

Restwarmte uit elektrolyse

TNO 2024 P10465 – 14 juni 2024

Restwarmte uit elektrolyse

Auteurs

S. Lamboo, L. Eblé, M. Weeda

Rubricering rapport

TNO Publiek

Opdrachtgever

Ministerie van Economische Zaken en Klimaat (EZK)

Projectnaam

Restwarmte uit elektrolyse

Dit project is gefinancierd als onderdeel van het onderzoeksprogramma Energietransitie Studies onder regie van de directie Klimaat van het DG Energie en Klimaat van het ministerie van EZK met als doel het leveren van kennis voor energiebeleid.

Alle rechten voorbehouden

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

© 2024 TNO

Samenvatting

Aanleiding

De overheid heeft doelen geformuleerd om rond 2030/2032 4-8 GW aan elektrolysecapaciteit te bouwen. Bij elektrolyse komt er naast waterstof ook warmte vrij. Deze restwarmte kan elders gebruikt worden, bijvoorbeeld via warmtenetten die warmte leveren aan nabijgelegen industrie, woningen, gebouwen of glastuinbouw. Dit onderzoek is gestart met als doel kennis over restwarmte uit elektrolyse op te bouwen voor het ontwikkelen van energiebeleid gericht op zowel elektrolyse, als restwarmtebenutting.

Onderzoeksvraag

Op verzoek van het Ministerie van EZK hebben wij deze studie uitgevoerd met als doel om de volgende onderzoeksvraag te kunnen beantwoorden: *‘In welke mate is de benutting van restwarmte uit elektrolyse techno-economisch interessant voor warmtebedrijven, en in hoeverre is het (met oog op ruimtelijke, bedrijfseconomische, organisatorische en juridische aspecten) wenselijk om hiervoor aanvullende eisen te stellen aan elektrolyseprojecten die de komende jaren worden uitgerold?’*

Methode

De studie bouwt voort op TNO kennis over elektrolyzers en warmtenetten. Voor de studie is verder een literatuuronderzoek gedaan en zijn er 10 interviews gehouden met onder meer warmtebedrijven en elektrolyse projectontwikkelaars. Ook zijn er aanvullende analyses uitgevoerd, zoals de verwachte warmteproductie van een elektrolyser verbonden aan wind op zee, hoeveel warmte aan warmtenetten geleverd kan worden op basis van een seizoensprofiel van de warmtevraag en een vergelijking met restwarmte uit andere industriële bronnen.

In deze samenvatting presenteren we eerst de conclusies en aanbevelingen en daarna bespreken we de belangrijkste resultaten van het onderzoek.

Conclusies

Op basis van deze studie constateren wij dat er nog veel onzekerheden zijn, waardoor de onderzoeksvraag niet hard te beantwoorden is. Uit de resultaten van dit onderzoek trekken we de volgende conclusies over de twee delen van de onderzoeksvraag:

1. *In hoeverre is restwarmte uit elektrolyse techno-economisch interessant voor warmtebedrijven?*
 - a. De kosten en opbrengsten van restwarmte projecten zijn sterk afhankelijk van project-specifieke omstandigheden, zoals de gevraagde temperatuur en de afstand tot de warmtevraag. Aangezien er nog veel onzekerheden zijn over o.a. de warmtevraag, de gewenste temperatuur, infrastructuur en de locatie van elektrolyzers (waarbij de aansluiting op het hoogspanningsnet en waterstofinfrastructuur ook belangrijke factoren zijn), is er op dit moment niet in algemene zin te concluderen of restwarmte uit elektrolyse techno-economisch interessant is voor warmtebedrijven.
 - b. Ten opzichte van andere industriële restwarmtebronnen heeft restwarmte uit elektrolyse voordelen (lage aanpassings- en uitkoppelkosten en zekerheid over beschikbaarheid op langere termijn) en nadelen (geen continu profiel en een relatief lage temperatuur). Ook hier geldt dat er door de project-specifieke omstandigheden geen algemene conclusies te trekken zijn over de techno-economische aantrekkelijkheid voor warmtebedrijven.

2. *In hoeverre is het wenselijk om aanvullende eisen te stellen aan elektrolyseprojecten die de komende jaren ontwikkeld worden?*
- Het is wenselijk om bij het ontwerpen en de bouw van elektrolyseprojecten al rekening te houden met de uitkoppeling van restwarmte. De kosten die tijdens de bouw gemaakt moeten worden lijken zeer beperkt. De kosten om op een later tijdstip aanpassingen te maken aan de elektrolyser pakken naar verwachting hoger uit.
 - De hoeveelheid (rest)warmte die vrijkomt bij elektrolyse is significant en zou een substantiële toevoeging kunnen zijn aan het totale warmteaanbod. Door onzekerheden over o.a. de warmtevraag, de toekomstige locaties van elektrolyzers en de ontwikkeling van warmteinfrastructuur, is het niet duidelijk welk deel van de vrijkomende warmte benut zal gaan worden. Hierdoor zullen er, indien er geëist wordt dat alle elektrolyzers restwarmte-klaar gebouwd worden, investeringen gedaan worden voor projecten die uiteindelijk nooit warmte gaan leveren (verzonken kosten). Doordat het niet duidelijk is hoeveel warmte er benut kan worden is niet eenduidig te concluderen of het proportioneel of wenselijk is om additionele eisen te stellen aan alle elektrolyseprojecten. Een integrale afweging van de kosten, baten en de risico's op verzonken kosten dient gemaakt te worden.

Aanbevelingen

Op basis van dit onderzoek komen we tot de volgende aanbevelingen:

- Weeg de vele onzekerheden rondom de benutting van warmte mee bij besluitvorming over additionele eisen om elektrolyzers restwarmte-klaar te ontwerpen en bouwen.
- Zorg voor kennisuitwisseling om meer (kwantitatief) inzicht te verkrijgen over de mogelijkheden voor de uitkoppeling van restwarmte uit elektrolyse en de kosten daarvan.
- Neem de mogelijkheden voor restwarmtebenutting mee in de overweging van de locatiekeuze voor elektrolyse. Omdat andere factoren zoals aanlanding wind op zee, aansluiting op het hoogspanningsnet en waterstofinfrastructuur ook een rol spelen bij de locatiekeuze voor elektrolyse, is een afweging tussen die factoren van belang en kan restwarmtebenutting niet een harde eis zijn.

Resultaten

Hieronder bespreken we de belangrijkste resultaten van het onderzoek.

Jaarlijks ongeveer 20-40 PJ restwarmte bij 4-8 GW elektrolyzers

Als gevolg van elektrische weerstand en onomkeerbare chemische reacties komt bij elektrolyse een deel van de ingevoerde elektriciteit vrij als warmte. Om de temperatuur van de elektrolyser constant te houden moet de vrijkomende warmte weggekoeld worden. De temperatuur, waarop de warmte vrijkomt verschilt per type elektrolyser. Bij alkaline elektrolyzers is dat een maximale gemiddelde temperatuur van 75°C en bij PEM elektrolyzers maximaal gemiddeld 60°C. De efficiëntie van een elektrolyser is non-lineair en hangt af van het productieprofiel van de elektrolyser. Het productieprofiel hangt op zijn beurt weer af van de elektriciteitsbron en de dimensionering van de elektrolyser ten opzichte van deze bron. Bij een elektrolyser gekoppeld aan een wind-op-zee-park met 120% van de capaciteit van de elektrolyser komt maximaal 31% van de capaciteit van de elektrolyser vrij als warmte en, naar schatting, gedurende een jaar gemiddeld rond de 15%. Uitgaande van gemiddelde warmteproductie van 15% van het vermogen komt er jaarlijks ongeveer 20-40 PJ aan restwarmte vrij bij 4-8 GW elektrolyzers. Dit is een theoretische inschatting op basis van één configuratie. De werkelijke warmteproductie hangt van meerdere factoren af. Daarnaast is het onzeker welk deel van deze warmte uitgekoppeld kan worden.

Meerkosten voorbereiding uitkoppeling restwarmte beperkt

De kosten voor de benodigde aanpassingen aan een elektrolyser om de restwarmte uit te koppelen zijn momenteel onzeker. Voor een 2,5 MW PEM elektrolyser zijn de kosten ingeschat op 5,5 €/kW voor de benodigde aanpassingen aan het koelcircuit. Dit zijn de minimale kosten die gemaakt moeten worden om de elektrolyser zo te bouwen dat de restwarmte op een later moment uitgekoppeld kan worden. Hier komen nog kosten voor elektronica, pijpleidingen, warmtewisselaars en pompen bij (63,7 €/kW) om de warmte uit te koppelen naar een directe eindgebruiker of een warmtenet. Deze investeringen kunnen op een later moment gedaan worden, bijvoorbeeld wanneer een afnemer van de warmte zich meldt.

Voor 4-8 GW elektrolyse komen de totale aanpassingskosten aan de elektrolyser uit op €270-540 miljoen, waarvan €22-44 miljoen voor de kosten die in ieder geval gemaakt moeten worden om de elektrolyser restwarmte-klaar te bouwen. Hier is geen rekening gehouden met schaling omdat hier niet voldoende informatie voor beschikbaar is. Kwalitatieve inschattingen vanuit de interviews bevestigen wel het beeld dat de meerkosten voor aanpassingen aan de elektrolyser beperkt zijn vergeleken met de initiële investeringskosten voor elektrolyseprojecten (2000-3000 €/kW).

De aanpassingen voor uitkoppeling van warmte op een later tijdstip pakt naar verwachting duurder uit dan de installatie direct uitkoppeling-klaar te bouwen. In dat geval komen er extra uitkoppelkosten bij om ruimte vrij te maken voor de uitkoppeling en kunnen er gederfde inkomsten zijn door het stilzetten van de elektrolyser. Met name de gederfde inkomsten van waterstofproductie kunnen flink oplopen. Kwantitatieve inschattingen van de uitkoppelkosten bij een gerealiseerde elektrolyser zijn momenteel onbekend.

De hoeveelheid (rest)warmte die vrijkomt bij elektrolyse is significant en zou een substantiële toevoeging kunnen zijn aan het totale warmteaanbod

Bij de 4-8 GW elektrolysecapaciteit uit de Nederlandse doelen voor 2030/2032 komt jaarlijks ordegrrootte 20-40 PJ aan (rest)warmte vrij. De totale warmtevraag van huishoudens, de dienstensector en de glastuinbouw is in 2030 ongeveer 410 PJ per jaar, waarvan volgens de prognose van de KEV 2023 30-35 PJ geleverd zal worden via warmtenetten.

Niet alle restwarmte van elektrolysers zal in 2030/2032 al uit te koppelen zijn. Op basis van het vraagprofiel van de glastuinbouw of de gebouwde omgeving, waarin er in de zomer nagenoeg geen warmte geleverd wordt, schatten we in dat er van de 20-40 PJ restwarmte die geproduceerd wordt door 4-8 GW aan elektrolysers maximaal 14-28 PJ gekoppeld kan worden aan warmtevraag in deze sectoren. Verder kan er ook warmte geleverd worden aan de industrie. De warmtevraag in de industrie is vaak continu en heeft daardoor geen of een beperkt seizoenseffect. De industrie vraagt echter vaak een hogere temperatuur.

Ook als er maar een deel van de restwarmte uit elektrolyse uitgekoppeld kan worden, kan er dus een significante bijdrage geleverd worden aan de invulling van de warmtevraag. Deze bijdrage kan verder toenemen gedurende de periode dat deze 4-8 GW elektrolysers operationeel zijn en de collectieve warmte-infrastructuur verder uitgebreid wordt. Het Nationaal Plan Energiesysteem voorziet een stijging naar 150 PJ warmtelevering via warmtenetten in 2050.

Er zijn echter veel onzekerheden, waardoor het niet duidelijk is welk deel van de vrijkomende warmte benut kan worden

Onzekerheden zijn onder andere de warmtevraag, de toekomstige locaties van elektrolyzers, de afstand tot de warmtevraag, de gewenste temperatuur, de tijdspaden en de infrastructuur. Een deel van deze onzekerheden is niet uniek voor restwarmte uit elektrolyse, maar geldt ook voor benutting van andere (rest)warmtebronnen. Zo zijn de ontwikkeling van de benodigde warmte-infrastructuur en onzekerheden rondom het rondkrijgen van een positieve business case relevante barrières voor vrijwel alle warmteprojecten. Door de onzekerheid zullen er, als er geëist wordt dat alle elektrolyzers bij ontwerp en de bouw klaargemaakt worden voor de uitkoppeling van restwarmte, investeringen moeten worden gedaan door partijen die uiteindelijk nooit aansluiten op een warmtenet.

Temperatuurniveau restwarmte maakt inzet warmtepomp mogelijk nodig

De warmte uit alkaline elektrolyzers komt vrij met maximaal gemiddeld 75°C en kan direct ingezet worden in middentemperatuur warmtenetten en naar verwachting ook in de glastuinbouw. De business case hangt in dit geval met name af van het beschikbare vermogen, het gevraagde vermogen en de afstand tot de warmtevraag. Voor restwarmte uit PEM elektrolyzers is naar verwachting een warmtepomp nodig omdat de warmte vrijkomt op maximaal 60°C. Voor bestaande hoge temperatuur warmtenetten (90 – 120°C) en voor transportleidingen met een hogere invoertemperatuur zal ongeacht de elektrolysetechnologie een warmtepomp nodig zijn. De additionele kosten voor de warmtepomp maken het realiseren van een sluitende business case lastiger. De ontwikkeling van nieuwe lage temperatuur warmtenetten kan kansen bieden voor het direct gebruik van restwarmte uit elektrolyse. Over de ontwikkeling van deze warmtenetten en de snelheid waarop deze uitgerold kunnen worden zijn verschillende opvattingen, waardoor de invloed op de toepassing van restwarmte uit elektrolyse nog niet te duiden is.

Locatie elektrolyser meestal niet nabij bestaande warmtenetten

Onze analyse wijst uit dat de voorkeursgebieden voor grootschalige elektrolyse (>100 MW) in de industrieclusters, met uitzondering van twee projecten in Amsterdam (600 MW), niet dicht bij bestaande warmtenetten liggen. Het bestaande warmtenet in Amsterdam is een hoge temperatuur warmtenet (90 – 120°C), waardoor er naar verwachting ook een warmtepomp nodig zal zijn, ongeacht het type elektrolyser dat gebruikt wordt. Voor de overige elektrolyseprojecten is er ontwikkeling van nieuwe warmte-infrastructuur nodig. Daarbij liggen de exacte locaties van de meeste elektrolyseprojecten ook nog niet vast. Verder is van de meeste projecten het type elektrolyser en dus ook de kwaliteit van de warmte nog niet bekend. In interviews hebben warmtebedrijven aangegeven dat het ontwikkelen van nieuwe warmte-infrastructuur ruim 10 jaar in beslag kan nemen. De ontwikkeling van nieuwe warmtenetten kunnen daarmee naar verwachting qua planning niet direct aangesloten worden op de 8 GW elektrolyse die beoogd wordt voor 2032. De verschillende tijdspaden en afhankelijkheid van andere partijen zorgen voor additionele complexiteit voor restwarmteprojecten. Op langere termijn kan er als er meer warmte-infrastructuur gebouwd is, ook in combinatie met andere warmtebronnen, mogelijk meer van de restwarmte uit elektrolyse ingevoerd worden in warmtenetten.

Vergelijking restwarmte uit elektrolyse met restwarmte industriële restwarmtebronnen

De voordelen van restwarmte uit elektrolyse zijn de relatief lage kosten voor uitkoppeling en de hogere zekerheid op langere termijn over de beschikbaarheid van restwarmte vergeleken met andere restwarmtebronnen. Het is onzeker hoe de industrie in Nederland zich de komende jaren gaat ontwikkelen. Door afname in productie of verschuiving van industriële processen kan de beschikbare restwarmte uit andere industriële bronnen verminderen.

Nadelen van restwarmte uit elektrolyse vergeleken met andere industriële restwarmtebronnen zijn: temperatuur en onregelmatig profiel. De temperatuur van industriële restwarmtebronnen ligt tussen de 25 en 200°C, met een concentratie binnen een bandbreedte van 70-90°C. Met 60-75°C ligt restwarmte uit elektrolyse aan de onderkant van deze bandbreedte of zelfs daaronder. Een deel van de restwarmte uit de industrie kan dus ingezet worden in hoge temperatuur warmtenetten of transportleidingen op hogere temperatuur, terwijl daar voor restwarmte uit elektrolyse een warmtepomp voor nodig zou zijn. De warmtepomp verslechtert de business case voor het gebruik van restwarmte significant. Dit nadeel is er niet als de restwarmte op lage (<50°C) of middentemperatuur warmtenetten (50-70°) ingevoed kan worden zonder het gebruik van een warmtepomp.

Van restwarmte uit de industrie wordt doorgaans aangenomen dat het continu beschikbaar is, wat een tweede voordeel is ten opzichte van restwarmte uit elektrolyse, waarvan de beschikbaarheid gekoppeld is aan het productieprofiel van de elektrolyzers. Het productieprofiel wordt onder meer beïnvloed door de hernieuwbare energiebronnen, dimensionering ten opzichte van de energiebronnen en/of het gebruiken van netstroom. Ook zal de marktprijs van elektriciteit en waterstof bepalen wanneer waterstof tegen concurrerende kosten door middel van elektrolyse kan worden geproduceerd, wat ook een grote invloed kan hebben op de exploitatie van de elektrolyser. Om een stabiel profiel te krijgen kan er gewerkt worden met warmtebuffers, wat wel een effect zal hebben op de business case voor exploitatie van restwarmte uit elektrolyse.

Inhoudsopgave

Samenvatting	3
Inhoudsopgave	8
1 Inleiding	9
2 Uitkoppeling van restwarmte uit elektrolyse	11
2.1 Warmteproductie elektrolyzers.....	11
2.2 Meerkosten voor uitkoppeling restwarmte elektrolyse.....	13
3 Toepassingen van restwarmte uit elektrolyse	15
3.1 Warmtevraag	15
3.2 Toepassing van restwarmte uit elektrolyse.....	18
3.3 Vergelijk met andere restwarmtebronnen	26
4 Conclusies en aanbevelingen	31
4.1 Conclusies.....	31
4.2 Aanbevelingen.....	35
Referenties	37
Bijlage	
Bijlage A: Overzicht partijen interviews	40

1 Inleiding

Aanleiding

De komende decennia wordt de waterstofproductie uit elektrolyse significant opgeschaald. De Nederlandse doelen zijn opschaling naar 4 GW elektrolysecapaciteit in 2030 en 8 GW in 2032. Naast waterstof komt er bij elektrolyse ook significante hoeveelheden restwarmte vrij. Dit maakt elektrolyse een potentieel interessante bron om een bijdrage te leveren aan een duurzame warmtebronnenmix. De warmte die vrijkomt via het koelsysteem van de elektrolyser kan uitgekoppeld worden naar een warmte overdrachtsstation (WOS) en geleverd worden aan een nabijgelegen (industriële) afnemer of aan een warmtenet. Een warmtebedrijf kan daarmee duurzame warmte leveren, bijvoorbeeld aan de gebouwde omgeving en de glastuinbouw. Recente studies van onder meer KWR en Royal HaskoningDHV tonen aan dat er potentieel is voor de toepassing van restwarmte uit elektrolyse (van der Roest, Bol, Fens, & van Wijk, 2023) (Royal HaskoningDHV, 2022).

In de praktijk zijn er echter meerdere factoren die de haalbaarheid van de benutting van de restwarmte uit elektrolyse beïnvloeden. Dat zijn onder meer factoren zoals de fysieke afstand en een mogelijke mismatch in temperatuurniveaus en productieprofielen van de restwarmte ten opzichte van de warmtevraag. Ook de aantrekkelijkheid van andere (rest)warmtebronnen in de omgeving zijn van invloed op de kansen voor de toepassing van restwarmte uit elektrolyse.

In het wetsvoorstel voor de Wet collectieve warmte wordt voorgesteld dat een producent van restwarmte deze restwarmte beschikbaar moet stellen aan een warmtebedrijf dat het gebruik van de restwarmte mogelijk maakt door het aanleggen van de benodigde infrastructuur (Ministerie van Economische Zaken en Klimaat, 2023). De uitkoppelkosten die de producent van restwarmte maakt om de restwarmte beschikbaar te stellen moeten volgens het wetsvoorstel vergoed worden door het warmtebedrijf.

Omdat de restwarmte volgens de wet collectieve warmte tegen vergoeding van de uitkoppelkosten opgehaald moet kunnen worden, is het interessant om te weten of de uitkoppelkosten beperkt kunnen worden door tijdens het ontwerp van de elektrolyzers al rekening te houden met uitkoppeling van de restwarmte. Het is de verwachting dat een groot deel van de geplande 4-8 GW gerealiseerd gaat worden met behulp van subsidies. Als er binnen de subsidieverlening geëist wordt dat in het ontwerp van de elektrolyser uitkoppeling van de restwarmte moet worden voorbereid, dan kunnen de uitkoppelkosten mogelijk beperkt worden. De meerkosten kunnen ook gedekt worden binnen de subsidies. De vraag is dan of een dergelijke eis proportioneel is ten opzichte van de additionele kosten voor de eigenaar van de elektrolyser of de overheid bij opname in subsidies. Verder is het de vraag of de restwarmtebron techno-economisch interessant genoeg is voor warmtebedrijven, zodat ze bereid zijn er de benodigde infrastructuur voor de benutting van de restwarmte te realiseren.

Onderzoeksvraag

Op verzoek van het Ministerie van EZK hebben wij deze studie uitgevoerd die input levert voor antwoorden op de volgende onderzoeksvraag: *'In welke mate is de benutting van restwarmte uit elektrolyse techno-economisch interessant voor warmtebedrijven, en in hoeverre is het (met oog op ruimtelijke, bedrijfseconomische, organisatorische en juridische aspecten) wenselijk om hiervoor aanvullende eisen te stellen aan elektrolyseprojecten die de komende jaren worden uitgerold?'*

Het rapport beoogt zowel kwalitatief als kwantitatief inzicht te geven in de belangrijkste knelpunten, onzekerheden en kansen voor restwarmtegebruik bij elektrolyse. Die inzichten moeten het voor EZK mogelijk maken om te beoordelen of sturing op restwarmtebenutting uit waterstofproductie zinvol en kansrijk is, en daarbij richting geven bij het zoeken naar een geschikt instrumentarium voor de stimulering van restwarmtegebruik bij elektrolyse.

Methode

De studie bouwt voort op TNO kennis over elektrolyzers en warmtenetten. Voor de studie is verder een literatuuronderzoek gedaan en zijn er 10 interviews gehouden met onder meer warmtebedrijven en elektrolyse projectontwikkelaars (zie Bijlage a voor een overzicht). De bevindingen van het literatuuronderzoek, de interviews en aanvullende TNO analyses worden in dit rapport beschreven.

Leeswijzer

Het rapport is opgedeeld in een deel over de uitkoppeling van restwarmte uit elektrolyse (Hoofdstuk 2), de toepassing van restwarmte uit elektrolyse (Hoofdstuk 3) en conclusies en aanbevelingen (Hoofdstuk 4).

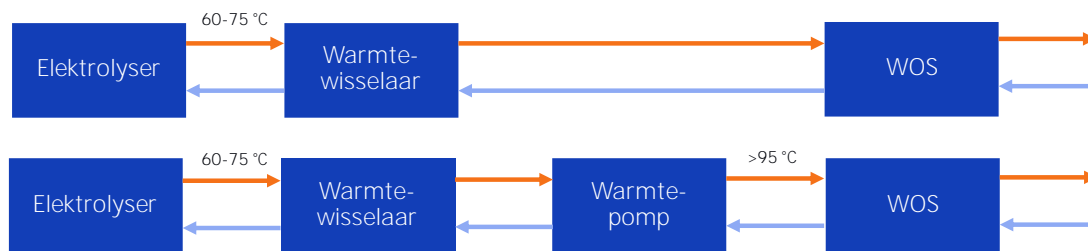
2 Uitkoppeling van restwarmte uit elektrolyse

In dit hoofdstuk kijken we naar de warmteproductie bij elektrolyzers, welke aanpassingen er nodig zijn aan de elektrolyser om de restwarmte uit te kunnen koppelen en wat de additionele kosten zijn om de benodigde aanpassingen te maken. In 2.1 wordt er ingezoomd op warmteproductie specifiek. In sectie 2.2 wordt een beeld geschetst van de kosten van uitkoppeling.

2.1 Warmteproductie elektrolyzers

Als gevolg van elektrische weerstand en onomkeerbare chemische reacties in de elektrolyser komt een deel van de ingevoerde elektriciteit vrij als warmte (van der Roest, Bol, Fens, & van Wijk, 2023). Deze warmte moet met een koelsysteem afgevoerd worden om de temperatuur van de elektrolyser constant te houden. De keuze van het koelsysteem hangt af van de schaal van de elektrolyser. Kleine laboratoriumopstellingen kunnen extern gekoeld worden, terwijl industriële elektrolyse op grote schaal interne koeling vereist. Interne koelmethoden gebruiken ofwel overtollig proceswater of een apart koelvloeistofcircuit, waarbij de laatste verontreinigingsproblemen vermijdt (Tiktak, 2019). Bij het gebruik van een koelvloeistofcircuit kan de warmte uit deze koelvloeistof vervolgens uitgekoppeld worden door middel van warmtewisselaars. Omdat de koeling van de elektrolyser in alle situaties gewaarborgd dient te worden, is er bij de uitkoppeling van restwarmte nog altijd een back-up koelsysteem nodig, om te koelen wanneer er geen warmtevraag is. Voor warmtewisselaars, warmtepompen en pijpleidingen moet er ruimte vrijgehouden worden. Met name in de ondergrond is het in industriële clusters druk, waardoor de beschikbare ruimte voor pijpleidingen een beperkende factor kan zijn.

De temperatuur waarop de warmte vrijkomt verschilt ook per type elektrolyser. Bij alkaline elektrolyzers is dat een maximale gemiddelde temperatuur van 75°C en bij PEM elektrolyzers maximaal gemiddeld 60°C. Er wordt wel gewerkt aan het verhogen van de werktemperatuur van PEM elektrolyzers, waardoor de maximale uitkoppeltemperatuur de komende jaren nog kan toenemen. Er zijn meerdere uitkoppelpunten mogelijk binnen het proces, waarvan de belangrijkste het water is uit de water-zuurstof en water-waterstof mengsels die uit de elektrolyser komen en gekoeld moeten worden voor het water weer de elektrolyser ingaat. Het koelen van het recirculerende water is belangrijk om de elektrolyser op de juiste werktemperatuur te houden. De warmte komt bij deze en de andere mogelijke uitkoppelpunten niet op dezelfde temperatuur vrij. Hierdoor kan er verschillende hoeveelheden restwarmte op verschillende temperaturen uitgekoppeld worden.

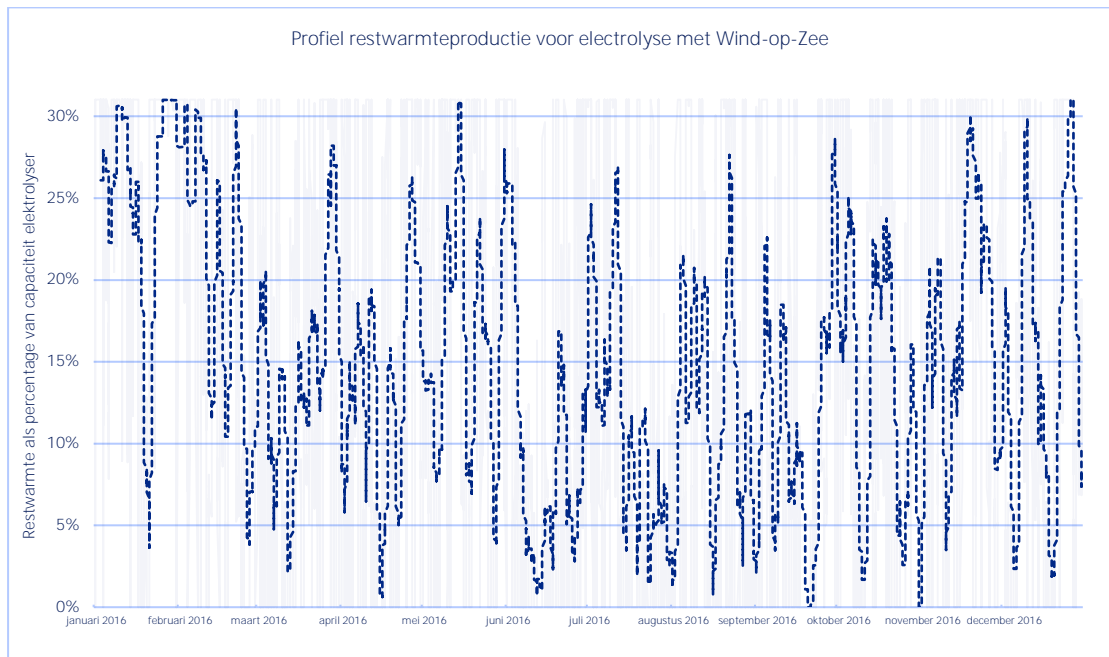


Figuur 2.1: Schematische weergave van twee mogelijke uitkoppelsystemen: de bovenste zonder warmtepomp en de onderste met warmtepomp. WOS staat voor warmte overdrachtsstation.

Theoretisch gezien wordt alle verloren energie omgezet in warmte. Dat betekent dat in theorie het restant van de efficiëntie van de elektrolyser als warmte vrij komt. De efficiëntie van een elektrolyser is non-lineair en hangt af van het productieprofiel van de elektrolyser. De efficiëntie van omzetting naar waterstof is hoger bij deellast dan bij vollast (Baumhof, Raheli, Johnsen, & Kazempour, 2023). Het productieprofiel hangt op zijn beurt weer af van de elektriciteitsbron en de dimensionering van de elektrolyser ten opzichte van deze bron. In Figuur 2.2 is een jaarprofiel van de warmteproductie van een elektrolyser geschetst die gekoppeld is aan een wind-op-zee-park met 120% van de capaciteit van de elektrolyser. De gestippelde lijn geeft een voortschrijdend gemiddelde weer waardoor de grafiek wat duidelijker te lezen is en de seizoensgebonden fluctuaties beter zichtbaar worden. De maximale warmteproductie van deze configuratie is 31% van de capaciteit van de elektrolyser en het gemiddelde ligt rond de 15%. Gedurende de levensduur van de elektrolyser neemt de efficiëntie van de stacks af, waardoor de warmteproductie toeneemt.

In de praktijk zal maar een deel van deze warmte uit te koppelen zijn, zowel door warmteoverdrachtsverliezen als door praktische limieten aan uitkoppeling. Omdat de warmte vrij komt op verschillende plekken zullen de kosten van uitkoppeling daarom ook variëren.

De doelen van Nederland zijn om in 2030 4 GW aan elektrolyseprojecten te hebben geïnstalleerd en 8 GW in 2032. Uitgaande van gemiddelde warmteproductie van 15% van het vermogen komt er jaarlijks ongeveer 20-40 PJ aan restwarmte vrij. Er zijn een aantal onzekerheden rondom de totale hoeveelheid beschikbare restwarmte uit elektrolyse. De hoeveelheid restwarmte hangt samen met het productieprofiel van de elektrolyzers. Het bovenstaande voorbeeld geeft een indruk van de warmteproductie van één configuratie. Het productieprofiel zal anders zijn als er gebruik gemaakt wordt van andere hernieuwbare energiebronnen zoals zonne-energie, de dimensionering ten opzichte van de hernieuwbare bronnen en/of elektrolyzers ook gebruik maken van netstroom. Daarnaast zal de marktprijs van elektriciteit en waterstof bepalen wanneer groene stroom verkocht wordt in plaats van gebruikt wordt voor elektrolyse, wat ook een grote invloed kan hebben op de exploitatie van de elektrolyser (Swarts, Morren, van den Akker, Sloopweg, & van Voorden, 2023).



Figuur 2.2: Warmteproductie van een electrolyser gekoppeld aan wind op zee met een 1-1.2 verhouding electrolyse-wind op zee capaciteit voor referentiejaar 2016. Hierbij wordt rekening gehouden met de non-lineaire efficiëntiecurve voor waterstofproductie. De gestippelde lijn geeft het drie daagse voortschrijdende gemiddelde weer.

2.2 Meerkosten voor uitkoppeling restwarmte electrolyse

De kosten voor het uitkoppelen van restwarmte uit electrolyse zijn momenteel onbekend. Uitkoppeling op hogere temperatuur vereist relatief grotere warmtewisselaars, vanwege een kleiner temperatuurverschil tussen het koelwater en de operationele temperatuur van de electrolyser. Bij een apart koelcircuit heeft dit als gevolg dat er ruimte beschikbaar gesteld moet worden en dat er meer materiaalkosten gemaakt worden. Daarbovenop is er extra elektronica vereist om de temperatuur van de electrolyser te reguleren met de combinatie van beide systemen. Er is weinig kwantitatieve data beschikbaar over de meerkosten van uitkoppeling uit electrolyse vanuit het perspectief van de electrolyse exploitant. Van der Roest et al. (2023) geven meerkosten aan voor een electrolyser van 2,5MW (zie Tabel 2.1). Op basis van de interviews lijken de enige aanpassingen die direct gemaakt moeten worden tijdens de bouw van de electrolyser de aanpassingen aan het koelcircuit te zijn. Deze kosten zijn zeer beperkt (5,5 €/kW), oftewel <0,3% van de installatiekosten van een electrolyser met installatiekosten van 2000 €/kW. De totale kosten voor uitkoppeling zijn volgens de studie hoger (69 €/kW), met name door de benodigde investeringen in warmtewisselaars en pijpleidingen. Deze overige kosten (63,7 €/kW) kunnen echter uitgesteld worden tot er daadwerkelijk warmte afgenomen gaat worden. Royal HaskoningDHV schat de kosten voor o.a. warmtewisselaars, pijpleidingen en pompen op ordergrootte €3 miljoen voor 1 GW aan electrolyzers, oftewel 3 €/kW, in een Quickscan voor de potentie voor restwarmte uit onder andere electrolyzers op de Maasvlakte (Royal HaskoningDHV, 2022; Royal HaskoningDHV, 2024). Deze kosten liggen een stuk lager dan ingeschat door van der Roest et al. (2023) voor de kleinere electrolyser. Voor deze onderdelen lijkt er dus een schaalvoordeel te zijn.

In de studie van van der Roest et al. Wordt wel uitgegaan van luchtkoeling. Buiten deze studie zijn er geen kwantitatieve data beschikbaar over de additionele kosten voor uitkoppeling. In interviews met elektrolyse partijen werd kwalitatief aangegeven dat de meerkosten zeer gering zullen zijn in vergelijking met de totale projectkosten. In het geval van de Holland-Hydrogen I wordt er al gekeken naar mogelijkheden voor de uitkoppeling van restwarmte (Shell, 2023), zonder dat er steunmaatregelen voor nodig zijn.

Tabel 2.1: Overzicht investeringskosten voor uitkoppeling van restwarmte bij een 2,5 MW PEM elektrolyser, inclusief installatiekosten. Bron: (van der Roest, Bol, Fens, & van Wijk, 2023).

Component	CAPEX	CAPEX (€/kW)
Tie-in elektrolyser (aanpassingen aan het koelcircuit)	13,8 k€	5,5
Elektronica, controls en monitoring	55,2 k€	22,1
Warmtewisselaar	41,4 k€	16,6
Pijpleidingen	55,7 k€	22,3
Pompen	6,6 k€	2,6
Totaal	173 k€	69,2

Voor 4-8 GW aan elektrolyse komen de meerkosten gerekend met 5,5 €/kW uit op 22-44 miljoen Euro. Het (demissionaire) kabinet heeft €4,9 miljard gereserveerd uit het Klimaatfonds voor subsidies voor grootschalige elektrolyse (Ministerie van Economische Zaken en Klimaat, 2023). Dit is bovenop subsidies voor kleinschalige elektrolyse (€250 miljoen) (Rijksoverheid, 2023), de SDE++ (maximaal €168 miljoen in de ronde van 2022, mogelijk €124 miljoen uit de ronde van 2023) (RVO, 2023) en IPCEI (€800 miljoen) (Rijksoverheid, 2022). De ingeschatte meerkosten voor de uitkoppeling van alle restwarmte uit 4-8 GW elektrolyse is gelijk aan 0,4-0,7% van de geplande en al verleende subsidies voor elektrolyse. Deze kosten zullen niet bijdragen aan de elektrolytische waterstofproductiecapaciteit in Nederland, hetgeen het primaire doel is van deze subsidies. Echter zou het mogelijk de maatschappelijke meerwaarde van de geïnstalleerde waterstofproductiecapaciteit kunnen verhogen.

De restwarmte van de elektrolyser op een later tijdstip uitkoppelen leidt tot dezelfde of hogere meerkosten. De benodigde ingrepen zijn hetzelfde. Er kunnen grotere warmtewisselaars nodig zijn, additionele materiaalkosten en extra elektronica om de temperatuur van de elektrolyser te regelen. Daar bovenop komen mogelijk extra kosten om de ruimte vrij te maken voor de uitkoppeling en kunnen er gedeerde inkomsten zijn door het stilzetten van de elektrolyser. Met name de gedeerde inkomsten van waterstofproductie kunnen flink oplopen. Hoe hoog deze uiteindelijk zullen zijn is ook afhankelijk van of de werkzaamheden ook uitgevoerd kunnen worden wanneer de elektrolyser sowieso al stilstaat, bijvoorbeeld voor jaarlijks onderhoud, het vervangen van membraanstacks of tijdens een windstille periode in de zomer bij een elektrolyser gekoppeld aan wind op zee. Een globale inschatting van de meerkosten voor het klaarmaken van de elektrolyser voor de uitkoppeling van restwarmte wanneer de installatie al in gebruik is, is niet eenvoudig te maken.

Ook de beschikbare ruimte voor warmtewisselaars, warmtepompen en pijpleidingen kan op een later tijdstip beperkt zijn. Dit kan tot additionele complexiteit leiden voor het uitkoppelen van restwarmte bij een reeds draaiende installatie.

3 Toepassingen van restwarmte uit elektrolyse

In dit hoofdstuk beschouwen we de toepassing van restwarmte uit elektrolyse. In 3.1 wordt gekeken naar verschillende soorten warmtevraag. In 3.2 naar hoe de restwarmte uit elektrolyse aansluit op de verschillende soorten warmtevraag. Ten slotte wordt er in 3.3 een vergelijking gemaakt met andere restwarmtebronnen. De vergelijking is gemaakt omdat business cases voor restwarmtebenutting erg case-specifiek zijn. Om tot wat algemene inzichten te komen over de positie van restwarmte uit elektrolyse als warmtebron is de vergelijking gemaakt met andere restwarmtebronnen.

3.1 Warmtevraag

Er zijn meerdere factoren die bepalen of een warmtebron interessant is voor een bepaalde warmtevraag. Belangrijke factoren zijn onder andere het warmteproductieprofiel, het type warmtevraag, de temperatuur van de warmtebron en de afstand tot de warmtevraag.

Volgens de KEV 2022 raming wordt er in 2030 via warmtenetten zo'n 30 PJ aan warmte geleverd via warmtenetten, 18 PJ aan huishoudens, 8 PJ in de dienstensector en 3,5 PJ aan de glastuinbouw (PBL, TNO, CBS & RIVM, 2022). Verder wordt aangegeven in de KEV 2023 dat er in 2021 91 PJ warmte aan de industrie geleverd is, waarvan 62 PJ via stoomnetten.

Volgens de KEV 2023 zijn er 150.000 bestaande woningen waarbij de plannen voor een warmtenet in uitvoering of definitief zijn (PBL, TNO, CBS & RIVM, 2023). 30.000 aansluitingen waren al meegenomen in de raming van de KEV 2022, waardoor er volgens de KEV 2023 maximaal nog 120.000 aansluitingen bij kunnen komen. Gerekend met een finaal warmteverbruik van ca. 30 GJ per woning per jaar komt dit uit op een stijging van 3,6 PJ. En komt de raming van de warmte geleverd aan huishoudens in 2030 uit op ongeveer 22 PJ.

Ter vergelijking is in de KEV 2022 geraamd dat de aardgasvraag bij huishoudens daalt naar 235 PJ in 2030. Uitgaande van een HR-CV ketel met een rendement van 100% en dat slechts een klein deel aardgas gebruikt wordt voor koken, is de warmtevraag ook ongeveer 235 PJ. De aardgasvraag in de dienstensector neemt volgens de KEV 2022 raming af naar ongeveer 70 PJ in 2030.

De hoeveelheid restwarmte uit elektrolyse is significant vergeleken met de warmtevraag in de glastuinbouw. De warmtevraag is momenteel rond de 90 PJ per jaar (Glastuinbouw Nederland, 2023). De sector verwacht dat de warmtevraag in 2040 zal zakken naar 60 PJ per jaar (Glastuinbouw Nederland, 2023). TNO experts verwachten dat de warmtevraag richting 2030 nog niet zo hard zal gaan dalen. Het grootste deel van de warmtevraag wordt door de glastuinbouw zelf geleverd. Dit zal volgens de KEV 2022 ook in 2030 het geval zijn: de KEV 2022 raming komt uit op 3,5 PJ aan warmte geleverd aan de glastuinbouw via warmtenetten in 2030, vergeleken met 2,7 PJ in 2021.

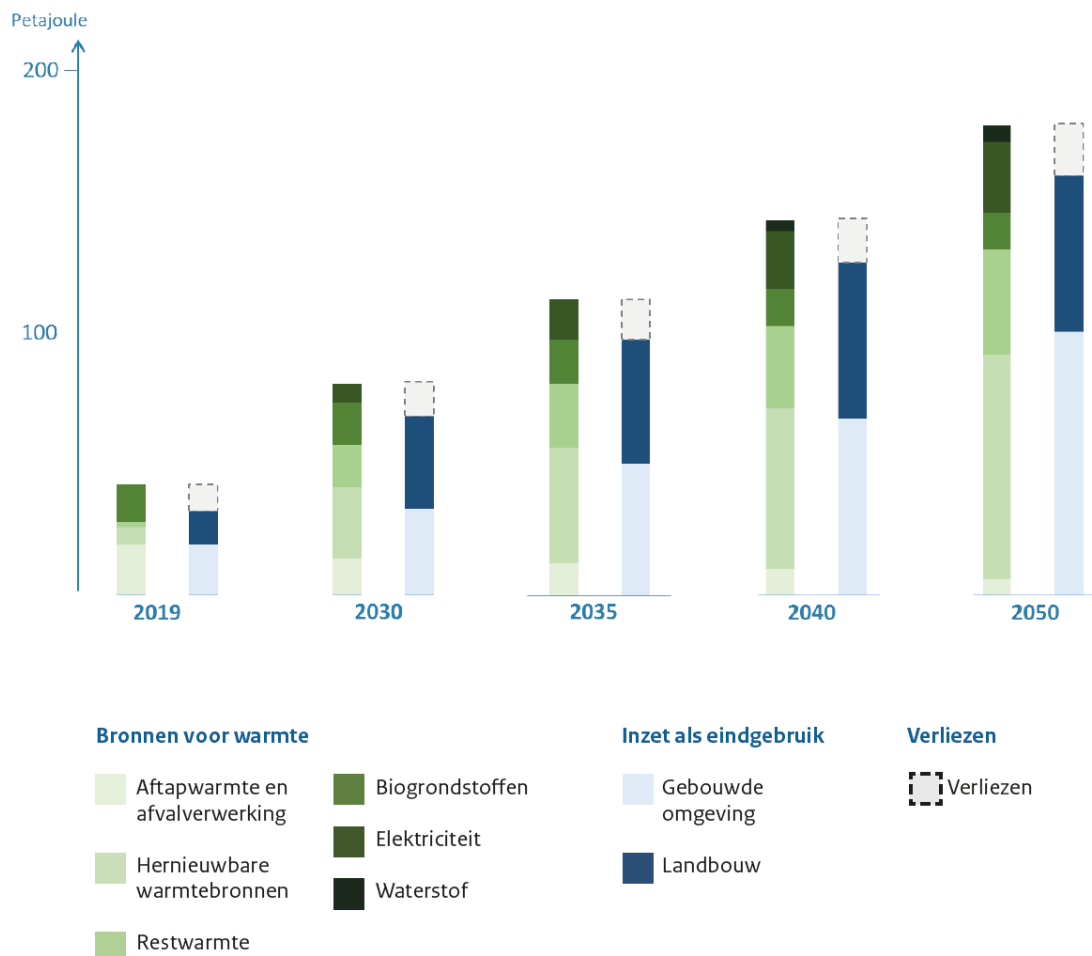
De KEV 2022 en KEV 2023 doen geen uitspraken over de ontwikkeling van de uitwisseling van stoom en warm water tussen individuele industriële bedrijven richting 2030.

Een deel van de warmte gaat verloren in de warmtenetten. Desondanks kan de restwarmte uit elektrolyse in 2030/2032 dus in potentie een significante bijdrage leveren aan de warmtevraag.

Tabel 3.1: Overzicht beschikbare restwarmte uit 4-8 GW elektrolyse en de warmtevraag bij huishoudens, de dienstensector en in de glastuinbouw in 2030.

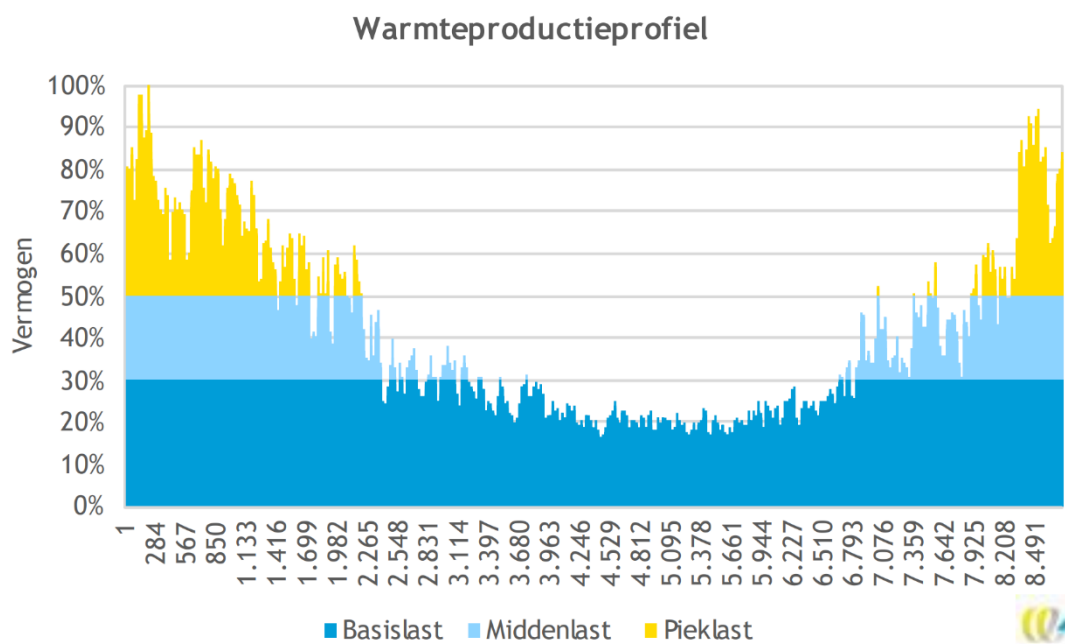
Warmtelevering	Warmtevraag		
Elektrolyse	Huishoudens	Dienstensector	Glastuinbouw
20-40 PJ	250 PJ, waarvan 18-22 PJ via warmtenetten geleverd wordt	70 PJ, waarvan 8 PJ via warmtenetten geleverd wordt	90 PJ, waarvan 3-4 PJ via warmtenetten geleverd wordt

In het Nationaal Plan Energiesysteem (NPE) wordt een snellere stijging in het gebruik van warmte uit warmtenetten in de gebouwde omgeving en glastuinbouw voorzien: richting de 75 PJ in 2030 en 100 PJ in 2035 (zie Figuur 3.1). Richting 2050 loopt de collectieve warmtelevering aan de gebouwde omgeving en landbouw op tot 150 PJ.

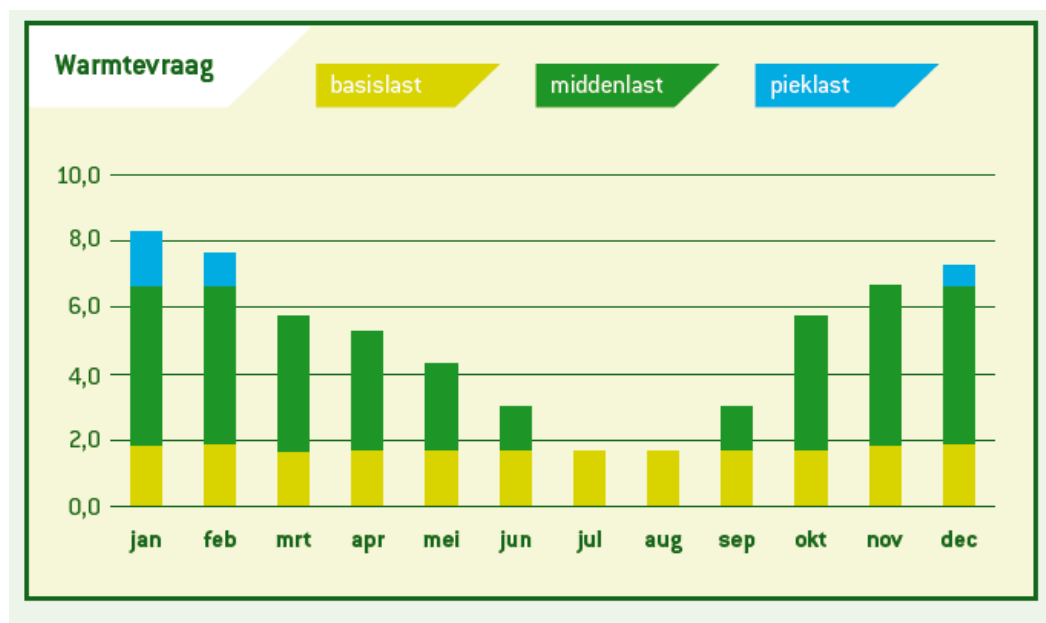


Figuur 3.1: Bronnen voor en inzet van warmte over tijd. Bron: Nationaal Plan Energiesysteem (Ministerie van Economische Zaken en Klimaat, 2023).

De warmtevraag bij huishoudens, dienstensector en glastuinbouw is op te delen in een basislast, middenlast en pieklast. Basislast is minimale vraag die gedurende het gehele jaar aanwezig is. De middenlast volgt het seizoensgebonden badkuipmodel waarin de warmtevraag hoger wordt naarmate de gemiddelde buitentemperatuur daalt. De pieklast is de warmtevraag bij extremere weersomstandigheden met zeer lage temperaturen en hoge warmtevraag. De verdeling van de verschillende typen vraag verschilt per toepassingsgebied. Zie voorbeelden van het profiel van de warmtevraag voor huishoudens in Figuur 3.2 en voor de glastuinbouw Figuur 3.3. Voor de glastuinbouw ligt de basislast duidelijk op een hoger niveau dan voor huishoudens.



Figuur 3.2: Warmteproductieprofiel van een groot bestaand warmtenet (CE Delft, 2023).



Figuur 3.3: Warmtevraag glastuinbouw (Glastuinbouw Nederland, 2023).

3.2 Toepassing van restwarmte uit elektrolyse

In deze sectie beschrijven we twee belangrijke aspecten voor het verbinden van de restwarmte uit elektrolyse met de warmtevraag: profielen en temperatuur (3.2.1) en de locaties van elektrolyseprojecten ten opzichte van de vraag (3.2.2).

3.2.1 Vergelijking temperatuur en profiel restwarmte elektrolyse met de vraag

Restwarmte uit alkaline elektrolyzers kan meteen ingevoerd worden in lage- (<50 °C) en middentemperatuur (50-70 °C) warmtenetten, en daarmee ook mogelijk voor de glastuinbouw. Hier zijn wel nieuwe (lage temperatuur) netten voor nodig. Voor de glastuinbouw kunnen mogelijk bestaande distributienetten gebruikt worden. Temperatuureisen voor primair transportnet kunnen echter beperkend zijn.

Warmtebedrijven geven aan dat het voor warmtetransport over langere afstanden wenselijk is om een hogere temperatuur te gebruiken, omdat dit de investering in de pijpleiding beperkt. Het vermogen dat door de pijpleiding getransporteerd kan worden is namelijk afhankelijk van het debiet van het water (een functie van het volume en de stroomsnelheid) en de temperatuur. Het uiteindelijke geleverde vermogen is ook afhankelijk van de retourtemperatuur. Deze temperatuur zal echter in werkelijkheid altijd zo laag mogelijk gehouden worden. Daarmee wordt het verlagen van de retourtemperatuur niet gezien als optie om het vermogen te verhogen. Om op lagere temperatuur een acceptabel vermogen pijpleiding te realiseren zal het debiet opgevoerd moeten worden, wat in de praktijk onvoordelig kan zijn. Dat betekent dat er doorgaans gekozen wordt om een grotere pijpleiding te gebruiken. In beide gevallen is er een groter pompvermogen nodig. Zowel een grotere pijpleiding als een verhoogd pompvermogen vertaalt zich weer in hogere kosten.

De restwarmte uit elektrolyzers is te laag voor directe inzet in hoge temperatuur warmtenetten (>90 °C). Voor de bestaande hoge temperatuur warmtenetten zal een warmtepomp nodig zijn. Uit de interviews en literatuur komt duidelijk naar voren dat de additionele kosten voor een warmtepomp significant zijn en het realiseren van een business case lastiger maken (Lensink & Schoots, 2023) (van der Roest, Bol, Fens, & van Wijk, 2023) (Royal HaskoningDHV, 2022) (van Dam, Gee, Goossens, Overvest, & Ruiter, 2023) (Jonsson & Miljanovic, 2022). Echter doet hetzelfde probleem zich voor bij een aantal andere hernieuwbare warmtebronnen, waaronder restwarmte uit datacenters, aquathermie en geothermie. De kosten van de warmtepomp zullen bij vergelijking met deze alternatieven dus geen doorslaggevende factor zijn.

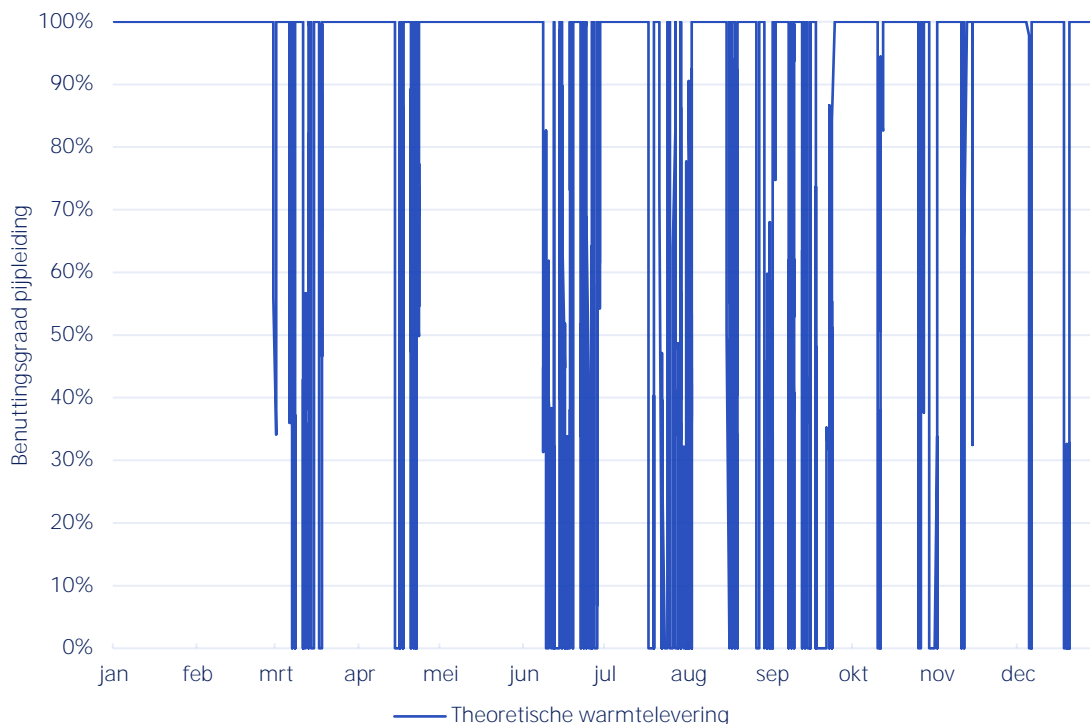
De ontwikkeling van lage temperatuur warmtenetten kunnen ervoor zorgen dat er geen warmtepomp benodigd is voor de toepassing van restwarmte uit elektrolyse. Resultaten van het WarmingUP project geven aan dat zestig procent van de Nederlandse woningen geschikt zijn voor lage temperatuurverwarming (Pothof, Vreeken, & van Meerkerk, 2022). Uit de interviews gehouden voor dit onderzoek is geen eenduidig beeld naar voren gekomen over de ontwikkeling van lage temperatuur warmtenetten. Sommige partijen verwachten hier meer van dan anderen. Ook over de snelheid waarop de lage temperatuur warmtenetten uitgerold kunnen worden bestaan er verschillende opvattingen. Hierdoor is de toekomstige invloed van lage temperatuur warmtenetten op de business case van restwarmte uit elektrolyse op basis van dit onderzoek niet te duiden, los van het algemene feit dat het een positieve invloed kan hebben op de business case.

Het profiel van restwarmteproductie uit elektrolyse op basis van wind op zee (zie Figuur 2.2) past het beste bij het middenlast vraagprofiel van de huishoudens en glastuinbouw. Voor de basislast is er te veel variatie in het profiel. Daarnaast zal de prioriteit altijd liggen bij waterstof productie en zal het verschaffen van pieklast daardoor onhaalbaar zijn. Uurlijkse variaties kunnen opgevangen worden door dagbuffers (voor korte termijn warmteopslag). Langere periodes intermitterende warmteproductie zullen lastiger op te vangen zijn. Zelfs met 3-daagse buffering zijn er ook in de winter periodes te verwachten met beperkte beschikbaarheid van warmte uit een elektrolyser gekoppeld aan wind op zee (zie Figuur 3.4). Momenteel zijn de mogelijkheden voor lange termijn warmteopslag nog beperkt en zijn de kosten ervan hoog. Omdat de warmteproductie vanuit elektrolyse niet regelbaar is door de beheerder van het warmtenet, is er zonder lange termijn warmteopslag additionele back-upcapaciteit nodig ter grootte van de restwarmtecapaciteit van de elektrolyser om de warmtevoorziening te kunnen garanderen. Dit zou een groot nadeel zijn voor het gebruik van restwarmte uit elektrolyse in vergelijking met regelbare hernieuwbare warmtebronnen.

Als de elektrolyser niet alleen gekoppeld is aan Wind-op-Zee kan het profiel meer op basislast gaan lijken. Bijvoorbeeld door middel van netstroomgebruik of een combinatie tussen wind op zee en zon PV.

De investering in de pijpleidingen is een belangrijke factor in het bepalen van de business case. Er zijn optimalisatiemogelijkheden bij het clusteren van (rest)warmtebronnen, waardoor de warmtetransportleidingen beter benut kunnen worden. In dit onderzoek hebben we geen optimalisatie gedaan van meerdere restwarmtebronnen binnen een cluster. De onderstaande analyse bekijkt hoe de benutting van warmteleidingen geoptimaliseerd kunnen worden door aanpassingen aan de dimensionering op basis van de elektrolysecapaciteit.

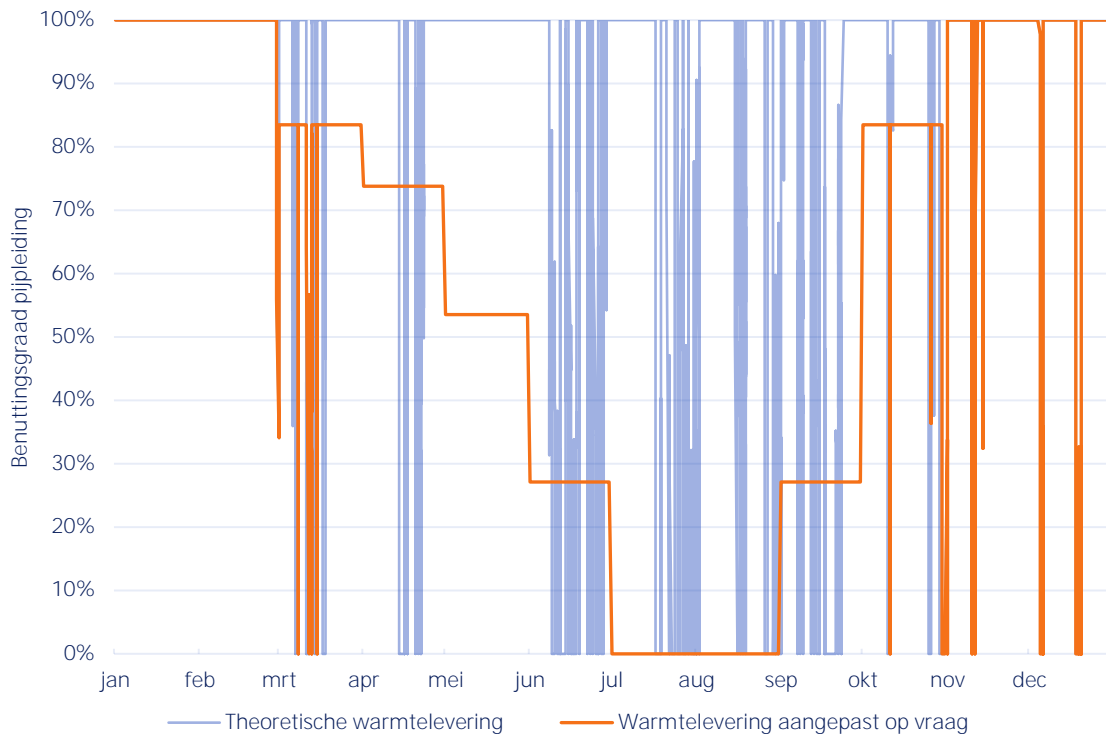
Om een hoge benutting van de pijpleidingen te realiseren kunnen de pijpleidingen kleiner gedimensioneerd worden dan de maximale beschikbare warmte van de elektrolyser. Figuur 3.4 geeft een voorbeeld weer voor een pijpleiding gedimensioneerd op 50% van de maximale warmteproductie van een elektrolyser gekoppeld aan wind op zee met een verhouding van 1 op 1,2 en een warmtebuffer met capaciteit voor drie dagen warmtelevering (op basis van informatie uit de interviews). De gemiddelde benuttingsgraad van deze pijpleiding is 90%, waardoor het profiel meer op basislast is gaan lijken. In de wintermaanden zijn er ook maar beperkte momenten waarop de pijpleiding niet op volle capaciteit gebruikt kan worden. Deze vrijheidsgraad voor het ontwerp van een elektrolyse-restwarmteproject toont aan dat de business case voor de benutting van de restwarmte verbeterd kan worden door een kleiner deel van de beschikbare restwarmte uit te koppelen. Er is geen rekening gehouden met additionele complexiteit voor het inregelen van de koeling van de elektrolyser.



Figuur 3.4: Benuttingsgraad pijpleiding gedimensioneerd op 50% van de maximale warmteproductie van de elektrolyser en een warmtebuffer met capaciteit voor drie dagen warmtelevering. Ein dit geval wordt er uitgegaan van een elektrolyser gekoppeld aan WoZ met een 1-1.2 verhouding elektrolyse-WoZ capaciteit voor referentiejaar 2016. Bron: TNO analyse.

Het is dus mogelijk om door het optimaliseren van de dimensionering de business case van het restwarmteproject te verbeteren. Daarentegen is het onwaarschijnlijk dat het mogelijk is voor restwarmte uit elektrolyse om te fungeren als een bron voor het voorzien van de basislast. Alleen in het geval van grote hoeveelheden opslag zou restwarmte uit elektrolyse kunnen fungeren als warmtebron voor de basislast. Een kostenanalyse van de dagbuffering die nodig zou zijn voor het garanderen van een basislast profiel zou hierin meer duidelijkheid kunnen verschaffen.

Dat zou betekenen dat de warmte waarschijnlijk ingezet wordt als middellast-bron, zie Figuur 3.2 en Figuur 3.3. Het gevolg is dat een aanzienlijk deel van de theoretisch hoge benuttingsgraad die getoond wordt in Figuur 3.4 mogelijk komt in tijden van verminderde vraag. Dit zou de businesscase van de restwarmte uit elektrolyse op haar beurt weer kunnen verslechteren. Om inzicht te geven in de effecten van de conjunctuur van de vraag, wordt in Figuur 3.5 de aangepaste benuttingsgraad van de pijpleiding weergegeven. De vraagconjunctuur is hierbij gebaseerd op de vraag van de glastuinbouw uit Figuur 3.3.



Figuur 3.5: Benuttingsgraad pijpleiding gedimensioneerd op 50% van de maximale warmteproductie van de elektrolyser en een warmtebuffer met capaciteit voor drie dagen warmtelevering. In dit geval wordt er uitgegaan van een elektrolyser gekoppeld aan wind op zee met een 1-1.2 verhouding elektrolyse-wind op zee capaciteit voor referentiejaar 2016. Bij de oranje gekleurde lijn is de levering aangepast op de vraag van de glastuinbouw. Bron: TNO analyse.

Uit Figuur 3.5 wordt duidelijk dat er in de zomer periodes zijn waarin er simpelweg geen sprake zal zijn van levering, ook bij een hoge theoretische bezettingsgraad van de transportleiding, die behaald kan worden door middel van optimalisatie van de verhouding van de capaciteiten van de transportleiding en de elektrolyser. Op basis van het voorbeeld in Figuur 3.5 wordt er een kleine 60% van de totale restwarmte uitgekoppeld die geproduceerd wordt door de elektrolyser. De verminderde warmtevraag in de zomer zorgt daarentegen wel voor meer leveringszekerheid in die periode.

Met een grotere pijpleiding en voldoende dagbuffers kan dit oplopen tot 85% van de totale productie van restwarmte. In dit tweede geval wordt er dus meer restwarmte uitgekoppeld, maar wel ten koste van groter gedimensioneerde warmte-infrastructuur. Dit beïnvloedt ook het aantal vollasturen van de pijpleiding, dit daalt van 5250 uur naar 3650 uur. Al met al kan er op basis van het middenlast profiel maximaal 14-28 PJ restwarmte uit 4-8 GW elektrolyse uitgekoppeld worden, van de totaal 20-40 PJ aan restwarmte die geproduceerd wordt. Dit kan nog lager uitpakken door optimalisatie van de benodigde infrastructuur voor uitkoppeling.

3.2.2 Locaties elektrolyse en de warmtevraag

Afstand is een andere belangrijke factor voor de haalbaarheid van uitkoppeling van restwarmte. De kosten voor een transportleiding van het uitkoppelpunt tot het warmteoverdrachtstation van een warmtenet nemen evenredig toe met de afstand. De investeringskosten voor deze pijpleiding bepalen grotendeels de haalbaarheid van het uitkoppelen van de restwarmte. Dergelijke investeringen worden alleen gedaan als er voldoende (rest)warmte beschikbaar is. Grote schaal pijpleidingen kennen echter een volloopriscio als de (rest)warmte niet gelijktijdig beschikbaar komt. Dit is een significant risico de komende jaren met de huidige onzekerheid over wanneer en op welke locatie er elektrolyseprojecten gerealiseerd gaan worden. Bovendien zal het seizoensgebonden profiel van (rest)warmteproductie uit elektrolyse ook betekenen dat transportleidingen ook maar een gedeelte van het jaar op volledige capaciteit gebruikt worden. Dit zal ook de investering in warmtetransportleidingen minder aantrekkelijk maken dan bijvoorbeeld bij basislast warmtelevering uit andere restwarmtebronnen of uit geothermie.

De voorkeurslocaties voor grootschalige elektrolyse (>100 MW) (zie Figuur 3.6) liggen in de industrieclusters Noordzeekanaalgebied, Rotterdam-Moerdijk, Eemshaven-Delfzijl en Borsele-Terneuzen. De belangrijkste factor hiervoor is dat er op de locaties voldoende aanbod is van elektriciteit, zodat de afstand van transport van elektriciteit voor elektrolyzers beperkt wordt. De voorkeursgebieden liggen daarmee met name op locaties waar windenergie van zee aanlandt via hoogspanningskabels. Andere belangrijke overwegingen voor elektrolyse zijn de nabijheid van een waterstoftransportnetwerk en de beschikbaarheid van demi-water.

Met uitzondering van Rotterdam-Moerdijk en het Amsterdamse Havengebied liggen de voorkeurslocaties niet nabij bestaande warmtenetten (zie Figuur 3.7). In Rotterdam-Moerdijk zijn de meeste plannen voor elektrolyzers ook gericht op de Tweede Maasvlakte (zie Tabel 3.2). Vanaf de Tweede Maasvlakte is het zeker 20-30 km naar het geplande tracé van WarmtelinQ om restwarmte uit Botlek-Pernis te gebruiken (WarmtelinQ, 2024). Vanaf de locatie van de Enecogen in de Europoort is het 15-20 km naar het tracé van WarmtelinQ. Eneco heeft de ambitie om 800 MW elektrolysecapaciteit te ontwikkelen op deze locatie in de Europoort (Eneco, 2024). Een alternatieve mogelijkheid is de restwarmte via een nieuwe pijpleiding naar de glastuinbouw in het Westland te transporteren. Hiervoor is met name de benodigde boring onder de Nieuwe Waterweg een aandachtspunt, met name door de complexiteit en de kosten (Royal HaskoningDHV, 2022). In het Provinciaal Meerjarenprogramma Infrastructuur Energie en Klimaat (pMIEK) Zuid-Holland is een warmtetransportnetwerk van de Maasvlakte naar het Westland opgenomen als een project in voorverkenningfase (Provincie Zuid-Holland, 2023). De aangegeven indicatieve planning is een investeringsbeslissing voor de volgende pMIEK (uiterlijk Q2 2024).

Moerdijk bevindt zich op ruim 10 km van bestaande warmtenetten in Brabant. Er zijn ideeën voor het koppelen van Moerdijk aan het bestaande Amerwarmtenet (WaterEnergySolutions, 2024). Hierdoor kan er in de toekomst mogelijk restwarmte uit elektrolyzers bij Moerdijk gekoppeld worden aan de warmtenetten in Oosterhout, Breda en Tilburg. Momenteel zijn er echter geen bekende geplande elektrolyseprojecten voor Moerdijk (Missie H2, 2024).

In het Amsterdamse Havengebied hebben HyCC en Vattenfall de ambitie om elektrolyzers te bouwen (HyCC, 2024) (Noordzeekanaalgebied, 2022). De beoogde capaciteit van het HyCC project is 500 MW. De capaciteit van de Vattenfall elektrolyser kan oplopen tot 100 MW (Noordzeekanaalgebied, 2022). De beoogde locatie voor de Vattenfall elektrolyser is aan de Hemweg, op de locatie van de voormalige kolencentrale. Hiermee ligt het op een gunstige

locatie op de restwarmte in te koppelen in het bestaande Vattenfall warmtenet. De beoogde locatie voor de HyCC elektrolyser is de Kaapstadweg en ligt daarmee op enkele kilometers van het bestaande warmtenet. Voor beide locaties zal de gewenste temperatuur voor het hogetemperatuur warmtenet (90-120 °C) betekenen dat er een warmtepomp nodig zal zijn, wat een beperkende factor kan zijn voor de haalbaarheid van de uitkoppeling van warmte.

Verder wordt in het Noordzeekanaalgebied gekeken naar de mogelijkheid om een elektrolyser van 100-500 MW te realiseren bij Tata Steel en naar een warmtenet vanuit de IJmond die o.a. restwarmte uit elektrolyse zou kunnen leveren aan de gemeente Velsen en de gemeente Beverwijk (HyCC, Tata Steel & Port of Amsterdam, 2024) (Provincie Noord-Holland, 2023). De planning voor beide projecten wordt in de pMIEK Noordzeekanaalgebied geduid als na 2030.

In de provincie Zeeland wordt gekeken naar het ontwikkelen van warmtenetten zowel boven als beneden de Westerschelde (TynstraGudde; Provincie Zeeland, 2023). Voor beide warmtenetten gaat het om gebruik maken van restwarmte uit de bestaande industrie en in de toekomst mogelijk ook elektrolyse. Boven de Westerschelde gaat het om de gemeentes Middelburg, Vlissingen, Borsele, Goes en Kapelle. Het project is in de verkenningsfase en er is geen gepland jaar van ingebruikname aangegeven in de pMIEK. Voor het warmtenet onder de Westerschelde gaat het om de gemeente Terneuzen en de realisatie van de eerste fase (kern Hoek) is gepland in 2026. Het beoogde project maakt gebruik van restwarmte van DOW, Yara, Cargill en later mogelijk ook elektrolyzers in het Kanaalgebied.

In de pMIEK Groningen zijn geen projecten voor warmtenetten opgenomen (Provincie Groningen, 2023).



Concluderend is het voor de elektrolyseprojecten in het Amsterdamse Havengebied (600 MW) mogelijk om aan te sluiten op het bestaande warmtenet en zijn er voor de overige elektrolyseprojecten ontwikkelingen nodig van nieuwe warmte-infrastructuur wat de haalbaarheid van uitkoppeling onzeker maakt. Er dient opgemerkt te worden dat zowel de locaties van elektrolyzers als de ontwikkeling van nieuwe warmtenetten nog onzekerheid kennen. In interviews hebben warmtebedrijven aangegeven dat het ontwikkelen van nieuwe warmte-infrastructuur ruim 10 jaar in beslag kan nemen. De ontwikkeling van nieuwe warmtenetten kunnen daarmee naar verwachting qua planning niet direct aangesloten worden op de 8 GW elektrolyse die beoogd wordt voor 2032.

Tabel 3.2: Indicatief overzicht plannen grootschalige elektrolyse in de industrieclusters. Er is nog maar weinig zekerheid over de exacte locaties en capaciteiten van de elektrolyzers, alsook over welk type elektrolyser er gebruikt gaat worden (PEM of Alkaline). Op basis van de Waterstofkaart (Missie H2, 2024).

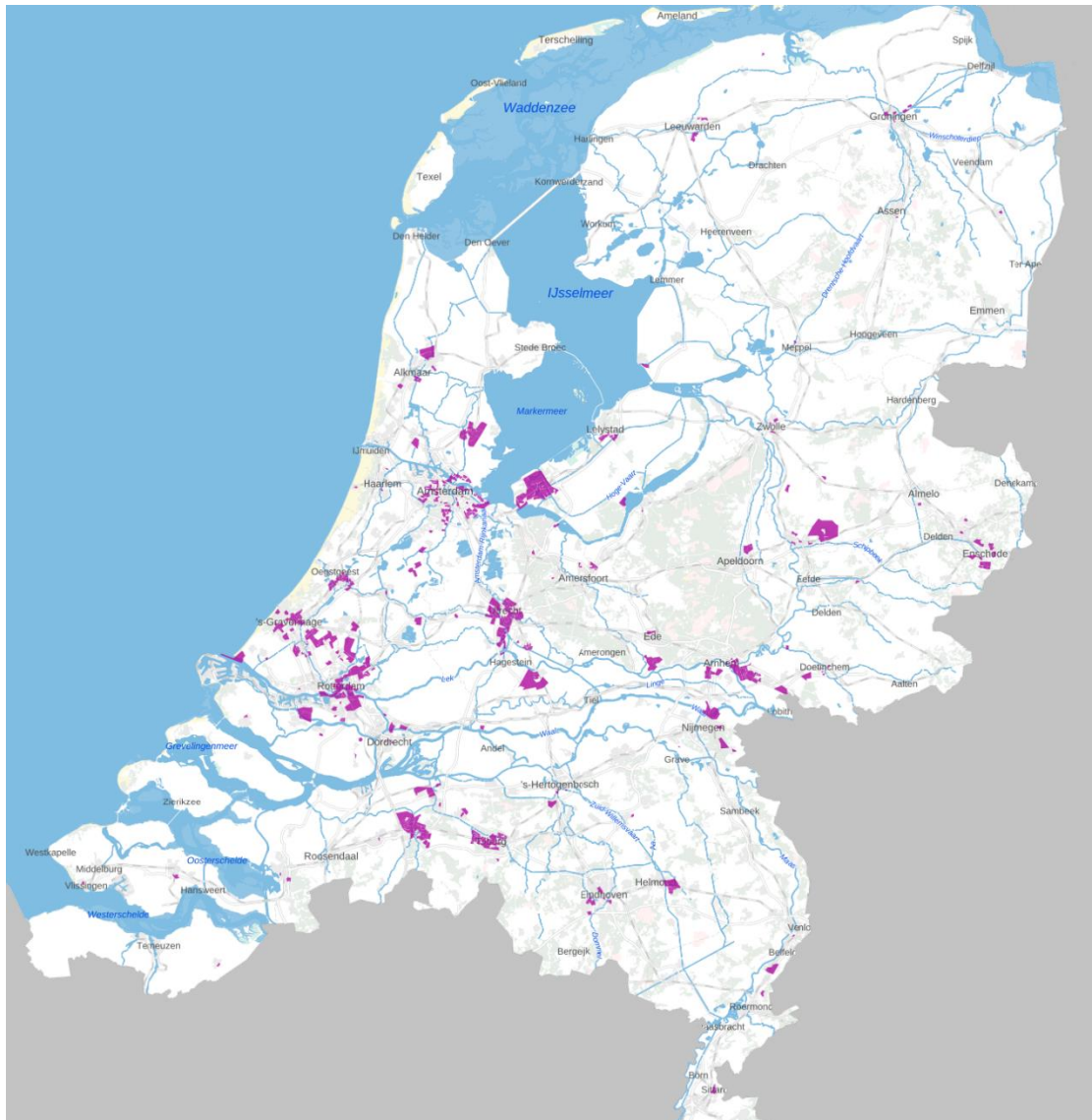
Industriecluster	Capaciteit (MW)	Opmerkingen
Rotterdam-Moerdijk	2800	2 GW op de 2 ^e Maasvlakte, 800 MW in de Europoort (Eneco). Alleen Shell heeft FID genomen voor een 200 MW elektrolyser op de 2 ^e Maasvlakte.
Noordzeekanaalgebied	700	3 projecten: H2era (500 MW) en H2ermes (100 MW) van HyCC en Hy4am (100 MW) van Vattenfall.
Eemshaven-Delfzijl	2000	Op basis van NorthH2. Concretere projecten tellen op tot <1 GW.
Zeeland-West Brabant	2000	Op basis van Hydrogen Delta regionaal plan. Concretere projecten zijn maar 500 MW.
Chemelot	Geen	



Legenda

-  Clusters industrie en bedrijventerreinen
-  Plangrens gemeenten voorkeursgebieden elektrolyse

Figuur 3.6: Overzicht voorkeursgebieden grootschalige elektrolyse (>100 MW). Bron: (Ministerie van Economische Zaken en Klimaat & Ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties, 2023).



Figuur 3.7: Overzicht bestaande warmtenetten. Bron: Warmteatlas (RVO, 2024).

3.3 Vergelijk met andere restwarmtebronnen

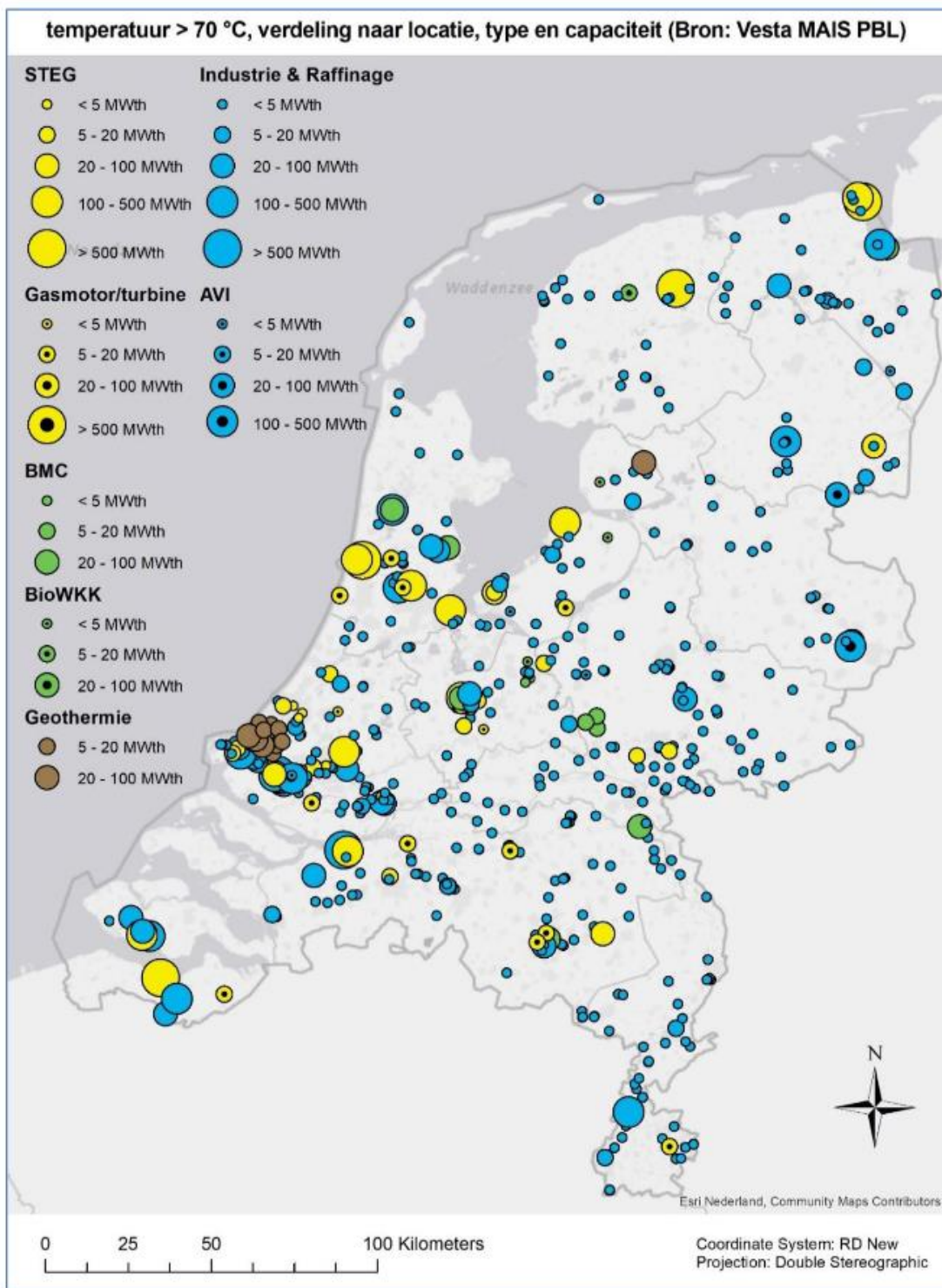
In de vorige paragraaf zijn meerdere elementen genoemd die invloed hebben op de business case voor het toepassen van restwarmte uit elektrolyse. Dat zijn onder andere de hoeveelheid vraag, de afstand van de elektrolyser naar de vraag, de vereiste temperatuur, de dimensionering van pijpleidingen voor warmtetransport ten opzichte van de warmtebron, en beschikbaarheid van andere warmtebronnen. Veel van deze elementen zijn niet uniek voor restwarmte uit elektrolyse. In deze paragraaf maken we daarom een vergelijking tussen elektrolyse als restwarmtebron en overige restwarmtebronnen in industriële clusters.

In de interviews is als voordeel voor de toepassing van restwarmte uit elektrolyse het mogelijke effect op de publieke perceptie van elektrolyse genoemd. Er wordt in het publieke gesprek over elektrolyse vaker gewezen op de energieverliezen, wat inefficiënt gebruik van hernieuwbare elektriciteit zou zijn. Door de (rest)warmte nuttig toe te passen kan het beeld positiever worden doordat een groter deel van de door elektrolyse gebruikte hernieuwbare elektriciteit nuttig gebruikt wordt, in de vorm van waterstof en warmte.

De Startanalyse van PBL en Expertise Centrum Warmte (ECW) en de Warmteatlas van RVO geven een overzicht van restwarmtebronnen in Nederland, met locaties, types en vermogens (PBL, 2020) (RVO, 2024). Figuur 3.8 geeft een overzicht van de HT- en MT-warmtebronnen. In de overzichten ontbreken de temperaturen van de meeste warmtebronnen. Bij alle bronnen in het havengebied Rotterdam staat een brontemperatuur van 80 graden vermeld. Op basis van deze overzichten is het niet duidelijk of er bronnen zijn met een hogere brontemperatuur.

De SDE++ kent twee varianten voor het benutten van restwarmte: zonder warmtepomp en met warmtepomp (Lensink & Schoots, 2023). Voor de variant zonder warmtepomp is de referentie in de SDE++ 2023 een uitkoppeling van gemiddeld 80°C en een retourstroom van gemiddeld 50°C. Voor de variant met warmtebron wordt een datacenter gebruikt als referentie, met een brontemperatuur van 30°C. Met de warmtepomp wordt de temperatuur opgevoerd naar 80°C. Voor beide varianten wordt uitgegaan van 5500 vollasturen per jaar.

De Warmteatlas van de Provincie Zuid-Holland geeft een overzicht van restwarmtebronnen in de regio ingedeeld in de verwachte temperatuurniveaus (<40°C of >40°C graden) (Provincie Zuid Holland, 2024). Het overgrote deel van de restwarmtebronnen valt in de categorie >40°C. RVO heeft op basis van de CO₂-emissies en type bedrijf inschattingen gemaakt van de hoeveelheid beschikbare warmte.



Figuur 3.8: Overzicht HT- en MT-warmtebronnen uit het achtergrondrapport van de Startanalyse aardgasvrije buurten 2020 (van Polen, et al., 2022).

Royal HaskoningDHV heeft in meerdere studies gekeken naar het restwarmtepotentieel in de Rotterdamse Haven. Er is aangegeven dat de temperatuur van restwarmte doorgaans tussen de 25 en 100°C ligt, maar dat temperaturen boven de 100°C ook voorkomen (Royal HaskoningDHV, 2021). Met name bij restwarmte in rookgassen kunnen temperaturen van 160°C of meer voorkomen. Op basis van een inventarisatie van de bedrijven in het havengebied is door Royal HaskoningDHV een inschatting gemaakt van de beschikbare restwarmte (zie Tabel 3.3). De temperatuurniveaus van de inzetbaar geachte restwarmte is niet geheel duidelijk. Voor restwarmte uit stoom (1,8 PJ in 2030 en 6,0 PJ in 2050) is de temperatuur boven de 100°C. Bij restwarmte uit restgassen is het ook waarschijnlijk dat een groot deel van het potentieel (8,1 PJ in 2030 en 15,7 PJ in 2050) boven de 100°C is. De temperatuur van restwarmte uit lucht of watercondensatoren is niet bekend. Voor restwarmte uit elektrolyse gaat Royal HaskoningDHV uit van 70°C.

Tabel 3.3: Inschatting Royal HaskoningDHV voor inzetbaar geacht restwarmte potentieel haven- en industriecomplex Rotterdam. Gebaseerd op (Royal HaskoningDHV, 2021).

Bron	2030	2050	Toelichting
Rookgassen	8,1 PJ	15,7 PJ	Hoge brontemperatuur, in 2030 uitgekoeld tot 80°C en in 2050 tot 45°C.
Lucht of watercondensator	6,0 PJ	12,0 PJ	Koeling tot 25-55°C. Aangenomen brontemperatuur onbekend.
Restwarmte stoom industrie	1,8 PJ	6,0 PJ	Warmte op hoge temperatuur (stoom) die niet nuttig ingezet kan worden binnen het bedrijf.
Waterstof elektrolyse	5,0 PJ	11,8 PJ	Groei-pad gebaseerd op toenemende capaciteit tot 2 GW _e in 2050.
Totaal	20,9 PJ	45,5 PJ	

In een quickscan heeft Royal HaskoningDHV naast restwarmte uit elektrolyse ook gekeken naar de restwarmte uit de waterzuiveringsinstallatie (WZI) van Shell Pernis (Royal HaskoningDHV, 2022). De temperatuur van de restwarmte van de WZI ligt tussen de 30 en 40°C. Het jaarlijkse aanbod wordt ingeschat op 0,5 PJ of een vermogen van ongeveer 15 MW (op basis van koeling tot 15°C en wintercondities).

In een studie voor Deltalinqs, Uniper en Netverder heeft Water Energy Solutions de beschikbare warmte in het Botlekgebied onderzocht (Deltalinqs, 2023). De studie is niet openbaar in verband met bedrijfsgevoelige informatie. Volgens CE Delft heeft de studie 120 MW aan restwarmtebronnen geïdentificeerd in het gebied. Hiervan is ongeveer 15 MW op hoge temperatuur (150-200°C) en 105 MW (70-90°C) (CE Delft, 2023).

Witteveen+Bos heeft in een analyse voor een restwarmtenet in de Gemeente Terneuzen gekeken naar de beschikbare restwarmtebronnen in de regio (Witteveen+Bos, 2023). Een overzicht is gegeven in Tabel 3.4. Over de bronnen bij Yara, Air Liquide en Cargill is weinig additionele informatie beschikbaar uit de studie. Ze worden gezien als mogelijke secundaire bronnen in aanvulling op de restwarmte van DOW. Daarom is er in de studie meer gekeken naar DOW, die op basis van twee stoomkrakers een grote hoeveelheid restwarmte vrijwel continu beschikbaar hebben.

Tabel 3.4: Mogelijke restwarmtebronnen regio Terneuzen. Gebaseerd op (Witteveen+Bos, 2023).

Restwarmtebron	Temperatuurniveau	Vermogen	Opmerkingen
Dow Chemical	68° C	>200 MW	Er is circa 200 MW _{th} restwarmte beschikbaar van de stoomkrakers. Er is 7 MW _{th} beschikbaar op 100° C van een condensaatleiding. Er is 460 MW back-upcapaciteit mogelijk vanuit WKK.
Yara	90° C of lager	<80 MW	Vermogen hangt af van gekozen temperatuurniveau en temperatuurtraject.
Air Liquide	70° C	15 MW	Ook op 40°C is inschatting dat 15 MW beschikbaar is.
Cargill	70° C	<20 MW	Tot 50 MW mogelijk op 30°C.

Uit verschillende studies over de toekomst van de Nederlandse industrie wordt duidelijk dat de bestaande industrie kan afnemen of verdwijnen wanneer deze fossielvrij zal opereren (CE Delft, 2023). Hiermee kan ook het aanbod van restwarmte uit deze industrieën afnemen of verdwijnen. Het restwarmtepotentieel uit bioraffinage en elektrolyzers wordt als zekerder gezien (CE Delft, 2023). Het Nationaal Warmtenet Trendrapport 2021 schat in dat de potentie voor de levering van restwarmte in 2050 100 PJ per jaar bedraagt (Dutch New Energy Research, 2021). De inschatting is gebaseerd op verschillende rapporten, lijkt gebaseerd op de huidige beschikbare industriële restwarmte en lijkt nog geen rekening te houden met de potentie van restwarmte uit elektrolyse (CE Delft, 2019) (Deltares en CE Delft, 2018).

Concluderend is er weinig specifieke data beschikbaar over restwarmtebronnen. Vergeleken met een aantal generieke overzichten en een klein aantal specifieke studies kan een vergelijk gemaakt worden met restwarmte uit elektrolyse (zie Tabel 3.5). Vaak gebruikte generieke inschattingen voor het temperatuurniveau van restwarmte is met ca. 80°C wat hoger dan restwarmte uit alkaline elektrolyzers (75°C) en ruim hoger dan PEM elektrolyzers (60°C). Doorgaans wordt ook aangenomen dat de restwarmte continu beschikbaar is en als basislast kan dienen (Lensink & Schoots, 2023) (Royal HaskoningDHV, 2021) (Teng & Kruit, 2023) (Witteveen+Bos, 2023). Uit de studies waar specifieker naar individuele warmtebronnen gekeken is komt een mix van verschillende temperatuurniveaus. Veel liggen rond de generieke inschattingen (70-90°C), maar lagere temperaturen (vanaf 25°C) en temperaturen van boven de 100°C worden ook genoemd. Voor de temperaturen van boven de 100°C zal een deel beschikbaar zijn omdat het niet nuttig gebruikt kan worden binnen het bedrijf zelf (Royal HaskoningDHV, 2021), maar een deel kan mogelijk gebruikt worden door andere industrie (CE Delft, 2023). Met de opkomst van nieuwe generatie warmtepompen kan het ook voorkomen dat een groter deel van de restwarmte binnen het eigen bedrijf of nabij gelegen industrie ingezet gaat worden (CE Delft, 2019).

Tabel 3.5: Overzicht vergelijk restwarmte elektrolyse met andere restwarmtebronnen.

	Restwarmtebron	Temperatuurniveau	Opmerkingen
Elektrolyse	Elektrolyse	60°C voor PEM 75°C voor ALK	TNO inschatting.
Startanalyse/ Warmteatlas RVO	Veel verschillende bronnen	Veel onbekend. 80°C in haven Rotterdam	Vermogens van veel verschillende (rest)warmtebronnen in kaart gebracht.
SDE++	Generiek industrie Datacenters	80°C 30°C	Referentie voor berekening basisbedrag SDE++.
Warmteatlas Provincie Zuid Holland	Generiek	>40°C	Klein deel bronnen ook <40°C.
Royal HaskoningDHV	Rookgas, condensors, stoom uit industrie Havengebied Rotterdam	25-100°C, ook tot of boven 160°C	Verschildt per type restwarmtebron.
Water Energy Solutions	Industrie Havengebied Rotterdam	70-90°C, klein deel 150-200°C	Weinig detail bekend door bedrijfsgevoelige informatie.
Witteveen+Bos	Industrie regio Terneuzen (DOW, Yara, Air Liquide en Cargill)	68-90°C	Van Yara maximaal 90°C, anderen rond 70°C.

4 Conclusies en aanbevelingen

4.1 Conclusies

Op basis van de resultaten van het onderzoek zijn geen harde conclusies te trekken ten opzichte van de onderzoeksvraag: *In welke mate is de benutting van restwarmte uit elektrolyse techno-economisch interessant voor warmtebedrijven, en in hoeverre is het (met oog op ruimtelijke, bedrijfseconomische, organisatorische en juridische aspecten) wenselijk om hiervoor aanvullende eisen te stellen aan elektrolyseprojecten die de komende jaren worden uitgerold?*

Hoewel de meerkosten om een elektrolyser restwarmte-klaar te ontwerpen en te bouwen beperkt lijken en er een significante hoeveelheid warmte vrijkomt bij 4-8 GW elektrolyse, is er onduidelijkheid over welk deel van de warmte benut zal gaan worden en zijn business cases erg project-specifiek. Ook voor andere industriële warmtebronnen is er onduidelijkheid over de benutting en zijn de business cases project-specifiek. Hierdoor is er niet te concluderen of restwarmte uit elektrolyse in algemene zin een techno-economisch interessante warmtebron is voor warmtebedrijven, ook niet vergeleken met andere restwarmtebronnen.

De onzekerheid rondom het deel van de warmte die benut kan worden betekent dat er, als er geëist wordt dat alle elektrolyzers restwarmte-klaar gebouwd worden, kosten gemaakt worden voor projecten waar de warmte nooit benut zal worden (verzonken kosten). Doordat het niet duidelijk is hoeveel warmte er benut kan worden is niet eenduidig te concluderen of het proportioneel of wenselijk is om additionele eisen te stellen aan alle elektrolyseprojecten. Een integrale afweging van de kosten, baten en de risico's op verzonken kosten dient gemaakt te worden. Hieronder staan de belangrijkste bevindingen uit het onderzoek die kunnen bijdragen aan het maken van de benodigde afwegingen over het stellen van additionele eisen om elektrolyseprojecten restwarmte-klaar te ontwerpen en bouwen. In paragraaf 4.2 staan onze aanbevelingen.

Het is wenselijk om bij het ontwerpen en bouwen van elektrolyseprojecten al rekening te houden met de uitkoppeling van restwarmte

Er is momenteel niet veel bekend over de kosten voor het uitkoppelen van restwarmte bij elektrolyse. Op basis van beperkte data uit de literatuur en kwalitatieve informatie uit interviews lijken de meerkosten voor de uitkoppeling van restwarmte bij elektrolyse gering, als er bij het ontwerp van een elektrolyseproject rekening mee gehouden wordt. Voor een concrete case uit de literatuur komen de meerkosten die tijdens de bouw van de elektrolyser gemaakt moeten worden uit op minder dan 0,3% van de investeringskosten voor de elektrolyser. Voor 4-8 GW aan elektrolyse schatten we de meerkosten in rond de €22-44 miljoen. Dit is beperkt vergeleken met de ruim €6 miljard aan subsidies die al verleend zijn of gepland zijn voor de opschaling en uitrol van waterstofproductie met elektrolyse.

Wanneer de warmte uitgekoppeld wordt moeten er nog wel investeringen gemaakt worden in pijpleidingen, pompen, een warmtewisselaar en additionele elektronica om de koeling van de elektrolyser aan te sturen. Op basis van de concrete case worden deze kosten ingeschat op 63,7 €/kW. De totale uitkoppelkosten voor 4-8 GW komen daarmee uit op €270-540 miljoen. Er is door beperkte databeschikbaarheid nog geen rekening gehouden met schaling van de kosten, waardoor de totale kosten nog wat lager kunnen uitvallen.

Uitkoppeling op een later tijdstip zal ogenschijnlijk duurder zijn. Naast de uitkoppelkosten komen er mogelijk extra kosten bij om ruimte vrij te maken voor de uitkoppeling en kunnen er gedeelde inkomsten zijn door het stilzetten van de elektrolyser. Met name de gedeelde inkomsten van waterstofproductie kunnen flink oplopen. Kwantitatieve inschattingen van de uitkoppelkosten bij een gerealiseerde elektrolyser zijn momenteel onbekend.

De hoeveelheid (rest)warmte die vrijkomt bij elektrolyse is significant en zou een substantiële toevoeging kunnen zijn aan het totale warmteaanbod

Bij de 4-8 GW elektrolysecapaciteit uit de Nederlandse doelen voor 2030/2032 komt jaarlijks ordegrrootte 20-40 PJ aan (rest)warmte vrij. Volgens de prognose van de KEV 2023 is de totale warmtevraag van huishoudens, de dienstensector en de glastuinbouw in 2030 ongeveer 410 PJ per jaar, waarvan volgens de prognose 30-35 PJ geleverd zal worden via warmtenetten. Het Nationaal Plan Energiesysteem voorziet een stijging van de collectieve warmtelevering naar 150 PJ in 2050. Verder wordt aangegeven in de KEV 2023 dat er in 2021 91 PJ warmte aan de industrie is geleverd, waarvan 62 PJ via stoomnetten. De KEV 2022 en KEV 2023 geven geen projectie van de uitwisseling van warmte tussen individuele industriële bedrijven in 2030. Niet alle restwarmte van elektrolyzers zal in 2030/2032 uit te koppelen zijn, maar er kan dus wel een significante bijdrage geleverd worden aan de invulling van de warmtevraag, ook na 2030/2032.

Er zijn echter veel onzekerheden waardoor het niet duidelijk is welk deel van de vrijkomende warmte benut kan worden

Onzekerheden zijn onder andere de warmtevraag, de afstand tot de warmtevraag, de gewenste temperatuur, infrastructuur en de overige beschikbare duurzame warmtebronnen. Een deel van deze onzekerheden zijn niet uniek voor restwarmte uit elektrolyse, maar zijn ook relevant voor andere (rest)warmtebronnen. Zo zijn de ontwikkeling van de benodigde warmte-infrastructuur en onzekerheden rondom het rondkrijgen van een business case relevante barrières voor vrijwel alle warmteprojecten.

Op basis van een koppeling met middenlast vraag verwachten we dat er voor 4-8 GW elektrolyse maximaal 14-28 PJ restwarmte uitgekoppeld kan worden.

De warmte uit alkaline elektrolyzers komt vrij met maximaal gemiddeld 75°C en kan direct ingezet worden in middentemperatuur warmtenetten en naar verwachting ook in de glastuinbouw. De business case hangt in dit geval met name af van het beschikbare vermogen, het gevraagde vermogen en de afstand tot de warmtevraag.

Voor restwarmte uit PEM elektrolyzers is naar verwachting een warmtepomp nodig omdat de warmte vrijkomt op maximaal 60°C. Voor bestaande hoge temperatuur warmtenetten (90 – 120°C) en voor transportleidingen met een hogere delta T zal ongeacht de elektrolysetechnologie een warmtepomp nodig zijn. De additionele kosten voor de warmtepomp maken het realiseren van een business case lastiger en creëert daarmee onzekerheid over de toepassing van restwarmte uit elektrolyse in deze omstandigheden. De ontwikkeling van lage temperatuur warmtenetten is hierbij relevant omdat ook de restwarmte uit PEM elektrolyzers dan mogelijk direct ingezet kan worden.

Over de ontwikkeling van deze warmtenetten en de snelheid waarop deze uitgerold kunnen worden zijn verschillende opvattingen, waardoor de invloed op de toepassing van restwarmte uit elektrolyse nog niet te duiden is.

Onze analyse wijst uit dat de voorkeursgebieden voor grootschalige elektrolyse (>100 MW) in de industrieclusters, met uitzondering van twee projecten in Amsterdam (600 MW), niet dicht bij bestaande warmtenetten liggen. Het bestaande warmtenet in Amsterdam is een hoge temperatuur warmtenet (90 – 120°C), waardoor er naar verwachting ook een warmtepomp nodig zal zijn, ongeacht het type elektrolyser dat er gebruikt wordt. Voor de overige elektrolyseprojecten is er ontwikkeling van nieuwe warmte-infrastructuur nodig. De locaties voor de meeste elektrolyseprojecten liggen ook nog niet vast en van de meeste projecten is ook het type elektrolyser nog niet bekend. In interviews hebben warmtebedrijven aangegeven dat het ontwikkelen van nieuwe warmte-infrastructuur ruim 10 jaar in beslag kan nemen. Nieuwe warmtenetten kunnen daardoor niet direct aangesloten worden op de 8 GW elektrolyse die beoogd wordt voor 2032. De verschillende tijdspaden en meerdere afhankelijkheden van andere partijen zorgen voor additionele complexiteit voor restwarmteprojecten. Op langere termijn kan er als er meer warmte-infrastructuur gebouwd is, ook in combinatie met andere warmtebronnen, mogelijk meer van de restwarmte uit elektrolyse ingevoed worden in warmtenetten.

Dus hoewel de kosten die gemaakt moeten worden om alle elektrolyzers bij ontwerp klaar te maken voor de uitkoppeling van restwarmte, bestaat er een risico op verzonken kosten door de onzekerheid over of de warmte uiteindelijk ook daadwerkelijk uitgekoppeld wordt. Dit risico op verzonken kosten dient meegenomen te worden in de afweging om te eisen dat alle elektrolyzers bij ontwerp klaargemaakt worden voor de uitkoppeling van restwarmte.

Doordat de kosten en opbrengsten van restwarmte projecten sterk afhankelijk zijn van project-specifieke omstandigheden is het niet mogelijk om te generaliseren en te concluderen of restwarmte uit elektrolyse techno-economisch interessant is voor warmtebedrijven

De kosten voor aanpassingen aan de elektrolyser en uitkoppeling van de restwarmte zijn maar een klein onderdeel van de totale kosten van een warmteproject. De kosten voor warmte-transportinfrastructuur zijn een significant onderdeel van de projectkosten. Of er aangesloten kan worden op een bestaand net, welke lengte aan nieuwe buisleidingen benodigd is en of er schaalvoordelen te behalen zijn bij het aanleggen van nieuwe infrastructuur door projecten te bundelen maakt dus allemaal veel uit. Lokale omstandigheden creëren ook verschillen tussen projecten, zoals het type omgeving (landbouwgrond, industrieterrein of gebouwde omgeving). Verder maakt het voor de kosten veel uit of er een warmtepomp benodigd is of niet. Zoals hierboven aangegeven is er voor al deze factoren nog veel onzekerheid.

De opbrengsten zijn weer sterk afhankelijk van de afzet, welke voor warmtenetten sterk samenhangt met het aantal aansluitingen. Samen maken deze project-specifieke factoren het generaliseren van de business case voor restwarmteprojecten onmogelijk. Hierdoor zijn er geen algemene uitspraken te doen over de aantrekkelijkheid van restwarmte uit elektrolyse voor warmtebedrijven. Hieronder maken we een vergelijking met andere restwarmtebronnen om de voor- en nadelen van restwarmte uit elektrolyse in perspectief te plaatsen.

Er zijn voor- en nadelen voor restwarmte uit elektrolyse ten opzichte van andere industriële restwarmtebronnen

De voordelen van restwarmte uit elektrolyse zijn de relatief lage kosten voor uitkoppeling en de hogere zekerheid op langere termijn over de beschikbaarheid van restwarmte vergeleken met andere restwarmtebronnen. Nadelen van restwarmte uit elektrolyse vergeleken met andere industriële restwarmtebronnen zijn: temperatuur en onregelmatige profielen.

Zoals hierboven al geconcludeerd zijn de kosten voor het aanpassen van een elektrolyser en het uitkoppelen van de restwarmte beperkt, op basis van beperkte data uit de literatuur. Deze kosten zijn lager dan aangenomen wordt voor restwarmte uit andere industriële bronnen, zoals bijvoorbeeld de aannames voor de SDE++.

Er is relatief weinig concrete data beschikbaar over restwarmte uit industriële bronnen. Generieke adviezen zoals de SDE++ en overzichten zoals die uit de Startanalyse aardgasvrije buurten en de Warmteatlas gaan uit van standaard warmteprofielen, typisch van rond de 80°C en continu beschikbaar. Data uit een viertal studies met meer gedetailleerde informatie over warmtebronnen sluit redelijk aan bij dit beeld. De bandbreedte van temperatuur is breder (25-200°C), maar er zijn meerdere datapunten in de bandbreedte van 70-90°C. Met 60-75°C ligt restwarmte uit elektrolyse aan de onderkant van deze bandbreedte of zelfs daaronder. Waar restwarmte uit alkaline elektrolyse direct ingezet kan worden in middentemperatuur warmtenetten en de glastuinbouw, kunnen andere restwarmtebronnen uit de industrie mogelijk gemakkelijker direct in te zetten zijn in hoge temperatuur warmtenetten of transportleidingen op hogere temperatuur. Dit creëert een nadeel in de business case voor projecten op basis van restwarmte uit elektrolyse als er een warmtepomp nodig is om de temperatuur te verhogen. Dit nadeel verdwijnt als er in de toekomst lage temperatuur warmtenetten (<50°C) ontwikkeld worden.

Van restwarmte uit de industrie wordt doorgaans aangenomen dat het continu beschikbaar is, wat een tweede voordeel is ten opzichte van restwarmte uit elektrolyse, waarvan de beschikbaarheid gekoppeld is aan het productieprofiel van de elektrolyzers. Het productieprofiel wordt onder meer beïnvloed door de hernieuwbare energiebronnen, dimensionering ten opzichte van de energiebronnen en/of het gebruiken van netstroom. Ook zal de marktprijs van elektriciteit en waterstof bepalen wanneer groene stroom verkocht wordt in plaats van gebruikt wordt voor elektrolyse, wat ook een grote invloed kan hebben op de exploitatie van de elektrolyser. Om een stabiel profiel te krijgen kan er gewerkt worden met warmtebuffers, wat wel een effect zal hebben op de business case voor restwarmte uit elektrolyse.

Het is onzeker hoe de industrie in Nederland zich de komende jaren gaat ontwikkelen. Door afname in productie of verschuiving van industriële processen kan de beschikbare restwarmte uit industriële processen verminderen. Dit creëert een voordeel voor restwarmte uit elektrolyse, waarvan de lange termijn beschikbaarheid zekerder is.

4.2 Aanbevelingen

Weeg de vele onzekerheden rondom de benutting van de warmte mee bij besluitvorming over additionele eisen om elektrolyzers restwarmte-klaar te ontwerpen

De meerkosten om elektrolyzers zo te ontwerpen dat de restwarmte nuttig gebruikt kan worden lijken beperkt. Als de restwarmte uitgekoppeld wordt dan kunnen de kosten hiervoor vergoed worden via de verkoop van de warmte. Als de warmte niet benut wordt dan zijn er verzonken kosten. Afhankelijk van of de meerkosten vergoed worden door een subsidie of niet, worden de verzonken kosten gedragen door de overheid of door de ontwikkelaar van het elektrolyseproject. Of een eis dat alle elektrolyzers ontworpen worden zodat de restwarmte uitgekoppeld kan worden redelijk is, is mede afhankelijk van de hoogte van de meerkosten, het risico op verzonken kosten en hoe deze kosten en risico's verdeeld worden over de overheid en het bedrijfsleven. Er zijn veel onzekerheden rondom de benutting van restwarmte uit elektrolyse: onder meer de afstand tot warmtevraag, de tijdspaden van de ontwikkeling van elektrolyse en warmte-infrastructuur, de business case en de beschikbaarheid van alternatieve (rest)warmtebronnen. Een integrale afweging van de kosten en risico's dient gemaakt te worden, waarbij rekening gehouden wordt met deze verschillende onzekerheidsfactoren.

Zorg voor kennisuitwisseling

Momenteel is de (kwantitatieve) kennis over de mogelijkheden voor uitkoppeling van restwarmte bij elektrolyse beperkt. Er worden de komende jaren veel elektrolyseprojecten gerealiseerd. Het is van belang dat er meer kennis beschikbaar komt over restwarmte uitkoppeling vanuit de praktijk om beleidskeuzes beter te kunnen maken. Specifieke pilotprojecten gericht op het gebruiken van restwarmte uit elektrolyse en kennisuitwisseling kunnen bijvoorbeeld zorgen voor additionele, publiek beschikbare kennis die gebruikt kan worden voor opvolgende projecten.

Neem restwarmtebenutting ook mee als één van de factoren in de locatiekeuze voor elektrolyzers

De afstand van een elektrolyseproject tot een afnemer van de warmte of een warmteoverdrachtstation van een warmtenet is bepalend voor de business case van het benutten van de restwarmte van elektrolyse. Momenteel worden grootschalige elektrolyzers gepland op locaties waar de aanlanding van wind op zee gepland is (bijvoorbeeld de Maasvlakte, Noordzeekanaalgebied en de Eemshaven), of waar er ruimte beschikbaar is op het hoogspanningsnet (bijvoorbeeld bij de Hemweglocatie in Amsterdam of bij de Enecogen locatie in de Europoort). Gezien de beperkte ruimte op het hoogspanningsnet verwachten we dat de beschikbaarheid van een netaansluiting de komende jaren bepalend zal blijven voor de locatie van elektrolyseprojecten. Daarnaast zijn aansluitingen op waterstoftransportinfrastructuur en demi-waterinfrastructuur belangrijke bepalende factoren voor de locatie voor elektrolyzers. Daarmee lijkt de potentie tot inzet van de restwarmte een relatief kleine factor te zijn in de locatiebepaling. Desalniettemin maakt het meenemen van de afstand tot een potentiële afnemer van de warmte als additionele factor voor het bepalen van de gewenste locatie voor elektrolyse verdere systeemoptimalisatie mogelijk. Sommige ontwikkelaars van elektrolyseprojecten zijn ook warmteleveranciers (bijvoorbeeld Vattenfall en Eneco) en houden hier nu al rekening mee. Voor overige elektrolyseprojecten adviseren we de mogelijkheden voor het nuttige gebruik van de warmte mee te blijven nemen in de integrale ruimtelijke planning van de energietransitie (MIEK, pMIEK, Gemeentelijke Transitievisie Warmte, etc.).

Voor kleinschalige elektrolyse is er mogelijk meer flexibiliteit qua locatiekeuzen ten opzichte van de benodigde netaansluiting. De afstand tot een warmtevraag is echter nog bepalender voor de businesscase bij kleinschalige warmtebronnen. Ook bij kleine elektrolyseprojecten kan daarom het meenemen van de afstand tot mogelijke afnemers van de warmte tot verdere systeemoptimalisatie leiden.

Referenties

- Baumhof, M., Raheli, E., Johnsen, A., & Kazempour, J. (2023). Optimization of Hybrid Power Plants: When is a Detailed Electrolyzer Model Necessary? *IEEE 2023 Belgrade PowerTech*. doi:<https://doi.org/10.1109/PowerTech55446.2023.10202860>
- CE Delft. (2019). *Restwarmte, de stand van zaken. Eenverkenning van beleid, kansen en barrières*. CE Delft.
- CE Delft. (2023). *Restwarmte benutten: kansen en uitdagingen*. CE Delft.
- CE Delft. (2023). *Verduurzaming bronnen voor warmtenetten*. Delft.
- Deltalinqs. (2023). *Onderzoek: meer duurzame warmte in de Botlek*. Opgeroepen op februari 23, 2024, van <https://www.deltalinqs.nl/onderzoek-naar-meer-duurzame-warmte-in-de-botlek>
- Deltares en CE Delft. (2018). *Verkenning warmtelozingen en duurzaam hergebruik restwarmte*.
- Dutch New Energy Research. (2021). *Nationaal Warmtenet Trendrapport 2021*.
- Eneco. (2024). *Eneco electrolyzer*. Opgeroepen op februari 9, 2024, van <https://www.eneco.nl/over-ons/wat-we-doen/klimaat/groene-waterstof/eneco-electrolyzer/>
- Glastuinbouw Nederland. (2023). *Energie: De klimaatneutrale Kas in 2040*. Zoetermeer: Glastuinbouw Nederland.
- HyCC. (2024). *H2era*. Opgeroepen op februari 9, 2024, van <https://www.hycc.com/nl/projecten/h2era>
- HyCC, Tata Steel & Port of Amsterdam. (2024). *H2ermes*. Opgeroepen op februari 14, 2024, van <https://h2ermes.nl/>
- Jonsson, F., & Miljanovic, A. (2022). *Utilization of waste heat from hydrogen production*. Mälardalen University.
- Koster, E., Hesselink, F., & Teng, M. (2022). *Warmtenetten in Vesta MAIS. Update berekeningsmethoden*. CE Delft.
- Lensink, S., & Schoots, K. (2023). *Eindadvies basisbedragen SDE++ 2023*. Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving.
- Ministerie van Economische Zaken en Klimaat & Ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties. (2023). *Ontwerp-Programma Energiehoofdstructuur*.
- Ministerie van Economische Zaken en Klimaat. (2023). *Kamerbrief Instrumentarium hernieuwbare waterstof*.
- Ministerie van Economische Zaken en Klimaat. (2023). *Nationaal plan energiesysteem*.
- Ministerie van Economische Zaken en Klimaat. (2023). *Wetsvoorstel Wet houdende regels omtrent productie, transport en levering van warmte (Wet collectieve warmte)*. Rijksoverheid. Opgehaald van <https://wetgevingskalender.overheid.nl/regeling/WGK010356/documenten/Raad%20Ovan%20State/Vorbereidende%20documenten%20gepubliceerd/1>
- Missie H2. (2024). *Waterstofkaart*. Opgeroepen op februari 9, 2024, van <https://waterstofkaart.missieh2.nl/nl/>
- Noordzeekanaalgebied. (2022). *Hydrogen hub Amsterdam Noordzeekanaalgebied: versneller van de waterstofeconomie*.
- PBL. (2020). *Startanalyse aardgasvrije buurten*. Opgeroepen op februari 22, 2024, van <https://themasites.pbl.nl/leidraad-warmte/2020/>
- PBL, TNO, CBS & RIVM. (2023). *Klimaat- en Energieverkenning 2023*. Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving.

- PBL, TNO, CBS & RIVM. (2022). *Klimaat- en Energieverkenning 2022*. Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving.
- Pothof, I., Vreeken, T., & van Meerkerk, M. (2022). *Field measurements on lower radiator temperatures in existing buildings*.
- Provincie Groningen. (2023). *Provinciaal MIEK Groningen*.
- Provincie Noord-Holland. (2023). *Provinciaal Meerjarenprogramma Infrastructuur Energie en Klimaat Noord-Holland Zuid*.
- Provincie Zuid Holland. (2024). *Warmteatlas Zuid Holland*. Opgeroepen op februari 23, 2024, van <https://pzh.maps.arcgis.com/apps/MapJournal/index.html?appid=4c8e61a776eb4a6e8aaec99653d22b62>
- Provincie Zuid-Holland. (2023). *pMIEK Zuid-Holland 2023*.
- Rijksoverheid. (2022, december 20). *Zeven grote waterstofprojecten in Nederland krijgen subsidie voor elektrolyse*. Opgeroepen op januari 3, 2024, van <https://www.rijksoverheid.nl/actueel/nieuws/2022/12/20/zeven-grote-waterstofprojecten-in-nederland-krijgen-subsidie-voor-elektrolyse>
- Rijksoverheid. (2023, oktober 9). *€ 250 miljoen voor meerdere kleine waterstofprojecten voor maximaal leereffect*. Opgeroepen op januari 3, 2024, van <https://www.rijksoverheid.nl/actueel/nieuws/2023/10/09/%E2%82%AC250-miljoen-voor-meerdere-kleine-waterstofprojecten-voor-maximaal-leereffect>
- Royal HaskoningDHV. (2021). *Collectieve warmtevoorziening RES Rotterdam Den Haag, verdieping en verkenning met scenario's*.
- Royal HaskoningDHV. (2022). *Quickscan potentie voor restwarmte Pernis Effluent en Maasvlakte Electrolyser*.
- Royal HaskoningDHV. (2024, januari 26). Interview met Royal HaskoningDHV over Quickscan studie.
- RVO. (2022). *Duurzaamheidsrapportage warmtenetten 2022*. Zwolle: Rijksdienst voor Ondernemend Nederland.
- RVO. (2023). *Feiten en cijfers SDE++*. Opgeroepen op januari 3, 2024, van <https://www.rvo.nl/subsidies-financiering/sde/aanvragen/feiten-en-cijfers>
- RVO. (2024). *Warmteatlas*. Opgeroepen op februari 9, 2024, van <https://www.warmteatlas.nl/viewer/app/Warmteatlas/v2?debug=false>
- RVO. (2024). *Warmteatlas*. Opgeroepen op februari 22, 2024, van <https://www.warmteatlas.nl/viewer/app/Warmteatlas/v2?debug=false>
- Shell. (2023). *Shell Holland Hydrogen 1 Information leaflet*. Shell.
- Swarts, T., Morren, J., van den Akker, W., Slootweg, J., & van Voorden, A. (2023). Techno-economic analysis of low-temperature electrolysis' waste-heat utilization. *IEEE Belgrade PowerTech*. Belgrade: IEEE.
- Teng, M., & Kruit, K. (2023). *Verduurzaming bronnen voor warmtenetten. Opgave, onrendabele top en knelpunten richting 2030*. CE Delft.
- Tiktak, J. (2019). *Heat Management of PEM Electrolysis*. Delft: Delft University of Technology.
- TNO. (2023, december 15). *Warmteprofielengenerator*. Opgehaald van warmteprofielengenerator.nl: <https://www.warmteprofielengenerator.nl/>
- TynstraGudde; Provincie Zeeland. (2023). *PMIEK Zeeland 2023*.
- van Dam, P., Gee, E. d., Goossens, J., Overvest, B., & Ruiter, T. d. (2023). *The feasibility of utilising waste heat from onshore electrolyzers and data centres for the Dutch horticulture: A techno-economic assessment*. Universiteit Utrecht and BlueTerra.
- van der Roest, E., Bol, R., Fens, T., & van Wijk, A. (2023). Utilisation of waste heat from PEM electrolyzers - Unlocking local optimisation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(72), 27872-27891.

- van Polen, S., van den Wijngaart, R., van Bommel, B., Hoogervorst, N., Luteijn, G., van der Molen, F., & Latino Tavares, J. (2022). *Achtergrondrapport Startanalyse aardgasvrije buurten 2020*. Den Haag: PBL.
- WarmtelinQ. (2024). *WarmtelinQ tracé*. Opgeroepen op februari 9, 2024, van <https://www.warmtelinq.nl/trace>
- WaterEnergySolutions. (2024). *Industrietafel Midden- en West-Brabant*.
- Witteveen+Bos. (2023). *Restwarmtenet Terneuzen. Schetsontwerp, businesscase en uitvoeringsplan Hoek*.

Bijlage A

Overzicht partijen interviews

Tabel A.1: Overzicht geïnterviewde partijen voor dit onderzoek.

Interview
PBL
Els van der Roest (KWR / TU Delft / Gemeente Utrecht)
Shell
HyCC
Havenbedrijf Rotterdam
Gasunie (WarmtelinQ)
HVC
Vattenfall
Ennatuurlijk
CE Delft
Royal HaskoningDHV

Energy & Materials Transition

Radarweg 60
1043 NT Amsterdam
www.tno.nl

TNO innovation
for life