT-U (ZLT met uitwisseling): -

- Dezelfde ruimtebehoefte als ZLT (afleverset + booster), geen wezenlijk verschil in binnenhuisruimte.
- Eventuele meer complexiteit door warm/koud-buffering of warmtepompmodules; speelt zich buiten woning af.

B.1.9 Ondergrondse ruimte

Beoordelingskaders:

1. Hoeveel fysieke ruimte het systeem vraagt in de ondergrond (leidingen, bronnen, buffers).
2. Compatibiliteit met bestaande kabels, leidingen, riolering, bomen, etc.
3. Mate van ruimtelijke impact en uitvoeringscomplexiteit in de openbare ruimte.

MT-warmtenet op basis van geothermie; score: – –

- Vereist grote hoofdleidingen met dikke diameters vanwege hoge temperaturen en debieten.
- Extra ruimte nodig voor geïsoleerde leidingen, leidingsleuven en broninfrastructuur.
- Lastig te combineren met andere ondergrondse infra; vaak conflicten met bestaande netten.
- Slecht te faseren, dus veel ruimtegebruik in één keer → grote druk op ondergrond.

MT-warmtenet op basis van LT-TEO; score: –

- Iets minder ruimte-intensief dan MT-geothermie, maar nog steeds relatief grote leidingen en veel aansluitingen.
- Vereist centrale opwek + distributie → veel kruisingen en ingrepen in de grond.
- Lastig inpasbaar in dichtbebouwde gebieden zonder herstructurering.

Individuele lucht-waterwarmtepomp; score: ++

- Geen collectieve infrastructuur in de ondergrond nodig.
- Beperkt tot individuele aansluitingen voor elektriciteit; geen leidingsleuven voor warmte.
- Minimale impact op openbare ruimte en ondergrondse congestie.

ZLT-warmtenet; score: +

- Werkt met kleinere leidingen (DA40–DA140), vaak zonder isolatie, en lage debieten.
- Veel minder ruimtebeslag dan MT-systemen.
- Geschikt voor combinatie met andere infra in smalle straten of beperkte profielen.
- Kan flexibel gelegd worden (bijvoorbeeld via dak/kelder bij gestapelde bouw).

ZLT-U (ZLT met uitwisseling); score: +

- Zelfde leidingsysteem als ZLT, maar met twee leidingen (warm/koud) in plaats van één.
- Extra leiding heeft beperkte impact (zelfde formaat, zelfde flexibiliteit).
- Soms extra ruimte nodig voor decentrale buffering of clusters, maar nog steeds veel compacter dan MT.

- Daarom gelijke score als ZLT.

B.1.10 Participatiespanning en faseerbaarheid

Beoordelingskaders:

1. Participatiespanning: hoeveel druk of betrokkenheid er nodig is van bewoners, bedrijven of overheden om het systeem succesvol te implementeren.
2. Faseerbaarheid: in welke mate het systeem het technisch en energetisch toelaat om klein te starten en in de tijd op te schalen.

MT-warmtenet op basis van geothermie; score: – –

- Heeft een hoge aanvangsdekkingsgraad nodig ($\geq 70\text{-}80\%$) om te kunnen functioneren.
- Geothermiebronnen kunnen niet moduleren: ze moeten op volle kracht draaien → lage technische faseerbaarheid.
- Bewoners moeten massaal tegelijk overgaan, wat veel sociale druk en weerstand veroorzaakt.
- Geen realistische optie voor gefaseerde uitrol of vrijwillige deelname.

MT-warmtenet op basis van LT-TEO; score: –

- Iets flexibeler dan geothermie, maar nog steeds beperkt faseerbaar.
- Centrale installaties en net moeten grotendeels operationeel zijn voordat levering mogelijk is.
- Relatief hoge startdekkingsgraad vereist; daardoor ook participatiedruk hoger dan bij decentrale systemen.

Individuele lucht-waterwarmtepomp; score: ++

- Volledig individueel en modulair: elke woning kan zelfstandig en op eigen tempo overstappen.
- Geen centrale infrastructuur of collectieve deelname vereist.
- Participatiespanning is laag, net als sociale druk.

ZLT-warmtenet; score: +

- Technisch en energetisch goed faseerbaar: kan klein starten en later uitgebreid worden.
- Geen massale gelijktijdige deelname nodig; bewoners kunnen in de tijd aansluiten.
- Wel enige participatie nodig voor rendabiliteit, maar geen grote sociale druk.

ZLT-U (ZLT met uitwisseling); score: +/-

- Technisch faseerbaar, maar energetisch complexer: vereist een goede mix van gebruikers (bijvoorbeeld warmtevraag én koudevraag).

- Participatiespanning ligt hoger dan bij ZLT, omdat de uitwisseling pas rendeert bij voldoende diversiteit in het netwerk.
- Theoretisch voordeel: kan als publieke infrastructuur met lage aanvangsdekking worden aangelegd, maar in praktijk complexer te realiseren.
- Daardoor een iets lagere score dan standaard ZLT.

B.1.11 Inclusiviteit

Beoordelingskaders:

1. Cognitieve belasting en complexiteit van de benodigde aanpassingen in de woning.
2. Financiële ongelijkheid: de mate waarin systemen mensen uitsluiten vanwege investeringsvermogen.
3. Mate van collectieve ontzorging door warmteleveranciers of overheden.

MT-warmtenet op basis van geothermie; score: ++

- 'One size fits all': systeem werkt voor vrijwel alle woningen, zonder ingrepen.
- Geen individuele investeringen of technische kennis vereist.
- Collectieve levering → bewoners worden volledig ontzorgd.
- Iedereen kan meedoen, ongeacht inkomen of vaardigheden.

MT-warmtenet op basis van LT-TEO; score: +

- Vergelijkbaar met MT, maar iets meer technische complexiteit aan de bronkant.
- Voor bewoners nog steeds grotendeels collectief georganiseerd.
- Minder laagdrempelig dan MT-geothermie, maar wel goed toegankelijk en ontzorgd.

Individuele lucht-waterwarmtepomp; score: –

- Hoge individuele investering nodig → creëert ongelijkheid tussen bewoners die het wel of niet kunnen betalen.
- Complexe installatie vraagt om technische kennis of begeleiding.
- Kans op uitsluiting van bewoners met lage inkomens of beperkte actieradius.
- Marketingaanbiedingen (zoals airco's) werken alleen voor mensen met voldoende financiële ruimte.

ZLT-warmtenet; score: +/-

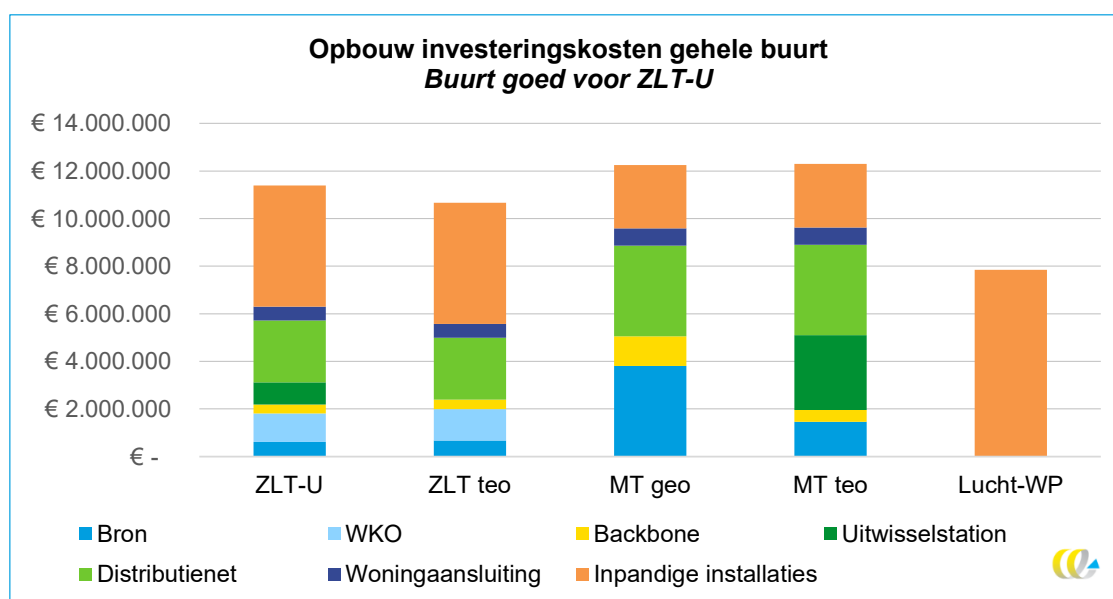
- Vereist afleverset én e-booster in woning → meer woningaanpassingen nodig dan bij MT.
- Wel collectief georganiseerd, wat enige mate van ontzorging biedt.
- Minder laagdrempelig dan MT, maar beter dan volledig individuele systemen.
- Kans op ongelijkheid blijft bestaan, vanwege variabele woninggeschiktheid en kosten.

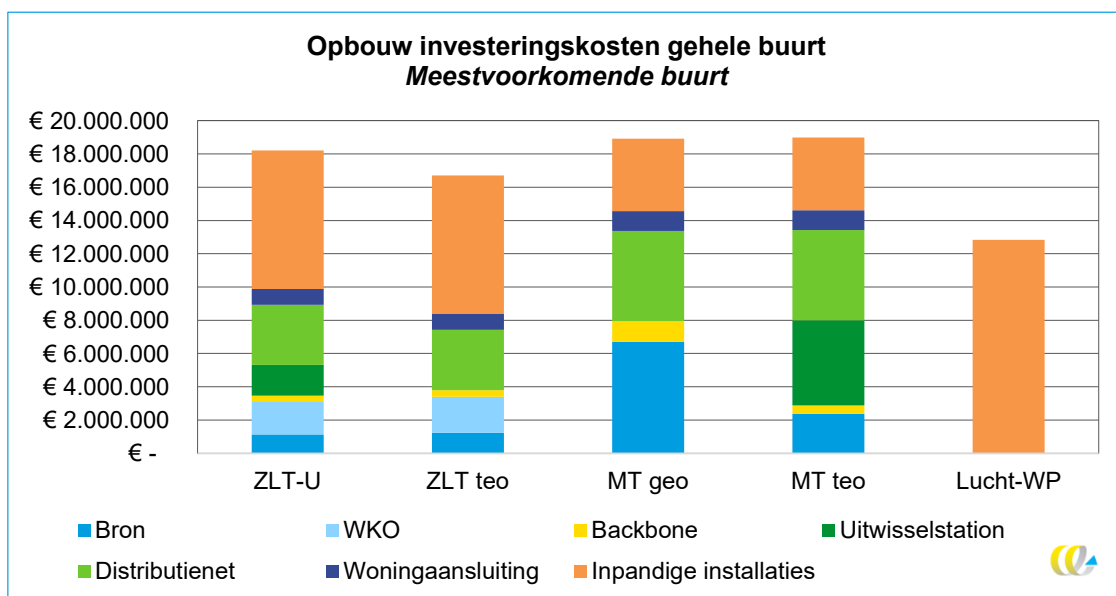
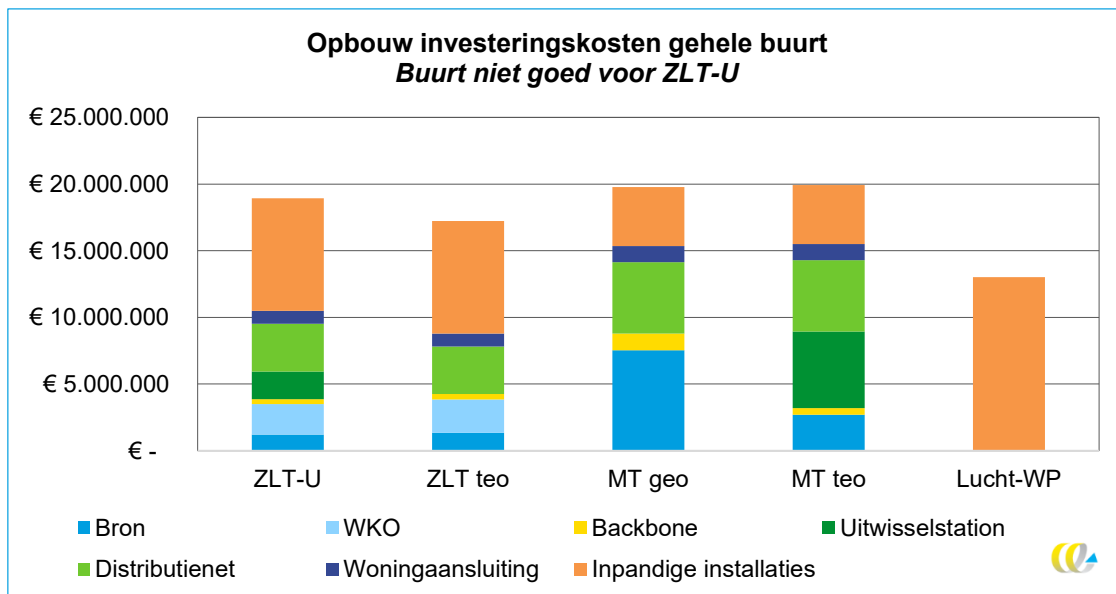
ZLT-U (ZLT met uitwisseling); score: +/-

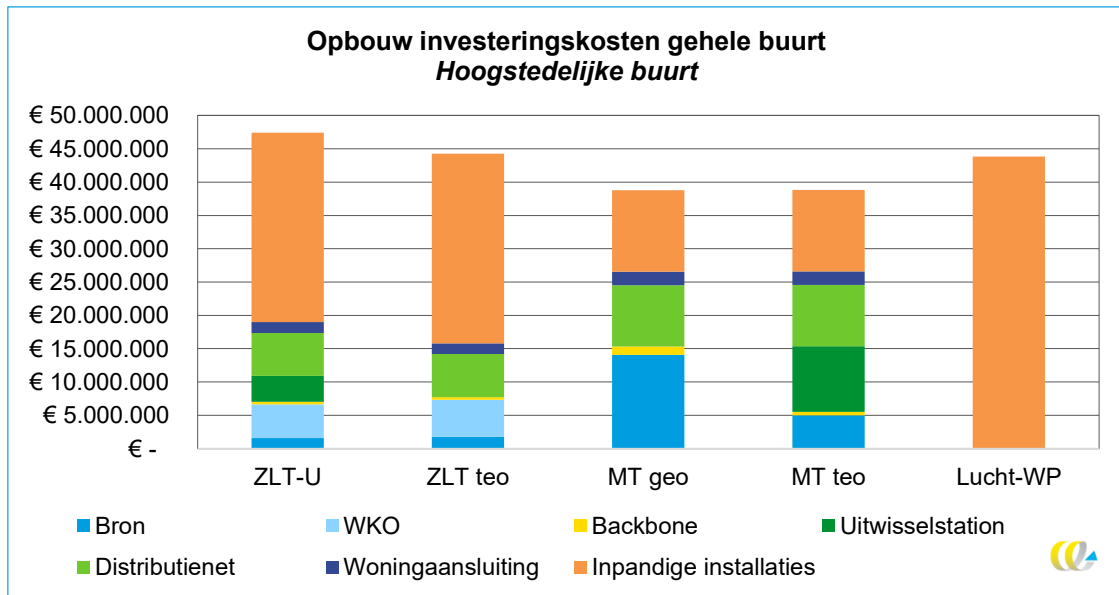
- Dezelfde technische eisen aan de woning als ZLT → vergelijkbare impact op bewoners.
- Eventuele extra complexiteit zit in het systeemontwerp, niet in de woning.
- Geen onderscheid met ZLT op dit punt → gelijke score.
- Ontzorging vanuit leveranciers of productmarkt (bijv. standaardaanbiedingen) is denkbaar, maar nog in opkomst.

B.2 Directe effecten

In de volgende grafieken worden de investeringskosten voor de vier verschillende cases weergegeven. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen de verschillende onderdelen van de gebiedsaanpassing. Kosten voor de isolatiemaatregelen zijn niet opgenomen, omdat deze voor alle technieken hetzelfde worden geacht.

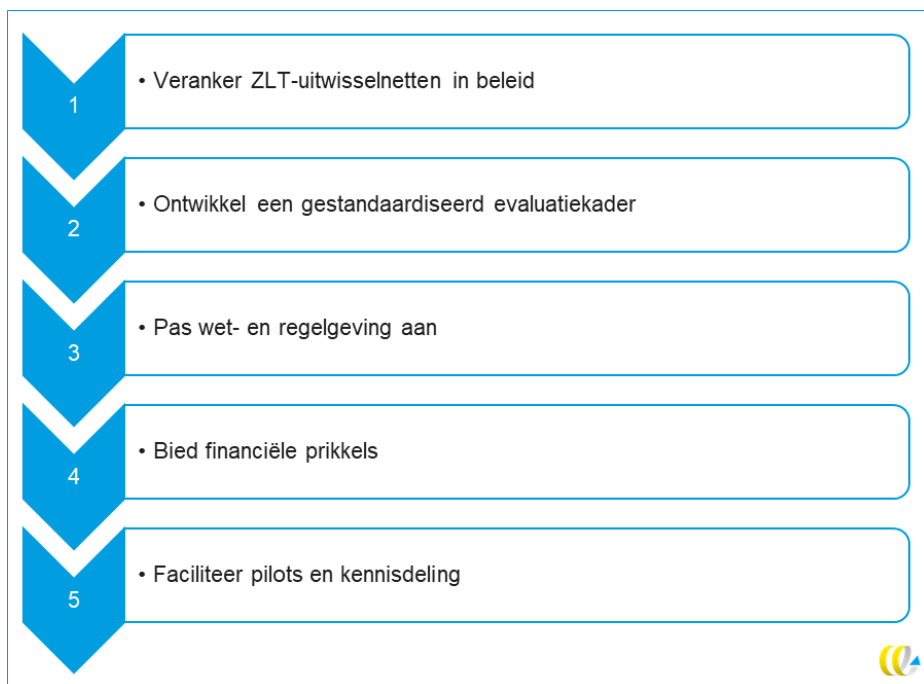






C Theory of Change

Theory of Change (ToC) is een methode om gestructureerd na te denken over hoe je van een ambitie naar impact komt. Het beschrijft de verandering die je wilt bereiken en laat zien hoe jouw activiteiten tot die verandering leiden. Kortom, het is een veranderpad van oorzaak en gevolg: *als we X doen, en aan voorwaarden Y is voldaan, dan bereiken we Z*. In het geval van ZLT-uitwisselnetten betekent dit dat we aangeven welke beleidsmatige, financiële en technische wijzigingen nodig zijn om deze netten een volwaardige plek te geven in de warmtetransitie. De volgende stappen vormen samen een stappenplan voor beleidsmakers, gebaseerd op de analyses van de maatschappelijke en directe effecten en de voorgenoemde scenario's, om deze Theory of Change te realiseren.



Deze stappen vormen samen een concreet verandertraject. Er ontstaat een omgeving waarin ZLT-uitwisselnetten kunnen doorgroeien van pionier naar mainstream, door:

1. Beleidsmatig te verankeren.
2. Eerlijk te vergelijken.
3. Regelgeving passend te maken.
4. Financieel te ondersteunen.
5. Te experimenteren en leren.

Via deze Theory of Change werken beleidsmakers en betrokken partijen doelgericht samen aan de ambitie om ZLT-uitwisselnetten als volwaardige route in de warmtetransitie, stap voor stap werkelijkheid te maken.

C.1 Theory of Change uitgewerkt

C.1.1 ToC: ZLT-uitwisselnetten in de warmtetransitie

Ambitie: ZLT-uitwisselnetten groeien uit tot een volwaardige schakel in de warmtetransitie van Nederland.

Dit betekent dat deze innovatieve lagetemperatuurwarmtenetten – die warmte én koude kunnen uitwisselen tussen gebouwen – algemeen worden erkend en toegepast naast de bestaande routes (individuele warmtepompen, hybride systemen, middentemperatuur-warmtenetten, lagetemperatuurnetten). Om dit toekomstbeeld te realiseren, moet er een aantal wezenlijke veranderingen plaatsvinden op het gebied van beleid, businesscase/ financiering en techniek/innovatie. Hieronder wordt beschreven welke veranderingen nodig zijn en hoe deze bijdragen aan het bereiken van de gewenste impact.

C.1.2 Uitgangssituatie en uitdaging

Huidige situatie: ondanks de veelbelovende kenmerken worden ZLT-uitwisselnetten op dit moment nauwelijks meegenomen door beleidsmakers in de warmteplannen voor bestaande wijken.

Drie hoofdredenen staan hun doorbraak in de weg:

6. De voordelen zijn nog onvoldoende bekend of gekwantificeerd.
7. ZLT-alternatieven zijn niet opgenomen in de gangbare beleidsmodellen (zoals Startanalyse/Vesta-MAIS), met name omdat daarin de koudevraag niet wordt meegenomen.
8. Er ontbreekt een eenduidig kader (taxonomie, evaluatiemethodiek) om ZLT-uitwisselnetten te beoordelen.

Hierdoor dreigt deze optie ook in nieuwe gemeentelijke warmteprogramma's over het hoofd te worden gezien. Het gevolg is dat lokale overheden veelal met eigen, versnipperde afwegingskaders werken, wat leidt tot tegenstrijdige adviezen en slecht onderbouwde keuzes.

Tegelijk kampt de warmtetransitie met een impasse: traditionele warmtenetprojecten liggen voor een groot deel stil (naar schatting 90% van de nieuwe warmtenetaansluitingen is gepauzeerd), waardoor meer woningeigenaren alternatieven zoeken (bijvoorbeeld airco's als verwarming) die het draagvlak voor collectieve oplossingen verder ondermijnen. Er is dus behoefte aan een 'vierde route' om deze impasse te doorbreken. ZLT-

en ZLT-uitwisselnetten bieden zo'n route en kennen unieke voordelen: ze combineren een collectieve infrastructuur met individuele of collectieve warmtepompen, faciliteren gelijktijdige levering van warmte en koude, en verminderen de druk op meerdere uitdagingen zoals netcongestie, geluids- en ruimteproblemen. In de praktijk is al gebleken dat in een netwerk als Mijnwater (Heerlen) rond 30% van de energiebehoefte via uitwisseling kan worden ingevuld, met als resultaat dat er minder opwekcapaciteit nodig is en piekbelastingen dalen.

Kernvraag: Hoe zorgen we ervoor dat deze veelbelovende ZLT-uitwisselnetten daadwerkelijk een plek krijgen in de warmtetransitie?

De Theory of Change hieronder schetst het pad van de huidige situatie naar de ambitie. De aanpak richt zich op interventies op drie terreinen: beleidsmatig, economisch en technisch. Als deze interventies slagen, en de bijbehorende aannames uitkomen, dan zal dit leiden tot bredere adoptie van ZLT-uitwisselnetten en uiteindelijk tot het gewenste eindresultaat: een duurzamere, betaalbare en maatschappelijk gedragen warmte- en koudevoorziening waarin ZLT-uitwisselnetten een vaste waarde zijn.

C.1.3 Beleidsmatige veranderingen

Doelstelling: overheden en beleidsmakers omarmen ZLT-uitwisselnetten als volwaardige optie in hun instrumentarium voor de warmtetransitie.

Concreet betekent dit: opname van ZLT-U in nationaal, regionaal en lokaal beleid, in rekenmodellen en in subsidie- en regelgeving, zodat deze optie een gelijke kans krijgt als andere oplossingen.

Integratie in warmteprogramma/wijkuitvoeringsplannen en modellen

Een eerste stap is het zichtbaar maken van de ZLT-U-route in beleidsdocumenten. Gemeenten moeten in hun warmteprogramma en wijkuitvoeringsplannen expliciet de optie van een (zeer-)lage temperatuur uitwisselingsnet meewegen. Op rijksniveau dienen modellen zoals Vesta-MAIS te worden aangepast, zodat de koudevraag en de bijbehorende voordelen van warmtenetten met uitwisseling worden meegenomen. Ook standaard-scenario's (PBL, Startanalyse) zouden moeten worden verrijkt met deze vierde route. Dit vergt inspanning van kennisinstellingen en Rijksoverheid om data te verzamelen en parameters te ontwikkelen voor ZLT-U-netten, zodat zij op gelijke voet vergeleken kunnen worden met warmtepompen, hybride systemen en conventionele warmtenetten. Het resultaat is dat beleidsmakers op elk niveau geïnformeerde afwegingen kunnen maken waarin ZLT-uitwisseling een plek heeft.

Ontwikkeling van een beoordelingskader (MKBA+)

Om verschillende warmtetechnieken eerlijk te vergelijken is een breed maatschappelijk afwegingskader nodig. De huidige praktijk – 'laagste kosten voor de eindgebruiker' als dominante factor – doet geen recht aan de maatschappelijke baten van opties zoals ZLT-U. Aanbevolen wordt een uitbreiding van het beoordelingskader, waarin naast financiële

criteria ook effecten op bijvoorbeeld elektriciteitsnetinvesteringen, milieukwaliteit (geluid, lucht, hitte) en sociale aspecten worden gewogen. Deze studie van CE Delft zet daartoe al een eerste stap door per warmtealternatief scores op maatschappelijke thema's te bepalen. De volgende stap is dat Rijk en gemeenten zo'n gestandaardiseerd kader gaan hanteren, bijvoorbeeld in de vorm van een mkba-light of multicriteria-analyse bij het opstellen van warmteprogramma's. Dit vereist ook het vastleggen van een heldere taxonomie: Wat verstaan we exact onder een ZLT-(U)-net? Welke elementen vallen binnen de systeemgrenzen? Etc., zodat iedereen over dezelfde definitie praat.

Voorbeeld en bewustwording vanuit de overheid

Beleidsmatige doorbraak vraagt om actieve steun en communicatie. Het Rijk kan richting geven door in de Wet collectieve warmte en uitvoeringsagenda's expliciet ruimte te scheppen voor innovatieve lagetemperatuurwarmtenetten. Denk aan experimenteerregelingen of een status als erkende oplossingsrichting in programma's zoals Programma Aardgasvrije Wijken (PAW). Gemeenten kunnen proactief kennis opdoen en delen over lopende initiatieven (zoals Heerlen, Eindhoven, etc.). Het aanwijzen van een Living Lab van een bestaand ZLT-U of een inrichten van een nieuw te ontwikkelen ZLT-U zorgt voor een tastbare ervaring. Voorlichting en het ervaren is cruciaal: veel lokale beslissers en bewoners kennen het concept niet goed. Door successen en lessen van pilots breed te communiceren, groeit het draagvlak. De Rijksoverheid en Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO) kunnen hierin faciliteren met handreikingen en kennisplatforms. Uiteindelijk leidt dit tot erkenning van ZLT-uitwisselnetten als volwaardig alternatief: een cultureel-mentale omslag bij beleidsmakers.

Aanpassingen in regelgeving en sturing

Naast zachte instrumenten (kennis, plannen) zijn mogelijk hardere maatregelen nodig om ZLT-netten een kans te geven. Bijvoorbeeld: in de wetgeving zou geborgd moeten worden dat warmtebedrijven of lokale energiecoöperaties de lagetemperatuur-uitwisselvariant kunnen exploiteren onder redelijke condities, bijvoorbeeld met flexibele tariefstructuren die zowel warmte als koude levering omvatten. Gemeenten krijgen via de nieuwe Wet gemeentelijke instrumenten warmtetransitie (Wgiw) ook meer sturingsmogelijkheden; zij zouden die kunnen inzetten in wijken waar ZLT-U kansrijk is, om dit scenario te bevorderen, bijvoorbeeld middels instrumenten uit de Omgevingswet (zoals door bij gebiedsontwikkeling voor te schrijven dat nieuwbouw voorbereidingskoudesets krijgt of dat in een bepaalde periode alleen een collectieve oplossing wordt uitgerold). Subsidies en financiële prikkels vanuit beleid zijn eveneens belangrijk (hier is overlap met de businesscase-discussie): de overheid kan middels subsidies voor innovatieve warmte-infrastructuur of via bijvoorbeeld Klimaatfonds-bijdragen de initiële drempel voor ZLT-projecten verlagen. Het inrichten van een Living Lab kan daarin een beleidskeuze zijn.

Verwachte resultaat van beleidsinterventies: ZLT-uitwisselnetten krijgen binnen enkele jaren een vaste plek in de gereedschapskist van warmte- en koudetechnieken bij overheden. Gemeenten benoemen deze route in hun programma's en zien de win-win-

mogelijkheden die de techniek biedt. Het gevolg is een stabiel beleidsklimaat: initiatiefnemers en marktpartijen voelen steun om in ZLT-U te investeren, omdat beleid en regelgeving dat faciliteren. Tegelijk worden maatschappelijke baten (zoals ontlasting van het stroomnet en gezondheidswinst door minder emissies) expliciet meegewogen, waardoor er politieke legitimatie ontstaat om, waar nodig, publiek bij te dragen aan de kosten. Dit alles creëert randvoorwaarden waarin ZLT-uitwisselnetten kunnen opschalen van niche naar mainstream.

C.1.4 Veranderingen in businesscase en financiering

Doelstelling: het ontwikkelen en exploiteren van ZLT-uitwisselnetten moet financieel aantrekkelijk en haalbaar worden voor betrokken partijen.

Dit vraagt om het wegnemen van financiële barrières en het introduceren van nieuwe waardecreatiemechanismen die recht doen aan de specifieke kenmerken van ZLT-U. Met andere woorden: de businesscase moet 'rond te rekenen' zijn, financieel én maatschappelijk, waarbij kosten en baten fair verdeeld zijn over stakeholders, en risico's beheersbaar.

Dekkingsbijdrage voor maatschappelijke baten

Uniek aan ZLT-uitwisselnetten is dat ze maatschappelijke meerwaarde leveren (bijvoorbeeld reductie van netcongestie, beter voor het milieu, comfort door koeling). In de huidige markt wordt dit niet of nauwelijks vergoed: de exploitant kan alleen warmte verkopen tegen reguliere tarieven. Om de businesscase positief te krijgen, is het wenselijk dat een deel van deze externe baten wordt verzilverd. Dit kan via overheidsbijdragen (bijvoorbeeld een kapitaalsubsidie of exploitatiesubsidie per aansluiting, gemotiveerd door CO₂- en NO_x-reductie en ontlasting van het elektriciteitsnet). Een ander model is dat netbeheerders of energiebedrijven die profiteren van ontlasting van hun systemen, mee-investeren in ZLT-uitwisselnetten. Bijvoorbeeld: als een ZLT-net een dure netverzwaring voorkomt, zou een deel van de uitgespaarde netinvestering kunnen worden doorgeschoven als bijdrage aan het warmteproject. Ook innovatieve financiële instrumenten, zoals impact-investing of leningen met zachte voorwaarden (via Invest-NL, Warmtefonds, etc.) kunnen helpen om de maatschappelijke baten nu al te kapitaliseren, zodat het project financieel rondkomt.

Risicovermindering en 'volloop' ondersteunen

Warmtenetten kampen vaak met een vollooprisico. In de eerste jaren zijn er onvoldoende aansluitingen om de kosten te dekken, waardoor de terugverdientijd lang is. Bij ZLT-U speelt dit ook, zij het dat individuele bewoners al (deels) warmte kunnen opwekken als het net nog niet volop benut wordt. Om dit risico te verkleinen, is overheidssteun cruciaal. Overheidssteun wordt in het algemeen al gegeven door investeringssubsidies en exploitatiesubsidies voor collectieve warmtenetten, maar vanwege de nieuwbouw zijn er extra risico's voor publieke en/of private warmtebedrijven. Gericht innovatiesubsidies of garantiestellingen met betrekking tot investering en exploitatie zijn daarnaast nodig om dit risico beter te ondervangen. Denk aan een deelneming of garantie in de beginfase: de overheid

draagt bij aan de voorinvestering in de infrastructuur en buffers die nodig zijn om buurten te koppelen. Daarmee worden de kapitaalkosten voor de marktpartij verlaagd, of risico's, die anders worden afgeprijsd, gemitigeerd. Ook kan men werken met een gefaseerd aansluitmodel: bewoners kunnen in etappes overschakelen, zolang de financiën zo zijn ingericht dat snelle instappers of de exploitant niet onevenredig de lasten dragen van de onderbezetting. Gemeenten kunnen bijvoorbeeld via een aansluitplicht (zodra een zeker dekkingspercentage is bereikt) of een afnamegarantie het vollooprisko beperken. Belangrijk is ook de split-incentive in de kosten te adresseren: de investeringen voor het koppelen van wijken en grote buffers komen upfront bij de netbeheerder, terwijl de voordelen (kleinere warmtepompen bij gebruikers, lagere stroomkosten) deels elders neerslaan. Hier moet een slimme kostenverdeel formule voor komen, bijvoorbeeld via een iets hoger dienstverleningstarief voor gebruikers (die immers individuele investeringen uitsparen) of publieke cofinanciering van de interwijkeninfrastructuur. Uiteindelijk moet gelden: de besparing op individuele apparatuur en energiegebruik door uitwisseling compenseert de extra netinvestering.

Nieuwe inkomstenstromen en flexibiliteitsmarkt

Een kenmerk van ZLT-uitwisselnetten is de mogelijkheid tot flexibel energieverbruik, waarbij warmte en koude gebufferd worden en elektrische aandrijving (warmtepompen) gestuurd worden naar daluren. Dit opent de deur naar extra inkomsten of kostenbesparingen. Ten eerste kunnen exploitanten besparen op inkoopkosten door elektriciteit te verbruiken op momenten van overschot en lage prijzen. Via slimme sturing (EMS, energy management system) is het denkbaar dat een ZLT-net vooral draait op goedkope, duurzame stroom ('s middags zon, 's nachts wind), waardoor de operationele kosten dalen. Ten tweede kan een net mogelijk deelnemen aan balanceringsmarkten en/of congestie-markten: doordat grote buffers als thermische batterij fungeren, zou een warmtebedrijf betaald kunnen krijgen voor het afnemen van stroom op piekmomenten of het terugschroeven van vraag in krapte (indirect via de gekoppelde elektriciteitsvraag van WP's). Voor dit soort verdienmodellen zijn wel erkenningen nodig, zoals de balancing service provider en congestion service provider en een goed functionerend EMS, maar het kan de businesscase duidelijk verbeteren. Daarnaast biedt een ZLT-net meerdere producten aan eindgebruikers: warmte én koeling. Dit kan vertaald worden naar een gecombineerde tariefstructuur waarbij voor comfortkoeling een aanvullende vergoeding voor verbruik gevraagd wordt; nu wordt er alleen vastrecht gerekend: een tariefstelling gebaseerd op werkelijke kosten van een airco. Omdat ZLT-U op veel maatschappelijke thema's gunstig scoort, zouden ook gebruikers bereid kunnen zijn iets meer te betalen voor een 'premium' oplossing die stiller, gezonder en duurzamer is, maar dit is wellicht beperkt.

Samenwerkings- en exploitatiemodellen

De traditionele warmtebedrijf-businesscase kan bij deze netten worden aangevuld met nieuwe samenwerkingsvormen. Bijvoorbeeld warmtegemeenschappen bestaande uit bewoners of bedrijven in een gebied, die samen investeren en de baten delen. Dit vergroot lokaal draagvlak en kan aanspraak maken op goedkopere financiering (leningen

via een coöperatief fonds, etc.). Een ander model is concessies waarbij gemeenten een aanbesteding uitzetten specifiek voor een ZLT-net-exploitatie, met duidelijke randvoorwaarden (bijvoorbeeld dat koudelevering verplicht onderdeel is en dat energietarieven dynamisch mogen zijn). Als verschillende partijen, van energiebedrijven tot installatiebranche, samenwerken, kunnen innovatieve contracten ontstaan, bijvoorbeeld ESCO-achtige constructies waar een partij de comfortgarantie levert aan gebruikers (verwarming en koeling tegen vaste prijzen) en intern optimaliseert met buffers en uitwisseling om winst te maken. Dergelijke modellen nemen end-userzorgen weg (ontzorging) en zorgen dat de partij die investeert ook profiteert van efficiëntieverbeteringen. Cruciaal is dat financiering tegen acceptabele rente beschikbaar komt, bijvoorbeeld via het Nationaal Warmtefonds of Invest-NL, omdat de terugverdientijd over 15-30 jaar gaat.

Verwachte resultaat van businesscase-interventies: Door ondersteuning vanuit beleid en slimme financiële arrangementen worden de voorinvesteringen dragelijk en is er perspectief op rendement voor initiatiefnemers. Dit leidt ertoe dat er de komende jaren een Living Lab en meerdere pilotprojecten van de grond komen waarin ZLT-uitwisselnetten worden aangelegd met financiële steun of risicoafdekking. Naarmate projecten slagen en opschaalen, zullen kosten dalen (leereffect, standaardisatie) en neemt de afhankelijkheid van subsidie af. Uiteindelijk ontstaat een situatie waarin een ZLT-U-net economisch concurrerend kan zijn met conventionele warmtenetten of individuele warmtepompen, zeker wanneer de maatschappelijke kosten (zoals netverzwaring bij all-electric scenario's) worden meegerekend. In zo'n situatie zullen marktpartijen bereid zijn uit eigen beweging in deze netten te investeren, waardoor het model zich duurzaam kan verspreiden.

C.1.5 Technische ontwikkelingen en innovaties

Doelstelling: het technisch mogelijk maken en vergemakkelijken van een brede uitrol van ZLT-uitwisselnetten.

Ontwikkelingen moeten gericht zijn op het verhogen van de prestaties, betrouwbaarheid en schaalbaarheid van deze netten, terwijl de kosten per aansluiting dalen. Innovatie is nodig op het niveau van apparatuur, opslag, aansturing én integratie met de gebouw-omgeving.

Verbetering van warmtepompen en componenten

In een ZLT-uitwisselnet werkt elke aangesloten woning of gebouw met een (water-water-) warmtepomp op variërende brontemperatuur, die in dienst staat van de prestatie van het gehele ZLT-uitwisselnet. Dit is een essentiële technologische vooruitgang. Concrete ontwikkelingen die nodig zijn: compacte, betaalbare water-waterwarmtepompen met een hoog rendement (COP) bij 15-25°C brontemperatuur, zodat zij efficiënt warmte kunnen leveren uit het net. Fabrikanten kunnen gestimuleerd worden om dergelijke 'vijfde-generatie ready'-warmtepompen te ontwikkelen, bijvoorbeeld via innovatieprogramma's. Ook de koelfunctie moet geïntegreerd en verbeterd worden, bij voorkeur levert één apparaat zowel verwarming als actieve koeling (voor piekzomeruren), eventueel met

natuurlijke koudemiddelen. Modulaire producten vanuit standaardisatie en industrialisatie moeten leiden tot het verlagen van de installatietijd en -kosten. Innovatie moet ertoe leiden dat de totale installatiekosten per woning dalen, wat direct de businesscase en adoptie ten goede komt.

Optimalisatie van opslag en uitwisseling

ZLT-U-systemen werken bij gratie van buffers en opslag (zowel voor korte termijn als seizoensopslag via wko). Technisch is winst te behalen met betere buffermogelijkheden: hoog-efficiënte wijkbuffertanks die warmte/koude over uren of dagen kunnen vasthouden, en verbeterde wko-technologie met hogere temperaturen en die daarmee hogere capaciteiten aankan zonder de balans in de ondergrond te verstoren. Ook thermochemische opslag of faseovergangsmaterialen zouden kunnen helpen om meer energie op te slaan in kleiner volume. Verder zal R&D moeten kijken naar de uitwisselbaarheid tussen verschillende wijken: hoe koppel je ZLT-U technisch aan elkaar? Denk aan slimme kleppen en leidingschakelingen of regionale lagetemperatuurnetten (backbone). Het streven is een technisch ontwerp waarbij overschotten in de ene wijk automatisch benut worden in de andere, eventueel ondersteund door automatisering. Meet- en regeltechniek is hier cruciaal: innovatieve sensoren en algoritmes die vraag en aanbod in real time balanceren, maximaliseren de uitwisseling. Ook hiervoor zijn al voorbeelden in werking (Heerlen Mijnwater heeft backbronstructuur met een intelligent managementsysteem). Investeren in dergelijke systemen en het delen van de opgedane kennis ervan zal de operationele efficiëntie en betrouwbaarheid van toekomstige netten vergroten.

Synergie met gebouwrenovatie en isolatie

Een aandachtspunt is dat ZLT-netten optimaal renderen in goed geïsoleerde gebouwen (lagetemperatuurafgifte). Technisch gezien moet dus de gebouwkant mee-ontwikkeld worden. Dit betekent dat huizen een lagetemperatuurverwarmingssysteem moeten hebben (vloerverwarming, LT-radiatoren) en voldoende isolatie, zodat een 20-30°C-bron via warmtepomp volstaat. Hier ligt een koppeling met renovatietechniek: opschaling van betaalbare isolatie en afgiftesystemen maakt meer gebouwen 'ZLT-ready'. Innovatie kan zitten in modulaire renovatiepakketten die een woning klaarstomen voor aansluiting op een laagtemperatuurnet. Ook kunnen hybride concepten dienen als tussenstap: bijvoorbeeld een combinatie van een ZLT-net (voor baseload en bereiding van warm tapwater) met een kleine bestaande gasketel voor de piek in oude woningen. Dit kan de overgangsfase vergemakkelijken. Het uiteindelijke doel is echter om zoveel mogelijk gebouwen geheel op elektriciteit/wko te laten draaien. Technisch moet ook worden nagedacht over aansluitstandaarden: uniformiteit in temperaturen, druk en regelsignalen, zodat apparatuur van verschillende leveranciers samen kan werken. Dit vermindert afhankelijkheid van één leverancier en stimuleert de markt van randapparatuur (buffers, pompen, warmtewisselaars) specifiek geoptimaliseerd voor ZLT-temperatuurgebied.

Digitale technologie en slimme sturing

Als 'hersenen' van het systeem is een geavanceerd, zelflerend energiebeheersysteem noodzakelijk. Innovatie op het vlak van ICT, datamodellen, algoritmes en besturing kan

zorgen dat elke component op het juiste moment opereert: warmtepompen individueel aangestuurd op laag tarief, kleppen die schakelen om warmte te transporteren als er ergens vraag is, etc. Dit zou idealiter gebeuren via een centraal platform dat zowel voorspellende sturing (weather forecasting, occupancy) als vraagrespons omvat. Ook gebruikersapplicaties (apps voor bewoners om instellingen te beheren of te zien hoeveel ze uitwisselen) kunnen bijdragen aan bewust gebruik. Cybersecurity en privacy horen hierbij in ogenschouw te worden genomen. Bovendien moeten er meetmethoden komen om uitwisseling eerlijk toe te rekenen – bijvoorbeeld als een kantoorpand ‘koude’ levert aan woningen, hoe wordt dit administratief verwerkt? Technisch betekent dit: energiemeters die zowel afname als levering kunnen registreren (tweerichtingsmeting in warmte, vergelijkbaar met slimme elektriciteitsmeters). Die gegevens zijn weer input voor innovatieve verrekenmodellen of zelfs lokale ‘energiegemeenschappen’ waar warmte- en koudecredits verhandeld worden. Hoewel dit futuristisch klinkt, past het in de trend van digitalisering en decentralisatie van energiesystemen.

Pilotprojecten en opschalingsplatforms

Innovatie komt het best tot wasdom via leren in de praktijk. Daarom is het nodig de komende jaren een Living Lab en een reeks pilot- en demonstratieprojecten uit te voeren in diverse contexten (stedelijke wijk, dorp, nieuwbouw, bestaande bouw) om technische en organisatorische lessen te trekken. Elk project zou vervolgens als Living Lab kunnen fungeren, waar bijvoorbeeld verschillende warmtepompconfiguraties vergeleken worden, of nieuwe opslag getest. Via een kennisplatform (bijvoorbeeld TKI Urban Energy of RVO projecten) kunnen de resultaten gedeeld worden, zodat er een best-practice-catalogus ontstaat. Standaardisatie kan volgen op succesvolle technieken: als bijvoorbeeld een bepaald type wijkbuffer in drie pilots goed presteert, kan dit de standaard worden. Schaalvergroting gaat de kosten drastisch omlaag brengen (denk aan kostendaling pv-panelen als analogie). Het doel is om rond 2030 ZLT-uitwisselnetten te hebben die zó beproefd zijn dat een gemeente of warmtebedrijf handelt uit een menukaart aan bewezen ontwerpen in plaats van steeds vanaf nul te beginnen.

Verwachte resultaat van technische innovaties: dankzij deze innovaties worden ZLT-netten steeds efficiënter en goedkoper. We voorzien een situatie waarin een standaard set aan componenten (leidingen, warmtepompen, buffers) beschikbaar is voor ontwikkelaars, met bekende prestatiecijfers en garantie op prestaties. Slimme sturing zorgt ervoor dat de exploitatiekosten (met name elektriciteitsverbruik) laag blijven, en dat aan comforteisen van gebruikers wordt voldaan (altijd warmte en koude naar behoefte). Door de verbeteringen kan het systeem zich aanpassen aan uiteenlopende situaties: van dichtbebouwde stedelijke gebieden met hoge gelijktijdige koel- en warmtevraag tot meer residentiële wijken. Het zoeken naar bronnen die vanuit koelprocessen over restwarmte beschikken, vaak op bedrijventerreinen en in winkelcentra, moet een van de eerste stappen zijn bij het verkennen van ZLT-U-mogelijkheden.

De betrouwbaarheid wordt aangetoond (continuïteit van levering, zelfs bij extreme kou of hitte) en eventuele kinderziekten zijn eruit, wat vertrouwen wekt bij afnemers. Bovendien

dalen de benodigde vermogens: doordat bijvoorbeeld 30-50% van de warmte via uitwisseling komt, hoef je minder bronnen en pompvermogen te installeren. Daarmee neemt ook de milieu-impact verder af. In het ideale geval ontstaat een positieve spiraal: technische verbetering → lagere kosten → meer uitrol → verdere leereffecten → nog lagere kosten, etc. Dit pad hebben andere duurzame technologieën al bewandeld; voor vijfde-generatie-warmte- en koudenetten is dat nu ook binnen bereik.

C.1.6 Beleidsaanbevelingen voor ZLT-uitwisselnetten

Op basis van de voorgaande paragrafen volgen hieronder concrete aanbevelingen voor beleidsmakers. Deze aanbevelingen moeten ervoor zorgen dat ZLT-uitwisselnetten een volwaardige rol kunnen spelen in de warmtetransitie. Ze richten zich op beleid en regelgeving en zijn bedoeld om direct uitvoerbaar te zijn.

Neem ZLT-uitwisselnetten op in beleid en planning

Zorg dat zeerlagetemperatuur-uitwisselnetten expliciet worden meegenomen in zowel nationaal, regionaal als lokaal warmtebeleid. Concreet: laat gemeenten in hun warmteprogramma en wijkuitvoeringsplannen de ZLT-variant als alternatief analyseren en beschrijven. Op rijksniveau dient men energie- en klimaatscenario's (bijvoorbeeld PBL-analyses) en modellen (zoals Vesta-MAIS) uit te breiden, zodat koudevraag en ZLT-uitwisseling worden meegerekend. Dit verhoogt de zichtbaarheid van ZLT-uitwisselnetten als volwaardige 'vierde route' naast all-electric, hybride en conventionele warmtenetten, en geeft beleidsmakers de informatie om gefundeerde afwegingen te maken.

Ontwikkel een gestandaardiseerd evaluatiekader (MKBA+) voor warmteopties

Stel een breed afwegingskader op waarmee gemeenten en Rijksoverheid warmtealternatieven eerlijk kunnen vergelijken op maatschappelijke kosten en baten. Breid de huidige focus op eindgebruikerskosten uit met criteria zoals impact op het elektriciteitsnet (bijvoorbeeld vermeden netverzwaring), milieueffecten (geluid, luchtkwaliteit, hittebestendigheid) en sociaal welzijn (comfort door koeling, energiezekerheid). Dit MKBA+-kader moet als standaard gaan dienen bij besluiten in de warmtetransitie, bijvoorbeeld als verplichte toets in wijkuitvoeringsplannen of bij het toekennen van subsidies. Werk hiervoor ook een heldere taxonomie/definitie uit van wat onder een ZLT-uitwisselnet wordt verstaan, zodat alle partijen met dezelfde begrippen werken. Door een gestandaardiseerd evaluatiekader te hanteren, worden de meerwaarden van ZLT-netten zichtbaar en meegewogen in besluitvorming, wat hun acceptatie vergroot.

Veranker ZLT-uitwisselnetten in wet- en regelgeving, met aandacht voor regionale aanpak

Pas de regelgeving aan om innovatieve lagetemperatuurnetten expliciet te faciliteren. In de nieuwe Wet collectieve warmte (Warmtewet) moet ruimte worden geboden aan warmtenetten die zowel warmte als koude leveren; sta flexibele tariefstructuren toe, waarbij exploitanten beide diensten kunnen doorberekenen. Dit vergt mogelijk een

afwijking van traditionele tariefregulering, maar is nodig om de unieke eigenschappen van ZLT-U-netten te honoreren. Via de Wet gemeentelijke instrumenten warmtetransitie (Wgiw) krijgen gemeenten extra sturingsmogelijkheden. Stimuleer dat zij deze inzetten om ZLT-U-netten – waar kansrijk – te bevorderen. Bijvoorbeeld door bij nieuwe gebiedsontwikkelingen aansluitingen of voorkeursbesluiten te formuleren die laagtemperatuur-uitwisseling bevoordelen. Duidelijke wettelijke kaders en rolverdeling verlagen de onzekerheid voor initiatiefnemers en zorgen dat ZLT-uitwisselnetten op een gelijkwaardige manier kunnen opereren als andere warmteoplossingen.

Faciliteer pilotprojecten en actieve kennisdeling

Trek als overheid bewust de kar om ZLT-uitwisselnetten uit de niche te halen via praktijkproeven. Richt een experimenteerprogramma in (bijvoorbeeld via een bepaling in de warmtewet of een innovatieprogramma van RVO) om enkele pilotwijken met ZLT-U-netten te ondersteunen. Verleen tijdelijke ontheffingen of extra ondersteuning aan deze pilots, zodat geleerde lessen snel duidelijk worden. Neem ZLT-uitwisselnetten op als inzendingscategorie in bestaande programma's (zoals voorheen Programma Aardgasvrije Wijken) en toekomstige regelingen voor aardgasvrije innovaties. Daarnaast is kennisverspreiding cruciaal: zorg voor centrale kennisplatforms (bijvoorbeeld via RVO of de Topsector Energie), waar resultaten, businesscases en technische details van pilotprojecten worden gedeeld. Organiseer ook bewustwordingscampagnes en workshops voor gemeentelijke beleidsmakers, zodat successen (en uitdagingen) van ZLT-uitwisseling breed bekend raken. Deze aanpak versnelt de leercurve en bouwt draagvlak: na een paar geslaagde voorbeelden zal de aarzeling bij andere gemeenten en warmtebedrijven verminderen en ontstaat er een sneeuwbaaleffect richting bredere toepassing.

Stel gerichte financiële prikkels en ondersteuning beschikbaar

Ondersteun de businesscase van ZLT-uitwisselnetten vanuit beleid om de initiële drempels te verlagen. Reserveer bijvoorbeeld middelen uit het Klimaatfonds of andere overheidsbudgetten voor een investeringssubsidie op de infrastructuur van ZLT-uitwisselnetten. Dit kan in de vorm van een eenmalige kapitaalbijdrage per aansluiting of cofinanciering van gemeenschappelijke voorzieningen (zoals wijkbuffers of koppelleidingen tussen wijken). Ook exploitatiesteun in de opstartfase (bijvoorbeeld een tijdelijk verschil tussen kostprijs en opbrengst compenseren, analoog aan de SDE++ voor hernieuwbare elektriciteit) kan helpen om het volloopprijsco te verkleinen. Verder is het aan te bevelen om maatschappelijke baten te monetariseren: als een ZLT-U-net aantoonbaar investeringen in het elektriciteitsnet voorkomt of hitte-overlast vermindert, zou daarvoor een vergoeding richting de exploitant kunnen gaan (denk aan een bijdrage van de netbeheerder of via een gemeentelijk klimaatadaptatiefonds). Ten slotte, zorg voor laagdrempelige leningen of garanties voor ZLT-projecten (via bijvoorbeeld het Nationaal Warmtefonds of Invest-NL) zodat financiers vertrouwen krijgen. Door deze financiële prikkels wordt de meerwaarde voor de samenleving van ZLT-uitwisselnetten omgezet in concrete steun, en wordt het voor marktpartijen rendabeler om in deze nieuwe infrastructuur te stappen.

Deze aanbevelingen samen bieden een integrale beleidsaanpak: van strategische verankering in plannen en rekenmodellen, tot praktisch wettelijk mogelijk maken, tot het wegnemen van financiële obstakels en kennishiaten. Iedere aanbeveling versterkt de andere. Zo zullen subsidies, Living Labs en pilots meer effect hebben als er ook een passend wettelijk kader is, en omgekeerd zal regelgeving beter werken als er al succesvolle voorbeelden (pilots) en een helder evaluatiekader zijn. Door als beleidsmaker deze acties op te pakken, worden de condities gecreëerd waaronder ZLT-uitwisselnetten kunnen opschalen van een veelbelovende optie naar een mainstream onderdeel van de warmtetransitie. Het uiteindelijke doel is dat zeerlagetemperatuur-uitwisselnetten een vanzelfsprekende keuze worden waar ze technisch en economisch passen. Wat de energietransitie in gebouwde omgeving versnelt en duurzamer én betaalbaarder maakt.

C.1.7 Conclusie: van Theory of Change naar realiteit

In deze Theory of Change is uiteengezet welke veranderingen nodig zijn om ZLT-uitwisselnetten uit de theoretische mogelijkhedenhoek te halen en op te schalen tot een gangbare praktijk in Nederland. Samenvattend moeten beleidsmakers de condities scheppen (erkenning, kaders, steun), financiers en uitvoerders moeten nieuwe businessmodellen omarmen (gedeelde baten, nieuwe inkomsten) en technici/innovatoren moeten de oplossingen verder perfectioneren (slimmere, goedkopere technologie). Het bereiken van de einddoelstelling (een volwaardige rol voor ZLT-uitwisselnetten in de warmtetransitie) is haalbaar als deze randvoorwaarden stapsgewijs worden ingevuld.

Belangrijk is dat alle betrokken stakeholders de gezamenlijke voordelen inzien: ZLT-uitwisselnetten dragen bij aan klimaatdoelen (CO₂-reductie door efficiëntie en uitwisseling), aan energiebesparing en betaalbaarheid (lagere systeemkosten op lange termijn) en aan comfort en leefbaarheid (voorzien in koeling, minder geluidshinder, etc.). Daarmee passen ze naadloos in de bredere doelstellingen van een duurzame én rechtvaardige energietransitie.

De geschetste Theory of Change is geen eindpunt, maar een levend proces: tijdens de uitvoering moeten we leren en bijsturen. Als bepaalde aannames niet uitkomen (bijvoorbeeld: mocht de technologie trager verbeteren dan voorzien, of beleidsprioriteiten verschuiven), dan moeten de strategieën worden aangepast. Flexibiliteit en samenwerking staan centraal. Overheidsinstanties, onderzoeksinstellingen, bedrijven en burgerinitiatieven moeten de handen ineenslaan om deze vierde route te realiseren.

Door nu te investeren in de genoemde veranderstrategieën, kan over enkele jaren blijken dat ZLT-uitwisselnetten daadwerkelijk die gewenste 'missing link' in de warmtetransitie zijn geworden. Het eindbeeld is een energiesysteem voor de gebouwde omgeving waarin collectieve lagetemperatuurnetten met uitwisseling een substantieel aandeel hebben in het aardgasvrij maken van wijken, naast all-electric oplossingen en hogertemperatuurwarmtenetten. Dit multipath-systeem is robuuster en efficiënter, omdat voor elke situatie de best passende route ingezet kan worden.

Literatuur

- ACM & Consuwijzer. (2025). *Maximale warmtetarieven*.
www.consuwijzer.nl/stadsverwarming-en-blokverwarming/warmtetarieven
- Allen, L., Lindberg, F. & Grimmond, C.S.B. (2010). Global to city scale urban anthropogenic heat flux: Model and variability. *International Journal of Climatology*, 2011(13), 1990-2005.
www.doi.org/10.1002/joc.2210
- Boesten, S., Ivens, W., Dekker, S.C. & Eijndems, H. (2019). 5th generation district heating and cooling systems as a solution for renewable urban thermal energy supply [Article].
Advances in Geosciences, 2019, 129-136. www.doi.org/10.5194/adgeo-49-129-2019
- CAS & Hogeschool van Amsterdam. (lopend). *Wijktypekaart*.
www.klimaat-effectatlas.nl/nl/wijktypologie
- CE Delft. (2010). *Handboek schaduwprizen: Waardering en weging van emissies en milieueffecten*.
- CE Delft. (2021). *Warmtetechnieken*.
- CE Delft. (2023a). *Beleid voor grootschalige batterijen en opweknetcongestie*.
- CE Delft. (2023b). *The heat pump market in europe - mapping the heat pump value chain and assessment of the manufacturing capacity in eu*.
- CE Delft. (2025). *Investerings- en netimpact van de warmtetransitie - provincie noord-holland*.
- Dang, L.M., Nguyen, L.Q., Nam, J., Nguyen, T.N., Lee, S., Song, H.-K. & Moon, H. (2024). Fifth generation district heating and cooling: A comprehensive survey. *Energy Reports*, 2024, 1723-1741. www.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.01.037
- DNE Research. (2025). *Nationaal warmtepomp trendrapport*.
- Lygnerud, K., Fransson, N., Särnbratt, M., Motoasca, E., Neven, T., Vanschoenwinkel, J., Pastor, C., Gabaldón, A. & Belda, A. (2023). District energy viewed from the new bauhaus initiative perspective - sustainable, inclusive and aesthetic heat. *Buildings*, 2023(12), 2930. www.doi.org/https://doi.org/10.3390/buildings13122930
- McGregor, G., Bone, A. & Pappenberger, F. (2017). Meteorological risk: Extreme temperatures. In (pp. 257-335). Disaster Risk Management Knowledge Centre (DRMKC).
www.drmkc.jrc.ec.europa.eu/portals/0/Knowledge/ScienceforDRM/ch03_s03/ch03_s03_subch0308.pdf
- Ministerie van VRO. (2023). *Brief over verduurzaming van de gebouwde omgeving*.
www.warmtetransitiemakers.nl/wp-content/uploads/2023/11/2307_GetekendebriefVerduurzamingvandegebouwdeomgeving_groengas_uit_TVW.pdf
- Netbeheer Nederland. (2019). *Basisinformatie over energie-infrastructuur: Opgesteld voor de regionale energie strategieën*.
[www.netbeheernederland.nl/upload/Files/Basisdocument over energie-infrastructuur_143.pdf](http://www.netbeheernederland.nl/upload/Files/Basisdocument%20over%20energie-infrastructuur_143.pdf)
- PBL. (2024). *Klimaat- en energieverkenning 2024*.
- PBL. (2025a). *Actualisatie startanalyse aardgasvrije buurten 2025*.
- PBL. (2025b). *Klimaat- en energieverkenning (kev) 2025*.
- Salamanca, F., Georgescu, M., Mahalov, A., Moustauoui, M. & Wang, M. (2014). Anthropogenic heating of the urban environment due to air conditioning. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014(10), 5757-6277. www.doi.org/10.1002/2013JD021225

- Staatstoezicht op de Mijnen. (2024). *Onderzoek naar de invloed van geothermie op aardbevingen*. www.sodm.nl/actueel/nieuws/2024/01/11/onderzoek-naar-de-invloed-van-geothermie-op-aardbevingen
- Taselaar, F. (2019). *Inleiding kabels & leidingen*.
- Viguié, V., Lemonsu, A., Hallegatte, S., Beaulant, A., Marchadier, C., Masson, V., Pigeon, G. & Salagnac, J. (2020). Early adaptation to heat waves and future reduction of air-conditioning energy use in paris. *Environmental Research Letters*, 2020(7). www.doi.org/10.1088/1748-9326/ab6a24.
- WarmingUp. (2022). *Handvatten voor de inpassing van warmtenetten in de ondergrond. Project 6c*.
- Willemse, A. & Steeneveld, G.J. (2021). *Cooling systems can increase city temperatures during extreme heat events*.