

De rwzi als smart energie-hub

Kansen voor waterstofproductie

Unie van Waterschappen

720174 | Definitief V3.0

01/10/2021

Pondera

Hoofdvestiging Nederland

Amsterdamseweg 13
6814 CM Arnhem
088 – pondera (088-7663372)
info@ponderaconsult.com

Postadres

Postbus 919
6800 AX Arnhem

Vestiging South East Asia

Jl. Mampang Prapatan XV no 18
Mampang
Jakarta Selatan 12790
Indonesia

Vestiging North East Asia

Suite 1718, Officia Building 92
Saemunan-ro, Jongno-gu
Seoul Province
Republic of Korea

Colofon

Titel

De rwzi als smart energie-hub

Ondertitel

Kansen voor waterstofproductie

Versienummer

Definitief V3.0

Datum

1-10-2021

Project nummer

720174

Opdrachtgever

Unie van Waterschappen

Auteur

Anne de Boer, Jim Quik, Steven Geujen

Vrijgegeven door

Eric Arends

Disclaimer

In het onderzoek is gebruik gemaakt van algemeen geaccepteerde uitgangspunten, modellen en informatie die ten tijde van het opstellen van dit rapport ter beschikking stonden. Aanpassingen in de uitgangspunten, modellen of gebruikte gegevens kunnen leiden tot andere uitkomsten. De aard en de nauwkeurigheid van de gebruikte gegevens voor het onderzoek bepalen in belangrijke mate de nauwkeurigheid en de onzekerheden van de berekende uitkomsten. Pondera is niet aansprakelijk voor gederfde inkomsten of schade die wordt geleden door opdrachtgever(s) en/of derden uit conclusies die gebaseerd zijn op gegevens die niet van Pondera afkomstig zijn. Deze rapportage is opgesteld met de intentie dat deze alleen gebruikt wordt door de opdrachtgever en slechts voor het doel waarvoor de rapportage is opgesteld. Er mag geen beroep worden gedaan op de informatie uit deze rapportage voor andere doeleinden zonder schriftelijke toestemming van Pondera. Pondera is niet verantwoordelijk voor de consequenties die kunnen voortvloeien uit het oneigenlijk gebruik van de rapportage. De verantwoordelijkheid voor het gebruik van (de analyse, resultaten en bevindingen in) de rapportage blijft bij de opdrachtgever. De Rechtsverhouding opdrachtgevers – architect, ingenieur en adviseur conform DNR 2011 is te allen tijde van toepassing.

Inhoudsopgave

Voorwoord

Samenvatting

1	Inleiding	1
1.1	Aanleiding van het onderzoek	1
1.2	Vraagstelling	3
1.3	Scope	4
1.4	Aanpak en leeswijzer	4
2	De rwzi als energie-hub: het concept	6
2.1	Onderdelen van een energie-hub	6
2.2	Energieverbruik	7
2.3	Energieproductie	7
2.4	Energieopslag	9
2.5	Theoretische model van een energie-hub	10
3	Analyse energiehuishouding rwzi's	16
3.1	Bepaling van de energiehuishouding van een representatieve rwzi	16
4	De rwzi als smart energy hub: de uitwerking	22
4.1	Selectie van meest representatieve rwzi	22
4.2	Strategieën voor het vormen van een energie-hub bij rwzi's	23
4.3	Varianten van de rwzi energie-hub	27
4.4	Inzichten in de zes strategieën	31
5	Bevindingen, conclusies en aanbevelingen	37
5.1	Bevindingen data-analyse en strategieën	37
5.2	Conclusies	41
5.3	Aanbevelingen	46
6	Bijlagen	
	Bijlage 1: Pilot Kampen	
	Bijlage 2: Pilot Harderwijk	
	Bijlage 3: Toelichting waterstof	
	Bijlage 4: Toelichting batterijen	

Voorwoord

Zeker in ons laaggelegen land is de aanpak van de klimaatcrisis van vitaal belang. Mondiaal, Europees en nationaal zullen alle zeilen moeten worden bijgezet om de uitstoot van broeikasgassen terug te dringen en te voorkomen dat de temperatuur op aarde verder dan 2 graden stijgt.

De waterschappen hebben dan ook met overtuiging ingestemd met het Klimaatakkoord en helpen constructief mee aan de energietransitie door inzet van hun assets voor de opwek van duurzame energie. Dit doen zij o.a. in de vorm van opwek van biogas, groen gas, wind- en zonne-energie en aquathermie.

Door de enorme inhaalslag die we in Nederland moeten maken staat ook de energieinfrastructuur zwaar onder druk. De vraag naar elektriciteit neemt de komende jaren sterk toe, nu het gebruik van aardgas wordt uitgefaseerd. Dit betekent dat duurzame energieprojecten soms niet kunnen worden aangesloten of dat duurzame energie verloren gaat, omdat de capaciteit van het net ontoereikend is. Hiermee staan ook de doelen van de regionale energiestrategieën onder druk en wordt een rem gezet op de ontwikkeling van de regionale economie, eenvoudigweg omdat de energievoorziening niet kan worden gegarandeerd. Er wordt landelijk naarstig gezocht naar mogelijkheden om energie op te slaan, bijvoorbeeld door middel van waterstof, en naar creatieve oplossingen om flexibiliteit in te bouwen.

Het voorliggende rapport is een goed voorbeeld hoe de waterschappen lokaal met hun uitvoeringskracht en innovatieve kennis werken aan de energietransitie. Een troefkaart daarbij zijn de ruim 300 rioolwaterzuiveringen die de waterschappen verspreid over het land in beheer hebben. Deze zijn goed voor ruim 8 PJ energieverbruik (primaire) met een ruime aansluiting op het elektriciteitsnet. Daarnaast zijn het één van de grootste producenten van biogas en groen gas (ruim 135 miljoen kuub per jaar) en zijn veel mogelijkheden voor plaatsing van zonnepanelen en windmolens. Het rapport laat zien dat vraag en aanbod van energie met de lokale omgeving van de rioolwaterzuivering kan worden afgestemd en uitgewisseld. Hierdoor is lokaal een aanzienlijke ontlasting van het elektriciteitsnet mogelijk, zo blijkt uit het rapport.

Het meest verrassende van het rapport is wel de mogelijkheid van opwek van groene waterstof op het terrein van de rioolwaterzuivering. De beschikbaarheid van duurzame energie en de toepassing van zuivere zuurstof voor de beluchting van het zuiveringsproces kan leiden tot een grote energiebesparing op de rioolwaterzuivering en een gunstige business-case voor groene waterstof. Ook vergunningstechnisch zijn rioolwaterzuiveringen aantrekkelijke locaties, omdat hier ook al vaak een biovergistingsinstallatie operationeel is. De plaatsing van een kleine of middelgrote electrolyser op een rioolwaterzuivering lijkt hiermee kansrijk, aldus de waterstofexperts. Een aantal waterschappen wil samen met netbeheerders, gemeenten en provincies beziën of pilots kunnen worden gestart om dit in de praktijk te testen. Juist op die plaatsen waar de energievoorziening op slot zit. Ook wordt verkend of de voertuigen en machines van de waterschappen en mogelijk ook lokale bedrijven kunnen worden verduurzaamd door middel van waterstof. Het theoretisch potentieel met 300 rioolwaterzuiveringen landelijk is aanzienlijk. Verder onderzoek zal meer inzicht moeten geven.

De waterschappen doen nu praktijkonderzoek voor de toepassing van zuivere zuurstof en de vaststelling van de omvang van een mogelijke waterstofinstallatie. Wereldwijd is dit uniek. Om pilots te kunnen realiseren is wel nodig dat we buiten de gebaande paden kunnen treden en dat er ook juridisch experimenteerruimte wordt gecreëerd. Een uitgelezen kans om de waterstof economie ook op lokale

schaal verder tot ontwikkeling te brengen en daarbij de uitvoerings- en innovatiekracht van de waterschappen te benutten. We kunnen het ons niet permitteren om kansen te laten liggen.

Dirk-Siert Schoonman
Bestuur Unie van Waterschappen
Tevens dijkgraaf van Waterschap Drents Overijsselse Delta.



4 oktober 2021

Samenstelling Begeleidingscommissie

De begeleidingscommissie bestaat uit:

- Gertjan Brand - Waterschap Drents Overijsselse Delta (projectleider)
- Ghada Sukkar - Waterschap Vallei en Veluwe (projectleider)
- Michel Masseus - Waterschap Drents Overijsselse Delta
- Rafaël Lazaroms - Unie van Waterschappen (opdrachtgever)

Daarnaast heeft een aantal andere waterschappen deelgenomen aan een Klankbordgroep:

- Waterschap Zuiderzeeland (Hans Kuipers)
- Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden (Wim Heijbroek)
- Wetterskip Fryslân (Sybren Gerben)

Evenals enkele externe partijen: Provincie Overijssel, Stedin, Alliander (netbeheerders), EnTranCE/Hanzehogeschool (kenniscentrum / opleiding) en STOWA.

Management samenvatting

De rwzi (rioolwaterzuiveringsinstallatie) als smart energie-hub

Waterschappen en het Klimaatakkoord

De waterschappen zijn volop betrokken bij het Klimaatakkoord en zijn mede-ontwikkelaars van de 30 regionale energiestrategieën. Daarnaast zijn zij zelf ook al geruime tijd bezig met verduurzaming, bijvoorbeeld door energieproductie vanuit het vergisten van slib en (aanvullende) energieopwekking vanuit zon, wind en aquathermie. Naar verwachting zal de vraag naar en de opwek van duurzame energie sterk stijgen. Een van de belangrijkste belemmeringen van de energietransitie is de beperkte capaciteit van het elektriciteitsnet. Dit is de reden waarom de Unie van Waterschappen opdracht heeft gegeven om mogelijkheden te onderzoeken voor de inzet van rioolwaterzuiveringen om lokaal een bijdrage te leveren aan de oplossing van dit probleem.

In het toekomstige energiesysteem waarbij er meer weerafhankelijke volatiele opwek is, zal het grilligere opwekpatroon zorgen voor grote verschillen in de elektriciteitsprijs. Voor de waterschappen, met gemalen en rwzi's als (middel)groot verbruiker van energie, is betrouwbare, beschikbare en betaalbare energielevering van groot belang. (Totaal energieverbruik van alle rwzi's opgeteld is ongeveer 8 PJoule primair.) Door het realiseren van eigen duurzame elektriciteitsopwekking, kan de toegankelijkheid en betaalbaarheid van elektriciteit beter geborgd worden en komt de benodigde energievoorziening meer in eigen regie.

Eén van de knelpunten in de energietransitie die lokaal en regionaal naar voren komt, is de beperkte capaciteit van het elektriciteitsnetwerk om duurzaam opgewekte energie af te voeren. Hierbij zijn vooral de piekvermogens een probleem. Vanwege de beperkte transportcapaciteit is er geen zekerheid dat de duurzame opwek die niet direct gebruikt wordt, doorgeleverd kan worden aan het net. In sommige gevallen moet hiervoor het elektriciteitsnet eerst uitgebreid worden met extra kabels en (onder)stations. Volgens de netbeheerders vergen de aanpassingen van het net op traditionele wijze investeringen in de orde van € 110 miljard. Daarbij komen nog extra uitdagingen wegens de grote ruimtevraag die nodig is voor de realisatie van nieuwe kabels en stations en de korte realisatietermijn van de Regionale Energiestrategieën (RES). De waterschappen willen lokaal graag een maatschappelijke bijdrage leveren aan de oplossing van de congestieproblemen op het elektriciteitsnet.

Met de 325 rioolwaterzuiveringen in Nederland waar diverse energiestromen van substantiële omvang bij elkaar komen, is het idee ontstaan om de mogelijkheid te onderzoeken van de rwzi als een smart energie-hub. Een smart energie-hub is mogelijk een alternatief voor de traditionele uitbreiding van het net. Voor dit onderzoek is de Unie van de Waterschappen de opdrachtgever, de waterschappen Drents Overijsselse Delta (WDOD) en Vallei en Veluwe (WVV) verzorgen de projectleiding. De uitvoering is in handen van Pondera.

De smart energie-hub

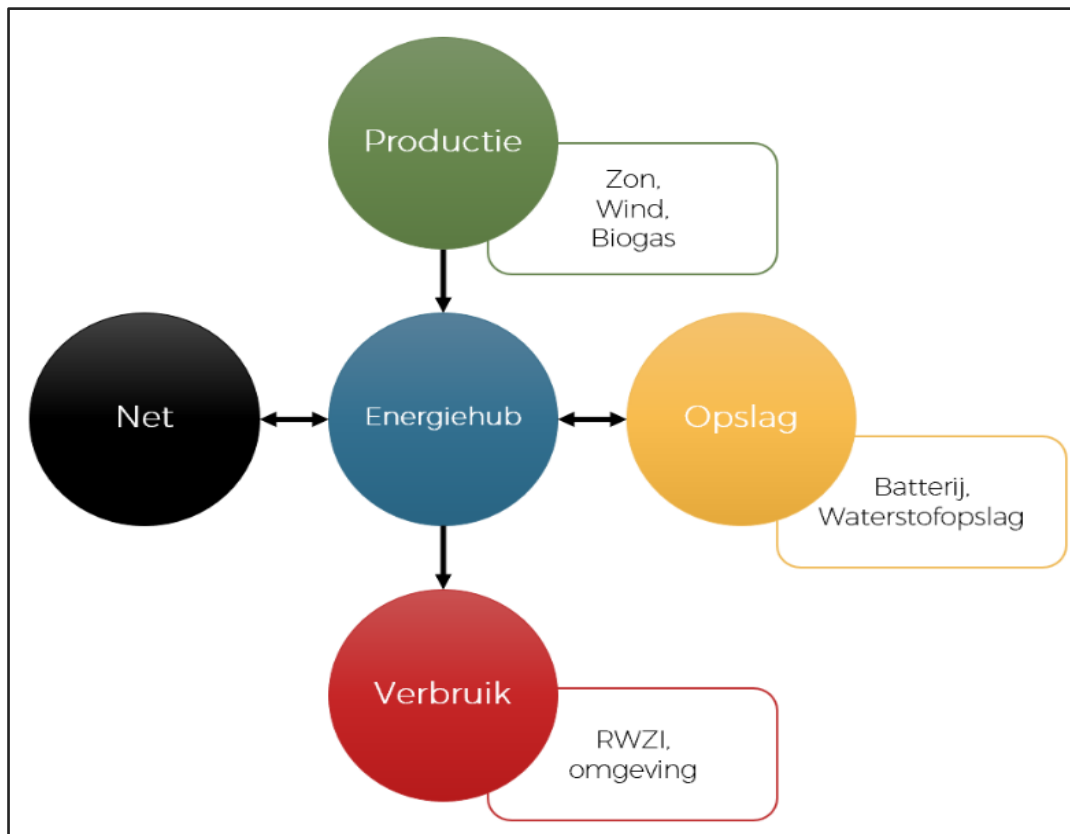
Een energie-hub is een knooppunt in een energiesysteem waar verschillende energiedragers samen komen en er afstemming tussen vraag en aanbod, opslag en conversie mogelijk is. Het concept bevat zoals aangegeven in [figuur 1](#) vier belangrijke elementen: duurzame energie productie, verbruik, opslag en een infrastructuur in de vorm van een net. De rwzi is een grote energieverbruiker met een relatief continu gebruikspatroon en tal van mogelijkheden voor energieconversie en flexibiliteit. Zo kan bijvoorbeeld biogas als brandstof omgezet worden naar warmte, elektriciteit of groen gas, kunnen additionele conversie- en of opslagsystemen zoals een electrolyser of batterij geplaatst worden en kan de WKK bij overproductie aan duurzame energie afgeschakeld worden. Met deze maatregelen kan het net ontlast worden en kan de rwzi functioneren als een smart energie-hub.

Om een significante rol te kunnen spelen in het ontlasten van het elektriciteitsnetwerk, moet er grootschalige energieproductie, energieverbruik en/of energieconversie op of in de nabijheid van de rioolwaterzuivering mogelijk zijn. Bovendien moeten er afzetmogelijkheden zijn voor de verschillende energiestromen/-dragers en moet er voldoende uitwisselingscapaciteit met een netwerk zijn.

De volgende omstandigheden zijn nodig om van een rwzi een goede energie-hub te maken:

- De primaire taak van waterzuivering mag niet in het geding komen door het toevoegen, koppelen en converteren van energiestromen.
- Het elektriciteitsnet moet niet verder belast worden.
- De reststromen die vrijkomen bij processen kunnen benut worden (zuurstof en warmte bij waterstofproductie).
- Er is schaalbaarheid en flexibiliteit mogelijk tussen energiebronnen en energiedragers. Dit kan gerealiseerd worden door conversie- en opslagmogelijkheden.

Figuur 1 Het concept energie-hub



Het onderzoek

Het onderzoek richt zich op de vraagstelling:

Op welke wijze kan een rwzi als potentiële energie-hub bijdragen aan het faciliteren van meer duurzame energie, waarbij de kerntaak van zuivering in stand blijft en het elektriciteitsnet zo veel mogelijk wordt ontlast?

Op basis van een analyse van het gemiddelde elektriciteitsverbruik per jaar, de belastingduurkromme, piekduurkromme, het dagprofiel en het jaarprofiel, is een representatief verbruiksprofiel bepaald voor de zuiveringsfunctie die schaalbaar is naar het aantal zuiveringseenheden. Met dit schaalbare profiel van de rwzi worden twee verbruiksprofielen, namelijk van een kleine rwzi (rwzi x) en een grote rwzi (rwzi y) geanalyseerd. Vervolgens zijn twee pilots uitgewerkt, namelijk rwzi Harderwijk en rwzi Kampen.

Pilots

In beide rwzi's is netcongestie een belemmering voor de duurzame opwekking, maar biedt de locatie wel een kans voor het realiseren van duurzame elektriciteitsopwekking. Voor de rwzi Harderwijk is gekeken naar de bestaande fysieke kansen voor optimalisatie zowel op de rwzi als op het elektriciteitsnet. Voor de rwzi Kampen zijn de mogelijkheden voor de productie van groene waterstof nader onderzocht.

Resultaten casus Harderwijk

De rwzi Harderwijk is een relatief grote zuivering van 200.000 ie met slibvergisting. Op de rwzi is de Bio energie centrale Harderwijk (BECH) gevestigd met eigen vergisting en omzetting naar groen gas. Het waterschap heeft een zonnepark gerealiseerd en werkt mee aan de inrichting van een windpark. Verder zijn in de nabijheid van de rwzi meerdere zon- en windprojecten waarbij de netcongestie een belemmerende factor is.

Voor de rwzi Harderwijk is duidelijk naar voren gekomen dat er, zowel binnen de grenzen van de rwzi, als in de bezetting van de middenspanningskabel en het verdeelstation, ruimte is voor optimalisatie. Er zijn verschillende mogelijkheden voor gebruik, opslag en conversie binnen de rwzi, en mogelijkheden voor afstemming met andere grote energieverbruikers in het nabije industrieterrein, die de netproblematiek kunnen verminderen.

Er zijn goede mogelijkheden voor optimalisatie omdat:

- De rwzi een smalle piek heeft voor haar maximale verbruik. Wanneer deze piek vermindert kan worden (door flexibel verbruik of goede afstemming met de in de omgeving opgewekte elektriciteit), komt er ruimte vrij op de middenspanningskabel en het onderstation.
- De kabel die de rwzi aansluit aan het net is nu redundant (ruim gedimensioneerd) aangelegd, waardoor er reservecapaciteit gereserveerd is. Indien de rwzi aangeeft deze reservecapaciteit niet nodig te hebben, komt er capaciteit vrij.
- Het is mogelijk dat de verbruiksprofielen van de andere grote afnemers in de omgeving anders zijn dan het verbruiksprofiel van de rwzi. Wanneer er onderlinge afstemming plaatsvindt, komt er capaciteit vrij. Daarvoor is wel voorafgaand overleg met de netbeheerder nodig.
- Er zijn meerdere mogelijkheden voor conversie binnen de rwzi. Hierdoor bestaat de mogelijkheid voor meer flexibiliteit van het energieverbruik en teruglevering. Dit is relevant voor het afvlakken en ondervangen van hoge pieken in opwek en/of verbruik.

De casus Kampen

De rwzi Kampen is een relatief kleine zuivering met ongeveer 100.000 ie. Het waterschap is van plan op het terrein een windturbine te plaatsen.. Daarnaast zijn er meerdere ontwikkelingen voor zon en wind in de nabijheid van de rwzi waarvoor de netcongestie een obstakel is.

De analyse met betrekking tot de productie van groene waterstof door middel van een elektrolyse systeem heeft interessante inzichten opgeleverd:

- Het combineren van een elektrolyse systeem van 2,5 MW met een windturbine van 4,8 MW en een zonnepark van 1,0 MWp is kostentechnisch optimaal. Met deze systemen kan circa 95% van de duurzaam geproduceerde elektriciteit worden benut. Zonder een electrolyse

systeem (of andere toepassingen waarmee de elektriciteit wordt gebruikt, opgeslagen of geconverteerd) zou circa 44% van de duurzaam opgewekte elektriciteit verloren gaan (curtailment).

- Zonder electrolyse systeem, wordt er 7,59 GWh teruggeleverd aan het elektriciteitsnet. Met electrolyse kan dit worden beperkt tot 2,30 GWh. Met het electrolyse systeem, waarbij waterstof (H₂) wordt geproduceerd, wordt het elektriciteitsnet minder zwaar belast. Op basis van de inschatting van WDOD is er op bijna alle afvalwaterzuiveringslocaties binnen het waterschap ruimte beschikbaar voor een electrolyse systeem.
- De resultaten van de businesscase laten zien dat op basis van de gehanteerde uitgangspunten de kosten voor de productie van waterstof uit zonne- en windenergie €6,28 per kg H₂ bedragen. Wanneer we de vermeden kosten voor elektriciteitsinkoop voor de rwzi, plus inkomsten voor teruglevering van het overschot aan elektriciteit meenemen in het kostenplaatje, dalen de kosten voor een kg H₂ naar €5,76.
- De prijs van waterstof is concurrerend en realiseerbaar vanwege:
 - o Gebruik van zelf opgewekte elektriciteit.
 - o Vermeden inkoop van elektriciteit.
 - o Het benutten van een rwzi locatie die al een omgevingsvergunning heeft voor zwaardere bedrijfsvoering. Hierdoor zijn er voor het realiseren van een dergelijk systeem minder aanvullende vergunningen nodig in vergelijking tot een andere locatie.
 - o De waterstof kan benut worden voor eigen afname voor (slib)transport en zware werktuigen.
 - o Nuttige toepassing restproducten (warmte en zuurstof) waardoor er additionele energiebesparing plaatsvindt op de rwzi.
 - o Mogelijkheden voor de aanvraag van subsidies zijn niet meegenomen maar waarschijnlijk wel beschikbaar en leiden dan tot een nog gunstigere businesscase.
- De belangrijkste voorwaarde voor de haalbaarheid van waterstofproductie is dat er voldoende afname is. Gelet op de bestaande behoefte aan een duurzame brandstof, is de verwachting dat daar voldoende afzet voor is.

Landelijk perspectief

Uit de smart energie-hubs Harderwijk en Kampen zijn mogelijke oplossingen voor de netcongesties in beeld gebracht. Het optimaliseren en lokaal afstemmen van opwek en verbruik in Harderwijk kan een bijdrage leveren aan het ontlasten van het elektriciteitsnet en daarmee ruimte creëren voor meer duurzame opwek conform de ambitie van de RES.

Een conservatieve inschatting van de impact van een gemiddelde rwzi als energie-hub komt neer op circa 0,5 MW aan fysieke ruimte op de netaansluiting die flexibel ter beschikking komt en gebruikt kan worden om netcongestie te verlichten. In Nederland, waar 325 rwzi's zijn, kan dat betekenen dat er 100 à 150 MW fysieke ruimte op de netaansluiting vrij komt. Bij afstemming met andere grote gebruikers kan mogelijk een meervoud daarvan worden behaald.

Rwzi Kampen laat zien dat het alloceren van de productie van groene waterstof binnen de grenzen van een rwzi mogelijk is. De voordelen zijn technisch, financieel en juridisch van aard. De geproduceerde groene waterstof kan worden ingezet voor de vergroening van de transportbeweging van het waterschap. Daarbij zorgen de reststromen voor meer energiereductie en verduurzaming.

Het theoretisch potentieel voor waterstofproductie is aanzienlijk, maar hangt per rioolwaterzuivering af van de lokale omstandigheden (zoals aanbod duurzame energie in de omgeving, lokale afzetmogelijkheden, grootte van de rioolwaterzuivering). Het theoretisch potentieel alleen al op de rwzi Zwolle wordt door het

waterschap Drents Overijsselse Delta globaal ingeschat op een electrolyser van ongeveer 10 MW (dit waterschap heeft in totaal 16 rioolwaterzuiveringen). Diverse waterschappen willen de mogelijkheid van een pilotinstallatie verkennen.

Uit de uitwerking van de pilots in het onderzoek kan geconcludeerd worden dat een rwzi een interessante bijdrage kan leveren om de stagnatie van duurzame opwek door netcongestie te verhelpen. Bij de aanpassing van de regionale energie-infrastructuur is het daarom van belang om de waterschappen te betrekken om de in beeld gebrachte kansen te verzilveren. Lokaal vervolgonderzoek per locatie is noodzakelijk. Waterschappen kijken er naar uit om samen met de netbeheerders en de provincies deze mogelijke oplossingen nader te verkennen.

Het vervolg

Om de optimalisatiekansen goed in beeld te brengen, is er behoefte aan een vervolgonderzoek naar het concept smart energie-hub. Voor de rwzi Harderwijk en een aantal bedrijven in de omgeving zal de afstemming tussen de lokale opwek en verbruik, rekening houdend met de desbetreffende verbruiksprofielen, verder worden onderzocht. Een ontwerp van de hub wordt gemaakt om in de vervolgfase de hub daadwerkelijk in de praktijk te realiseren. Alliander, de gemeente Harderwijk en het bedrijvenpark BKH hebben aangegeven daar aan mee te willen werken.

Voor het bepalen van de exacte waarde van de beluchting met pure zuurstof, als restproduct van de elektrolyse, is een onderzoek door STOWA gestart. Daarin wordt de focus gelegd op de haalbaarheid van de energiebesparing en het beperken van de lachgas-emissies uit het zuiveringsproces door het beluchten met pure zuurstof. Dit wordt aan de hand van praktijkmetingen bepaald. Verder is het waterschap in gesprek met de stakeholders over de realisatie van een electrolyse systeem en de rol van de verschillende partijen daarin.

Voor beide hubs is het van belang om de realisatie van deze twee mogelijke oplossingen in de praktijk te toetsen. Gelet op de huidige juridische en fiscale beperkingen is het wenselijk dat hiervoor de nodige experimenteerruimte wordt geboden.

1 Inleiding

1.1 Aanleiding van het onderzoek

Waterschappen hebben een de maatschappelijke taak om goed kwantitatief en kwalitatief waterbeheer uit te voeren. Klimaatverandering heeft mogelijk negatieve consequenties voor dit waterbeheer. Maatregelen om klimaatverandering zoveel mogelijk te beperken worden daarom unaniem gesteund door de individuele waterschappen en de Unie van Waterschappen (UvW). Hierbij gaat het zowel om maatregelen op gebied van klimaatadaptatie, bijvoorbeeld omgaan met toename van neerslagextremen en droogte, als het bijdragen aan klimaatmitigatie door het benutten van mogelijkheden voor energiebesparing, overschakelen op duurzame bronnen, duurzame opwek van energie en het benutten van mogelijkheden voor buffering en opslag van energie.

Een waterschap heeft geografisch een regionale aanwezigheid, ingebed in de stedelijke en landelijke omgeving met functies als wonen, bedrijvigheid, natuur en landbouw. Regionaal steunen de waterschappen de energietransitie door een actieve deelname in de totstandkoming van de regionale energiestrategie (RES). Het waterschap heeft hierin een natuurlijke rol vanuit eigendom van gronden met mogelijkheid voor duurzame energieproductie en vanuit het eigen energiegebruik door de installaties voor de zuivering.

Waterschappen zijn al geruime tijd bezig met verduurzaming, bijvoorbeeld door biogasproductie (vergisting) en kijken nu ook actief naar (aanvullende) energieopwekking vanuit zon, wind en aquathermie. De opgewekte energie kan in eerste instantie gebruikt worden door de eigen installaties, en daarna door de directe omgeving (bijvoorbeeld warmtelevering), door de mobiliteit (bijvoorbeeld biogas/CNG/LNG) en voor teruglevering op het elektriciteitsnetwerk en gasnetwerk. Ook ontstaat de mogelijkheid om de verschillende energiestromen te koppelen (vraag-aanbod), te converteren (biogas naar warmte/elektra, elektriciteit naar waterstof, zuurstof en warmte), op te werken (slib naar biogas naar groengas/CNG/LNG) en te beheren.

Buiten de waterschappen wordt er ook veel in duurzame opwek geïnvesteerd. Het aandeel duurzame energie neemt toe en in het toekomstige energiesysteem zal er veel weersafhankelijke volatiele opwek zijn. Dit grilligere opwekpatroon zorgt voor grote verschillen in de elektriciteitsprijs en het is niet gegarandeerd dat altijd voldoende duurzame elektriciteit beschikbaar is. Voor de UvW, met gemalen en rwzi's als (middel)groot verbruiker van energie, is betrouwbare, beschikbare en betaalbare energielevering van belang. Door het realiseren van eigen duurzame elektriciteitsopwekking, kan (voor een gedeelte) de toegankelijkheid en betaalbaarheid van elektriciteit gewaarborgd worden en komt de benodigde energievoorziening in eigen regie.

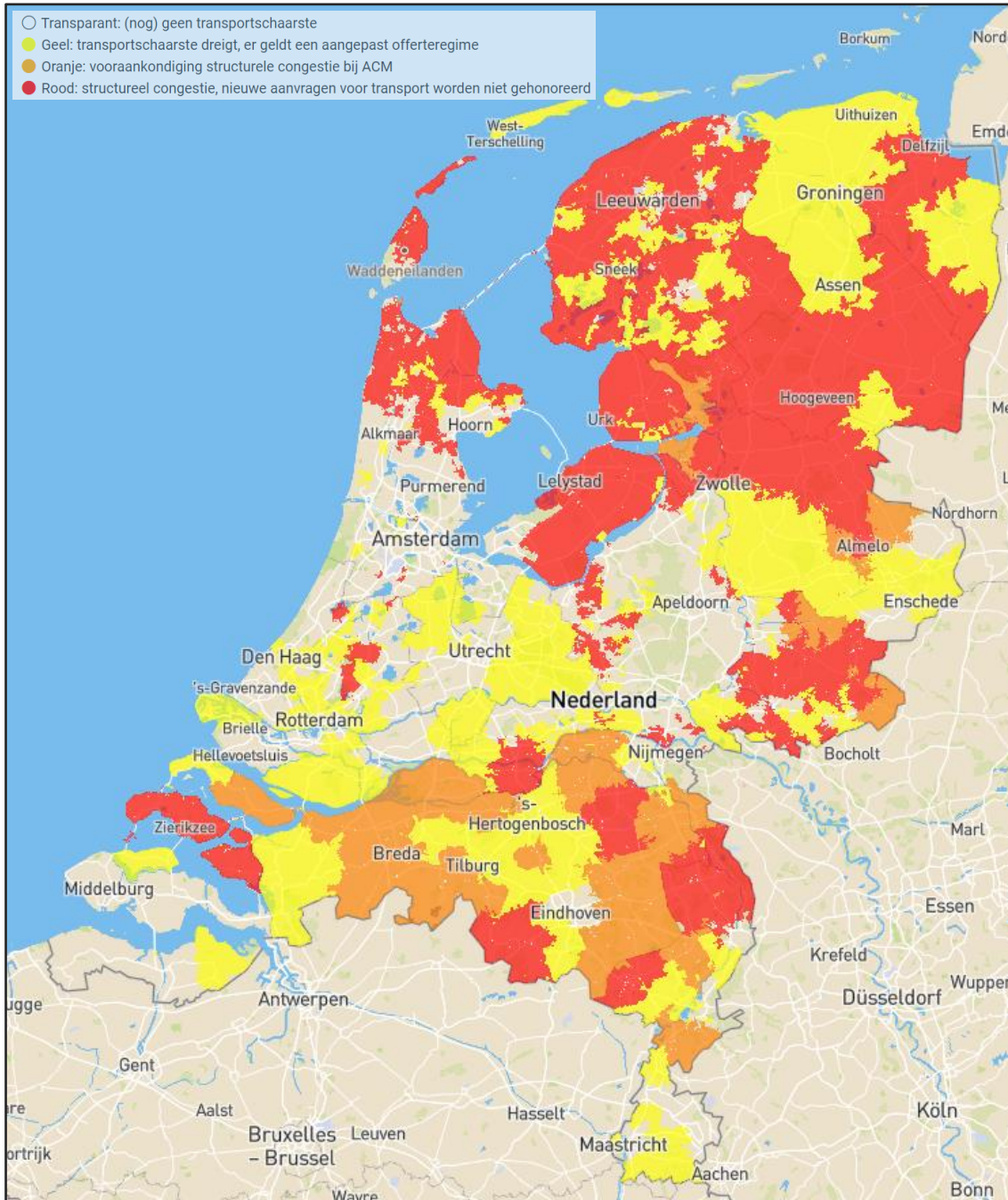
Energie-hub als oplossing voor congestie

Eén van de knelpunten in de energietransitie die lokaal en regionaal naar voren komt is de beperkte transportcapaciteit van het elektriciteitsnetwerk om duurzaam opgewekte energie af te kunnen voeren. Hierbij zijn vooral de piekvermogens een probleem. De duurzame energieopwekking heeft een groot aandeel in deze congestie omdat er op bepaalde momenten meer vermogen wordt geleverd, dan er vraag is. Bij conventionele elektriciteitscentrales kan doorgaans de capaciteit beter afgestemd worden op de vraag en is congestie daardoor minder een probleem.

Vanwege de toenemende hoeveelheid geïnstalleerde duurzame elektriciteitsopwekking, ontstaat er dus congestie op het elektriciteitsnetwerk en is er op veel plekken in Nederland geen transportcapaciteit meer

beschikbaar, zoals te zien in Figuur 1.1. Netbeheerders werken er hard aan om het net te verzwaren. Dit vergt echter veel investeringen en het kost tijd voordat dit gerealiseerd is.

Figuur 1.1 Transportcapaciteit elektriciteitsnetwerk Nederland ¹



Er zijn verschillende oplossingen voor netcongestie. Allereerst moet het net door de netbeheerders verzwared worden. Daarnaast kan er gekeken worden waarvoor de netaansluiting door de aangeslotene

¹ <https://capaciteitskaart.netbeheernederland.nl/> geraadpleegd op 01-06-2021

gebruikt wordt, en de garantie en zekerheid van levering die gevraagd is, en de transportcapaciteit op verschillende momenten van de dag. Het elektriciteitsnet in Nederland is redundant aangelegd, waardoor de zekerheid van levering geborgd is. Dit betekent dat bij storing of uitval van een kabel of transformator er reservecapaciteit in het netwerk beschikbaar is. Het is mogelijk dat er afnemers en producenten zijn die deze garantie niet nodig hebben, waardoor de gereserveerde capaciteit in sommige gevallen anders ingezet kan worden. De mate van congestie op het net, en daarmee ook de transportcapaciteit, is dus tijdsafhankelijk. Hier liggen mogelijkheden om beter gebruik te maken van de geïnstalleerde capaciteit over de loop van de dag. Dit vergt wel flexibiliteit in productie en consumptie.

Indien een rwzi haar verbruik en opwek via de WKK flexibel kan inzetten op momenten dat er meer transportcapaciteit is op het net, zal dit ten goede komen aan de congestie. Ook het installeren van regelbare conversiesystemen, zoals een electrolyser, kan een positieve bijdrage leveren aan netcongestie. Dit kan gerealiseerd worden door enkel elektriciteit van het net te gebruiken en te leveren op momenten wanneer er voldoende transportcapaciteit is, en het totale volume elektriciteit dat teruggeleverd wordt aan het net te beperken. Hiermee kunnen rwzi's bijdragen aan het 'verslimmen' en optimaliseren van het energienetwerk. Doordat rwzi's verspreid over het land aanwezig zijn, kunnen ze op verschillende locaties een bijdrage leveren. Hiermee kan de rwzi dus een centrale rol spelen in de energie-infrastructuur, als een energie-hub. Een zogeheten energie-hub kan op deze manier bijdragen aan het afvlakken van de pieken op het net. Hierdoor kunnen mogelijk hoge maatschappelijke investeringen in het net (meer kabels en stations) worden voorkomen. Bovendien hebben waterschappen als grote energiegebruikers zelf ook baat bij een stabiele duurzame energiestroom.

Het waterschap staat nu voor grote keuzes hoe zij kunnen waarborgen dat zuiveringsprocessen niet in het geding komen door de grillige energieopwekking en dat er een betrouwbare, beschikbare en betaalbare energievoorziening blijft. Hierbij moet rekening gehouden worden met de transportcapaciteit van het elektriciteitsnetwerk en kunnen ook andere mogelijkheden voor netstabilisatie en energieintegratie onderzocht worden. Vanwege de nodige investeringen in assets die hiermee gepaard gaan, is meer inzicht nodig in de mogelijke rol die een rwzi kan spelen als energie-hub, en de implicaties die dat heeft of de omgeving en het elektriciteitsnetwerk.

1.2 Vraagstelling

Dit project beoogt inzicht te verkrijgen in de mogelijkheden voor waterschappen om maatschappelijke kosten voor het uitbreiden van het energienet te verlagen door middel van slim energiebeheer, zelf meer duurzame energie te realiseren of te faciliteren, en daarbij een verkenning te doen naar de mogelijkheden van de functie van energie-hub door rwzi's. Het onderzoek beoogt dit niet alleen op een conceptueel niveau te onderzoeken maar nadrukkelijk ook de praktische uitvoerbaarheid te verkennen.

Dit leidt tot de volgende vraagstelling voor het onderzoek:

Op welke wijze kan een rwzi als potentiële energie-hub bijdragen aan het faciliteren van meer duurzame energie, waarbij de kerntaak van zuivering in stand blijft en het elektriciteitsnet zo veel mogelijk wordt ontlast?

1.3 Scope

Er zijn veel verschillende stromen aanwezig op een rwzi; onder andere elektriciteit, warmte, water, slib, en gas. Het doel van dit project is om te onderzoeken wat de rol van een rwzi als energie-hub kan zijn, zonder dat dit ten koste gaat van de huidige primaire taken en processen die plaatsvinden op een rwzi.

De focus ligt hierbij vooral op de elektrische stroom en hoe deze, door direct gebruik, conversie of opslag het best benut kan worden. Deze focus is aangelegd omdat hierin op dit moment (netwerk)knelpunten liggen ten aanzien van de afvoer van duurzame opgewekte energie en dit knelpunt opgelost moet worden indien een rwzi duurzame elektriciteitsopwekking wil realiseren. Hierdoor kan een rwzi bijdragen aan klimaat- en duurzaamheidsdoelstellingen en minder afhankelijk zijn van wisselende elektriciteitsprijzen. De gasstroom speelt ook een belangrijke rol. Anders dan elektriciteit is het mogelijk om gassen makkelijker en met minder verliezen op te slaan. Met biogas vanuit vergistingsinstallaties op de rwzi's kan elektriciteit en warmte wordt geproduceerd. Ook elektrolyse kan potentieel worden ingezet om elektriciteit om te zetten in waterstof.

Warmtestromen zullen in dit onderzoek op kwalitatieve basis worden beschouwd, omdat er onvoldoende data voorhanden is over de exacte omvang van alle warmte behoevende processen op de rwzi om een sluitende balans te vormen. Omzetting naar warmte wordt ook kwalitatief onderzocht als strategie in het energie-hub concept. Warmte kan nuttig ingezet worden binnen de rwzi of de omgeving, bijvoorbeeld omdat het als nevenproduct vrijkomt, om overschotten aan duurzame elektriciteit nuttig toe te passen of omdat er een warmtevraag kan zijn bij de vergistingsinstallaties; waar mogelijk wordt dit aspect (kwalitatief) meegenomen in het onderzoek.

In dit onderzoek wordt op hoofdlijnen beschouwd of de verschillende mogelijkheden voor een rwzi als energie-hub technisch haalbaar zijn en of dit een nuttige bijdrage kan leveren aan de energiebalans. Waar mogelijk wordt ook de financiële haalbaarheid en praktische uitvoerbaarheid beschouwd.

1.4 Aanpak en leeswijzer

Twee verschillende sporen worden gebruikt om tot beantwoording van de vraagstelling te komen, namelijk het analysespoor en het pilotspoor. Het analysespoor wordt uitgewerkt in de voorliggende rapportage. Het pilotspoor wordt voor twee specifieke locaties nader verkend en uitgewerkt in Bijlage 1 en Bijlage 2 bij dit rapport. In het pilotspoor worden twee verschillende pilots concreet uitgewerkt, namelijk de mogelijkheid voor de inzet van waterstof op de rwzi Kampen (Bijlage 1) en de mogelijkheden van de functie van energie-hub met een focus op het ontlasten van het elektriciteitsnetwerk voor rwzi Harderwijk (Bijlage 2) waar ook een vergistingsinstallatie aanwezig is.

In het analysespoor worden de generieke mogelijkheden voor rwzi's om een energie-hub te vormen verkend. De strategieën die hieruit volgen zullen voor de meeste rwzi's toepasbaar zijn. Allereerst zal er in hoofdstuk 2 het theoretische concept van een energie-hub nader worden uitgewerkt. In hoofdstuk 3 van dit rapport zal in het kader van het analysespoor systematisch de (32) rwzi's van de aan dit onderzoek deelnemende waterschappen (Waterschap Drents Overijsselse Delta en Waterschap Vallei en Veluwe) geanalyseerd. Hieruit zal een dataset worden geselecteerd die het meest representatief is voor alle rwzi's. Dit biedt de basis om in hoofdstuk 4 de verschillende bouwstenen en algemeen toepasbare concepten voor een energie-hub te definiëren en onderzoeken. Hoofdstuk 5 vat de bevindingen samen in puntsgewijze conclusies gevolgd door enkele aanbevelingen om een nader vervolg te geven aan dit onderzoek.

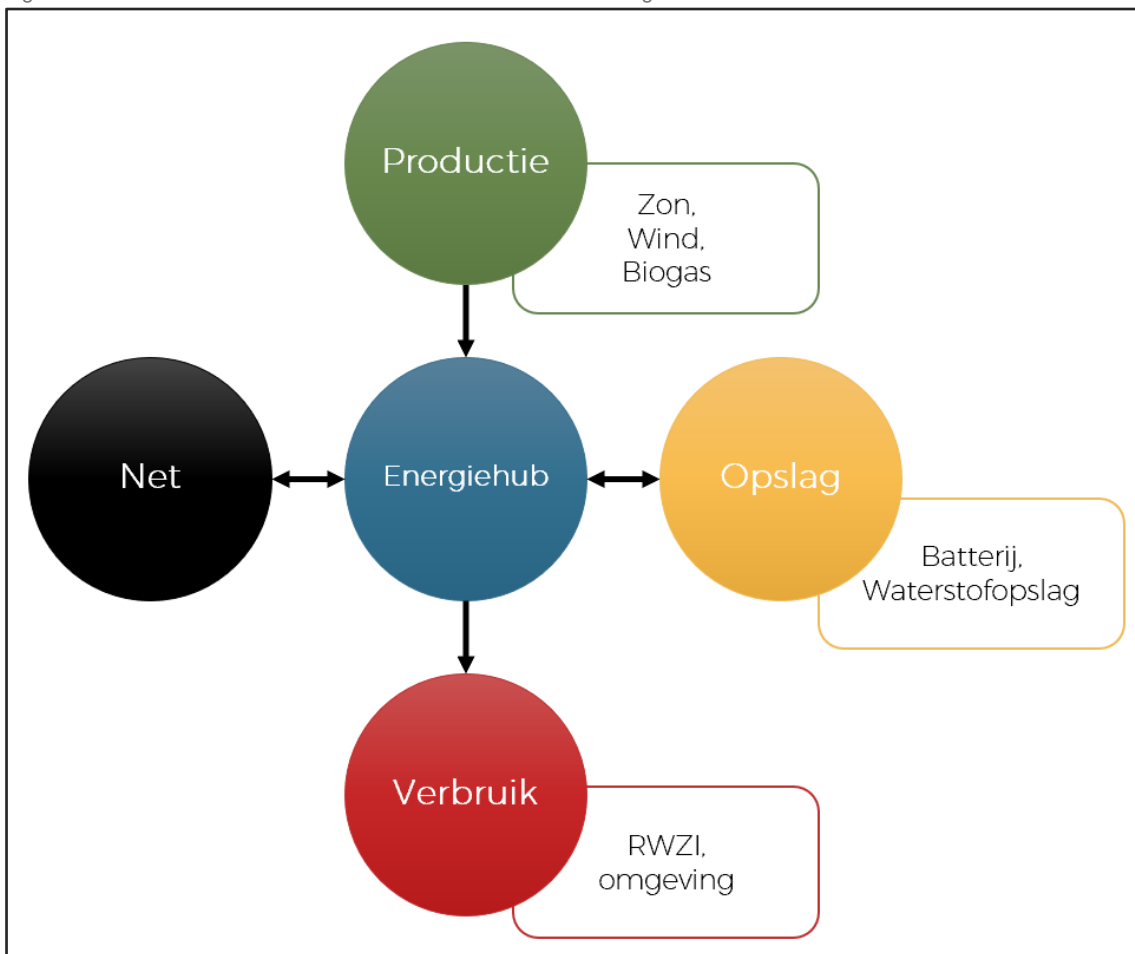
2 De rwzi als energie-hub: het concept

2.1 Onderdelen van een energie-hub

Rioolwaterzuiveringen (rwzi's) hebben de potentie om zich te ontwikkelen als energie-hub. Een energie-hub is een knooppunt in een energiesysteem waar verschillende energiedragers samen komen en afstemming, opslag en conversie mogelijk is. Energie-hubs kunnen op verschillende schalen en mate van complexiteit worden ingericht. Om een significante rol te kunnen spelen in het ontlasten van het elektriciteitsnetwerk, moet er grootschalige energieproductie, energieverbruik en/of energieconversie op of in de nabijheid van de rwzi aanwezig zijn. Bovendien moeten er afzetmogelijkheden voor de verschillende energiestromen/-dragers en moet er voldoende uitwisselingscapaciteit met een netwerk zijn. De verschillende functionaliteiten en hoe deze samenhangen is schematisch weergegeven in Figuur 2.1.

De verschillende energiestromen op een rwzi, de mogelijkheden om extra energiestromen toe te voegen en aan elkaar te koppelen en de ruimtelijke positionering van rioolwaterzuiveringen in de omgeving, maken rwzi-locaties interessant als mogelijke energie-hub.

Figuur 2.1 Verschillende functionaliteiten komen samen in een energie-hub



Voordat analyse en kwantificering van energiestromen (opwek en verbruik) plaatsvindt, worden in dit hoofdstuk de verschillende energiestromen en -dragers kort beschreven. Ook wordt een (theoretisch) model gepresenteerd waarin de verschillende energiestromen gekoppeld worden.

2.2 Energieverbruik

Het energieverbruik van de rwzi en de omgeving wordt hieronder toegelicht.

2.2.1 Verbruik rwzi

Elektriciteitsvraag

Voor het zuiveringsproces is elektriciteit nodig waarbij deze elektriciteit voornamelijk gebruikt wordt voor het aandrijven van de motoren voor de beluchting. 50% tot 60% van de elektriciteitsvraag op de rwzi is bestemd voor de beluchting.

Warmtevraag

Voor de slibvergisting (indien van toepassing) en het verwarmen van de bedrijfsgebouwen is warmte nodig. De warmtevraag van de bedrijfsgebouwen bedraagt slechts 4% – 8.5% van de totale warmtevraag op rwzi's waar ook slibvergisting plaats vindt, het overige gedeelte van de warmtevraag gaat naar de vergisting. Op rwzi's zonder slibvergisting is de totale warmtevraag dus erg beperkt.

Brandstofvraag transport en werktuigen

Veel werktuigen op het terrein van een rwzi en in het beheergebied van een waterschap, draaien op diesel. Verduurzamingsmogelijkheid voor deze toepassing zijn het vervangen van diesel door groengas (opgevaardeerd biogas), groene waterstof dat binnen de grenzen van de rwzi geproduceerd wordt, of door elektrisch aangedreven voertuigen (met accu's).

2.2.2 Verbruik omgeving

Warmtevraag

De gebouwde omgeving heeft een warmtevraag. Er zijn verschillende mogelijkheden om aan deze warmtevraag te voldoen; door middel van aardgas (of eventueel groengas), het gebruik van een warmtepomp of elektrische boiler (waaruit vervolgens een nieuwe elektriciteitsvraag ontstaat) of door aangesloten te zijn op een warmtenet en gebruik te maken van vrijgekomen warmte uit de nabije omgeving.

Elektriciteitsvraag

Elektriciteit is een hoogwaardige vorm van energie en wordt door verschillende sectoren in de omgeving gebruikt om aan de energievraag te voldoen. Door middel van een netaansluiting kan elektriciteit geleverd worden. Vanwege de klimaatdoelen is er specifiek vraag naar duurzame elektriciteit boven elektriciteit dat geproduceerd is uit fossiele brandstoffen.

2.3 Energieproductie

Er zijn verschillende energiebronnen mogelijk op het terrein van een rwzi of in de directe omgeving. Deze worden hierna verder toegelicht.

2.3.1 Vergisting: biogas, groengas en elektriciteit

Slibgisting is een biologisch proces waarbij de organische stoffen uit zuiveringsslib worden omgezet in methaan, kooldioxide en water. Er kan onderscheid gemaakt worden tussen primair en secundair slib; in de voorbezinktank wordt primair slib afgevoerd, dit bestaat uit bezinkbare delen uit het influent. In de actief-slibtank wordt vervolgens biologisch (secundair) slib geproduceerd, voornamelijk bestaande uit bacteriemassa. Biogas wordt geproduceerd door het organische deel van het zuiveringsslib te vergisten waardoor er biogas ontstaat. Dit slibgistingproces vindt plaats in een slibgistingstank met een operationele hydraulische slibverblijftijd van ongeveer 20 dagen bij een temperatuur van 30 °C tot 38 °C². Door middel van slibgisting is het mogelijk een energierugwinning uit rioolwater te realiseren, is er een betere stabilisatie van slib, een betere ontwaterbaarheid van het uitgegiste slib (minder chemicaliënverbruik ontwatering) en minder reststofproductie².

Slibvergisting wordt toegepast op 70 rwzi's in Nederland, wat neerkomt op ongeveer een op de vijf rwzi's. Op deze 70 rwzi's wordt ongeveer 2/3^e van al het slib verwerkt. In totaal wordt hiermee 135 miljoen kuub biogas per jaar geproduceerd in 2020. Hiermee zijn de waterschappen een van de grootste biogasproducenten uit Nederland en dragen ze bij aan circa 25% van de nationale biogasproductie. Het is mogelijk om het biogas op te waarden tot groengas, wat vervolgens ingezet kan worden in de mobiliteitssector of de gebouwde omgeving². Op dit moment wordt doorgaans het biogas gebruikt om door middel van een warmtekrachtkoppeling (WKK) elektriciteit (en warmte) te produceren.

2.3.2 Warmteproductie

Zoals hierboven beschreven, wordt het geproduceerde biogas doorgaans verbrand in een wkk. Hierbij komt naast elektriciteit ook een grote warmtestroom vrij, die vaak kan worden ingezet om het vergistingsproces op temperatuur te houden en indien mogelijk voor gebouwverwarming.

Naast de thermische energie die vrijkomt uit een wkk, kan er ook warmte onttrokken worden aan het effluent met hulp van warmtewisselaars. Door middel van een warmtepomp kan de gewonnen warmte vervolgens worden opgewaardeerd tot hoogwaardige warmte van circa 75°C dat via een warmtenet geleverd kan worden aan de omgeving van de rwzi³. In de zomermaanden is dit voldoende en draait het warmtenet op een aanvoer van circa 72°C. De potentie van de warmte die onttrokken kan worden uit het effluent is afhankelijk van het waterdebiet en het temperatuurverschil wat onttrokken wordt. Echter, hoe groter het warmteverschil tussen het effluent en de gewenste temperatuur van het warmtenet, hoe lager het rendement van de warmtepomp is en hoe meer elektriciteit er aanvullend nodig is.

2.3.3 Zon en wind

Het is mogelijk dat er op het terrein eigen opwek van duurzame elektriciteit plaatsvindt middels zonnepanelen en/of windturbine(s). De opgewekte elektriciteit wordt doorgaans eerst voor eigen verbruik gebruikt. Indien er meer opwek is dan eigen verbruik, zal een nuttige besteding van de opgewekte energie gevonden moeten worden.

² Handboek slibgisting, STOWA rapport 16, 2011

³ Thermische energie op de rwzi, STOWA rapport 03, 2013

2.4 Energieopslag

Op veel rwzi's is er nog geen vorm van elektriciteitsopslag aanwezig. In de functie van een energie-hub is een vorm van opslag al snel nodig om het net te ontlasten en 'overtollige' duurzaam opgewekte energie op te slaan. Ook kan opslag nodig zijn om op de momenten dat de energievraag hoger is dan de energieproductie, toch de processen te kunnen laten doorgaan.

2.4.1 Waterstof

Waterstof is een energiedrager die geproduceerd kan worden door het splitsen van water door middel van elektriciteit. Waar het lastig is om elektriciteit op te slaan, zijn gassen wel goed op te slaan. Vanwege het grote volume van waterstof bij atmosferische druk (en dus lage energiedichtheid), zal de waterstof onder druk gebracht moeten worden. Groene waterstof is waterstof dat geproduceerd wordt door middel van duurzaam opgewekte elektriciteit. Groene waterstof kan gebruikt worden in de industrie als vervanger van aardgas en kolen, als vervanger van grijze waterstof, in de mobiliteitssector, in de gebouwde omgeving en als brandstof om elektriciteit op te wekken.

Op dit moment zijn de systemen voor opslag en distributie van waterstof uitgelegd voor 300 bar, met ontwikkelingen en normaanpassing tot 640 bar. Deze opslagsystemen zijn kostbaar en voor een goede businesscase is het van belang om de waterstofopslag te dimensioneren dat deze zo klein mogelijk is maar nog wel kan garanderen dat de vraag naar waterstof geleverd kan worden.

2.4.2 Batterij

Naast waterstof is ook opslag met batterijen mogelijk, bijvoorbeeld Li-ion en Vanadium Redox Flow batterijen (VRFB). In een batterij wordt elektriciteit direct opgeslagen zonder dat er conversie naar een andere energiedrager plaatsvindt. Elektrische voertuigen worden niet gezien als een geschikte oplossing vanwege het constante verbruik van de rwzi. Dit zou vereisen dat er 24 uur per dag auto's aan dit systeem gekoppeld zijn, wat niet realistisch is.

2.4.3 Warmteopslag

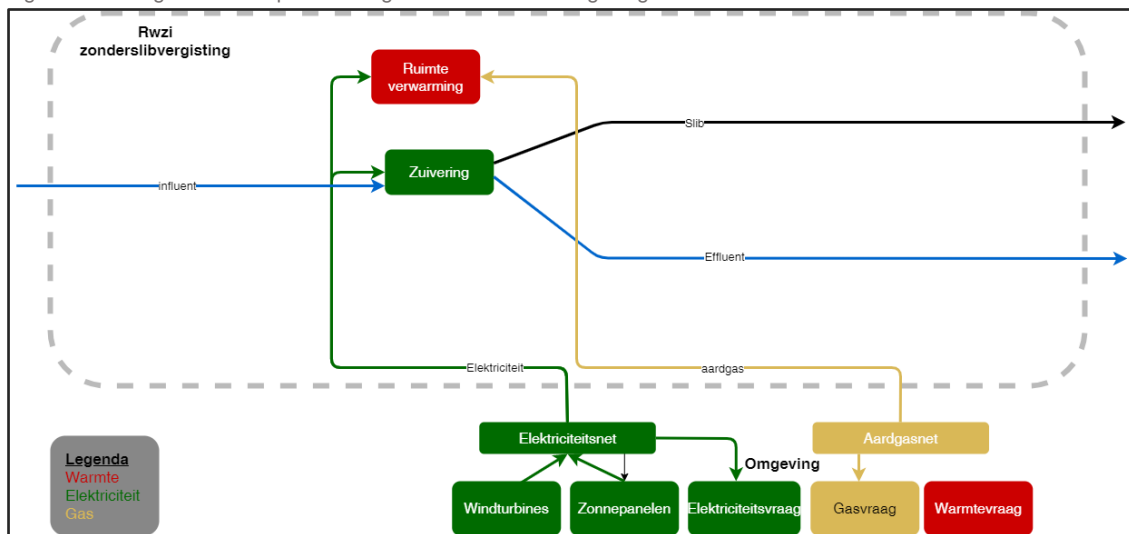
Om de warmteproductie aan te laten sluiten op de warmtevraag, is warmteopslag gewenst. Deze opslag zal voornamelijk op maandbasis gebruikt worden, waarbij er in de wintermaanden meer vraag naar warmte is dan tijdens de zomermaanden. De meest gebruikte vorm van grootschalige warmteopslag is een warmte koude opslag (WKO) in een aquifer in de ondergrond. De aanwezigheid van een geschikte aquifer is nodig voor een nuttige toepassing van de wko. Nieuwe ontwikkelingen rondom buffervaten en zogenaamd ecovat maken het mogelijk om niet alleen onder de grond warmte op te slaan, maar ook boven de grond. Voor het nuttig gebruik van de vrijgekomen warmte op een rwzi dient er een geschikte warmtevraag in de nabijheid, eventueel via een warmtenet, aanwezig te zijn. De vrijgekomen warmte afkomstig van een WKK is hoogwaardige warmte. Wanneer er warmte onttrokken wordt aan het effluent en er gebruik gemaakt wordt van eventueel vrijgekomen warmte van een elektrolyse systeem, is dit laagwaardige warmte (warmte met een relatief lage temperatuur). Deze warmte moet eerst door middel van een warmtepomp opgewaardeerd worden.

2.5 Theoretische model van een energie-hub

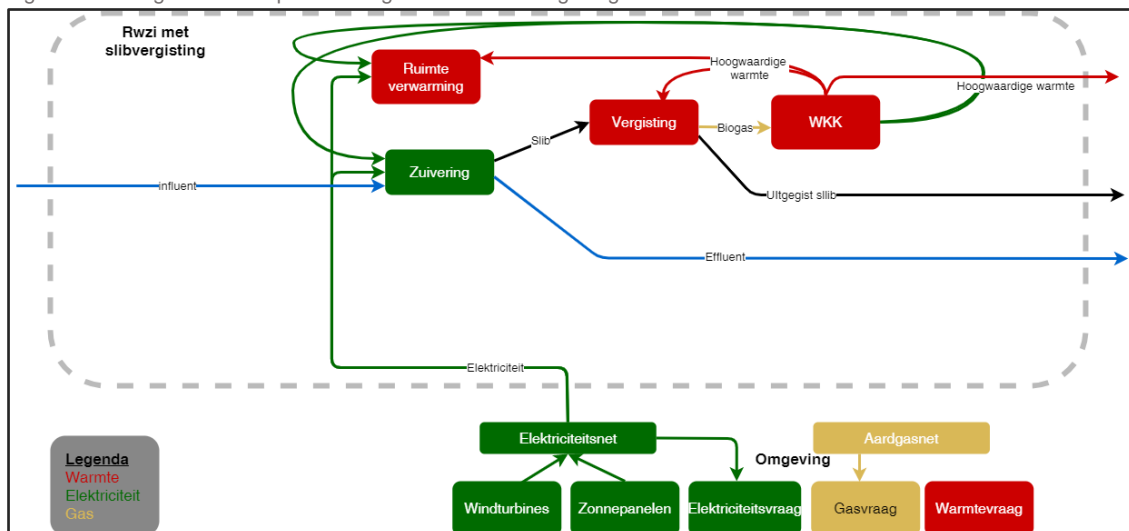
2.5.1 Koppelen van de stromen

Wanneer de verschillende energiestromen op een rwzi aan elkaar gekoppeld worden, kan de rwzi de functie van een energie-hub gaan vervullen. In *Figuur 2.2* en *Figuur 2.3* worden de stromen op een rwzi met en zonder slibvergisting weergegeven. Hieruit blijkt dat op een rwzi met slibvergisting meer soorten energiedragers aanwezig zijn en dat er nu al verschillende stromen gekoppeld worden.

Figuur 2.2 Energiestromen op een huidige rwzi zonder slibvergisting



Figuur 2.3 Energiestromen op een huidige rwzi met slibvergisting



Het schema in *Figuur 2.4* geeft de verschillende stromen weer in het geval dat de duurzame elektriciteitsopwekking, aquathermie en waterstofproductie door middel van elektrolyse toegevoegd worden op een rwzi. De extra koppeling van stromen maakt de rwzi tot een energie-hub. Verschillende koppelingen van stromen worden hieronder toegelicht.

De mogelijkheid voor het onttrekken van warmte uit het effluent kan ook interessant zijn. Binnen de grenzen van de rwzi kan de warmte gebruikt worden voor ruimteverwarming, of voor het indikken of vergisten van slib op de rwzi's waar dit nodig is³. De mogelijkheden voor het leveren van deze warmte aan de omgeving zijn afhankelijk van de lokale mogelijkheden in het gebied. Of deze mogelijkheden financieel aantrekkelijk zijn, hangt af van de afstand, omvang, kwaliteit en bedrijfstijd van de warmtevraag en het warmteaanbod.

Op het moment dat er investeringen gedaan moeten worden om de warmtepotentie uit het effluent te benutten, moet er wel rekening gehouden worden met het feit dat deze warmte middels een infrastructuur getransporteerd moet worden. Indien dit warmtenet niet in beheer is van het waterschap, kan er een afhankelijkheid van een andere partij met betrekking tot leveringsafspraken ontstaan. Garanties op de lange termijn zijn daarom nodig bij de beslissing over investeringen voor warmtewinning en warmtelevering. Daarbij komt dat de beschikbaarheid van warmte en behoefte aan warmte van mogelijke afnemers seizoen afhankelijk kunnen zijn. Hierdoor kan de koppeling met een warmte opslagsysteem, bijvoorbeeld een WKO, nuttig zijn.

Koppeling van elektriciteit en waterstof

Wanneer elektriciteit wordt ingezet om waterstof te produceren, worden verschillende energiedragers aan elkaar gekoppeld en ontstaat een regelbaar energiesysteem. Bij het produceren van waterstof via elektriciteit door middel van elektrolyse, gaat wel energie verloren, maar de ontwikkeling van de elektrolyse techniek is nog volop in gang. Waar in 2017 een rendement van 65% (HHV) of 60 kWh/kgH₂ gehaald werd, is dat in 2021 gestegen naar 79% (HHV) of 50 kWh/kgH₂. Bij de productie van waterstof uit water door elektrolyse komt naast waterstof ook zuurstof en warmte vrij. Deze additionele stromen kunnen ingezet worden op rwzi's ter aanvulling van de beluchtingssystemen en voor het drogen en vergisten van het slib. Dit kan mogelijk voor verdere energiebesparingen zorgen.

Het waterstof dat geproduceerd wordt, in het geval hernieuwbare elektriciteit gebruikt wordt, is een duurzame gasvormige energiedrager. Dit wordt groene waterstof genoemd.

Waterstof kan gebruikt worden in de industrie, als vervanger voor aardgas voor warmte toepassingen, maar ook als grondstof in de chemie. Een van de bekendste voorbeelden is het gebruik van waterstof in de mobiliteitssector in brandstofcellen. Op dit moment is de waarde van de toepassing van waterstof in de industrie lager dan de toepassing in de mobiliteit. Als industriële toepassing, heeft waterstof een waarde van 1,60 euro per kg H₂. De mobiliteitswaarde is onder huidig overheidsbeleid 5,50 euro per kg H₂. Om deze reden is het inzetten van waterstof in de mobiliteitssector op dit moment de financieel aantrekkelijkste toepassing van waterstof. Energetisch is het inzetten van waterstof in de mobiliteitssector ook interessant omdat de efficiency van een verbrandingsmotor ook laag is (25% tot 40% afhankelijk van het deellast percentage waar de verbrandingsmotor op functioneert). Bovendien reduceert de toepassing van waterstof in deze sector de uitstoot van NO_x en CO₂.

Indien waterstof gebruikt wordt om weer elektriciteit op te wekken, wordt een rendement van slechts 43% (HHV) gehaald, waardoor, gecombineerd met het rendement van de productie van waterstof, 66% van de energie verloren gaat. Het is daarom niet een energetisch efficiënte toepassing om waterstof te gebruiken om elektriciteit later weer op te wekken.

2.5.2 De invloedssfeer van een energie-hub

De grenzen van een energie-hub zijn in theorie oneindig, aangezien energiestromen met elkaar in verbinding staan. Als voorbeeld: een rwzi heeft een elektriciteitsaansluiting op een distributiekabel die op zijn beurt in verbinding staat met een transformatorstation, dat vervolgens is verbonden met het hoogspanningsnetwerk. Zelfs landelijke hoogspanningsnetwerken zijn met elkaar verbonden via interconnectors. Hoe verder je afgaat van je startpunt, hoe meer data er nodig is om de onderlinge invloed te kunnen kwantificeren. Dit geldt niet alleen voor elektriciteit, maar ook voor warmte, (riool)water, aardgas en alle andere energiedragers en kringlopen.

De mate waarin de afstand van de omgeving waarbinnen uitwisseling mogelijk is, wordt bepaald door de uitwisselingsmogelijkheid, die op zijn beurt afhankelijk is van de beschikbare infrastructuur.

Voor elektriciteit is er een uitgebreide infrastructuur aanwezig, en alle rwzi's zijn ook via een netaansluiting gekoppeld aan deze infrastructuur. Echter is er veel congestie op het net, waardoor op veel locaties beperkte of zelfs geen mogelijkheden zijn voor extra uitwisseling met het net. Voor de koppeling met de omgeving zal dus niet alleen gekeken moeten worden naar de aanwezigheid van de infrastructuur, maar ook naar de beschikbaarheid van de infrastructuur. Deze beschikbaarheid is tijd en locatie gebonden. Mogelijkheden voor afstemming met de netbeheerder, en eventueel met de omgeving, wordt besproken in bijlage 2 rwzi Harderwijk.

In het geval van gas is er ook een uitgebreid aardgasnetwerk. Zoals eerder besproken zijn er diverse technologieën om vervangers van aardgas te produceren (zoals groen gas, waterstofgas etc.). Naast het aardgasnetwerk, kunnen gassen ook uitgewisseld worden met de omgeving door tanks en wegtransport (bijvoorbeeld een tankstation). Vanwege veiligheid met betrekking tot opslag is goede communicatie met de omgeving over de vraag naar gassen nodig zodat het vraagprofiel redelijk overeenkomt met het productieprofiel en de opslag daarmee beperkt kan blijven.

Voor warmte is er (nog) geen nutsbedrijf die een infrastructuur op landelijk niveau regelt en garandeert. Op lokale schaal zijn er wel partijen die warmtenetten aanleggen en daarmee warmtebronnen koppelen met warmtevraag. Voor haalbare exploitatie is het belangrijk dat een warmtebron op de lange termijn, minstens 15 jaar, beschikbaar is. Bij elektriciteitscentrales bijvoorbeeld is dit niet altijd gewaarborgd, maar met redelijke zekerheid kan wel gesteld worden dat rwzi's blijvend zijn. Warmtenetten lenen zich vooral voor wijken met een bebouwingsdichtheid van boven de 30 woningen per hectare. Voor wijken waar de woningdichtheid lager ligt, zijn de kosten voor de infrastructuur, en de warmteverliezen in het netwerk relatief hoog waardoor alternatieven vaak financieel en energetisch gunstiger zijn. Om de warmteverliezen in het netwerk te beperken, is het wenselijk dat de afstand tussen de bron en de wijk maximaal 1000 meter is⁴.

In zijn algemeenheid heeft het voor alle energiestromen de voorkeur om de toepassing van geproduceerde energie(dragers) zo lokaal mogelijk te zoeken. Met name elektriciteit en warmte kennen verliezen als deze over grote afstanden getransporteerd dienen te worden.

4

https://www.topsectorenergie.nl/sites/default/files/uploads/Urban%20energy/publicaties/TKI_WarmtenettenOnttrafeld.pdf

2.5.3 Randvoorwaarden voor een rwzi energie-hub

De belangrijkste taak van een rwzi is het zuiveren van afvalwater. Wanneer er meer functionaliteiten en energiestromen gekoppeld worden aan dit zuiveringsproces, is het van belang dat het zuiveringsproces ook zonder deze additionele functionaliteiten en energiestromen kan plaatsvinden. Het primaire proces van zuivering moet geborgd zijn, onafhankelijk van de functie van een rwzi als een energie-hub.

Ten tweede moet een energie-hub het elektriciteitsnet niet extra (nadelig) belasten, bijvoorbeeld ten tijde van congestie. Congestie op het elektriciteitsnet kan het gevolg zijn van een te grote piek in levering (verbruik) of teruglevering (productie). De rwzi kan bijdragen in het mitigeren van leveringscongestie door eigen elektriciteitsproductie te realiseren, bijvoorbeeld door zonne- of windenergie. Echter, gezien de grillige productie van deze energiebronnen moet er ook rekening mee worden gehouden dat eventuele overschotten van deze opwek vervolgens niet op hun beurt bijdragen aan congestie met betrekking tot teruglevering aan het net. De mate en aard van de congestie op het net is daarom zowel locatie- als tijdsgebonden. Afstemming is nodig met de netbeheerder over momenten dat (extra) teruglevering of levering mogelijk, of zelfs gewenst is. Indien het mogelijk is om zowel eigen verbruik als productie flexibel in te zetten, kan de energie-hub het beste bijdragen aan ondersteuning van het elektriciteitsnet.

Ten derde moet er de bereidheid en de mogelijkheid zijn om als hub op te treden. Het koppelen van energiestromen gaat gepaard met investeringen. Een eerste doel waarom investeringen gedaan worden kan zijn om het eigen verbruik (grotendeels) duurzaam op te wekken. Om een energievoorziening te hebben die grotendeels zelfvoorzienend is, zal er meer vermogen moeten worden geïnstalleerd dan de piekvraag. De overige opgewekte elektriciteit kan in afstemming met de netbeheerder teruggeleverd worden. Echter zal deze mogelijkheid in veel gevallen niet volledig mogelijk zijn vanwege beperkte transportcapaciteit. Om te zorgen dat dat alle opgewekte elektriciteit goed benut wordt, zijn er ook andere investeringen nodig. Veel projectontwikkelaars zijn gefocust op het financiële rendement van een energieproject en aanvullende investeringen in opslag en/of conversie drukken momenteel nog teveel op het rendement. Een waterschap daarentegen zit in een positie waar het mogelijk is om een ander rendementsperspectief in te nemen en te kijken naar het grotere (maatschappelijke) plaatje. Hierdoor kan de maatschappelijke waarde die gecreëerd wordt door het inrichten van een energie-hub meespelen in het bepalen of de investeringen rendabel genoeg zijn en kan er wellicht genoeg worden genomen met lagere financiële rendementen. Bovendien kunnen waterschappen mogelijk een andere manier aangrijpen om financiering voor dergelijke investeringen rond te krijgen door samenwerking met bijvoorbeeld de waterschapsbank.

De mogelijkheid om op locatie (rest)energiestromen te benutten, kan bepaalde locaties ook geschikter maken om als energie-hub te fungeren. Indien bijvoorbeeld een elektrolyse systeem gebruikt wordt om het overschot duurzaam opgewekte energie om te zetten in waterstof, kan de vrijgekomen warmte en zuurstof op een rwzi nuttig worden ingezet. Het inzetten van deze bijproducten zorgt voor verdere energiebesparingen van de processen op de rwzi.

Ook de omgevingsvergunningen en bestemmingsplannen bepalen de (initiële) geschiktheid van locaties om als energie-hub te dienen. Op het terrein van een rwzi is de omgevingsvergunning vaak ruimer dan op andere plaatsen omdat er al processen zijn die ingericht op gassen, warmte en afvalstoffen. Gezien de bestaande omgevingsvergunningen en bestemmingsplannen voor rwzi locaties, kan het mogelijk eenvoudiger zijn om op deze locaties een vergunning voor bijvoorbeeld een elektrolyse systeem rond te krijgen.

3 Analyse energiehouding rwzi's

In dit hoofdstuk wordt de data van het elektriciteitsverbruik van verschillende rwzi's (van WDOD en WVV) geanalyseerd. Het doel van deze analyse is om datasets te identificeren die representatief zijn voor het elektriciteitsverbruik van de rwzi in het algemeen. Dit vormt de basis bouwsteen van het energie-hub-concept op een rwzi, aangezien deze energiebehoefte met bijbehorend verbruiksprofiel te allen tijde gegarandeerd dient te worden. We hebben ons op eerste plaats gericht op het elektriciteitsverbruik, omdat hiervan voldoende meetdata beschikbaar is. In hoofdstuk 4 wordt er vervolgens voor deze representatieve datasets geanalyseerd wat de mogelijkheden van de rwzi als energie-hub zijn.

3.1 Bepaling van de energiehouding van een representatieve rwzi

Om de energiehouding van een typische rwzi te bepalen moet eerst de typische rwzi gedefinieerd worden. Over het algemeen kunnen rwzi's onderverdeeld worden in twee categorieën: rwzi's met slibvergister en rwzi's zonder slibvergister. Dit is tegelijkertijd ook een redelijke indicatie van het formaat van de rwzi; rwzi's met een biologische capaciteit onder de 150.000 (136 gr TZV / dag) hebben over het algemeen geen vergister, terwijl veel rwzi's met een biologische capaciteit boven 150.000 (136 gr TZV / dag) wel een vergistingsinstallatie hebben. Dit geldt echter niet alle grote rwzi's; bijvoorbeeld de rwzi's in Utrecht, Almere en Deventer hebben een grotere biologische capaciteit van 150.000 (136 gr TZV / dag), terwijl hier geen vergisting plaatsvindt.

Het belichtingsproces op de rwzi is verantwoordelijk voor het leeuwendeel van het energieverbruik. Dus hoe groter de rwzi, hoe groter het energieverbruik. Op basis van gesprekken met experts van de waterschappen is vastgesteld dat een slibvergister gemiddeld slechts 5% extra elektriciteitsverbruik toevoegt ten opzichte van het verbruik van het zuiveringsproces.

Om het verbruik van de zuivering in kaart te brengen zijn verbruiksgegevens van 20 rwzi's zonder slibvergister beschouwd. Van deze rwzi's zijn 59 datasets beschikbaar met kwartierwaarden van het elektriciteitsverbruik over het gehele jaar, tussen 2018 en 2020. Om een representatieve dataset te kiezen, zijn de volgende eigenschappen van alle datasets geanalyseerd:

- Het gemiddelde elektriciteitsverbruik per jaar
- De belastingduurkromme
- De piekduurkromme
- Het dagprofiel in stappen van een uur
- Het jaarprofiel in stappen van een maand

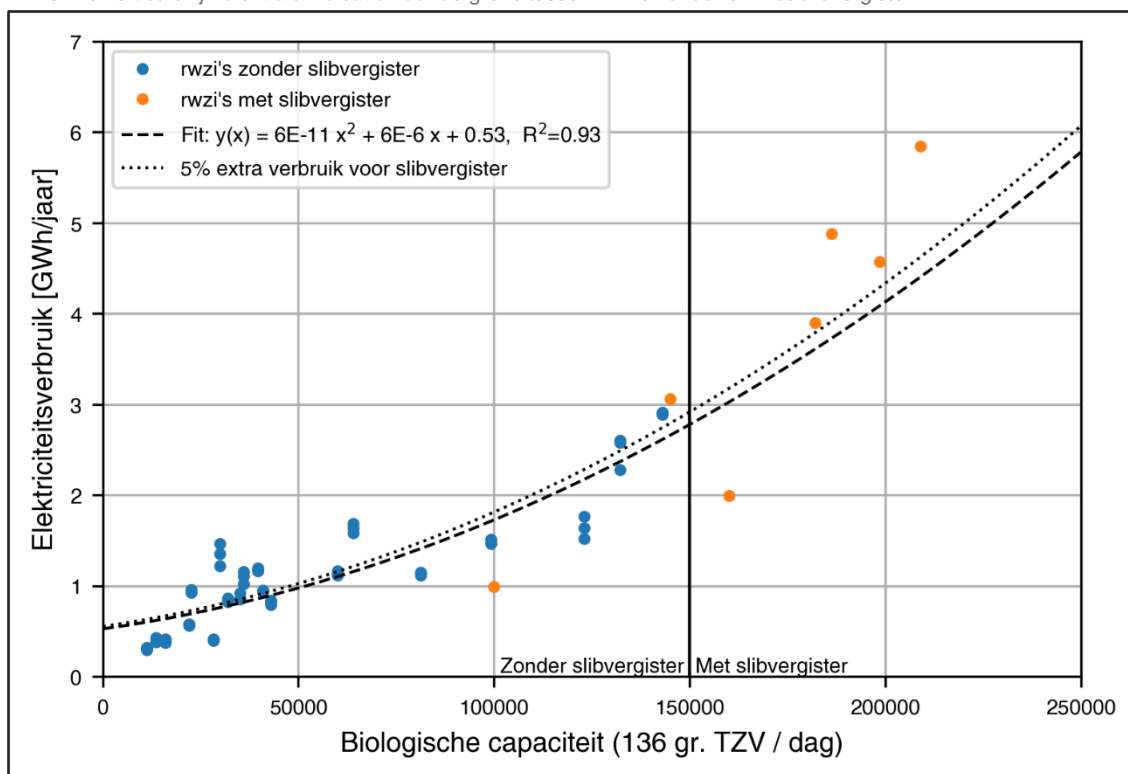
Aan de hand van deze analyse is een representatief verbruiksprofiel verkregen voor de zuiveringsfunctie die schaalbaar is naar het aantal zuiveringseenheden. De analyse toont wel dat er duidelijke verschillen zijn in de grootte van de verschillende rwzi's in Nederland. Ondanks dat het verbruiksprofiel schaalbaar is, zijn er wel andere groottes van de aansluitcapaciteit. Het verschil in de grootte van de aansluitcapaciteit heeft vervolgens wel een implicatie voor de mogelijkheden van een rwzi om als energie-hub te dienen. Omdat het wel mogelijk is om een representatief verbruiksprofiel te verkregen voor de zuiveringsfunctie die schaalbaar is naar het aantal zuiveringseenheden, zullen er twee verschillende energiehoudingen van rwzi's onderzocht worden. Rwzi's met een kleine biologische capaciteit (rwzi X) en rwzi's met een grote biologische capaciteit (rwzi Y).

Merk op dat deze dataset niet wordt verkregen door het gemiddelde te nemen van alle datasets. Dat zou leiden tot het verlies van karakteristieke eigenschappen op kwartierbasis. Aan de hand van het gemiddelde van de karakteristieken van alle rwzi's wordt een dataset geselecteerd die het meest representatief is. Dit profiel wordt vervolgens gebruikt in de analyse van de mogelijkheden van de rwzi als energie-hub.

3.1.1 Elektriciteitsverbruik per jaar

Het elektriciteitsverbruik per jaar als functie van biologische capaciteit is weergegeven in Figuur 3.1. Deze grafiek laat zien dat het verbruik toeneemt met het aantal zuiveringseenheden. De trendlijn (fit) dient als een benchmark om het jaarverbruik in te schatten aan de hand van het aantal zuiveringseenheden van een rwzi. Een waarde van 0,93 voor de determinatiecoëfficiënt (R^2) geeft aan dat de trendlijn de data goed weergeeft. Aan de hand van deze trendlijn kan het elektriciteitsverbruik van de zuiveringsfunctie worden geschaald naar het aantal zuiveringseenheden.

Figuur 3.1 Het gemiddelde elektriciteitsverbruik per jaar als functie van de biologische capaciteit van de beschouwde rwzi's. De verticale lijn dient als indicatie voor de grens tussen rwzi's zonder en met slibvergister.

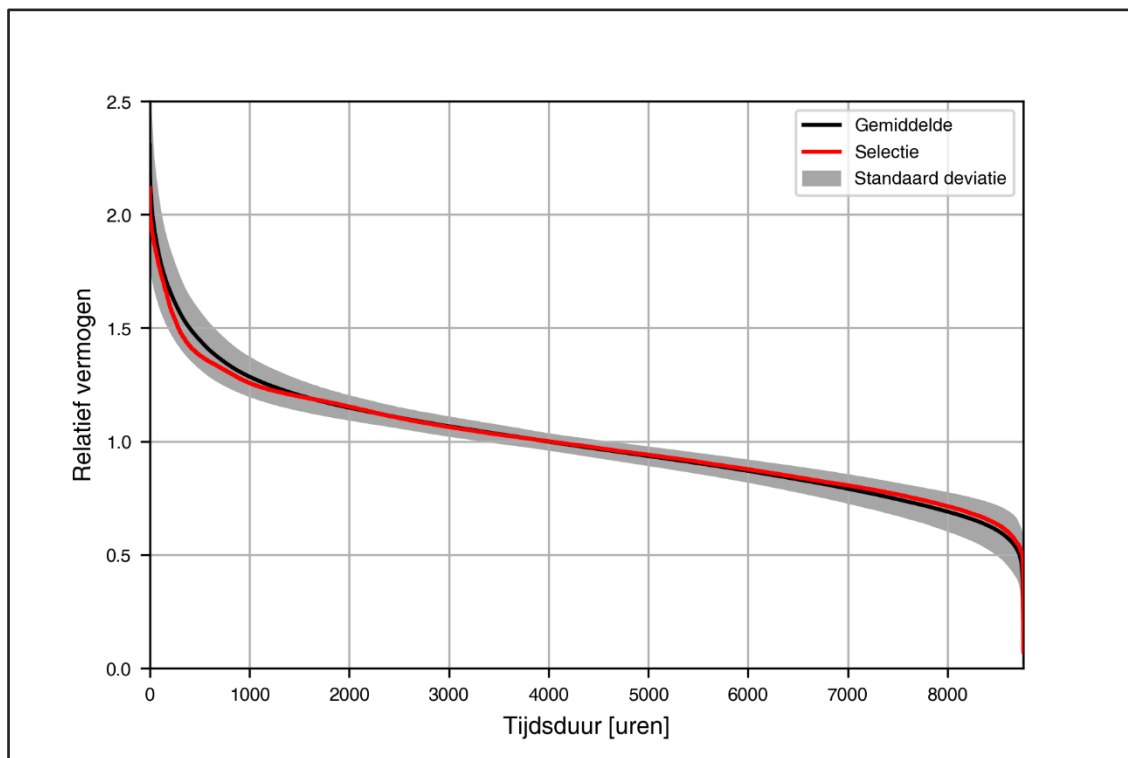


3.1.2 Belastingduurkromme

De belastingduurkromme is een sortering van het benodigde vermogen van hoog naar laag en geeft aan hoeveel tijd in een jaar er een bepaald minimaal vermogen wordt verbruikt. De rwzi's tonen zeer vergelijkbare profielen waardoor de afwijking ten opzichte van het gemiddelde klein is; de standaard deviatie is gemiddeld maar 6,6%. De steile daling van 0 tot 1000 uur geeft aan dat er voor een relatief korte periode een groot vermogen nodig is. Uit Figuur 3.2 is af te lezen dat dit piek vermogen gemiddeld maar twee keer het gemiddelde jaar vermogen is. Daarna daalt de grafiek geleidelijk waarna hij sterk daalt boven de 8700 uur. Dit geeft aan dat het energieverbruik van een rwzi relatief vlak is met een korte periode van groot verbruik en vrijwel geen periode van geen verbruik.

Merk op dat op de y-as relatief vermogen staat. Het relatieve vermogen is het vermogen gedeeld door het jaarlijks gemiddelde vermogen van de betreffende dataset. De eenheid van de y-as kan gezien worden als procenten van het gemiddelde vermogen over het hele jaar.

Figuur 3.2 De belastingduurkromme in relatief vermogen over een heel jaar. Het relatieve vermogen is het vermogen gedeeld door het jaarlijkse gemiddelde vermogen van de betreffende dataset. De selectie is het geselecteerde profiel voor rwzi x.

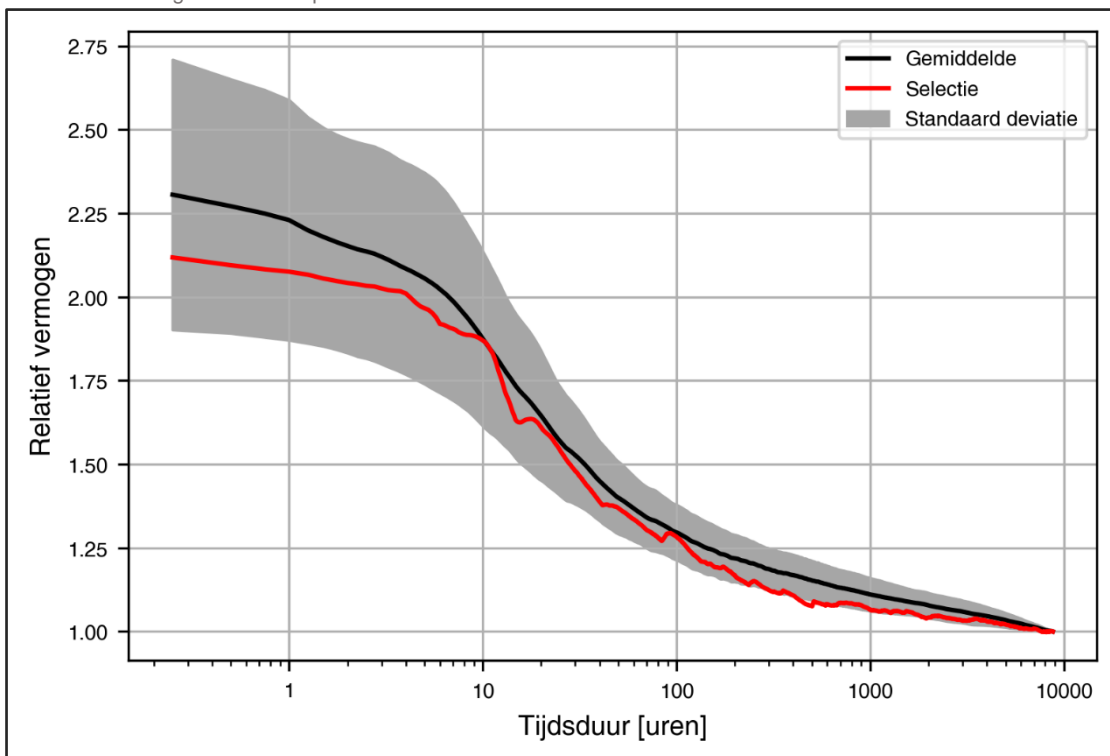


3.1.3 Piekduurkromme

De belastingduurkromme in Figuur 3.2 toont de totale duur van het gebruikte vermogen, maar zegt niets over de duur van een piek. Hiervoor wordt de piekduurkromme gebruikt; de piekhoogte als functie van piekduur. De piekduurkromme is weergegeven in Figuur 3.3. Merk op dat de x-as een logaritmische schaal heeft in plaats van lineair.

De kromme toont een relatief vlak gedeelte tot 10 uur, waarna een vrij sterke daling zichtbaar is tot 100 uur. Na 100 uur is de kromme weer relatief vlak. Ook is de piek tot 10 uur gemiddeld maar 2,2 keer het jaargemiddelde verbruik. De rwzi's hebben een zeer vergelijkbaar gedrag; de standaarddeviatie is gemiddeld maar 2,5%.

Figuur 3.3 De piekduurkromme in relatief vermogen over een heel jaar. Het relatieve vermogen is het vermogen gedeeld door het jaarlijkse gemiddelde vermogen van de betreffende dataset. De x-as heeft een logaritmische schaal. De selectie is het geselecteerde profiel voor rwzi x.

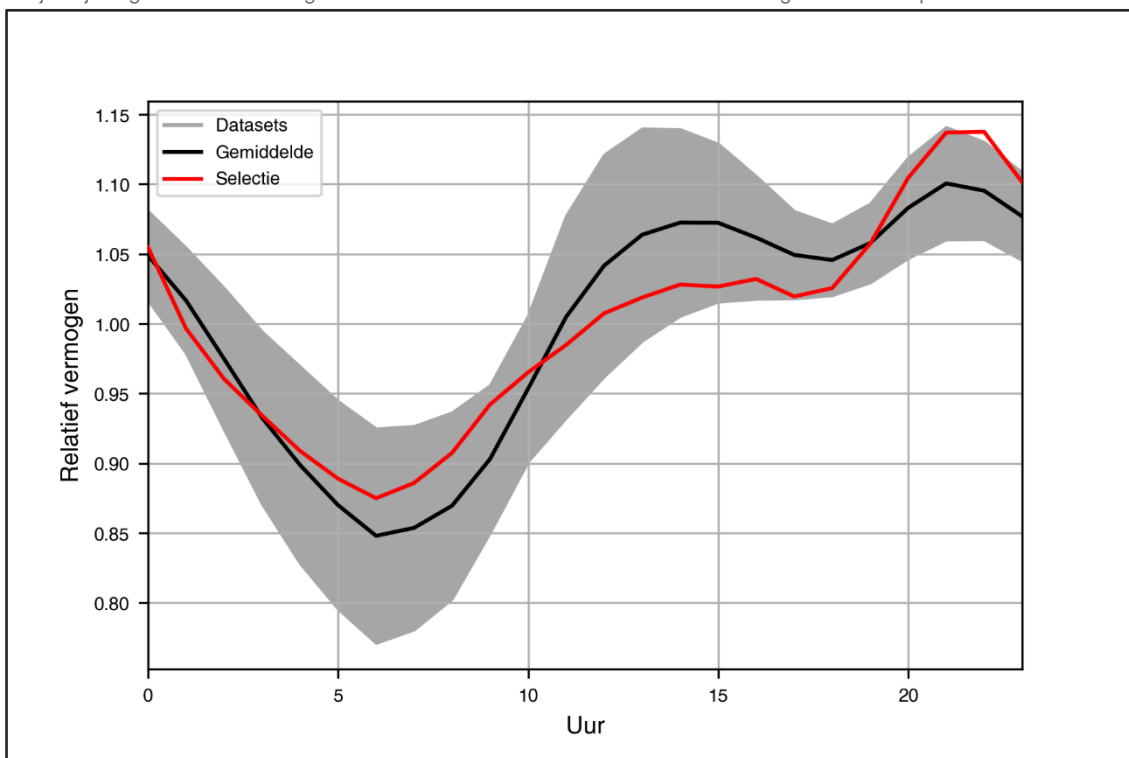


3.1.4 Dagprofiel

Het dagprofiel biedt inzicht in de variatie in het gemiddelde verbruik over de dag. Door het verbruiksprofiel te vergelijken met het opwekkingsprofiel van duurzame bronnen zoals zonne-energie is het mogelijk om op hoofdlijnen het verbruik af te stemmen met de productie. De daadwerkelijke 'match' tussen verbruik en productie gebeurt echter wel op werkelijke kwartierwaarden. Het gemiddelde dagprofiel is weergegeven in Figuur 3.4. Het eerste wat opvalt is dat er een dip rond 6 uur is en een piek rond 15 en 21 uur. De piek rond 15 uur biedt wellicht een match met zonne-energie.

De standaarddeviatie is gemiddeld maar 5,4%, oftewel de rwzi's hebben een zeer vergelijkbaar dagprofiel. Merk wel op dat de relatieve verschillen over de dag klein zijn, hooguit 15%. Dit geeft aan dat het verbruik van een rwzi gemiddeld gezien weinig fluctueert.

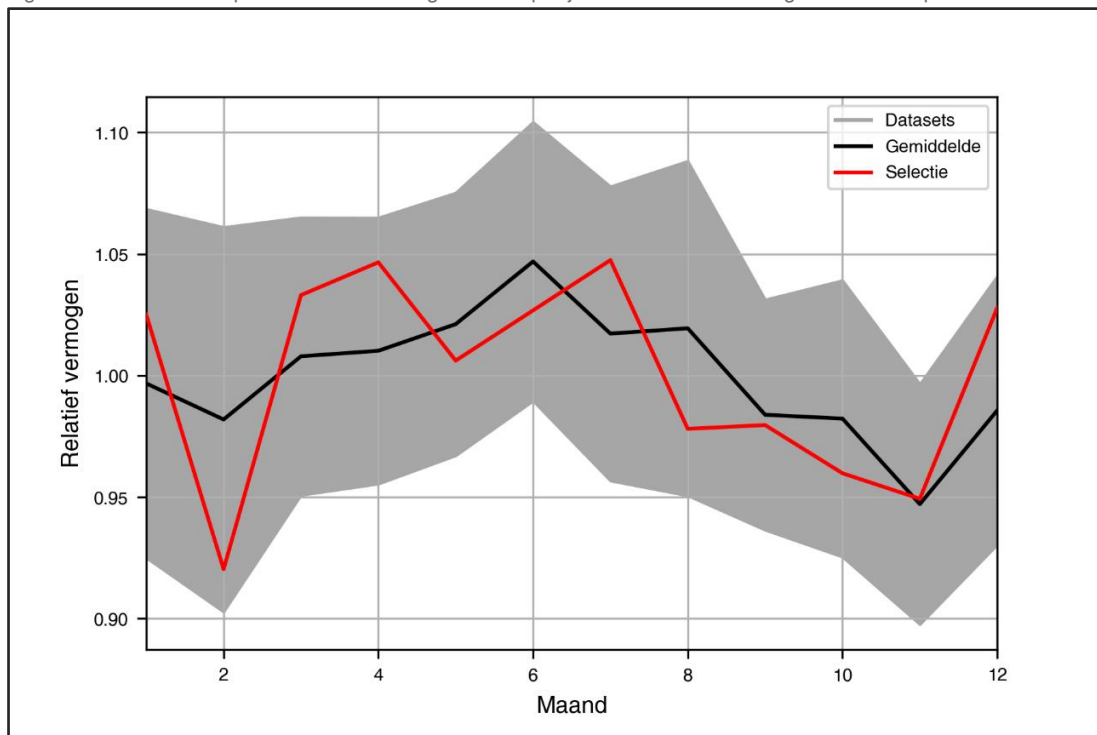
Figuur 3.4 Het verbruiksprofiel van de rwzi's gemiddeld per dag. Het relatief vermogen is het vermogen gedeeld door het jaarlijkse gemiddelde vermogen van de betreffende dataset. De selectie is het geselecteerde profiel voor rwzi x.



3.1.5 Jaarprofiel

Het jaarprofiel biedt ook inzicht in eventuele afstemmingsmogelijkheden op hoofdlijnen met duurzame bronnen en is weergegeven in *Figuur 3.5*. Let op de schaal van de y-as, deze ligt tussen de 0,9 en 1,1, oftewel 90% en 110% van het gemiddelde jaarverbruik. We spreken hier dus over zeer kleine fluctuaties rond het jaargemiddelde verbruik: hooguit 5% voor de gemiddelde lijn. Hieruit kan geconcludeerd worden dat de rwzi een zeer constant verbruik heeft over het jaar. De standaarddeviatie is met een gemiddelde waarde van 7,2% klein, wat aangeeft dat de verschillende rwzi's vergelijkbare jaarprofielen hebben.

Figuur 3.5 Het verbruiksprofiel van de rwzi's gemiddeld per jaar. De selectie is het geselecteerde profiel voor rwzi x.



3.1.6 Aansluitcapaciteit

Naast het verbruiksprofiel van een rwzi is ook de beschikbaar fysieke capaciteit om elektriciteit uit te kunnen wisselen met het netwerk van belang om de mogelijkheden voor een energie-hub te verkennen. Aan de hand van de aangeleverde gegevens kan geconcludeerd worden dat de aansluitcapaciteit van de rwzi's hoofdzakelijk afhankelijk is van de grootte van de rwzi (in i.e).

- Kleine rwzi's hebben doorgaans een aansluitcapaciteit van 630 kiloVolt-Ampere (kVA),
- Grote rwzi's hebben doorgaans een aansluitcapaciteit van 2.000 kVA.

In alle gevallen is deze aansluiting dubbel (redundant) uitgevoerd om garantie van levering te geven in geval van onderhoud of storing aan de bekabeling of trafo. Dit garandeert dat de zuiveringsfunctie te allen tijde behouden blijft. Echter is het wel theoretisch mogelijk om deze redundantie te benutten in een eventuele hub-functie. Daarom zal de dubbele aansluitcapaciteit gebruikt worden in de analyse van de mogelijkheden als energie-hub. Omdat de elektriciteitsvraag voor de zuiveringsprocessen wel binnen de capaciteit van de enkele aansluiting valt, zal dit geen risico's meebrengen voor de primaire taken van de rwzi.

4 De rwzi als smart energy hub: de uitwerking

In dit hoofdstuk wordt allereerst de representatieve dataset geselecteerd om een schaalbaar verbruiksprofiel voor RWZI X en RWZI Y te genereren. Zoals beschreven is dit de basis waar vanuit, in combinatie met de huidige beschikbare capaciteit van de netaansluiting, verschillende strategieën voor de rwzi te onderzoeken om een rol als energie-hub te vervullen.

4.1 Selectie van meest representatieve rwzi

Aan de hand van voorgaande analyse in hoofdstuk 3 is een dataset geselecteerd die als meest representatief wordt beschouwd: rwzi Genemuiden in 2018. Deze dataset toont de kleinste afwijking ten opzichte van het gemiddelde van de verschillende karakteristieken. Hierbij is de nadruk gelegd op de afwijking ten opzichte van de belasting- en piekduurkromme, vanwege de geringe fluctuaties in de dag- en jaarprofielen. Aan de hand van de trendlijn (fit) in [Figuur 3.1](#) kan deze dataset worden geschaald naar vervuilingseenheden, en kan daarmee dus zowel grote als kleine rwzi's representeren.

Om een beeld te geven van de mogelijkheden om een energie-hub te vormen, die representatief zijn voor de meeste rwzi's in Nederland, zijn twee referentie-rwzi's gedefinieerd: een gemiddeld kleine rwzi (RWZI X), en een gemiddeld grootte rwzi (RWZI Y). Het elektriciteitsverbruik van deze rwzi's is gemodelleerd aan de hand van de hiervoor genoemde geselecteerde dataset. Het formaat van de rwzi's, uitgedrukt in de biologische capaciteit, jaarverbruik en aansluitcapaciteit is weergegeven in [Tabel 4.1](#).

De elektriciteitsaansluiting is dubbel uitgevoerd om garantie te bieden voor het eigen verbruik van de zuivering in het geval van onderhoud of storing. Deze twee aansluitingen kunnen potentieel in de toekomst wel beide benut worden voor teruglevering van duurzame energie. Aangezien deze analyse alle mogelijkheden beschouwt, is deze dubbele aansluitcapaciteit meegenomen in de analyse als zijnde beschikbaar voor energie-hub functies. In het geval van onderhoud is er dan tijdelijk maar een aansluiting beschikbaar voor teruglevering.

Tabel 4.1 De eigenschappen van referentie RWZI X en Y.

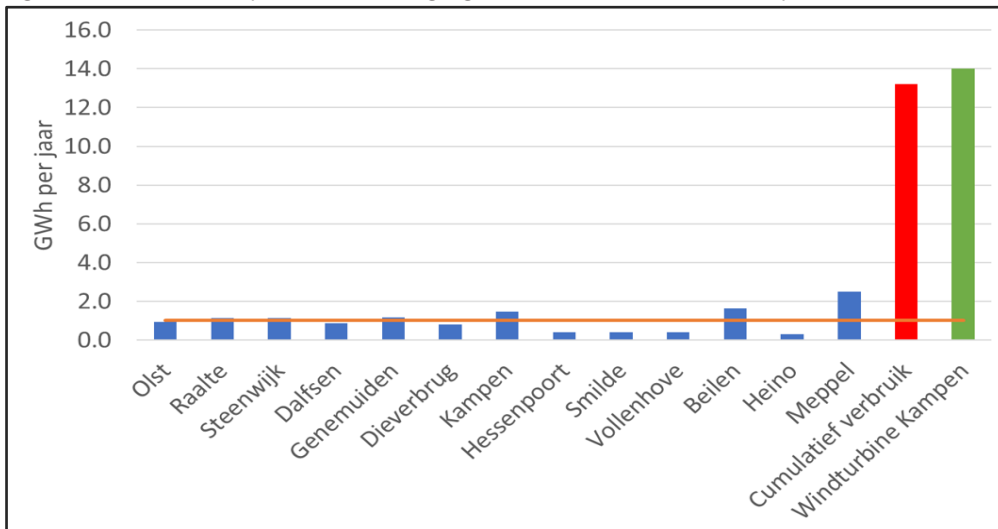
	RWZI X	RWZI Y
Biologische capaciteit (136 gr TZV/dag)	54.000	250.000
Jaarverbruik rwzi [GWh/jaar]	1,0	5,8
Jaarverbruik slibvergister [GWh/jaar]	-	0,3
Totale jaarverbruik [GWh/jaar]	1,0	6,1
Aansluitcapaciteit [kVA] (In tweevoud uitgevoerd)	630	2000

4.2 Strategieën voor het vormen van een energie-hub bij rwzi's

Zoals beschreven in hoofdstuk 3 en in de vorige paragraaf, biedt het huidige verbruiksprofiel van een rwzi de basis voor het verder onderzoek naar de mogelijkheden om een energie-hub te vormen. De eerste stap in het vervullen van een energie-hub-functie, is het zelf opwekken van duurzame elektriciteit, indien daar de ruimte voor is. Idealiter wordt er binnen de grenzen van het rwzi terrein voldoende energie opgewekt om zelfvoorzienend te zijn. Het probleem wat zich bij duurzame bronnen voordoet is dat de opwek vrijwel nooit volledig aansluit bij het verbruik. Dit vraagstuk wordt in deze paragraaf verder uitgewerkt.

Wanneer een rwzi elektriciteitsproductie uit zonne- en/of windenergie realiseert om de elektriciteitsvraag van duurzaam opgewekte energie te voorzien, is het noodzakelijk om ook mogelijke uitwisseling met het elektriciteitsnet, conversie en of opslag nader te onderzoeken en toe te passen, vanwege de verwachte mismatch tussen verbruik en productie. Bijvoorbeeld, wanneer er een grote, moderne windturbine met een gangbaar opgesteld vermogen (als voorbeeld een type met 4,8 MW) geplaatst wordt, produceert deze significant meer elektriciteit dan binnen de grenzen van een rwzi verbruikt wordt. *Figuur 4.1* laat zien dat een windturbine van 4,8 MW meer elektriciteit produceert dan 13 rwzi's tezamen. Zonder conversie of opslag zal het net zwaar belast worden en kan het zelfs voorkomen dat niet alle duurzaam opgewekte elektriciteit nuttig toegepast kan worden en de windturbine op gereduceerd vermogen moet draaien of zelfs stilgezet moet worden (curtailment).

Figuur 4.1 De elektriciteitsproductie van een gangbare, moderne windturbine ten opzichte van het verbruik

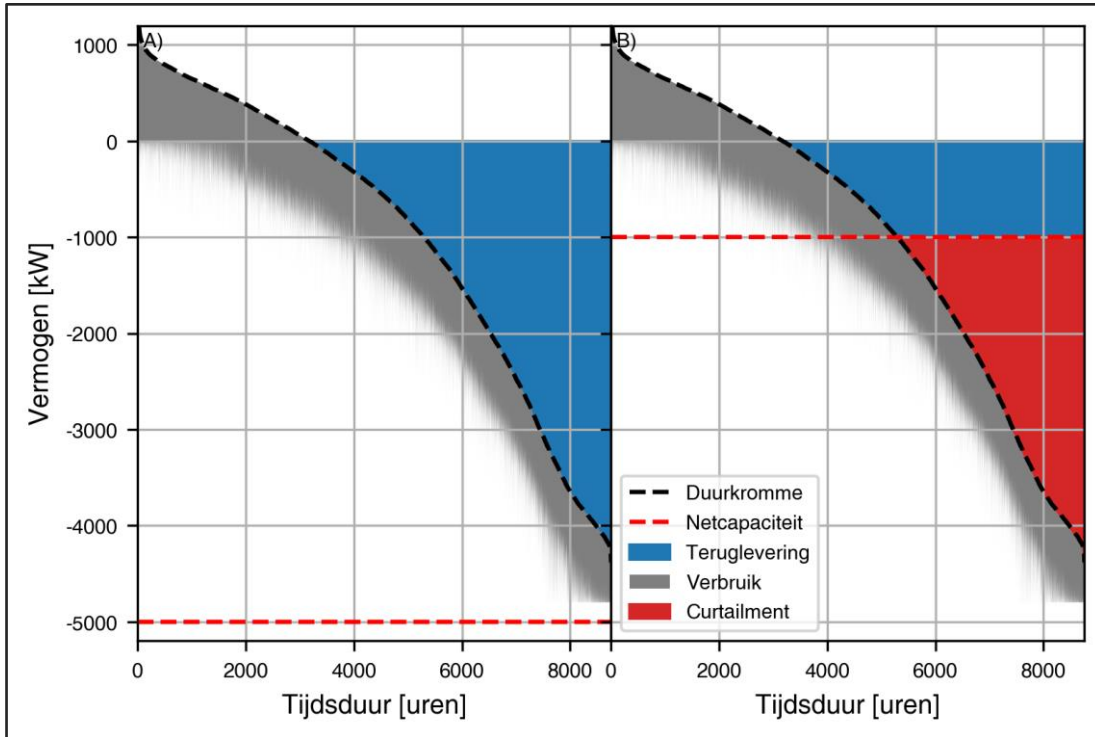


Deze mismatch is niet alleen op basis van totale jaarvolumes, maar productie en verbruik dienen vooral op basis van actuele vermogens met elkaar overeen te komen. Een overzichtelijke manier om dit weer te geven is met een belastingduurkromme, zie *Figuur 4.2*. De zwarte stippellijn geeft de belastingduurkromme weer. De rode stippellijn geeft de netcapaciteit weer. Indien de belastingduurkromme onder de rode stippellijn komt, kan een deel van de duurzame opwek niet teruggelieferd worden, aangegeven met het rode vlak 'curtailment'. In dit voorbeeld zijn er twee situaties met een andere netcapaciteit weergegeven. Dit geeft direct een beeld van de balans of onbalans van het systeem. Indien er curtailment plaatsvindt, kan het nuttig zijn om energieopslag te overwegen, het effect hiervan is weergegeven in *Figuur 4.3*. Merk wel op dat de tijdsafhankelijkheid niet is weergegeven in de figuur. De eisen die aan de energieopslag of conversie gesteld moeten worden zullen afhangen van de tijd tussen het energieoverschot en schaarste.

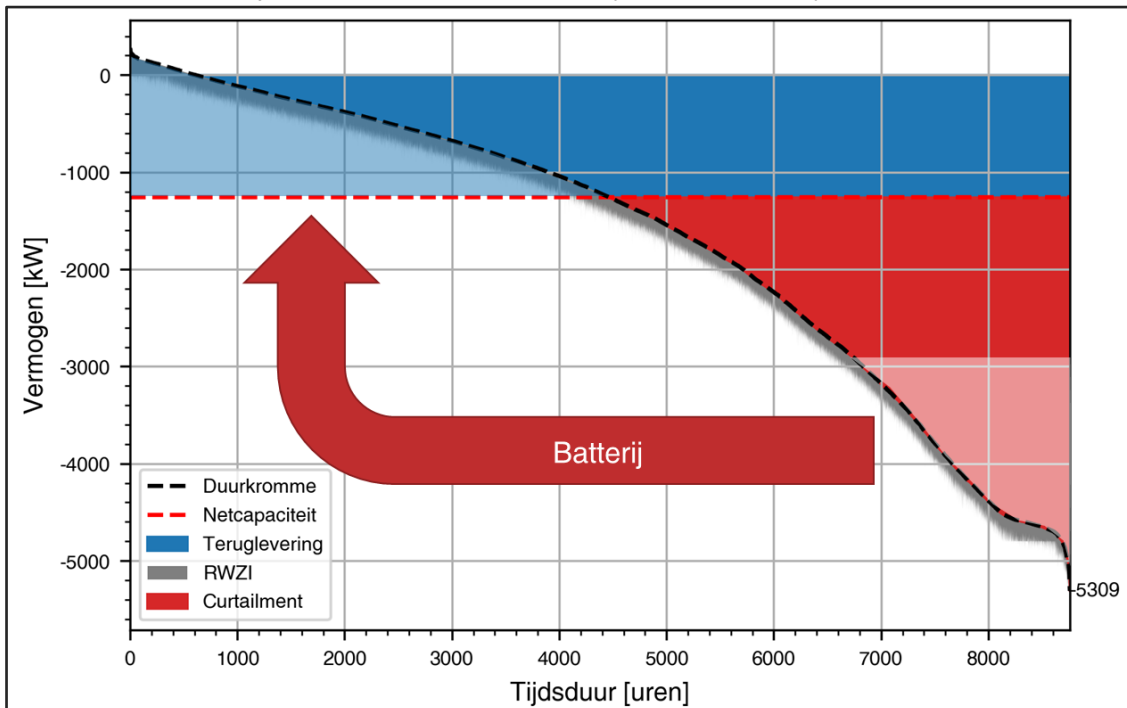
Figuur 4.2 Een algemene belastingduurkromme van een energiesysteem waar duurzame opwek plaatsvind. Positieve vermogens zijn afkomstig van het net, negatieve vermogens van duurzame opwek.

A) Een energiesysteem zonder curtailment.

B) Een energiesysteem met curtailment.



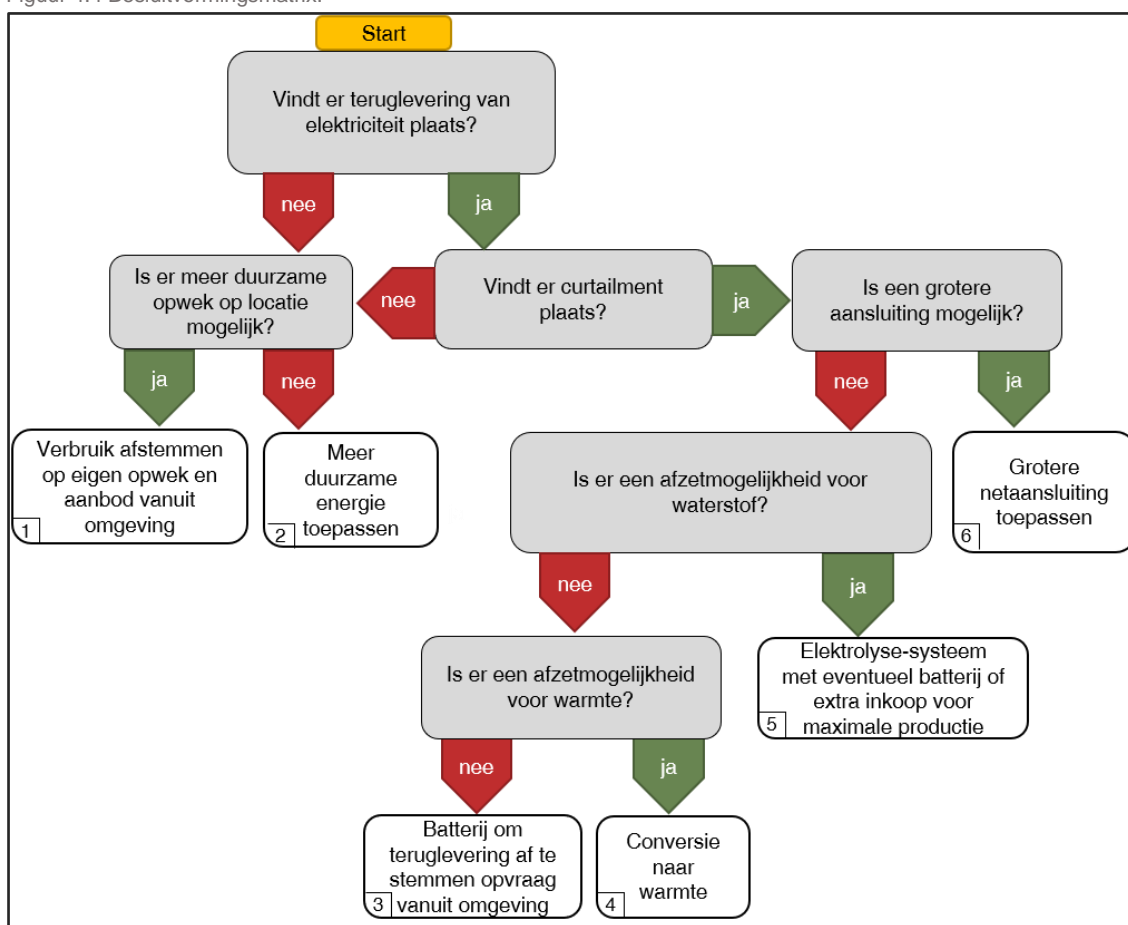
Figuur 4.3 Het effect van energieopslag op de belastingduurkromme waar duurzame opwek plaatsvind. Afhankelijk van het formaat van een batterij wordt een deel van het rode vlak verplaatst naar het transparante blauwe vlak.



Het toevoegen van een aanvullende bouwsteen aan het energie-hub concept, in de vorm van grootschalige duurzame energieproductie, betekent dat er een nieuwe balans in de energiehuishouding van de rwzi dient te worden gevonden. Aangezien de meeste rwzi's zijn aangesloten op een middenspanningskabel van het distributienetwerk van de regionale netbeheerder, betekent dit dat de fysieke transportcapaciteit begrensd is tot de maximale capaciteit die de netbeheerder toelaatbaar acht voor de middenspanningskabel. Het kan dus voorkomen dat bij windenergie en/of grootschalige zonneparken er een zodanige mismatch is tussen productie en verbruik dat deze zelfs niet via de huidige netaansluiting kan worden ontsloten. Ook kan het voorkomen dat er in het betreffende gebied een beperking zit op het terugleververmogen die vanwege congestie lager ligt dan de daadwerkelijke fysieke capaciteit.

Om een geschikte strategie te bepalen voor het vormgeven van de bouwstenen van de energie-hub is een besluitvormingsmatrix samengesteld, weergegeven in Figuur 4.4. Er zijn een zestal strategieën geselecteerd die in de meeste situaties toegepast kunnen worden. Vanwege de grote complexiteit van een mogelijke energie-hub zijn er afhankelijk van de situatie ook andere opties mogelijk. Deze besluitvormingsmatrix dient derhalve als ondersteuning bij eventuele strategische keuzes, maar moet niet zonder expertise toegepast worden. De strategieën worden hieronder uiteengezet en op de volgende pagina nader toegelicht:

Figuur 4.4 Besluitvormingsmatrix.



1. Verbruik afstemmen op eigen opwek en aanbod vanuit omgeving.

In het geval dat er niet meer duurzame energie toegepast kan worden, kan er gekeken worden naar de mogelijkheden om het eigen verbruik zo goed mogelijk af te stemmen op de eigen opwek en eventueel aanbod vanuit de omgeving te koppelen. Dit kan door met de netbeheerder in overleg te gaan over aanbieden van flexibele vermogens of door installaties in de directe nabijheid van de rwzi te koppelen aan de netaansluiting van de rwzi (cable pooling). Dit is ook een optie voor rwzi's die in de basis geen mogelijkheid hebben om eigen duurzame energie te produceren.

2. Meer duurzame energie toepassen.

In deze situatie vindt er geen curtailment plaats en is er meer duurzame opwek mogelijk. In dit geval is het gewenst om meer duurzame energie toe te passen, om zo ten eerste het eigen verbruik op te wekken. In de nieuwe situatie moet de besluitvormingsmatrix opnieuw doorlopen worden, aangezien er mogelijk dan wel curtailment plaats kan vinden.

3. Batterij om teruglevering af te stemmen op vraag vanuit omgeving.

Indien de eigen duurzame opwek niet geheel teruggeleverd kan worden, of dat de eigen opwek groter is dan het eigen verbruik, kan er een batterij overwogen worden om de eigen opwek af te stemmen op de vraag vanuit de omgeving. Hierbij is het van belang om naast de verwachte momenten waarop er geladen dient te worden ook voldoende momenten in beeld te hebben waarop de batterij kan ontladen.

4. Conversie naar warmte.

Bij een overschot aan eigen opwek en een vraag naar warmte voor ofwel eigen verbruik ofwel de omgeving kan het overschot worden omgezet in warmte⁵. In deze situatie is het wel van belang dat de warmte ook getransporteerd kan worden naar de vraag, dus mogelijk is een warmtenet een vereiste. Mogelijk zou ook een warmte-opslag toegepast kunnen worden, waarin bijvoorbeeld zonne-energie uit de zomer opgeslagen wordt voor gebruik in de winter. Ook is de conversiemethode en de bijbehorende efficiëntie van belang in het dimensioneren van deze bouwsteen.

5. Elektrolyse-systeem met eventueel batterij of extra inkoop voor maximale productie.

In deze situatie is er een overschot aan duurzame energie, en een vraag naar waterstof. Dan kan een elektrolyse-systeem een uitkomst bieden. Het elektrolyse-systeem kan in de eerste instantie gebruikt worden om het overschot aan eigen opwek op te vangen. Indien dat niet toereikend is voor de waterstofvraag zijn er nog twee opties: een batterij toepassen om pieken in eigen productie alsnog te benutten, of extra energie inkopen. Voor dit systeem is wel essentieel dat de geproduceerde waterstof genoeg afzet heeft, aangezien waterstofopslag zeer kostbaar is. In de ideale situatie is een waterstofnet beschikbaar.

6. Grotere netaansluiting toepassen.

In deze situatie vindt er wel curtailment plaats, en is er ruimte voor een grotere netaansluiting. Om de hub-functie ten goede te komen is het in dit geval wenselijk de grotere aansluiting ook te realiseren.

⁵ De aanname is gemaakt dat een gemiddeld Nederlands huishouden 1.239 m³ gas verbruikt (<https://www.milieucentraal.nl/energie-besparen/inzicht-in-je-energierekening/gemiddeld-energieverbruik/>), dat 1 m³ gas een bovenwaarde heeft van 35,17 MJ en 1 kWh een energie inhoud heeft van 3,6MJ (<https://www.energieconsultant.nl/energiemarkt/energie-berekeningen-uit-de-praktijk/omrekening-van-m3-n-naar-kwh/>) Wanneer deze waardes gecombineerd worden, zal er per huishouden 12,1 MWh warmte-energie nodig zijn.

4.3 Varianten van de rwzi energie-hub

Om een beeld te geven van veel voorkomende situaties van rwzi's in Nederland worden de volgende scenario's beschouwd:

1. RWZI X met zon (energieneutraal)

Een kleine rwzi met een zonnenveld die op jaarbasis evenveel produceert als het eigen verbruik. Dit scenario kan op de meeste rwzi's worden toegepast.

2. RWZI X met windturbine

Een kleine rwzi met een moderne windturbine.

3. RWZI Y met windturbine

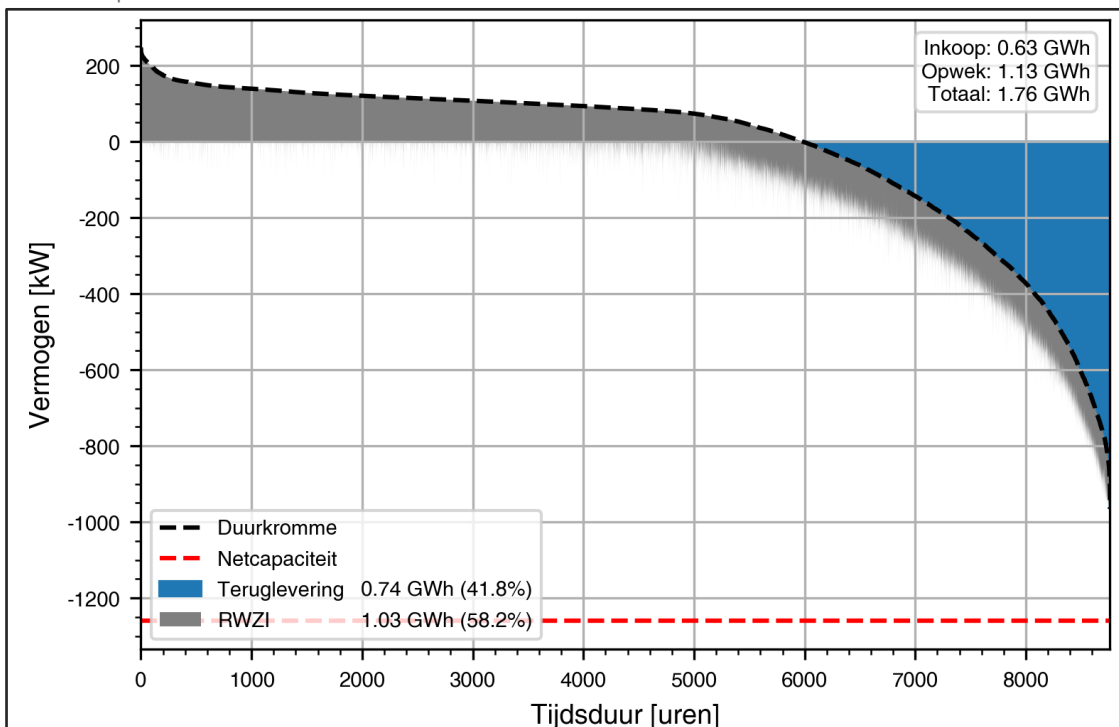
Een grote rwzi met een moderne windturbine. Door het grotere eigen verbruik en de grotere netaansluiting zijn er andere mogelijkheden in vergelijking tot het voorgaande scenario.

Deze scenario's worden in de volgende secties uitgewerkt.

4.3.1 RWZI X met zon (energieneutraal)

Over het algemeen is er op het terrein van een rwzi ruimte voor kleinschalige energieopwekking met zonnepanelen. In het geval dat de opwek op jaarbasis even groot is als het eigen verbruik, oftewel energieneutraal, ziet de belastingduurkromme er als volgt uit, zie Figuur 4.5.

Figuur 4.5 De belastingduurkromme van RWZI X met een klein zonnenveld. De opwek van het zonnenveld is gelijk aan het verbruik van de rwzi. Positieve vermogens zijn afkomstig van het net, negatieve vermogens zijn afkomstig van duurzame opwek.



De sterke daling vanaf ongeveer 5000 uur laat zien dat het zonnenveld de helft van de tijd elektriciteit produceert, wat overeenkomt met de tijd dat de zon schijnt. Een groot deel van de tijd is er energie vanuit het net nodig om aan de energiebehoefte van de rwzi te voldoen. In de huidige configuratie wordt het overschot aan duurzame energie teruggeleverd aan het net. Het maximale vermogen dat teruggeleverd

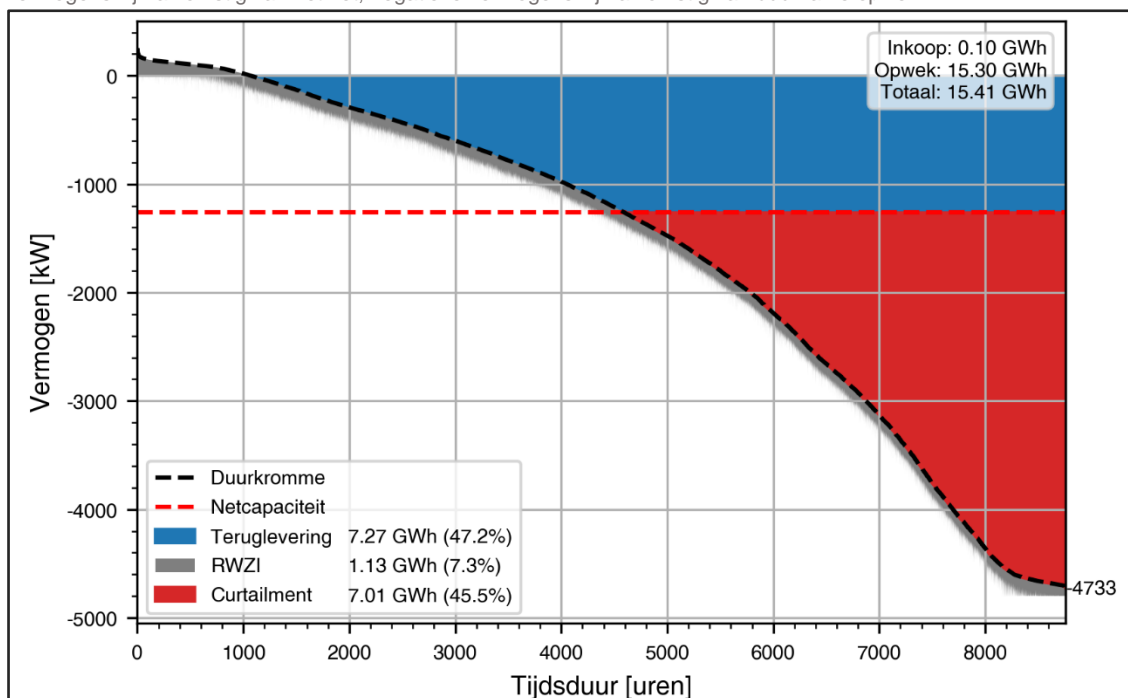
wordt is kleiner dan de fysieke capaciteit van de netaansluiting, hierdoor kan alle energie in theorie teruggeleverd worden. Op basis van de besluitvormingsmatrix zijn er dan twee opties te overwegen:

- Optie 1: Indien er niet meer duurzame energie toegepast kan worden, zal er gekeken moeten worden naar mogelijkheden om het eigen verbruik af te stemmen op de eigen duurzame opwek, of duurzame opwek in de omgeving. Afstemming van het eigen verbruik is afhankelijk van de eigenschappen van de rwzi, diens omgeving en de beschikbare capaciteit op het distributienet waar de rwzi op is aangesloten. In dit voorbeeld kan dit niet verder uitgewerkt worden, aangezien dit per locatie kan verschillen. Mogelijk kan een batterij nog een uitkomst bieden om meer van de eigen opwek te gebruiken in plaats van terug te leveren. Echter is dit vanwege het kleine formaat van het zonnepark lastig, aangezien het formaat van de batterij aanzienlijk zal moeten zijn. Om 35% extra te kunnen gebruiken van de eigen opwek is een batterij van 4,4 MWh nodig, dit is grotfweg gelijk aan 62 elektrische auto's.
- Optie 2: Indien er meer duurzame energie toegepast kan worden, kan er meer toegepast worden met het oog op verduurzaming. De volgende sectie geeft inzicht in een mogelijk vervolg van deze optie.

4.3.2 RWZI X met een windturbine

Een moderne windturbine heeft een nominaal vermogen rond de 5 MW, een ashoogte en rotordiameter van 130 m. In dit scenario is er uitgegaan van een Nordex N133/4,8MW. Dit turbinetype heeft een ashoogte van 125 m, rotordiameter van 133 m en een nominaal vermogen van 4,8MW. In Figuur 4.6 wordt de belastingduurkromme weergegeven van de situatie waar deze windturbine bij RWZI X geplaatst wordt.

Figuur 4.6 De belastingduurkromme van RWZI X met een windturbine. De windturbine is een N133/4.8MW. Positieve vermogens zijn afkomstig van het net, negatieve vermogens zijn afkomstig van duurzame opwek.



Vergeleken met de voorgaande situatie is er veel meer duurzame opwek. Deze opwek is ook meer

verspreid over het jaar. Gezien het grote vermogen van de windturbine (4,8MW) en de kleine aansluitcapaciteit (2x630kVA) is er een groot overschot aan duurzame energie dat niet teruggeleverd kan worden aan het net. Op basis van de besluitvormingsmatrix blijven opties 3, 4, 5 en 6 over.

- Optie 3: Dit is afhankelijk van de elektriciteitsvraag vanuit de omgeving. Het effect hiervan zal worden toegelicht in bijlage 2, de pilot van Harderwijk.
- Optie 4: Indien er een warmtevraag op de rwzi of in de omgeving is, kan de duurzame opwek omgezet worden in warmte. In deze situatie wordt er 7,27 GWh teruggeleverd en 7,01 GWh curtailed. Afhankelijk van de warmtevraag kan er tot 14,3 GWh omgezet worden in warmte, wat bij een conversie van 1 joule elektriciteit naar 1 joule warmte⁶ bijna 1200 huishoudens per jaar van warmte kan voorzien. Er zal mogelijk wel een vorm van warmteopslag nodig zijn om het aanbod op de vraag af te stemmen.
- Optie 5: In deze situatie wordt een elektrolyse-systeem voor waterstofproductie beschouwd. Dit zal uitgebreid worden beschreven in de pilot van Kampen.
- Optie 6: Tot slot is er nog een mogelijkheid voor een grotere netaansluiting. Dit biedt meer ruimte voor teruglevering, waardoor de grote teruglevering niet direct een probleem is voor het waterschap. Om de netbeheerders te ontlasten kan er echter gekeken worden naar flexibel terugleververmogen, waardoor er alleen op bepaalde momenten van de dag een groot vermogen teruggeleverd kan worden (alleen wanneer het net 'plek' heeft). Dit zal dan moeten worden toegepast in combinatie met optie 3, aangezien hiervoor een vorm van opslag nodig is.

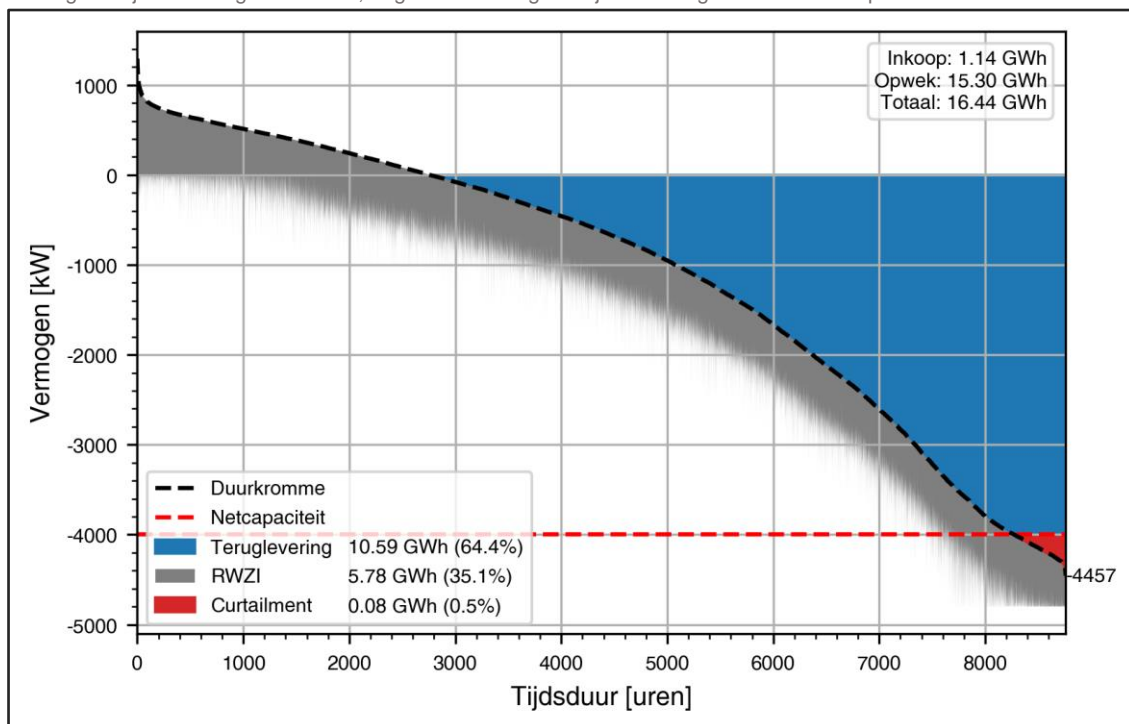
⁶ Deze wijze van kwantificeren is vergelijkbaar met opwarming door middel van een elektrische boiler (maximaal 100% rendement). Indien het overschot aan elektriciteit kan worden gebruikt in warmtepompen, zijn er hogere rendementen mogelijk. Dit is echter afhankelijk van onder andere de starttemperatuur van het verwarmingsmedium en de doelttemperatuur. Hoe groter dit temperatuurverschil, hoe lager het rendement.

4.3.3 RWZI Y met windturbine

Dit scenario bouwt voort op het voorgaande scenario. In dit geval gaat het om de combinatie van RWZI Y met een windturbine. De belastingduurkromme is weergegeven in Figuur 4.7. Op basis van de besluitvormingsmatrix worden opties 3, 4 en 5 aangeraden:

- Optie 3: Gezien de geringe curtailment is er niet direct een noodzaak om de teruglevering af te stemmen op de vraag vanuit de omgeving. Maar mogelijk kan dit het net ontlasten. De uitwerking van deze optie is afhankelijk van de vraag vanuit de omgeving, en zal worden toegelicht in de pilot Harderwijk.
- Optie 4: In de huidige configuratie is er een overschot van maximaal 10,7 GWh wat omgezet zou kunnen worden in warmte. Dit is gelijk aan de warmtevraag voor een heel jaar van vrijwel 900 huishoudens. Dit vereist wel een vorm van warmteopslag, om het aanbod op de vraag af te stemmen.
- Optie 5: In deze situatie wordt een elektrolyse-systeem voor waterstofproductie beschouwd. Dit zal uitgebreid worden beschreven in de pilot van Kampen.

Figuur 4.7 De belastingduurkromme van RWZI Y met een windturbine. De windturbine is een N133/4.8MW. Positieve vermogens zijn afkomstig van het net, negatieve vermogens zijn afkomstig van duurzame opwek.



4.4 Inzichten in de zes strategieën

Op basis van de analyses in hoofdstuk 3 en hoofdstuk 4, en de pilots in bijlage 1 en bijlage 2, is er meer inzicht verkregen in de zes strategieën van de besluitvormingsmatrix in [Figuur 4.4](#). Deze inzichten worden in deze paragraaf nader beschreven en toegelicht aan de hand van voorbeelden uit het pilotspoor.

4.4.1 Strategie 1: Verbruik afstemmen op eigen opwek en aanbod vanuit omgeving.

Het grootste gedeelte van het energieverbruik op een rwzi is de beluchting. Onderzoek van CE⁷ Delft en STOWA⁸ heeft uitgewezen dat er mogelijkheden zijn voor het sporadisch op en afschaken van de beluchtingsinstallatie tijdens de nitrificatiefase waardoor de elektriciteitsvraag tijdelijk verhoogd of verlaagd kan worden. Hiermee zou de rwzi mogelijk haar verbruik beter af kunnen stemmen op het aanbod van bestaande duurzame bronnen; of indien deze niet aanwezig zijn, kunnen bijdragen aan het (gedeeltelijk) verminderen van congestie door op afroep van de netbeheerder flexibel energie te verbruiken.

Inzichten pilot Harderwijk

Om congestie structureel kunnen te verminderen, is het nodig om te kunnen garanderen dat er altijd kan worden voldaan aan een verzoek voor afschaling/opschaling van verbruik/productie ingegaan kan worden. Een ander voorbeeld is dat er een garantie gegeven wordt dat de rwzi nooit meer verbruikt dan een vooraf afgesproken vermogen, bijvoorbeeld 0,6 MW, door het flexibel inzetten van de compressor en beluchters en het bergen van rioolwater in het rioolstelsel. Op dit moment is in Harderwijk de gecontracteerde capaciteit voor verbruik 1,6 MW. Deze garantie zou betekenen dat er 1,0 MW capaciteit vrij komt. De bijdrage aan het oplossen van congestie werkt echter alleen indien er nooit over deze nieuwe afgesproken verbruikscapaciteit van 0,6 MW heen gegaan wordt. Dit kan wel als een potentieel risico gezien worden omdat er mogelijk wel momenten zijn waar er meer piekverbruik is en er een direct gevolg kan zijn voor de kwaliteit van het gezuiverde water.

4.4.2 Strategie 2: Meer duurzame energie toepassen.

Indien er geen (of beperkte) teruglevering van elektriciteit of (beperkte) curtailment plaatsvindt en er meer duurzame opwek mogelijk is, is het in sommige gevallen mogelijk om extra duurzame energie toe te passen. Wel moet er vervolgens gekeken worden hoe deze additionele duurzame energie goed benut kan worden.

Inzichten pilot Harderwijk

Uit pilot Harderwijk blijkt dat de toevoeging van meer duurzame energie in eerste instantie leidt tot meer curtailment. Voor een betere benutting van deze energie moet er een nuttige toepassing gevonden worden. De extra energie kan bijvoorbeeld worden omgezet in warmte of waterstof of er kan naar afstemming met de omgeving gezocht worden. Na het toevoegen van meer duurzame opwek, of een andere vorm van duurzame opwek, moet opnieuw de matrix doorlopen worden om te kijken wat de mogelijkheden zijn.

⁷ Flexibiliteit en het waterschap, CE Delft, juli 2019

⁸ DE (ON)MOGELIJKHEDEN VAN FLEXIBEL ENERGIEMANAGEMENT OP RIOOLWATERZUIVERINGSINRICHTINGEN. Rapport 69, 2018

In de pilot kampen is de situatie waarbij het overschot duurzame elektriciteit gebruikt wordt voor de productie van waterstof bekeken. Door twee scenario's te beschouwen, een met enkel een windturbine, en een waarbij er ook een aanvullend zonnenveld is, is het mogelijk om het effect van extra duurzame energie, in dit geval een zonnenveld, te toetsen. Het zou dus mogelijk zijn om een aanvullende duurzame energiebron toe te voegen, indien deze weinig tot geen overlap kent met het productieprofiel van de reeds bestaande of beoogde energiebron (bijvoorbeeld de beperkte overlap tussen zonne- en windenergie).

Inzichten pilot Kampen

Uit pilot Kampen is gebleken dat de toevoeging van 1 MW zonnenveld aan een situatie met een 4,8 MW windturbine leidt tot een vlakker productieprofiel. In deze situatie wordt het overschot aan duurzame energie gebruikt om waterstof te produceren. Voor het zuiveringsproces en het produceren van waterstof is 37% minder elektriciteit van het net nodig in de situatie wanneer er ook een zonnenveld wordt toegevoegd. In de situatie met alleen een windturbine wordt 4,5% van het totale elektriciteitsverbruik voor zuivering en waterstofproductie geleverd vanuit het net, wanneer er een zonnenveld wordt toegevoegd is dit slechts 2,7%.

In de situatie met een zonnenveld wordt er wel 4% meer elektriciteit teruggeleverd aan het net (13,9% van de totale duurzame opwekking in het geval van alleen een windturbine en 13,6% van de totale duurzame opwekking wanneer er ook een zonnenveld geïnstalleerd is).

Er wordt 13% meer elektriciteit curtailed in de situatie met een aanvullend zonnenveld. Het gedeelte curtailde elektriciteit met alleen een windturbine is 4,2% en met een aanvullend zonnenveld 4,5%.

In deze pilot is er uitgegaan van de capaciteit van de reeds geplande duurzame energie installaties. Hierop is de grootte van het electrolyse systeem bepaald. Deze pilot geeft geen inzicht in de (financiële) haalbaarheid wanneer er nog meer duurzame energieopwekking beschikbaar zou zijn.

4.4.3 Strategie 3: Batterij om teruglevering af te stemmen op vraag vanuit omgeving.

Door middel van een batterij kan elektriciteit op momenten van overschot worden opgeslagen, en kan dit later worden teruggeleverd. Hiermee is het mogelijk om de teruglevering beter af te stemmen op de transportcapaciteit van het netwerk. Bij het dimensioneren van het batterijsysteem dient er altijd ook gekeken te worden naar de momenten waarop er weer ontladen kan worden. Daarnaast zal er in situaties zoals bijvoorbeeld geschetst is in Figuur 4.3 een batterijsysteem alleen niet toereikend zijn om alle duurzame elektriciteit nuttig toe te passen, omdat de tijden waarop er terugleververmogen beschikbaar is simpelweg niet voldoende volume bieden om alle curtailment te voorkomen. In dat geval dienen de andere oplossingsrichtingen ook onderzocht te worden.

Inzichten pilot Kampen

In pilot Kampen is op kwartierbasis het verbruik en productie van de verschillende energiestromen bekeken. Hieruit bleek dat in de situatie met een windturbine en een zonnepark er slechts 4,1% elektriciteit van het net gehaald moest worden voor de zuiveringsprocessen. Theoretisch zou een aanvullend batterijsysteem gebruikt kunnen worden om overschotten die nu curtailed worden op te slaan en in te zetten op momenten wanneer er ander elektriciteit van het net gehaald wordt. Naar verwachting weegt de investering in een dergelijk batterijsysteem niet op tegen de vermeden kosten voor inkoop van elektriciteit van het net, zelfs als de elektriciteitsprijzen hoog zijn.

Inzichten pilot Harderwijk

In pilot Harderwijk is verder gekeken naar mogelijkheden om in te spelen op de beschikbaarheid van het netwerk over de tijd heen.

Op basis van de (beperkte) meetdata van Liander, is het vermoeden dat de beperking in teruglevering wordt veroorzaakt door het aanbod van zonne-energie door andere aangeslotenen op de middenspanningskabel. De piek in teruglevering zal dus plaatsvinden rond de middag, dit geldt ook voor een eventueel extra zonneveld bij de rwzi. Om de congestie op de middenspanningskabel te verlichten, zijn er verschillende opties mogelijk. Allereerst is het aan te raden om het zonneveld op de rwzi in een oost/west opstelling te realiseren, waardoor de piek output wordt verlaagd. Ten tweede zou de wkk (wanneer aanwezig) kunnen worden teruggeregeld tijdens de momenten van veel zonnenschijn. Ten derde zou er een batterij kunnen worden bijgeplaatst om ten tijde van piekproductie de teruglevering aan het net te beperken.

Of de investering in een batterij lonend is, hangt af van de huidige hoogte van curtailment. Indien deze beperkt is, vanwege beperkte duurzame opwek, zal de investering naar alle waarschijnlijkheid minder gunstig zijn.

Wanneer er naast een zonneveld ook een windturbine duurzame energie opwekt, is er in de huidige situatie op het net beperkte aanvullende overlap tussen de duurzame energieproductie van de windturbine en mate van congestie op het net. Dit vanwege beperkte gelijktijdigheid tussen wind en zonne-energie (Liander schat de gelijktijdigheid voor zon en wind op 3%), en omdat er op dit moment op het distributienet nog enkel zonne-energie is aangesloten en geen windenergie. Dit maakt het theoretisch mogelijk om op bewolkte dagen en tijden de nachtelijke uren tot de maximale capaciteit van de netaansluiting terug te leveren. Wanneer er vanuit de omgeving meer windenergie op het net wordt aangesloten, kan dit betekenen dat er weer meer gelijktijdigheid is tussen de piekbelasting op het net en de opwek binnen de grenzen van de rwzi.

Een andere mogelijkheid is om het verbruik van elektriciteit te verhogen, om zo de teruglevering te beperken, bijvoorbeeld door het produceren van waterstof door middel van een electrolyse systeem. Het gebruiken van een batterij is in een situatie waar door middel van een windturbine elektriciteit wordt opgewekt praktisch gezien niet aan te bevelen, omdat ten tijde van veel windproductie de batterij snel vol loopt en het curtailment volume, in het geval van Harderwijk met 6,9 GWh bijna 7 keer zo groot is als het volume dat teruggeleverd kan worden op momenten dat het maximale terugleververmogen niet wordt benut (ongeveer 1 GWh). Dit betekent dat alleen een batterij (ongeacht hoe groot vermogen/volume) in geen enkel geval ervoor kan zorgen dat alle elektriciteit kan worden teruggeleverd, tenzij het terugleververmogen (tijdelijk) kan worden verhoogd, zoals hiervoor is beschreven.

4.4.4 Strategie 4: Conversie naar warmte

De toepassing van warmte is kwalitatief beschouwd in dit onderzoek. Voor de benadering van dit vraagstuk is er gekeken naar de hoeveelheid elektriciteit die beschikbaar is, en hoeveel warmte hiermee opgewekt kan worden. De benodigde systemen (ketel, opslagsysteem en infrastructuur) zijn niet meegenomen. Hierdoor is de warmtevraag als theoretisch potentieel beschouwd.

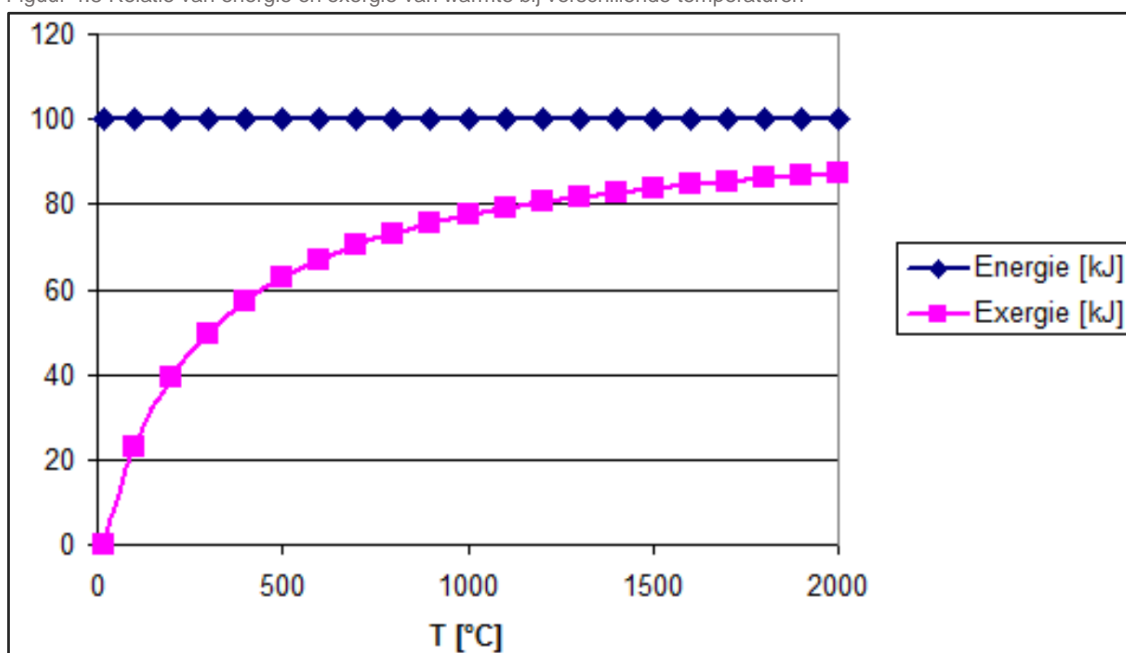
Ter vergelijking, bij het waterstof systeem zijn in het pilotspoor (rwzi Kampen) wel de aparte bouwstenen beschouwd en is er een business case opgesteld. Hierdoor kan er in het geval van waterstof gesproken worden over een economisch potentieel. Vanwege het verschil in detail niveau is een vergelijking tussen de twee opties (nu) niet mogelijk.

Inzichten pilot Harderwijk

Een theoretische kwantificering van de conversie naar warmte is te vinden in pilot Harderwijk. Hieruit is gebleken bleek dat met een WKK en een zonneveld ruim 130 huishoudens van warmte voorzien kunnen worden. Indien er ook een windturbine wordt toegevoegd aan de mix, kan dit opgeschaald worden naar ruim 1000 huishoudens. Wanneer de elektriciteitsproductie van de WKK buiten beschouwing gelaten wordt, zal het aantal huishoudens dat in hun warmtebehoefte voorzien wordt, afnemen naar 800.

Bij de conversie van elektriciteit naar warmte wordt er wel een hoogwaardige vorm van energie omgezet in een lagere vorm van energie. De waardering van deze energie wordt bepaald aan de hand van de kwaliteit van de energie, de exergie. Exergie is het nuttige deel van de energiestroom. Bij elektriciteit is de energiewaarde gelijk aan de exergiewaarde en kan alle energie dus nuttig gebruikt worden. Voor warmte ligt de exergiewaarde een stuk lager. Hierbij geldt wel, hoe hoger de temperatuur van de warmtestroom, hoe hoger de exergie⁹. De verhouding van de energie en exergie waarde van warmte is weergegeven in Figuur 4.8.

Figuur 4.8 Relatie van energie en exergie van warmte bij verschillende temperaturen ⁹



Dit betekent dat de inzet van elektriciteit in een warmtepomp (waarin door middel van arbeid in de vorm van elektriciteit lagere temperatuur warmte kan worden opgewerkt naar hogere temperatuur warmte) de voorkeur zal hebben wanneer er gekeken wordt naar conversie naar warmte, vanwege het hogere rendement. Het inzetten van elektriciteit in een boiler is door middel van het geleiden van elektriciteit door een weerstand, waardoor warmte ontstaat. Dit heeft een lager rendement dan een warmtepomp, maar kan wellicht in meer situaties worden toegepast dan een warmtepomp.

⁹ <http://eduweb.eeni.tbm.tudelft.nl/TB242E/?exergie-introductie>

4.4.5 Strategie 5: Elektrolyse-systeem

Door middel van een elektrolyse systeem kan elektriciteit en water omgezet worden in waterstof, zuurstof en warmte. Op deze manier vindt er conversie van elektronen naar moleculen plaats. Binnen de grenzen van een rwzi kan de vrijgekomen zuurstof en warmte, wat vaak als bijproducten beschouwd wordt, nuttig worden ingezet. Een bijkomend voordeel van waterstof is, dat het in tegenstelling tot elektriciteit, makkelijker op te slaan is. Het toepassen van een elektrolyse systeem vraagt echter wel om investeringen en de technologie is daarnaast nog volop in ontwikkeling. Bovendien is het van belang dat de geproduceerde waterstof ook nuttig afgezet kan worden. Vanwege de hoge investeringen die nodig zijn, moet het elektrolyse systeem genoeg waterstof produceren om de investeringen terug te verdienen. Om deze reden kan het ook nodig zijn om aanvullen elektriciteit van het net te halen. Op dit moment zal er minimaal ongeveer 60% vollaasturen behaald moeten worden. Met enkel opwekking vanuit de zon, zal dit niet genoeg vollaasturen opleveren.

Inzichten pilot Kampen

In pilot Kampen is de toepassing van een elektrolyse systeem uitgewerkt. Hieruit blijkt dat het mogelijk is om de productie van elektriciteit uit zonne- en windenergie op de rwzi Kampen te integreren in combinatie met waterstofproductie, zonder daarbij de netaansluiting te hoeven verzwaren of vernieuwen. Op basis van de analyse kan circa 95% van de duurzaam geproduceerde elektriciteit worden benut, allereerst in de vorm van eigen verbruik voor het zuiveringsproces op de rwzi (8,7%), vervolgens voor de productie van groene waterstof (72,1%) en in geval van overschot als teruglevering aan het net (14,2%).

De resultaten van de businesscase laten zien dat de kosten voor de productie van waterstof uit zonne- en windenergie €6,28 per kg H₂ zijn, op basis van de gehanteerde uitgangspunten. Wanneer we de vermeden kosten voor elektriciteitsinkoop voor de rwzi, plus inkomsten voor teruglevering van het overschot aan elektriciteit meenemen in het kostenplaatje, dalen de kosten voor een kg H₂ naar €5,76. Om een haalbaar project te realiseren, dienen de inkomsten uit de afzet van de geproduceerde waterstof gelijk te zijn aan deze kosten. Een van de mogelijk afzetmarkten is in de mobiliteit, ter vervanging van bijvoorbeeld diesel. In het geval dat alle geproduceerde waterstof tegen de prijs van diesel kan worden afgezet, laten de resultaten zien dat het project nog een onrendabele top heeft van €1,19 per kg H₂. Hierbij zijn eventuele investeringen voor de vervanging van werk- en voertuigen met dieselmotoren door brandstofcel-aandrijving niet meegenomen. Echter, er zijn in het model enkele aannames gedaan die in werkelijkheid mogelijk geoptimaliseerd kunnen worden.

4.4.6 Strategie 6: Grotere netaansluiting toepassen

Een van de aanleidingen van dit onderzoek is het feit dat momenteel in diverse regio's in Nederland congestie plaatsvindt in het elektriciteitsnetwerk. Veel netbeheerders stellen nu al beperkingen op het terugleveren van duurzame energie of kunnen geen extra leveringsvermogen aanbieden aan verbruikers. Een grote netaansluiting toepassen is dus in veel gevallen niet zomaar mogelijk. Bij rwzi Harderwijk bijvoorbeeld is er een redundant uitgevoerde aansluiting van 2MVA, waardoor er, indien de volledige fysieke capaciteit van de aansluiting beschouwd wordt, 4 MVA aansluitcapaciteit is. Ondanks dit is rwzi Harderwijk beperkt tot het terugleveren van 0,85MVA en het verbruiken van 1,6 MVA. Indien een grotere netaansluiting gewenst is dan 1,75 MVA in geval van Enexis en 2MVA in geval van Liander, vereist de netbeheerder dat er een aansluiting wordt gezocht op een onderstation (de koppeling tussen het netwerk van de regionale netbeheerder en de landelijke netbeheerder TenneT). Dit kan leiden tot hoge kosten,

afhankelijk van de afstand die er afgelegd moet worden naar het dichtstbijzijnde beschikbare onderstation. Ook kan het betreffende onderstation kampen met congestie, net zoals een verdeelstation of middenspanningskabel. Het aansluiten op een onderstation is daarmee alleen zinvol indien het niet nadelig bijdraagt aan de congestie op het betreffende onderstation en de kosten voor deze netaansluiting gecompenseerd kunnen worden door de maatschappelijke baten die door de rwzi als energie-hub kunnen worden gegenereerd. Er kunnen op verschillende manieren maatschappelijke baten worden behaald, zoals bijvoorbeeld productie van duurzame elektriciteit of waterstof, verlichting van congestie op het nabije distributienet, etc.

Inzichten pilot Harderwijk

In pilot Harderwijk is beschreven dat de beschikbare capaciteit van het netwerk wordt beperkt door de totale gecontracteerde transportcapaciteit van alle aansluitingen. Deze maximaal gecontracteerde capaciteit wordt door veel verbruikers echter niet continu gebruikt. In Harderwijk bijvoorbeeld is er dubbele aansluiting met een fysieke capaciteit van 2x 2MVA (~2 MW), maar is de gecontracteerde capaciteit voor verbruik vanwege beperkte transport capaciteit ongeveer 1,6 MW. Het werkelijke verbruiksvermogen is maximaal 1,135 MW, en voor slechts 5,8% van de tijd is het verbruik meer dan 0,6 MW. Hierdoor is er in werkelijkheid op veel momenten wel meer ruimte beschikbaar op het netwerk, maar kan dit in de huidige situatie niet benut worden.

Om het distributienetwerk beter te benutten, maar ook om congestie te voorkomen, kunnen netbeheerders onderzoeken om flexibele transportcapaciteit beschikbaar te stellen aan aangeslotenen. Dit is echter momenteel nog in strijd met de wetgeving, die stelt dat alle aangeslotenen hetzelfde behandeld dienen te worden. Dit betekent dat ook de wetgeving hier op termijn ruimte voor zou moeten bieden. Daarnaast dient de uitwisseling van data tussen aangeslotenen en de netbeheerders uitgebreid te worden en bij voorkeur geautomatiseerd en real-time beschikbaar te zijn, om capaciteit te kunnen verdelen of af te roepen/beschikbaar te stellen. Omdat leveringszekerheid een van de kerntaken is van de netbeheerders dient de flexibele verdeling van transportcapaciteit eerst in een gecontroleerde (pilot)omgeving ontwikkeld te worden voordat dit op grotere schaal uitgerold kan worden.

5 Bevindingen, conclusies en aanbevelingen

In dit hoofdstuk worden de bevindingen van het analysespoor van dit onderzoek samengevat. De bevindingen van de pilots zijn in de betreffende bijlagen van de pilots opgenomen en tevens gebruikt in het verdiepen van het analysespoor. Onderstaand worden allereerst de bevindingen uit de data-analyse van de rwzi's beschreven. Vervolgens worden de bevindingen beschreven per strategie die toegepast zou kunnen worden bij een rwzi als energie-hub. Tot slot wordt in paragraaf 5.2 de hoofdvraag van het onderzoek beantwoord, aangevuld met aanbevelingen voor het vervolg in paragraaf 5.3.

5.1 Bevindingen data-analyse en strategieën

- Geschaald naar het relatieve vermogen van rwzi's, hebben de verschillende rwzi's een vergelijkbaar verbruiksprofiel van elektriciteit op basis van de belastingduurkromme, de piekduurkromme, het dagprofiel en het jaarprofiel. Dit verbruiksprofiel is relatief constant en vlak. Rwzi's zonder slibvergister hebben doorgaans 5% minder biologische capaciteit en energieverbruik dan grotere rwzi's waar wel slibvergisting plaatsvindt. Vanwege een groter energieverbruik is er ook een verschil in de aansluitcapaciteit van verschillende rwzi's. Kleine rwzi's hebben doorgaans een (kleine) aansluitcapaciteiten van 630 kVA terwijl grote rwzi's een aansluitcapaciteit tussen 1.630 en 3.000 kVA hebben. Vrijwel alle rwzi's, onafhankelijk van de aansluitcapaciteit zijn aangesloten op het distributienetwerk.
- De aansluitcapaciteit van rwzi's wordt doorgaans slechts gedeeltelijk gebruikt. Bijvoorbeeld 100 kW gemiddelde afname versus 630 kVA (~kW) aan beschikbare fysieke capaciteit. Dit biedt kansen om de resterende beschikbare capaciteit op de aansluiting te benutten voor "grid-diensten" d.m.v. een batterij, kleinschalige waterstof productie of uitwisseling met de omgeving.
- De gemiddelde verbruiksvermogens van kleine rwzi's (50-200 kW) en van grote rwzi's (100-700 kW) zijn relatief laag. Dit maakt direct verbruik uit variabele bronnen zoals wind/zon vooral interessant in combinatie met een conversie- of opslagsysteem. Zonder een dergelijk systeem gaat ofwel veel van de piekproductie uit zon of wind verloren, of wordt deze duurzame productie op het elektriciteitsnet ingevoerd waardoor het juist bijdraagt aan de piekbelasting van het net en netcongestie, ofwel er is een heel kleine energieproductie (bijvoorbeeld uit een klein zonneveld) waarmee het energieverbruik van de rwzi slechts op bepaalde momenten gedekt wordt (bijvoorbeeld alleen als de zon voldoende schijnt).
- Een gangbare moderne windturbine van bijvoorbeeld 4,8 MW produceert ongeveer 10 tot 15 keer zoveel energie als een gemiddelde kleine rwzi verbruikt. In het geval van rwzi Kampen (één van de onderzochte pilots in dit onderzoek) is dat ongeveer 9 keer. In het geval van rwzi Harderwijk (de andere pilot in dit onderzoek) waar wel slibvergisting plaatsvindt, is dat ongeveer 6 keer meer opwek dan eigen verbruik wanneer de op het terrein aanwezige biovergistingcentrale Harderwijk (BECH) van derden niet wordt meegenomen in het verbruik, en ongeveer 2 keer meer opwek dan verbruik wanneer de BECH wel beschouwd wordt. Indien een dergelijke turbine geplaatst wordt bij een rwzi wordt het overschot ofwel geleverd aan het elektriciteitsnet (en draagt daarmee (potentieel) bij aan netcongestie), ofwel benut voor bijvoorbeeld waterstofproductie of warmteopwekking, of gaat verloren ten gevolge van het afschakelen of terugregelen van de productie (dit laatste wordt aangeduid als 'curtailment').

Een aantal strategieën is bepaald om op een nuttige manier om te gaan met de productie en het benutten van duurzame elektriciteitsopwekking op of in de omgeving van een rwzi, waarbij uitgegaan wordt van

mogelijkheden om de rwzi als energie-hub in te zetten en het netwerk te ontlasten. Deze strategieën worden achtereenvolgens toegelicht.

Strategie 1: Verbruik afstemmen op eigen opwek en aanbod vanuit omgeving

- Er is potentieel flexibiliteit in het energieverbruik van het zuiveringsproces, bijvoorbeeld door flexibel te beluchten, maar dit dient nader te worden onderzocht omdat dit ingrijpt op het primaire proces van de rwzi. De frequentie, duur en omvang van het flexibele vermogen wat hierbij beschikbaar komt, is afhankelijk van de mate waarin een verstoring van het zuiveringsproces optreedt en acceptabel is, vergt verdere analyse.
- Het betrekken van duurzame productie-installaties zoals zonnepanelen en windturbines in de directe nabijheid van de rwzi is alleen zinvol in het geval:
- De productie-installatie zelf geen toereikende netaansluiting en/of gecontracteerd transportvermogen weet te verkrijgen bij de netbeheerder, of
- Het voor de exploitant van de productie-installatie goedkoper is om via de rwzi op het net aan te sluiten en de geproduceerde duurzame elektriciteit mag worden ingezet voor verduurzaming van het energieverbruik van de rwzi,
- Dat in beide voorgaande gevallen de rwzi op zodanige wijze de energieproductie weet te verbruiken, op te slaan en/of te converteren zodat de hoeveelheid teruglevering beperkt blijft tot hetgeen binnen de beschikbare fysieke capaciteit en/of gecontracteerde terugleververmogens op het net past.
- De kansen voor afstemming met de omgeving zijn locatie afhankelijk. De mate waarin er een bijdrage aan het verminderen van de netbelasting, of zelfs het voorkomen van netverzwaring, geleverd kan worden, hangt onder meer af van de geplande (flexibele) duurzame opwek dat aangesloten is op de middenspanningskabel, geplande toekomstige duurzame opwek, de methode van duurzame opwekking (en het bijbehorende opwekprofiel), de mate van flexibiliteit die verbruikers kunnen leveren, de frequentie van piekbelasting, de duur van de piekvraag en de huidige netbelasting.

Strategie 2: (meer) duurzame energie toepassen

- Zonne-energie kan het beste kleinschalig worden toegepast in het geval er geen of beperkte teruglevering mogelijk is, vanwege de mismatch tussen het productieprofiel van zonne-energie en het verbruiksprofiel van een rwzi. Grootschalige toepassing van zonne-energie vereist een grote netaansluiting die relatief een klein deel van de tijd volledig benut wordt. Ook omzetting van de zonne-energie naar waterstof of warmte is, zonder opslagsysteem, relatief ongunstig, omdat de electrolyser dan weinig vollasturen draait (de zon schijnt alleen overdag en in de winterperiode veel minder krachtig) en de warmtevraag vaak niet aansluit bij het productieprofiel van zonne-energie. Op dit moment zijn de investeringskosten van een elektrolysesysteem nog erg hoog. Om een financieel haalbaar project te realiseren, zal de electrolyser tot ongeveer 60% vollasturen moeten komen, hetgeen met enkel een zonnepanel niet mogelijk is.
- De elektriciteitsproductie van een zonnepanel met een grote piekproductie overdag en weinig productie in de winter, kent geen goede match met het verbruiksprofiel van een rwzi; voor minimaal de helft van de tijd moet er elektriciteit van het net gehaald worden.
- Een moderne windturbine genereert zo veel energie dat er na aftrek van het elektriciteitsverbruik van een rwzi nog veel elektriciteit beschikbaar is, terwijl de huidige netaansluiting bij rwzi's niet toereikend is om alle energie terug te kunnen leveren aan het net. Tegelijkertijd biedt het overschot aan duurzame energie meerdere opties voor een energie-hubfunctie, omdat een grote hoeveelheid elektriciteit beschikbaar is die op verschillende manieren nuttig toegepast kan worden. Hiervoor biedt de beslissingsmatrix (zie paragraaf 4.2) op hoofdlijnen inzicht in de strategieën voor de benutting van deze energie.

- De toevoeging van een klein zonnepark (ordegrootte van een megawatt) aan een systeem waar al een moderne windturbine (ordegrootte van vier tot vijf megawatt) aanwezig is, zorgt voor een vlakker opwekkingsprofiel en zorgt in principe niet voor een vergroting van de piek in teruglevering.

Strategie 3: Batterij om teruglevering af te stemmen op vraag vanuit omgeving

- Een voorbeeld voor de toepassing van een batterijsysteem op een rwzi is om het restant van de piekproductie uit een zonnepark, na aftrek van eigen elektriciteitsverbruik, op te vangen en op een later moment zelf te verbruiken of terug te leveren, om het elektriciteitsnet te ontlasten tijdens momenten van een piek in de teruglevering. Echter, de financiële haalbaarheid van deze optie is laag, omdat de investeringen in een batterij relatief hoog zijn en er (nog) geen extra inkomsten mee gegenereerd worden dan louter verkoop van elektriciteit of vermeden inkoop op een ander moment. Indien aan een batterijsysteem gedacht wordt is het advies om de batterij dan zodanig te dimensioneren dat deze ook beschikbaar is voor TenneT en in de toekomst wellicht ook de regionale netbeheerder, om betaalde ondersteunende diensten voor het net te bieden (bijvoorbeeld frequentieregeling of congestiemanagement).
- Bij rwzi's met een windturbine (en eventueel een klein zonnepark) zijn de mogelijkheden voor batterijen om curtailment te voorkomen afhankelijk van het beschikbare transportvermogen voor teruglevering. Indien de momenten waarop er terugleververmogen beschikbaar is niet voldoende volume bieden om curtailment te voorkomen, is een batterijsysteem alleen niet voldoende om alle elektriciteit nuttig te kunnen gebruiken. De energieproductie vanuit een windturbine is dermate groot dat een batterijsysteem een enorme omvang zou moeten hebben en daarmee erg kostbaar zou zijn. Het ligt dan meer voor de hand om andere oplossingsrichtingen (zoals elektrolyse of warmteomzetting) te onderzoeken.

Strategie 4: Conversie naar warmte

- De warmtevraag op een rwzi zonder slibvergisting is zeer beperkt, dus directe afzet van geproduceerde warmte op deze rwzi's is zeer gering.
- Elektriciteit kan gebruikt worden om warmte te genereren voor het vergistingsproces of slibindikking (indien aanwezig), maar eventueel ook om huishoudens via een warmtenet in hun warmtebehoefte te voorzien. Echter wordt hierbij wel een hoogwaardige vorm van energie (electriciteit) omgezet in een lagere vorm van energie (warmte).
- Het omzetten van het overschot aan duurzame elektriciteit in warmte heeft in principe nooit de voorkeur boven direct gebruik van elektriciteit (op locatie of via het net), vanwege het feit dat elektriciteit een hoogwaardigere vorm van energie is dan warmte. Deze optie is daarom alleen aan te raden als er verder geen andere mogelijkheden zijn voor de benutting van de elektriciteit of in het geval er geen andere bronnen beschikbaar zijn om de benodigde warmte mee te kunnen leveren.

Strategie 5: Elektrolyse-systeem

- Door het toepassen van een elektrolysesysteem kan het overschot duurzaam opgewekte elektriciteit benut worden en wordt curtailment teruggebracht. In een goed gedimensioneerd electrolyse systeem kan hiermee de curtailment van 44% naar 4% teruggebracht worden¹⁰.
- Indien de geproduceerde waterstof door het waterschap zelf gebruikt kan worden, bijvoorbeeld door de werktuigen van het waterschap, is een elektrolysesysteem niet afhankelijk van de garantie van afzet in de omgeving en is de benodigde infrastructuur hiervoor beperkt. Deze beperkte

¹⁰ De resultaten van de pilot in Kampen zijn gebruikt als referentie. Er zal 44% curtailment zijn indien er geen nuttige toepassing voor de opgewekte elektriciteit gevonden wordt.

afhankelijkheden van benodigde infrastructuur en afname in de omgeving maakt de toepassing van elektriciteit voor de productie van waterstof minder complex (minder garanties van afname door derden zijn nodig voorafgaand aan de investeringen in het systeem), economisch aantrekkelijker en biedt het een methode om de (zware) voertuigen van het waterschap te verduurzamen.

- Er zijn verschillende additionele voordelen van het plaatsten van een elektrolysesysteem op het terrein van een rwzi. Allereerst kan de vrijgekomen warmte en zuurstof ook mogelijk nuttig benut kunnen worden, wat kan leiden tot een lagere energievraag van het zuiveringsproces. Bovendien biedt toepassing van pure zuurstof mogelijkheden tot innovatie van het zuiveringsproces; het biedt kansen om het zuiveringsproces beter te controleren en emissies van lachgas te reduceren en het is mogelijk om van pure zuurstof Ozon te produceren waarmee medicijnresten uit het afvalwater verwijderd kunnen worden.
- Waterstofproductie op een rwzi laat positieve resultaten zien waarbij het geproduceerde waterstof waarschijnlijk concurrerend zal zijn met diesel. In deze businesscase is er van uitgegaan dat de geproduceerde waterstof gegarandeerd benut of verkocht kan worden.
- Naar verwachting weegt de investering in een aanvullend batterijsysteem in combinatie met een zonnepaneel, windturbine en een elektrolysesysteem niet op tegen de vermeden kosten voor inkoop van elektriciteit van het net, zelfs als de elektriciteitsprijzen hoog zijn.
- Rwzi's hebben bovendien gunstige uitgangspunten voor het realiseren van waterstofproductie met behulp van een electrolyser doordat een vergunning hiervoor naar verwachting goed verkrijgbaar is vanwege de doorgaans zwaardere categorie bedrijvigheid die het bestemmingsplan toelaat en de ligging die meestal verder verwijderd is van woningen en dergelijke.

Strategie 6: Grotere netaansluiting toepassen

- De meeste rwzi's hebben een netaansluiting die verbonden is met het distributienetwerk (middenspanningskabel) waardoor de fysieke capaciteit doorgaans beperkt is tot maximaal 1,75-2 MVA (afhankelijk van de regionale netbeheerder). Boven deze drempel vereist de netbeheerder dat wordt aangesloten op een onderstation. Het vergroten van de capaciteit van de netaansluiting van de rwzi kan daarmee resulteren in een forse toename in kosten, afhankelijk van de afstand tot het betreffende onderstation.
- Rwzi's zonder slijbvergisting hebben doorgaans een aansluiting met een fysieke capaciteit van 630 kVA (redundant) en kunnen mogelijk (als het netwerk het toelaat) nog vergroot worden in capaciteit zonder daarvoor een nieuwe aansluiting met een onderstation aan te leggen. Daarmee kunnen extra uitwisselingsmogelijkheden met het net verkregen worden.
- Het voordeel van het realiseren van een grotere netaansluiting naar een onderstation is dat het distributienet waar de rwzi voorheen mee verbonden was mogelijk niet verzaamd hoeft te worden, en er significant hogere vermogens kunnen worden teruggelieferd (mits de transportcapaciteit van het onderstation toereikend is). Het is echter niet uitgesloten dat het betreffende onderstation al reeds kampt met congestie en dat de fysieke capaciteit van de nieuwe netaansluiting naar dit onderstation bij voorbaat al niet (volledig) kan worden benut.

5.2 Conclusies

In dit onderzoek naar de mogelijkheden waarop een rioolwaterzuiveringsinstallatie (rwzi) een functie zou kunnen vervullen als een energie-hub, staan de huidige doelstellingen omtrent het realiseren van meer duurzame energie als waterschap en de problematiek rondom congestie op het elektriciteitsnet centraal. Dit is in hoofdstuk 1 samengevat in de volgende hoofdvraag:

Op welke wijze kan een rwzi als potentiële energie-hub bijdragen aan het faciliteren van meer duurzame energie, waarbij de kerntaak van zuivering in stand blijft en het elektriciteitsnet zo veel mogelijk ontlast wordt?

Onder een energie-hub die de opwek van duurzame energie bevordert en het elektriciteitsnet zoveel mogelijk ontlast, wordt verstaan: een schakel in het energiesysteem waarbij optimalisatie van aanbod, opwek en gebruik van duurzame energie vanuit de rwzi en/of de omgeving plaatsvindt door middel van (combinaties van):

- overdracht van energie,
- energieopslag,
- conversie van energie.

In de vorige paragraaf zijn strategieën beschreven om dit te realiseren. Hieruit trekken wij de volgende conclusies.

5.2.1 Duurzame energie opwekken en gebruiken op de rwzi

1. Aan de hand van het verkregen inzicht in het typerende verbruiksprofiel van rwzi's zijn de praktische gebruiksmogelijkheden en -beperkingen van zonne- en windenergie gedetailleerd in kaart te brengen.

Allereerst hebben we uitvoerig onderzoek gedaan naar het elektriciteitsverbruik van de rwzi's, aangezien het kunnen benutten van duurzame elektriciteit door deze zelf direct uit de bron te verbruiken de meest efficiënte stap is. Uit deze eerste analyse is een dataset geselecteerd die het meest representatief is voor zoveel mogelijk rwzi's. Vervolgens zijn daar mogelijke productieprofielen van zonne- en windenergie mee gematched, in relatie tot de beschikbare transportcapaciteit van de netaansluiting. De resultaten hiervan geven helder inzicht in hoeveel elektriciteit direct verbruikt kan worden op de rwzi zelf, hoeveel elektriciteit er daarna nog teruggeleverd kan worden via de netaansluiting en hoeveel elektriciteit er 'gecurtailed' (beknot/niet benut) wordt. In de pilot van rwzi Harderwijk (zie bijlage) is dit vergaand uitgewerkt en in beeld gebracht.

2. Grootschalige opwek met zon en wind leidt tot een groot energieoverschot op een rwzi waarvoor een nuttige toepassing gevonden dient te worden.

De algemene conclusie kan getrokken worden dat het toepassen van grootschalige duurzame elektriciteitsproductie (een groot zonneveld of een moderne windturbine) op een rwzi zonder slibvergisting leidt tot een groot volume aan elektriciteit dat terug geleverd, dan wel gecurtailed dient te worden (afhankelijk van de beschikbare transportcapaciteit). Bij een rwzi met slibvergister is het eigen energieverbruik groter en treedt curtailment dus in mindere mate op, echter het energieverbruik is relatief laag in vergelijking met de productie van een moderne windturbine.

Het toepassen van zonne-energie is modulair en daardoor in principe schaalbaar naar het eigen verbruik van een rwzi en de beschikbare transportcapaciteit. Er kunnen simpelweg meer of minder zonnepanelen geplaatst worden. Het toepassen van windenergie met moderne technologie is echter minder schaalbaar, vanwege de toenemende omvang en vermogens van huidige beschikbare turbinetypes. In de meeste situaties zal het aansluiten van een moderne windturbine op een rwzi leiden tot een groot volume aan duurzame elektriciteit dat beschikbaar komt op een rwzi terrein, zelfs na aftrek van het eigen verbruik. Om de resterende elektriciteit nuttig toe te kunnen passen zijn in dit onderzoek een aantal opties onderzocht en beoordeeld; hieruit komen goede mogelijkheden naar voren (zie onderstaand).

5.2.2 Benutten van een overschot aan duurzame energie: netaansluiting, batterij, warmte of waterstof

3. Een grotere netaansluiting vergroot de uitwisselingscapaciteit met het netwerk mits de netbeheerder dit kan bieden. In de toekomst is wellicht ook een flexibel vermogen te contracteren waarmee netcongestie verlicht kan worden.

Het realiseren van een grotere netaansluiting kan de productie van grootschalige duurzame energie faciliteren en de uitwisselingscapaciteit met het net van de rwzi vergroten. Dit is in het kader van de doelstelling van dit onderzoek alleen een optie indien hiermee niet negatief wordt bijgedragen aan congestie op het netwerk. Het advies is daarom om deze optie altijd in overleg met de regionale netbeheerder te verkennen.

In de toekomst kan wellicht een flexibel transportvermogen voor een rwzi, maar ook samen met andere aangeslotenen op het elektriciteitsnetwerk gecontracteerd worden waarbij afgesproken wordt met de netbeheerder dat het verbruik op- of afgeschakeld wordt naar gelang er een overschot of tekort is aan duurzame energie op het netwerk. Dat is een mogelijke oplossing om congestie te voorkomen of te verminderen en de netinfrastructuur efficiënter te benutten. Hierbij moet wel beseft worden dat de netbeheerder er te allen tijden vanuit moet kunnen gaan dat ook daadwerkelijk op- of afgeschakeld wordt wanneer dat nodig is; nader onderzoek naar de technische mogelijkheden hiervan zonder de zuiveringsfunctie te bedreigen, dient plaats te vinden. Gezien het relatief geringe en constante verbruik van een rwzi, zal het positieve effect op het netwerk ook relatief beperkt zijn.

Of het financieel voordelig is om een grotere netaansluiting toe te passen, hangt van verschillende factoren af. Allereerst of de extra beoogde capaciteit onder de grens van (afhankelijk van het gebied) 1,75 tot 2 MVA blijft, waardoor de huidige aansluiting naar het distributienet enkel verzaamd hoeft te worden, of boven 1,75 tot 2 MVA komt, waardoor er een veel duurdere aansluiting op het onderstation gerealiseerd moet worden. De kosten voor de grotere netaansluiting zijn vervolgens afhankelijk van de tarieven die de netbeheerder hanteert en eventueel de afstand en route naar het onderstation. Of deze investering positief uitpakt ten opzichte van bijvoorbeeld vermeden curtailment, dient locatiespecifiek berekend te worden.

4. Een batterijopslagsysteem is alleen nuttig indien er voldoende gelegenheid is om de batterij weer te kunnen ontladen. Dit zal in regel eerder voorkomen bij een systeem met enkel duurzame opwek vanuit een beperkt aantal zonnepanelen dan in een systeem met een moderne windturbine omdat deze te veel overschot aan elektriciteit produceert om op te kunnen slaan en weer te gebruiken.

Een batterijopslagsysteem kan helpen om pieken af te vangen die niet verbruikt noch afgevoerd kunnen worden via het net. Van belang is dan wel dat er voldoende gelegenheid is om de batterij weer te kunnen ontladen door eigen verbruik of teruglevering naar het net. Het relatief beperkte en gelijkmatige energieverbruik van een rwzi en de doorgaans relatief kleine netaansluiting maakt het onmogelijk om een grote overtollige piek in energieproductie die is opgeslagen in een batterij weer snel te ontladen. Hierdoor dient een batterij óf erg groot te zijn (en daarmee erg duur) om langer een grote hoeveelheid energie op te slaan, óf juist klein maar dan kan er slechts een relatief kleine hoeveelheid energie worden opgeslagen. Denk hierbij bijvoorbeeld aan het overschot van de dag piekproductie van een klein zonneveld dat in de nacht wordt gebruikt.

De (financiële) haalbaarheid van deze toepassing hangt af van de grootte van het zonneveld, het volume van de elektriciteitsvraag in de avonduren (welke per maand verschilt), de ontwikkeling van de elektriciteitsprijzen (welke vermeden worden door het gebruik van een batterij) en de ontwikkelingen in de prijzen en kwaliteit van batterijen. De overtollige productie van een windturbine leent zich niet voor opslag in een batterij, die zou dan veel te groot moeten worden.

5. Conversie naar warmte is een oplossing die in beeld komt als geen directe toepassingen voor geproduceerde elektriciteit beschikbaar is.

In het geval er een warmtevraag op de rwzi (vergistingsproces) of in de omgeving van de rwzi bestaat (bijvoorbeeld een warmtenet), kan er ook voor worden gekozen om de duurzame elektriciteit om te zetten in warmte. Het potentieel dat hiermee bediend kan worden hangt af van conversiemethode en rendement (bijvoorbeeld warmtepomp of elektrische boiler), toegang tot een warmteverbruiker en de zekerheid en het profiel van de warmtevraag. We adviseren om elektriciteit pas toe te passen in warmteomzetting, indien er geen andere toepassingen geschikt of haalbaar zijn waarbij elektriciteit in zijn huidige, hoogwaardige vorm kan worden gebruikt. Het aanleggen van een warmtenet, vooral als zich dit over grotere afstanden uitstrekt, is kostbaar.

Opslag van warmte is nuttig indien de warmtevraag niet overeenkomt met het warmteaanbod. De (financiële) haalbaarheid hangt af van de schaal waarvoor de warmteopslag dient (voor enkel het warmteverbruik van de rwzi of ook van de omgeving), de temperatuur van de vrijgekomen warmte, de gewenste gebruikstemperatuur, het gewenste volume, de techniek van opslag en de ruimtelijke mogelijkheden op locatie.

6. De lokale productie van waterstof door middel van een elektrolysesysteem is economisch en technisch goed haalbaar en kan nuttig worden toegepast.

Het produceren van waterstof uit elektriciteit door middel van een elektrolysesysteem biedt de mogelijkheid om elektriciteit die niet door de rwzi verbruikt of teruggeleverd kan worden, om te zetten in een andere duurzame energiedrager (groene waterstof) die brede toepassing kan vinden en ook opgeslagen kan worden (al is grootschalige opslag onder hoge druk wel duur). Het pilotonderzoek van rwzi Kampen leert ons dat elektrolyse de technische potentie heeft om grootschalige productie van duurzame elektriciteit door bijvoorbeeld zonne- en windenergie zo volledig mogelijk te benutten en daarbij de belasting van het elektriciteitsnetwerk te minimaliseren.

Naast technische potentie, blijkt de toepassing van waterstofproductie op de rwzi ook een economisch potentieel te hebben en concurrerend te zijn met andere brandstoffen indien de groene waterstof wordt afgezet ten behoeve van mobiliteit en werktuigen. De resultaten van de businesscaseberekeningen in de

pilot rwzi Kampen laten zien dat de kosten voor de productie van waterstof uit zonne- en windenergie circa €6,28 per kg H₂ zijn, op basis van de gehanteerde uitgangspunten. Wanneer we de vermeden kosten voor elektriciteitsinkoop voor de rwzi, plus inkomsten voor teruglevering van het overschot aan elektriciteit meenemen in het kostenplaatje, dalen de kosten voor een kg H₂ naar €5,76. In het geval dat alle geproduceerde waterstof tegen de prijs van diesel kan worden afgezet, laten de resultaten zien dat het project nog een onrendabele top heeft van €1,19 per kg H₂. Vanwege de onzekerheid van de SDE++ regeling voor waterstof, is deze subsidie in de businesscaseberekening niet meegenomen, waardoor de businesscase nog aanmerkelijk zal verbeteren indien deze subsidie wel beschikbaar is.

Daarnaast bieden rwzi's ook unieke aanvullende kansen om de inzet van een elektrolysesysteem te optimaliseren, door nuttige toepassing van restwarmte en vrijkomende zuurstof voor het zuiveringsproces. Rwzi's beschikken over omgevingsvergunningen die gezien de doorgaans zwaardere categorie bedrijfsbestemming van het terrein, mogelijk met een eenvoudige uitbreiding een elektrolysesysteem kunnen faciliteren. Dit zal doorgaans niet het geval zijn bij een zonne- of windpark in agrarisch gebied. De financiële haalbaarheid van een elektrolysesysteem is afhankelijk van de mogelijkheid van afzet en verkoop van de geproduceerde waterstof. Het gebruik van waterstof ter vervanging van fossiele brandstoffen in werk- en voertuigen zou op dit moment de meeste waarde toevoegen en kunnen leiden tot een economisch rendabel systeem.

Om een elektrolysesysteem (evenals een batterijsysteem) te dimensioneren adviseren wij om altijd voor de specifieke situatie een nadere analyse te doen naar elektriciteitsverbruik en -productie, minimaal op basis van kwartierdata. Dit is ook noodzakelijk om de financiële haalbaarheid van dergelijke strategieën te onderzoeken.

Alhoewel het nog niet op voorhand met zekerheid te stellen is dat het elektrolyseconcept een winstgevende optie is, staan waterschappen wel in de unieke positie om deze strategie ook vanuit het oogpunt van de maatschappelijke baten verder te kunnen ontwikkelen en toe te passen. Hierbij vormt de aanwezigheid van meer dan 300 rwzi's verspreid over Nederland, een land dekkend netwerk.

5.2.3 Duurzame energie uitwisselen met de omgeving

Hierboven is met name stilgestaan bij het benutten van duurzame energie op de rwzi zelf en het oplossen van de problematiek van overschotten aan duurzame elektriciteit op de rwzi die niet op het net teruggeleverd kunnen worden. Vanuit een andere oriëntatie (die overigens wel overlappend is) kan ook de uitwisseling met de omgeving centraal gesteld worden, vanuit de behoefte daartoe in de omgeving van de rwzi. Dit is onder meer in de pilot Harderwijk onderzocht.

7. Overschot aan duurzame elektriciteitsproductie in de omgeving kan mogelijk worden gebruikt voor de eigen energiebehoefte van een rwzi of voor omzetting naar waterstof.

Indien in de omgeving van de rwzi duurzame elektriciteit wordt opgewekt (uit zon of wind) en deze kan niet (altijd) afgevoerd worden via het elektriciteitsnet vanwege congestieproblemen op het net, dan kan een rwzi in de omgeving mogelijk bijdragen aan het oplossen van dit probleem. Twee mogelijkheden liggen dan voor de hand: de energie gebruiken ten behoeve van de processen op de rwzi zelf of dit overschot opslaan of omzetten. Zoals hierboven beschreven is het eigen verbruik van een rwzi beperkt van omvang. Dit levert dus geen oplossing voor grotere vermogens. Opslaan in een batterij kent de problematiek zoals hiervoor beschreven: al snel is een hele grote batterij nodig als het gaat om meer opwek dan dat van een klein zonnenveld. Omzetten naar waterstof (of eventueel warmte wanneer deze heel nuttig gebruikt kan

worden) is evenwel een mogelijkheid, net zoals hierboven beschreven bij het benutten van een groter overschot dat zelf wordt opgewekt.

De situatie voor het verkrijgen van een economisch sluitende business case voor de productie van waterstof uit elektriciteit vanuit de omgeving is in dit geval evenwel gecompliceerder. Als wordt uitgegaan van levering van het overschot via het bestaande elektriciteitsnet dan dient er op dit moment nog energiebelasting betaald te worden hetgeen de energie veel duurder maakt dan wanneer het zelf opgewekt zou zijn. Mogelijk gaat hier in de toekomst het een en ander veranderen waardoor het bestaande netwerk een rol kan spelen bij het direct koppelen van vraag en aanbod, echter dit dient dan wel heel nauwkeurig afgestemd te worden met de capaciteit van het netwerk, immers deze optie komt alleen in beeld wanneer er al sprake is van congestieproblemen en mag deze problemen natuurlijk niet verergeren.

Het leggen van een eigen kabel naar een opwekinstallatie van derden is wettelijk niet zomaar toegestaan; er dient dan een privaat netwerk (gesloten distributiesysteem of directe lijn) aangelegd te worden met tal van wettelijke monitorings-, beheers- en toetredingsverplichtingen. Ook ontstaat natuurlijk de vraag tot welke omvang het verwerken van energie van derden in de omgeving een waterschapstaak is. Vanuit de maatschappelijke functie van waterschappen is een bijdrage aan de energietransitie en beperking van de maatschappelijke kosten van het netwerk evenwel waard om te overwegen en nader te verkennen.

8. Vraag naar duurzame energie in de omgeving

Een vraag naar duurzame energie vanuit de omgeving, bijvoorbeeld vanuit een bedrijf, kan mogelijk gedekt worden door de productie vanuit zon of wind vanuit het terrein van de rwzi. Hiervoor kan het elektriciteitsnetwerk ingezet worden, en wanneer congestie dit onmogelijk maakt, kan in overleg met de netbeheerder nagegaan worden of een koppeling van vraag en aanbod afhankelijk van tijd en omvang mogelijk is (flexibel gecontracteerd vermogen). In een situatie van een netwerk met bestaande congestieproblemen, breng dit evenwel aanmerkelijke inspanningen met zich mee om exact en altijd de levering en productie te matchen zonder het netwerk teveel te belasten. Het is de vraag of een waterschap hiertoe is uitgerust of dit op zich zou willen nemen. Is er geen congestie dan kan het elektriciteitsnetwerk uiteraard zonder enige problemen de verbindende schakel zijn tussen rwzi en nabijgelegen gebruiker.

Het aanleggen van een directe kabel tussen een gebruiker in de omgeving en een rwzi is technisch mogelijk, echter dezelfde wettelijke beperkingen en verplichtingen als hierboven beschreven doen zich dan voor, feitelijk wordt het waterschap dan een netbeheerder; de vraag rijst of dat een beoogde rol is, al zijn er in potentie zeker maatschappelijke kosten voor het mogelijk minder uitbreiden van het netwerk te besparen.

Naast elektriciteit kan er ook een warmtevraag in de omgeving zijn die mogelijk geheel of gedeeltelijk door een rwzi gedekt kan worden (er zijn diverse bronnen zoals aquathermie of warmte van wkk's). Ook kan elektriciteit omgezet worden naar warmte zoals hierboven al beschreven. Voor transport en levering van warmte is doorgaans een warmtenet nodig dat een aanmerkelijke investering met zich meebrengt.

5.3 Aanbevelingen

Nader concretiseren van de uitwisselingsmogelijkheden met de omgeving

De fysieke aansluitcapaciteit van rwzi's wordt doorgaans slechts gedeeltelijk gebruikt. Dit biedt kansen om de resterende beschikbare capaciteit op de aansluiting te benutten om vanuit opwek op de rwzi of vanuit nabijgelegen bronnen extra duurzame energie aan het net te leveren, of het netwerk te ontlasten bij congestie problemen. Absoluut gezien is echter de capaciteit per rwzi om elektriciteit uit te wisselen met het netwerk beperkt. Er zijn evenwel meer dan 300 rwzi's in Nederland waardoor de optelsom van deze mogelijkheden op nationale schaal naar verwachting wel zo'n 100 tot 150 megawatt kan bedragen (300 maal de gemiddeld beschikbare vrije capaciteit van circa 0,5 megawatt). Vanuit dat perspectief is de bijdrage substantieel al zullen per rwzi de mogelijkheden sterk verschillen. Aanbevolen wordt om per rwzi een verkenning uit te voeren of het potentieel benut kan worden. Dit onderzoek, met als één van de hulpmiddelen de beslissingsmatrix met verschillende strategieën (zie paragraaf 4.2), biedt hiervoor de nodige handvatten. In de pilot rwzi Harderwijk zijn tal van opties verkend die in een vervolgonderzoek nader geconcretiseerd kunnen worden, vooral voor wat betreft de uitwisselingsmogelijkheden met de omgeving.

Pilots voor de lokale productie van groene waterstof

Uit het onderzoek komt naar voren dat goed uitgerekend kan worden hoe en in welke mate energieverbruik en duurzame energieproductie op elkaar afgestemd kunnen worden en welke overschotten of tekorten optreden. Het lokaal produceren van groene waterstof is een goede oplossing voor het verwerken van een overschot aan productie vanuit wind, eventueel in combinatie met zon. Hiermee kan een relatief grote omvang aan overproductie van duurzame energie verwerkt en nuttig toegepast worden. Ook heeft deze toepassing een gunstige businesscase bij afzet van de waterstof voor vervoer en werktuigen van het waterschap, mede doordat benutting mogelijk is van de vrijkomende warmte en zuurstof in het zuiveringsproces.

Dit in combinatie met de mogelijkheden die waterschappen hebben om niet alleen economisch motieven maar ook de maatschappelijke meerwaarde een rol te laten spelen in de besluitvorming, leidt tot de aanbeveling dit verder in de praktijk te gaan onderzoeken door middel van pilots met experimenteerruimte. Het onderzoek in die pilots (dat kan voortborduren op de pilot rwzi Kampen in dit onderzoek) kan zich richten op de benutting van de vrijkomende warmte en zuurstof, de praktische, technische en economische realisatie van het elektrolysesysteem en de afzet van de waterstof in de specifieke lokale omstandigheden. Waterschappen kunnen hiermee lokaal bijdragen aan verduurzaming en op nationaal niveau een rol spelen in de verdere ontwikkeling van de productie en toepassing van waterstof dat gezien wordt als een belangrijke schakel in de energietransitie.



6 Bijlagen



Bijlage 1: Pilot Kampen

De rwzi als Energiehub

Bijlage 1: Pilot rwzi Kampen

WDO Delta / Unie van Waterschappen

720174 | V3.0

01/10/2021



Pondera

Hoofdvestiging Nederland
Amsterdamseweg 13
6814 CM Arnhem
088 – pondera (088-7663372)
info@ponderaconsult.com

Postadres
Postbus 919
6800 AX Arnhem

Vestiging South East Asia
Jl. Mampang Prapatan XV no 18
Mampang
Jakarta Selatan 12790
Indonesia

Vestiging North East Asia
Suite 1718, Officia Building 92
Saemunan-ro, Jongno-gu
Seoul Province
Republic of Korea

Colofon

Soort document
De rwzi als Energiehub

Projectnaam
Bijlage 1: Pilot rwzi Kampen

Versienummer
V3.0

Datum
1-10-2021

Project nummer
720174

Opdrachtgever
WDO Delta / Unie van Waterschappen

Auteur
Anne de Boer; Jim Quick

Nagekeken door
Steven Geujen

Disclaimer

In het onderzoek is gebruik gemaakt van algemeen geaccepteerde uitgangspunten, modellen en informatie die ten tijde van het opstellen van dit rapport ter beschikking stonden. Aanpassingen in de uitgangspunten, modellen of gebruikte gegevens kunnen leiden tot andere uitkomsten. De aard en de nauwkeurigheid van de gebruikte gegevens voor het onderzoek bepalen in belangrijke mate de nauwkeurigheid en de onzekerheden van de berekende uitkomsten. Pondera is niet aansprakelijk voor gederfde inkomsten of schade die wordt geleden door opdrachtgever(s) en/of derden uit conclusies die gebaseerd zijn op gegevens die niet van Pondera afkomstig zijn. Deze rapportage is opgesteld met de intentie dat deze alleen gebruikt wordt door de opdrachtgever en slechts voor het doel waarvoor de rapportage is opgesteld. Er mag geen beroep worden gedaan op de informatie uit deze rapportage voor andere doeleinden zonder schriftelijke toestemming van Pondera. Pondera is niet verantwoordelijk voor de consequenties die kunnen voortvloeien uit het oneigenlijk gebruik van de rapportage. De verantwoordelijkheid voor het gebruik van (de analyse, resultaten en bevindingen in) de rapportage blijft bij de opdrachtgever. De Rechtsverhouding opdrachtgevers – architect, ingenieur en adviseur conform DNR 2011 is te allen tijde van toepassing.

Inhoudsopgave

1	Inleiding	1
1.1	Aanleiding	1
1.2	Leeswijzer	2
2	Huidige situatie en toekomstige ontwikkelingen	3
2.1	Beschrijving huidige situatie en toekomstige ontwikkeling	3
2.2	Schematische weergave huidige situatie en toekomstige ontwikkeling	5
2.3	Aanpak pilot	7
3	Uitwerking en resultaten ontwikkeling rwzi Kampen	8
3.1	Algemene toepassing elektrolyse	8
3.2	Energiebalans	16
3.3	Toepassing electrolyse	26
3.4	Business case	28
4	Conclusies	32

1 Inleiding

In het kader van het onderzoek naar de mogelijkheden van rioolwaterzuiveringsinstallaties (rwzi) om te fungeren als een energiehub, in opdracht van de Unie van Waterschappen, worden specifiek voor twee locaties concrete mogelijkheden voor een pilot onderzocht en uitgewerkt. Eén van deze pilotlocaties betreft de rwzi te Kampen, in eigendom van Waterschap Drents Overijsselse Delta (WDOD). Deze rapportage vormt bijlage 1 bij het hoofdrapport en beschrijft de pilot voor de locatie Kampen.

1.1 Aanleiding

In het noorden van Kampen bevindt zich een rwzi met een zuiveringscapaciteit van ongeveer 100.000 inwoner equivalenten (i.e.). De rwzi ligt ingeklemd tussen de IJssel en een industriegebied. De dichtstbijzijnde woonwijk ligt op ca. 2 km. Er vindt op de rwzi Kampen geen slibvergisting plaats. Gezien de omvang en de afwezigheid van een slibvergistingsproces, kan rwzi Kampen gekenmerkt worden als een relatief eenvoudige rwzi. Onderstaand een afbeelding van de rwzi.

Figuur 1.1 Rwzi Kampen



Op deze locatie zijn er reeds plannen voor het realiseren van een zonnepark van ongeveer 1 MW en één moderne windturbine van 4 à 5 MW. Dit betekent een enorme toename in aanbod van duurzame elektriciteit. Gezien de omvang van de rwzi zal het eigen verbruik waarschijnlijk onvoldoende zijn om dit volume aan duurzame elektriciteit op te vangen en zal er sprake kunnen zijn van een substantieel overschot. In het licht van de recente belemmeringen die ontstaan op verschillende plekken in het landelijke en regionale elektriciteitsnetwerk en de bijbehorende investeringen die benodigd zijn om deze

belemmeringen op te lossen, kijken we in deze pilot naar de mogelijkheden die waterstof kan bieden als buffer of nuttige toepassing van het surplus aan duurzame elektriciteit op deze locatie.

De vraag die in deze pilot centraal staat is:

Op welke wijze kan de productie van waterstof op de rwzi te Kampen bijdragen aan de realisatie van duurzame elektriciteitsproductie uit zonne- en/of windenergie, waarbij het elektriciteitsnet zo min mogelijk wordt belast?

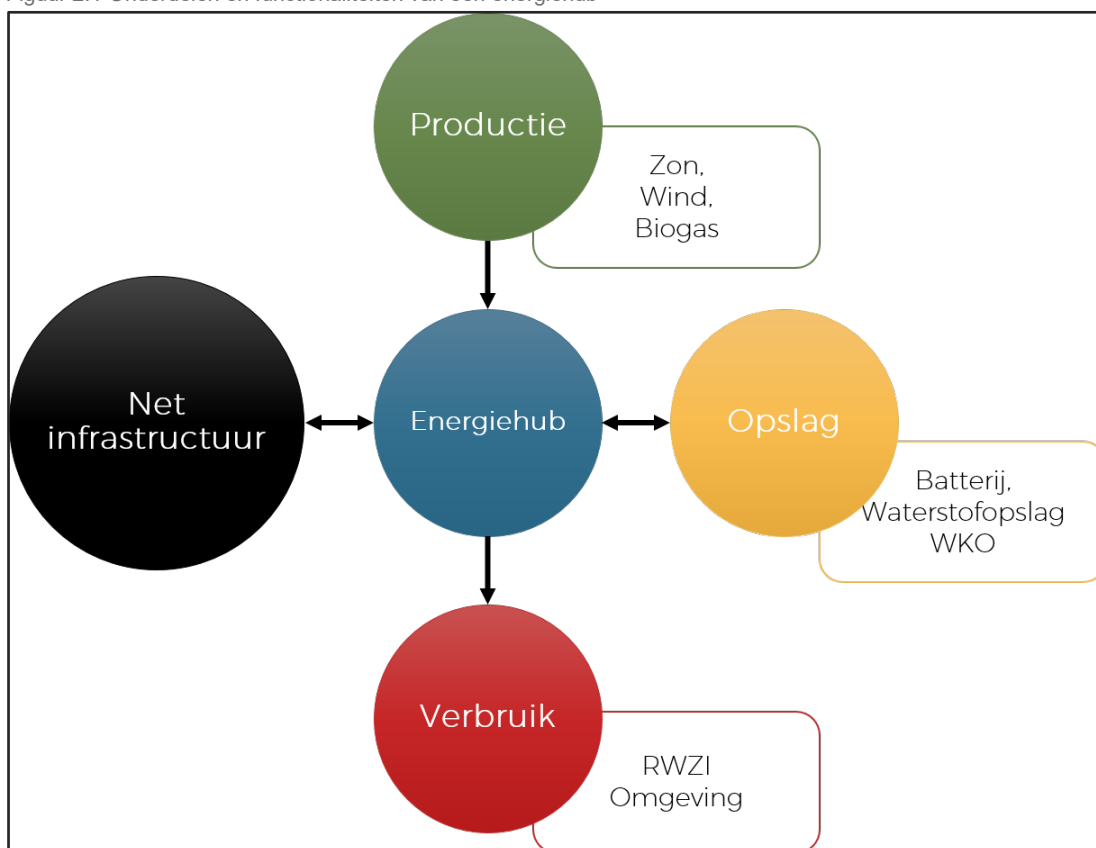
1.2 Leeswijzer

Volgend op dit hoofdstuk, waarin de aanleiding en de vraagstelling is genoemd, wordt er in hoofdstuk 2 de huidige situatie en de toekomstige ontwikkelingen van de rwzi beschreven aan de hand van het energiehub concept. In hoofdstuk 3 wordt vervolgens een pilotconcept voor de toepassing van waterstofproductie op rwzi Kampen uitgewerkt en de resultaten hiervan gepresenteerd. In hoofdstuk 4 volgende conclusies en aanbevelingen.

2 Huidige situatie en toekomstige ontwikkelingen

Zoals beschreven in hoofdstuk 2 van het hoofdrapport “De rwzi als Energiehub”, zijn er verschillende functionaliteiten die, wanneer gecombineerd, kunnen worden beschouwd als een energiehub. De energiehub bestaat daarmee uit verschillende ‘bouwstenen’. Deze verschillende functionaliteiten zijn nogmaals weergegeven in Figuur 2.1. De verschillende functionaliteiten en de mogelijkheden toegespitst op rwzi Kampen worden hieronder beschouwd.

Figuur 2.1 Onderdelen en functionaliteiten van een energiehub



2.1 Beschrijving huidige situatie en toekomstige ontwikkeling

De huidige situatie van de rwzi Kampen en de verwachte ontwikkelingen op of in de nabijheid van de rwzi, die een invloed kunnen hebben op de energiehuishouding van de rwzi, worden in deze paragraaf beschreven aan de hand van de verschillende functionaliteiten van de energiehub.

Op dit moment vindt er geen productie van energie plaats op de rwzi. Omdat er geen slibvergisting plaatsvindt, wordt er geen biogas geproduceerd voor energieopwekking in een warmtekrachtkoppeling installatie. Alle energie die verbruikt wordt op de rwzi, wordt dan ook geleverd vanuit het net.

Er zijn mogelijkheden voor duurzame energie opwek op het terrein van de rwzi. Dit zou gerealiseerd kunnen worden door middel van windturbine(s) en/of zonnepanelen.

Met enkel wind zullen er overwegend veel momenten zijn wanneer de rwzi kan functioneren zonder gebruik te maken van de netaansluiting. Het opwekkingsprofiel van enkel zon (zonder vorm van opslag) daarentegen sluit naar verwachting niet voldoende aan met het verbruiksprofiel van de rwzi waardoor er op meer momenten gebruik gemaakt moet worden van de netaansluiting. Het opwekkingsprofiel van zon en het opwekkingsprofiel van wind gecombineerd, vullen elkaar aan waardoor er, over het algemeen, een stabielere opwek is. Dit kan voordeling zijn wanneer er elektriciteit gebruikt wordt voor de productie van andere energiebronnen. Totale opwek is echter wel groter, en afhankelijk van de capaciteit van de netaansluiting moet deze opgewekte elektriciteit wel benut worden.

Op het terrein van rwzi Kampen zijn plannen om een windturbine van 4.8 MW te plaatsen en een zonneweide aan te leggen van 1,0413 MW in oost-west oriëntatie.

2.1.2 Netaansluiting

De rwzi is op dit moment aangesloten op het net door middel van een redundante (dubbele) aansluiting van 630 kVA (~630 kW fysieke capaciteit).

Met oog op de installatie van de zonneweide en de windturbine en de inzet van opslag- en conversiemogelijkheden, zijn er verschillende mogelijkheden voor de netaansluiting. De capaciteit van de opslag/conversie kan dusdanig geschaald worden dat het restant energie dat teruggeleverd wordt aan het net maximaal 2x630 kVA is, waardoor er geen aparte netaansluiting naar een onderstation nodig is.

Indien opslag of conversie niet mogelijk is, dient er te worden onderzocht of het mogelijk is om de huidige netaansluiting te verzwaren. Dit is echter beperkt mogelijk in relatie tot het nabijgelegen distributienet, namelijk tot maximaal 1.750 kVA. Indien de behoefte qua terugleververmogen groter is, dient er een nieuwe aansluiting naar een onderstation van Enexis gelegd te worden. Het dichtstbijzijnde onderstation zit op 2,3 km afstand van de rwzi. Een van de hoofddoelen van inzetten van de rwzi als een energiehub is dat het elektriciteitsnet minder belast wordt en dat de maatschappelijke kosten zo laag mogelijk blijven. Daarmee is het uitgangspunt dat er allereerst wordt onderzocht wat de mogelijkheden zijn van de huidige netaansluiting van de rwzi.

2.1.3 Verbruik

Rwzi Kampen heeft een relatief voorspelbaar verbruik over de tijd heen. Het grootste gedeelte van het energieverbruik gaat naar het zuiveringsproces in de vorm van elektriciteit (ongeveer 1.500.000 kWh per jaar). Slechts een klein gedeelte van de energiebehoefte is in de vorm van een warmtevraag van de gebouwen op het terrein van de rwzi. Deze warmtevraag wordt geleverd door aardgas.

In de toekomst zijn er wellicht kansen om, indien beschikbaar, restwarmte nuttig in te zetten bij de indikking van het slib dat overblijft na het zuiveringsproces. Daarnaast wordt er relatief veel elektriciteit verbruikt bij de beluchting als onderdeel van het zuiveringsproces. We gaan er voor dit pilotonderzoek ervan uit dat de flexibiliteit in het sturen of verplaatsen van het elektriciteitsverbruik beperkt is.

Het uitgangspunt is dat te allen tijde het zuiveringsproces zelf en de energievoorziening die daarvoor benodigd is geborgd zijn.

2.1.4 Opslag

Om als energiehub te kunnen inspelen in pieken en dalen van zowel energieproductie als energieverbruik, is er opslag nodig. Het combineren van duurzame elektriciteitsopwekking met de duurzame productie van waterstof door middel van elektrolyse is mogelijk een geschikte oplossing. In deze pilot wordt deze oplossing specifiek uitgewerkt. Optioneel zou een batterijsysteem nog kunnen dienen als aanvullende buffer.

De dimensionering van de electrolyser kan op basis van (een combinatie van) verschillende criteria

- De gewenste hoeveelheid waterstof voor eigen gebruik of verkoop van het waterstof, ter vervanging van diesel en benzine.
- De gewenste zuurstof productie
- De kosten van de geproduceerde waterstof en zuurstof
- Capaciteit van de netaansluiting waarbij de maximale terug levering onder een grens moet blijven
- Het verwachte overschot van elektriciteit waarop het aantal vollasturen wordt afgesteld
- De verwachte toename van flexibele energieproductie in de toekomst waarbij er een grotere vraag ontstaat voor net stabilisatie

De dimensionering van (een eventuele) batterij hangt af

- Aantal uren waar de electrolyser die niet optimaal benut wordt (en hoe deze verdeeld zijn)
- Aantal uren dat er elektriciteit van het net gehaald moet worden voor de zuivering
- Kosten

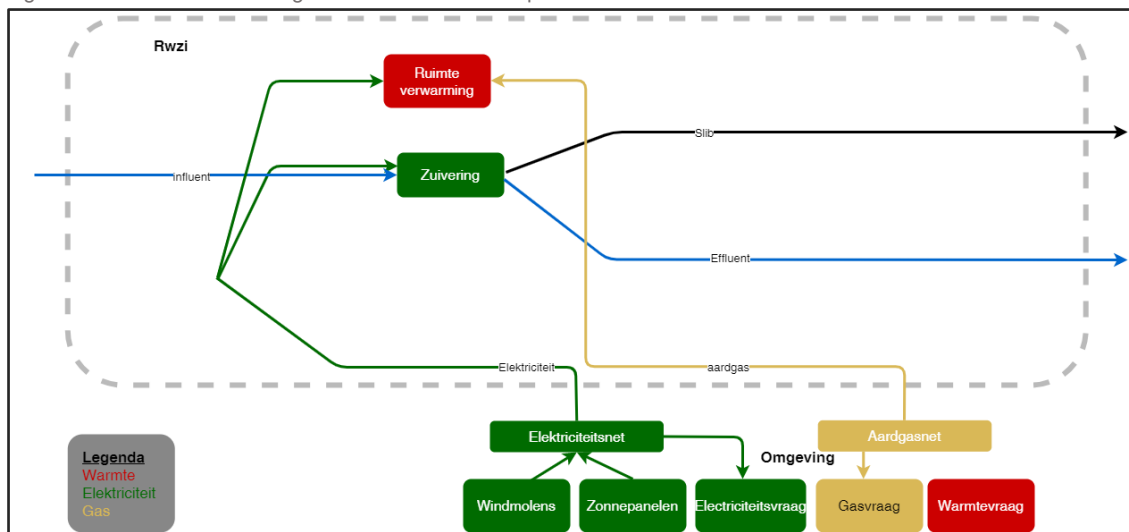
De dimensionering van de electrolyser is een van de uitkomsten van deze pilot en wordt in paragraaf 3.1 besproken.

Bij de productie van waterstof door middel van een electrolyser komt warmte vrij. Het is mogelijk om deze warmte te benutten (eventueel na opwaardering met een warmtepomp).

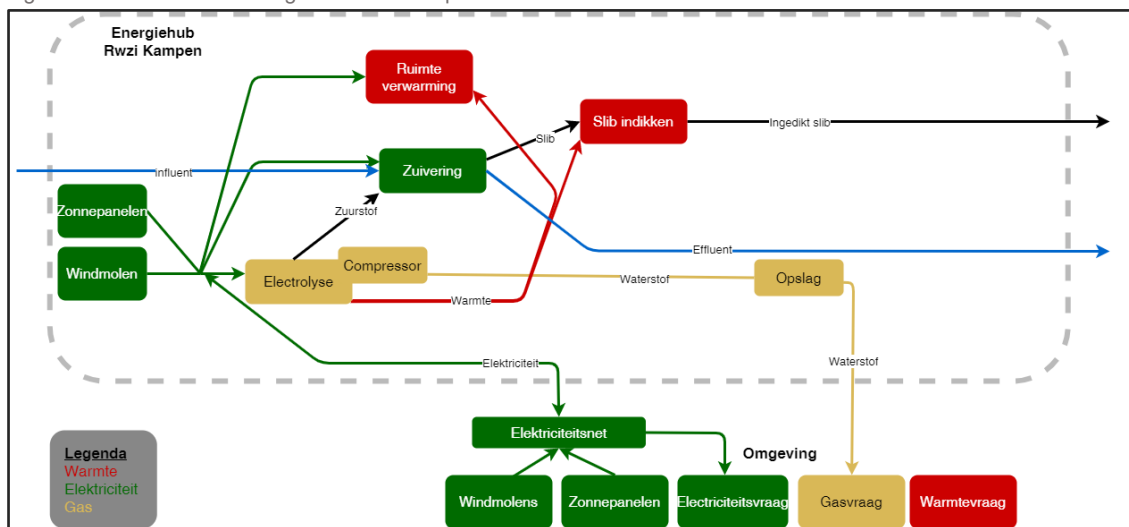
2.2 Schematische weergave huidige situatie en toekomstige ontwikkeling

Om de relatie tussen de verschillende stromen en processen op de rwzi Kampen in de huidige en toekomstige situatie inzichtelijk te maken, zijn onderstaande een tweetal schema's gepresenteerd. Hierin zijn groene pijlen elektrische stromen, zwarte pijlen zijn productstromen, blauwe pijlen zijn waterstromen, rode pijlen zijn warmtestromen en de gele pijl is de waterstofstroom. De energietoepassing van de processen corresponderen met de kleuren van de pijlen.

Figuur 2.2 Stroom in de huidige situatie voor rwzi kampen



Figuur 2.3 Stroom voor energie hub rwzi kampen



De figuren laten zien dat de complexiteit van de energiestromen in de huidige situatie relatief laag is. In het geval dat de toekomstige ontwikkelingen van duurzame elektriciteitsproductie en elektrolyse zullen worden toegevoegd aan de energiehuishouding van de rwzi, zien we dat de complexiteit van de energiestromen toeneemt. Daarnaast komen er aanvullende kansen in het energiesysteem om processen en energiestromen te optimaliseren, door bijvoorbeeld restwarmte te gebruiken voor ruimteverwarming of indikking van slib, maar ook het inzetten van zuurstof uit het elektrolyse proces in het zuiveringsproces om de inzet van beluchting te kunnen reduceren.

2.3 Aanpak pilot

Om te bepalen wat de mogelijkheden zijn voor rwzi Kampen om waterstof toe te passen ten behoeve van de benutting van duurzaam geproduceerde elektriciteit, en daarmee een rol als energiehub in de omgeving in te nemen, wordt op basis van het duurzame profiel van duurzame energieopwekking en het verbruiksprofiel van de rwzi de dimensionering van de electrolyser bepaald. Hierbij wordt rekening gehouden met de kosten per geïnstalleerd vermogen, wat samenhangt met de vollasturen, en wordt rekening gehouden met de capaciteit van de netaansluiting. Op basis de dimensionering, kan de kostprijs van waterstof, de hoeveelheid geproduceerde waterstof, de hoeveelheid geproduceerde zuurstof en beschikbare warmte bepaald worden. Ook wordt er aandacht besteed aan wet en regelgeving rondom de realisatie van een elektrolyse opstelling.

Om meer inzicht te krijgen in de koppeling van duurzame energie opwek met duurzame waterstof productie, is een situatie met enkel duurzame energie opwek door middel van een windturbine, en een situatie waarbij de duurzame energieopwekking gerealiseerd wordt door zowel een windturbine als een zonneweide, beschouwd. Hierdoor komt er meer inzicht in hoe de profielen op elkaar aansluiten en het effect daarvan op het elektrolyse proces en de daarbij geproduceerde energiebronnen.

In het volgende hoofdstuk wordt de pilot nader uitgewerkt en worden de resultaten gepresenteerd.

3 Uitwerking en resultaten ontwikkeling rwzi Kampen

3.1 Algemene toepassing elektrolyse

3.1.1 Uitgangspunten en configuratie

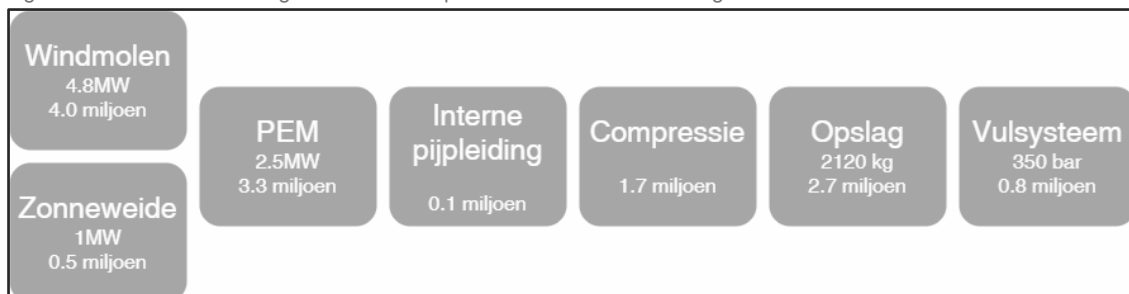
De uitgangspunten waarop het electrolyse systeem is gebaseerd staan beschreven in Tabel 3.1 en Figuur 3.1. Deze waarden worden gebruikt en ingevoerd voor het modelleren van het systeem. Op basis hiervan draait het systeem op een bepaalde efficiëntie, waardoor er waterstof geproduceerd wordt. Op basis hiervan kan een businesscase worden opgesteld.

Tabel 3.1 Uitgangspunten electrolyse systeem

Uitgangspunt	Waarde
Gemiddelde energieprij	€ 43.00 / MWh
Profiel en onbalans effect	12%
Verhoging ingekochte elektriciteit	€ 20.00 / MWh
Verkooprij elektriciteit	€ 37.00 / MWh
Diesel prijs (excl. VAT)	€ 1.09 / liter
Soort windturbine	N133, capaciteit van 4.8MW
Capaciteit zonneweide	1MW
Capaciteit electrolyser	2.5MW
Capaciteit waterstof opslag	2120 kg
Duurzame elektriciteitsproductie	15.304 MWh / 16.195 MWh*
Elektriciteitsvraag rwzi Kampen	1.465 MWh
Capaciteit netaansluiting	1260 kVA
Operationele jaren	20 jaar

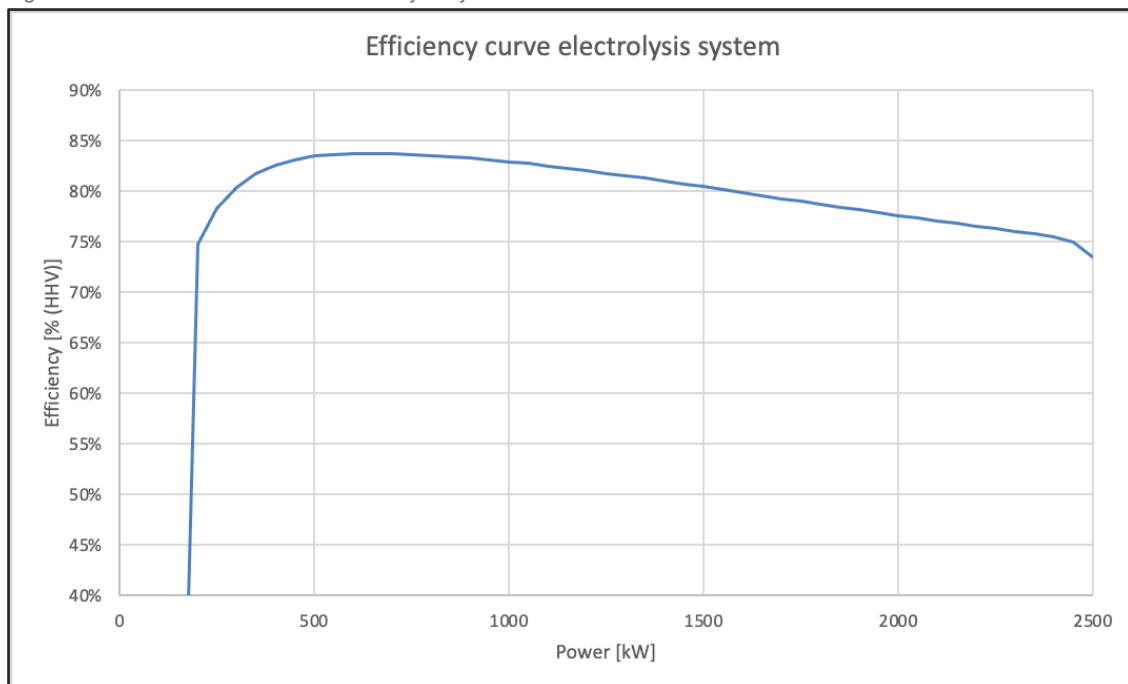
* afhankelijk van de situatie; 1 windturbine of 1 windturbine en een zonneweide

Figuur 3.1 Bouwstenen voor groene waterstof productie inclusief investeringskosten



De efficiëntie van het electrolyse systeem is afhankelijk van het operationele werkpunt. Hoe dit samenhangt is weergegeven in Figuur 3.2. Hieruit blijkt dat het niet efficiënt is om de electrolyser op volle (2.5MW) capaciteit te draaien.

Figuur 3.2 Efficiëntie curve van het electrolyse systeem



3.1.2 Toepassing opgewekte duurzame energie

De opgewekte energie wordt gebruikt om waterstof te produceren. De toepassing van de duurzaam opgewekte energie voor de waterstof productie is achtergesteld aan het energieverbruik die nodig is voor de algemene zuiveringsprocessen van de rwzi. Indien er, nadat de duurzaam opgewekte energie geleverd is aan de zuiveringsprocessen en waterstofproductie, een overschot aan duurzame opgewekte energie is, zal deze terug geleverd worden aan het net voor zover de capaciteit van de netwerkaansluiting dat toelaat. De rest van de energie wordt gecurtailed.

Bij de dimensionering van de electrolyser wordt de huidige netaansluiting beschouwd. De mogelijkheid om deze aansluiting uit te breiden en het net te verzwaren wordt niet gebruikt omdat dat de businesscase negatief financieel beïnvloed.

3.1.3 Waterstofvraag

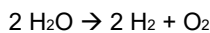
Er is een aanname gemaakt dat de waterstofvraag per week lineair is gedurende de weekdays. De aangenomen waterstofvraag is 750 kg h₂ per weekday, en er is geen waterstof vraag in het weekend. Per week kan met de waterstofproductie 3000 liter benzine bespaard worden. Het is mogelijk om de geproduceerde waterstof voor eigen verbruik te gebruiken, of aan derden door te verkopen. Ondanks geen gesimuleerde waterstof vraag in het weekend, zal de productie gewoon doordraaien. In de praktijk betekent dit dat in het weekend de buffers weer worden aangevuld, en deze gedurende de week langzaam afnemen.

In het omliggende industriegebied zijn veel bedrijven die gericht zijn op de mobiliteit. Een van deze bedrijven is EG Fuel, die zich richt op de aankoop, opslag, distributie en verkoop van brandstoffen, smeermiddelen en alternatieve brandstoffen. Daarnaast is er een bedrijf genaamd Sunoil Biodiesel, die

zich specialiseert in het produceren van groene brandstof afkomstig van afvalstoffen. Bovendien is er ook een EV box charging station. Ook zijn er reguliere tankstations in de nabije omgeving. De nabijheid van verschillende mogelijkheden voor de mobiliteit om te tanken, biedt een mogelijke kans voor de rwzi om op aan te haken.

3.1.4 Waterstof en zuurstof productie

Bij de productie van waterstof via electrolyse, wordt water door middel van elektriciteit gesplitst in waterstof en zuurstof. Voor elke twee elementen waterstof die geproduceerd wordt, worden een element zuurstof geproduceerd volgens de onderstaande reactie:



De zuurstof wordt geproduceerd met een druk van 2 bar, waterstof tot 30 bar. Geven het verschil in molaire massa, wordt daarmee voor elke kg waterstof, ongeveer 8 kg zuurstof geproduceerd. De output van zuurstof op twee bar kan eventueel opgevoerd worden indien gewenst, dit vergt verdere afstemming wat nodig is om de zuurstof effectief te gebruiken in de rwzi.

Toepassing van zuurstof

Het is mogelijk om de zuurstof af te blazen, echter verlaagt de toepassing van zuurstof het elektriciteitsverbruik van de zuivering, dus is dat niet aan te raden. De zuurstof dient juist ingezet te worden in het zuiveringsproces.

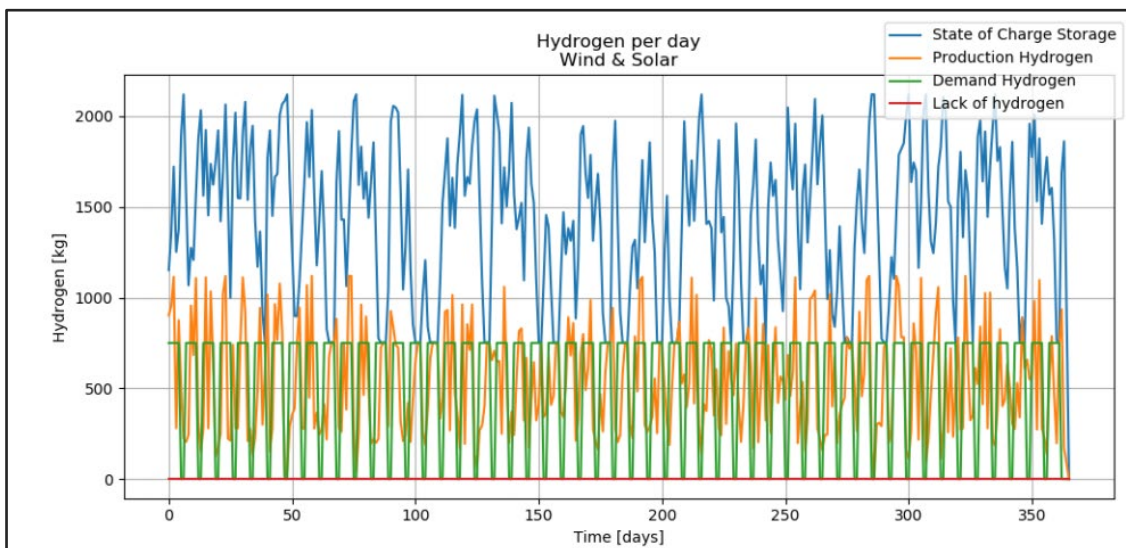
Bovendien is het niet zomaar mogelijk om zuurstof op elke manier af te blazen, daarvoor moeten er eerst veiligheidsvoorschriften gevolgd worden. De afblaas van zuurstof mag niet in de buurt van de veiligheid afblaas van waterstof, ter voorkoming van een explosief mengsel.

Toepassing van waterstof

De druk van waterstof wordt in een compressor verhoogd tot 640 bar. Dit zorgt ervoor dat er verder geen compressie meer nodig is om waterstof toe te passen in trucks en machines.

3.1.5 Extra energieverbruik via de netaansluiting en opslag

De kostprijs van waterstof opslag is hoog, daarom wordt er elektriciteit van het net gehaald op het moment dat de eigen elektriciteit opwek niet voldoende is om de benodigde hoeveelheid waterstof te produceren. Hierdoor wordt er gezorgd dat de waterstof productie aangepast is op de waterstofvraag en indien opwek niet voldoende is, het aangevuld wordt.



Wanneer het nodig is om de waterstof voorraad op te bouwen, is het efficiënt om dit te de uren dat er minder waterstof productie is, hierdoor behaal je een hoger rendement. De electrolyser is namelijk efficiënter als hij runt op deellast. Daarom wordt er elektriciteit van het net gehaald op de momenten dat het aanbod duurzame energieopwekking laag is; hierdoor gaat het overall systeemrendement omhoog en is er minder elektriciteit nodig om meer waterstof te produceren. Op dit moment wordt er daarom naar de wind en zon voorspelling gekeken. Het is een in de toekomst een mogelijkheid om ook de verwachte energieprijzen mee te nemen bij de bepaling wanneer er elektriciteit van het net wordt ingekocht. Deze mogelijkheid zit echter nog niet verwerkt in het systeem. Ook moet er nagegaan worden of je als rwzi mee wil doen in dit marktspel of vaste tarieven wil afspreken.

Bij de bepaling of er extra waterstof geproduceerd wordt door middel van elektriciteit van het net, wordt er ook gekeken naar de hoogte van de opslag. De kostprijs van waterstof opslag is hoog. Daarom is het financieel voordeliger om niet de opslag op de maximale productie van de electrolyser in te stellen, en moet deze op momenten van minder duurzame energieopwekking soms aangevuld worden met elektriciteit van het net om aan de vraag te voldoen. Voor de business case is dat beter dan investeren in een grotere opslag. Daarnaast is er een juridische grens van 5000 kg waterstof opslag. Als er over deze grens gegaan wordt, gelden er strengere maatregelen voor de locatie.

3.1.6 Elektrolyse systeem

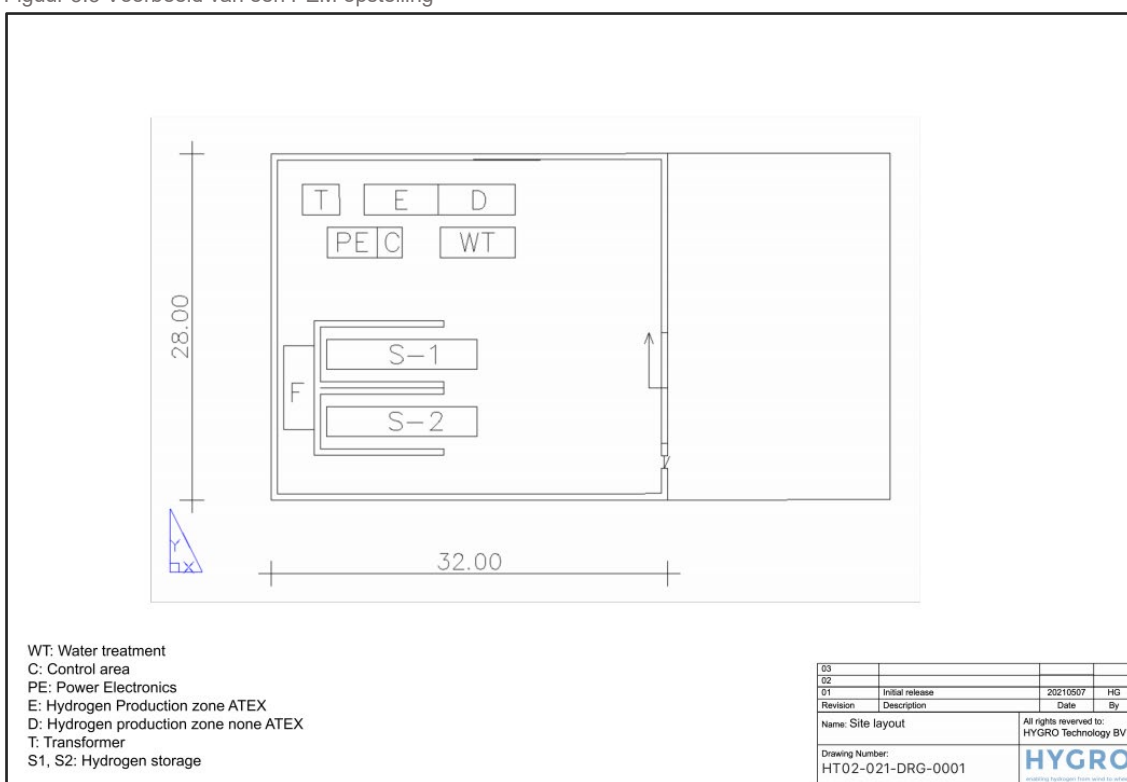
Er verschillende electrolyse systemen; de twee meest toegepaste zijn alkaline electrolyse (AE) en proton exchange membrane (PEM). Voor de toepassing van een electrolyser bij een rwzi om het restant duurzame opgewekte energie om te zetten in waterstof, is PEM geschikter dan AE. Allereerst is PEM 4 tot 10 keer compacter, waardoor het makkelijker inpasbaar is op het terrein van een rwzi. AE moet altijd draaien op minimaal 10% van het totale vermogen. Om dit te garanderen is er een netaansluiting nodig. PEM kan ook zelfstandig op enkel (volatiele) duurzame energie opwek draaien. Verder heeft PEM ook een snellere reactietijd, namelijk minder dan 1 ms t.o.v. 5 tot 10 minuten bij een AE systeem, en sluit daarmee beter aan op het opwekkingspatroon van duurzame energieopwekking.

Een voorbeeld van een mogelijke inpassing van een PEM systeem is gegeven in [Figuur 3.3](#) en [Figuur 3.4](#). De totale afmetingen zijn hier 28m x 30m. De opstelling moet in een veilige omgeving staan. Omdat er gassen worden opgeslagen die gezien worden als gevaarlijke gassen, zijn hier eisen aan verbonden. De

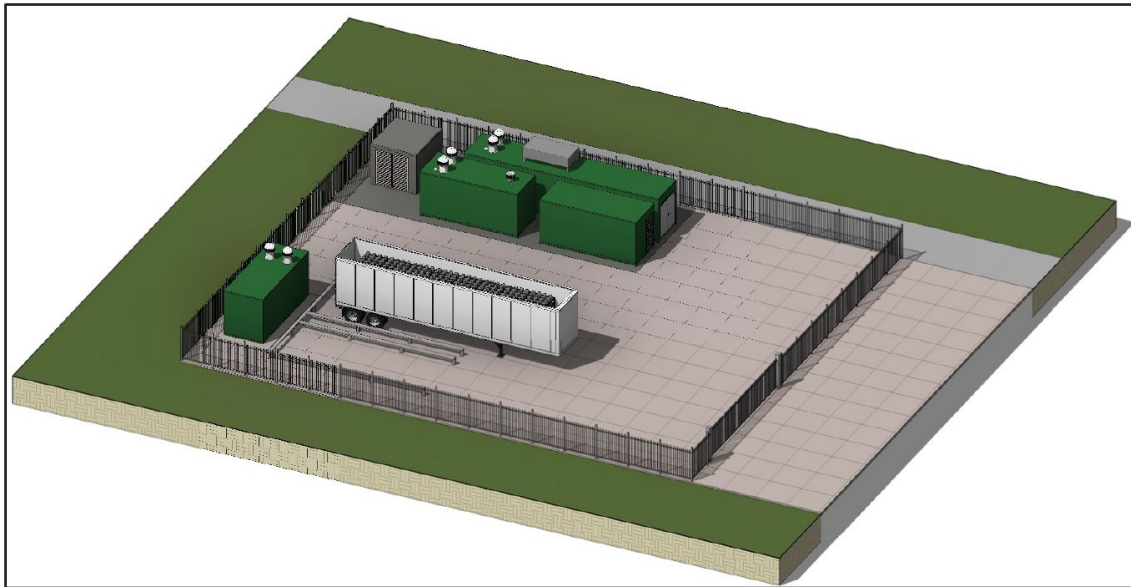
opslag van waterstof mag niet groter zijn dan 2.120 kg. In de situatie beschreven in Figuur 3.3 wordt zuurstof niet opgeslagen.

Het water wat gebruikt wordt in het elektrolyse proces kan gewoon kraanwater of grondwater zijn. De toestroom is maximaal 1m³/uur. Na het verwijderen van alle stoffen uit het water door middel van omgekeerde osmose gevolgd door electrodeionisatie (EDI). Deze systemen kenmerken zich dat in deze systemen een rest stroom van water ontstaat met een hogere concentratie van de stoffen die in de aanvoer in het water zitten. Het brine percentage is circa 50% van de ingenomen hoeveelheid water. Hierna wordt net gekeken in het vergunningsproces. In het water purificatie systeem worden verder geen extra chemicaliën gebruikt, en is de vervuiling beperkt tot de stoffen die bij beginsel al in het water zaten.

Figuur 3.3 Voorbeeld van een PEM opstelling



Figuur 3.4 Mogelijke lay-out van de waterstofinstallatie



Koppeling duurzame energie en electrolyser

Op een intern elektriciteitsnetwerk op het terrein van de rwzi zullen de windturbine, zonneweide en de electrolyser worden aangesloten. De electrolyser komt tussen de windturbine en het transformator station. In principe is het gewenst om de electrolyser aan te sluiten op 400 volt. Dit is waarschijnlijk het voltage van de netaansluiting van de rwzi, en hierdoor hoeft er geen extra transformatoren in het systeem te zitten, wat zorgt voor minder energieverlies.

Er zijn ontwikkelingen waarbij de koppeling tussen windenergie en electrolyse plaatsvindt in de windturbine zelf. Hierdoor zijn er nog minder conversie stappen nodig. Deze koppeling zorgt voor daarmee voor ongeveer 10% energetische winst te behalen is, en ongeveer 25% financiële winst, doordat de systemen minder componenten bevatten. Echter is deze mogelijkheid van koppeling nog in ontwikkeling en verwacht is dat deze de komende drie jaar nog niet commercieel beschikbaar is. Om deze reden is dit niet relevant voor rwzi Kampen.

3.1.7 Juridisch kader

Vergunningen

Om een elektrolyse systeem te plaatsen zijn er vergunningen nodig. De kosten hiervoor zijn circa €100.000, en worden in de business case meegenomen onder de ontwikkelkosten. De waterstof productie-installatie wordt in de wet geassocieerd als een RIE-4 installatie (Productie gevaarlijke stoffen). In de meeste gevallen betekent dit dat de volgende vergunningen moeten worden aangevraagd: een bestemmingsplan inpassing, omgevingsvergunning en bouwvergunning.

De vergunningen zitten over het algemeen in de uitgebreide procedure die 34 weken in beslag neemt.

Wetgeving

De installaties moeten voldoen aan de Europese regelgeving, die is vastgelegd Europese richtlijnen¹.

- ADR transport gevaarlijke stoffen, indien de waterstof niet alleen op locatie wordt gebruikt
- Pressure Equipment Directive, veiligheid hogedruk toepassing
- ATEX Directive, veiligheid elektrische apparatuur in explosieve omgeving
- Machinery Directive, machine veiligheid
- Low Voltage Directive, elektrische veiligheid
- Electromagnetic Compatibility Directive, elektromagnetische compatibiliteit
- Construction Products Directive betrekking hebbende op bouw en civiele werken
- PGS 15 Opslag gevaarlijke stoffen.
- PGS35 Wet en regelgeving omtrent tanken van h2 voertuigen

Belastingen en subsidies

Energiebelasting: Over de elektriciteit die gebruikt wordt voor het elektrolyse proces hoeft geen energiebelasting betaald te worden, conform de kamerbrief van de minister van Economische Zaken en Klimaat aan de tweede kamer. Voor de energie benodigd voor compressie wel. Dit laatste geldt echter alleen voor het gedeelte elektriciteit die van het net is gehaald en niet voor de eigen opgewekte elektriciteit. Afhankelijk van hoe dit in de toekomst geregeld is, kan hier rekening mee gehouden worden bij het alloceren van de eigen duurzaam opgewekte elektriciteit.

Brandstof accijns: op dit moment is waterstof als brandstof vrijgesteld voor accijns. Wat betreft kilometerheffing is het nog niet duidelijk wat het beleid gaat worden, en hoe de regels daar specifiek voor waterstof en elektrisch vervoer zullen zijn.

MIA/Vamil: Een dergelijk belasting voordeel is alleen van toepassing op het elektrolyse systeem, en dan specifiek voor PEM systemen, AE-systemen staan niet op goedgekeurde lijst. Dit voordeel wordt echter niet meegenomen in de businesscase waardoor deze in werkelijkheid positief beïnvloed kan worden.

Energie-investeringsaftrek (EIA): Is niet van toepassing.

SDE++: Er wordt subsidie verstrekt op basis van de geproduceerde elektriciteit, onafhankelijk of deze elektriciteit binnen de grenzen van de rwzi gebruikt wordt, of terug geleverd wordt aan het net. De subsidie regeling en hoogte voor waterstof is nog niet bekend en daarom niet meegenomen. Deze regeling zal later dit jaar bekend gemaakt worden. In de business case is geen SDE meegenomen en dit kan de business case nog positief beïnvloeden.

3.1.8 Investerings

De raming van de investering van het systeem is weergegeven in Tabel 3.2.

¹ <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/publicaties/2015/05/21/adr>

Tabel 3.2 Kostenraming investeringen

Productie:	Miljoen euro
Windturbine (4,8MW)	4.0
Zonneweide (1MW)	0.5
Elektrolyse systeem (2,5MW)	3.3
Onvoorzien	0.4
Pacht van grond	0.0
Project ontwikkeling & constructie management	0.5

Compressie en opslag:	Miljoen euro
Interne pijplijn	0.1
Compressie tot hoge druk (640 bar)	1.7
Opslag (2120kg)	2.7
Constructie management en onvoorzien	0.1

Vulsysteem:	Miljoen euro
Waterstof tankstation	0.8

Totale investeringen	Miljoen euro
Investeringskosten situatie windturbine	14.1
Investeringskosten situatie windturbine + zonneweide	14.6

De investeringskosten voor de windturbine en de zonneweide zijn marktconform. Echter is het mogelijk dat de gegeven prijzen kunnen afwijken wanneer deze daadwerkelijk aanbesteed worden. De prijs voor het elektrolyse systeem is de prijs waarmee HYGRO Technology die zou aanbieden. De prijs voor het elektrolyse systeem bevat alles wat noodzakelijk is om waterstof te produceren, zo ook het puur maken van het water zodat het in het electrolyse systeem gebruikt kan worden. Projectontwikkeling bevat de ontwikkeling voor alle losse componenten.

3.1.9 Mogelijke knoppen om aan te draaien

De huidige configuratie; de capaciteit van het electrolyse systeem en de capaciteit van de opslag zijn geoptimaliseerd op basis van de aangeleverde capaciteit van de windmolen en de zonneweide. Indien deze afwijkend zijn, moet het gehele systeem opnieuw geoptimaliseerd worden.

Indien er genoeg waterstofproductie is (en de buffers vol zijn), kan er toch waterstof geproduceerd worden en afgeblazen worden. Hierdoor zouden de andere producten, namelijk zuurstof en warmte wel benut kunnen worden.

Een continue productie van zuurstof gunstig voor de zuivering. Naast het beter benutten van de elektrolyse capaciteit, kan de productie van zuurstof dus een reden zijn om elektriciteit van het net af te

halen om het elektrolyse proces toe te passen. Door het toepassen van zuurstof bij de zuivering gaat ook het elektriciteitsverbruik van de rwzi omlaag.

De vrijgekomen warmte die gebruikt kan worden om slib in te dikken. Hierdoor kan namelijk het aantal transportbewegingen gereduceerd worden.

Schaling van de opslag – hierdoor kan er meer waterstof geproduceerd worden. In de huidige configuratie (vermogen duurzame opwek, capaciteit electrolyser, vraag naar waterstof) is de opslag van 2120kg echter optimaal. Er wordt in dat geval circa 5% gecurtaild en extra opslag brengt echter hoge kosten met zich mee. Om goed gebruik te maken van de geïnvesteerde opslag moet er ook elektriciteit van het net gehaald worden – waarbij de hoeveelheid is begrensd aan de capaciteit van de netaansluiting. Ook is het de vraag in hoeverre je door meer elektriciteit van het net te halen, je het net niet juist verder belast. Bovendien is de opslagcapaciteit van de huidige categorie begrenst op 5000kg waterstof voordat je in een volgende categorie komt waar strengere veiligheidseisen, en daarmee hogere kosten, komen kijken.

Het is ook mogelijk om geen compressie toe te passen, en het waterstof in een (eventueel toekomstige) infrastructuur te injecteren. De druk in het distributie net is op dit moment 16 bar, en omdat de waterstof op 40 bar geproduceerd wordt, is dit voldoende. Indien het in het transmissienetwerk van Gasunie geïnjecteerd zou worden, moet de druk wel naar minimaal 100 bar opgevoerd worden. Hierdoor worden de kosten voor compressie bespaard. Echter is dit wel een risico, want als er geen afname van waterstof is, staat je eigen installatie ook stil, met de financiële gevolgen van dien. Er kan namelijk maar weinig waterstof op 30 bar worden ondergebracht, en er zijn dan geen snelle oplossingen.

3.2 Energiebalans

In Tabel 3.3 Tabel 3.3 Energiebalans is de energiebalans voor de twee situaties toegelicht. Een verdere uitwerking van de individuele situaties is beschreven in paragraaf 3.2.1 en paragraaf 3.2.2.

Tabel 3.3 Energiebalans

Energiebalans	4.8MW wind	4.8MW wind + 1MW zon	variantie
Duurzame energie opwek (MWh)	15.304	16.195	6%
Elektriciteit van het net (MWh)	718	453	-37%
Elektriciteitsvraag rwzi (MWh)	1.465	1.465	0%
Elektriciteitsvraag electrolyse (MWh)	11.092	11.546	4%
Elektriciteitsvraag compressie (MWh)	701	701	0%
Teruglevering aan het net (MWh)	2.122	2.209	4%
Gecurtailde elektriciteit (MWh)	642	727	13%

3.2.1 Energiebalans 1 windturbine van 4.8 MW

In de situatie wanneer een gemiddelde rwzi, rwzi Kampen, een windmolen met een capaciteit van 4.8 MW installeert, is er een groot overschot aan duurzame energie die niet teruggeleverd kan worden. Dit leidt tot een verlies van 6.85 GWh, wat gelijk is aan 44.3% van de totale energie. Dit is weergegeven in de belastingduurkromme in Figuur 3.5

Figuur 3.5. Om deze energie beter te benutten is voor de uitwerking van deze pilot ervoor gekozen om een electrolyse-systeem toe te passen. Aan de hand van de uitgevoerde analyse is geconcludeerd dat een electrolyser met een vermogen van 2,5 MW optimaal is.

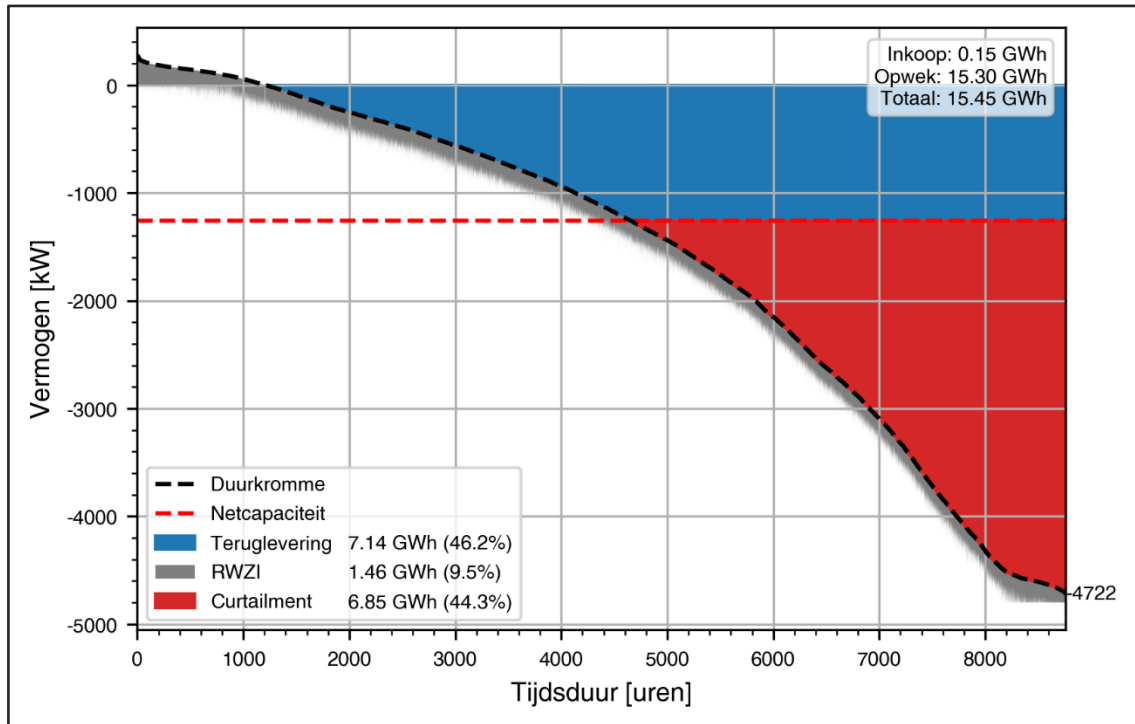
De energiebalans met een electrolyser is weergegeven in Figuur 3.6. Hierin zijn de totale hoeveelheden en toepassingen van energie weergegeven. De energiebalans per maand en per uur zijn weergegeven in Figuur 3.7 en Figuur 3.8. In deze situatie zal 11.03 GWh gebruikt worden in het elektrolyse-systeem. Op momenten dat er meer energie opgewekt wordt dan gebruikt kan worden, wordt er energie teruggeleverd aan het net, dit bedraagt 2.21 GWh. Een klein deel van het overschot kan niet teruggeleverd worden vanwege de beperkte netcapaciteit, hierdoor wordt er 0.74 GWh gecurtailed. Indien het gewenst is dat het volledige overschot van duurzame energie teruggeleverd kan worden aan het net, moet 2200 kW teruggeleverd kunnen worden. Dit vereist een aansluitcapaciteit van 1.100kVA die in tweevoud is uitgevoerd.

De energiebalans per maand en per dag tonen de fluctuaties van de eigen opwek. Hierin is te zien dat er meer duurzame opwek beschikbaar is in de wintermaanden en in de nacht. Mogelijk zou een toevoeging van zonne-energie het profiel afvlakken, wat gunstig is voor de electrolyser. Deze situatie wordt in paragraaf 3.2.2 beschouwd.

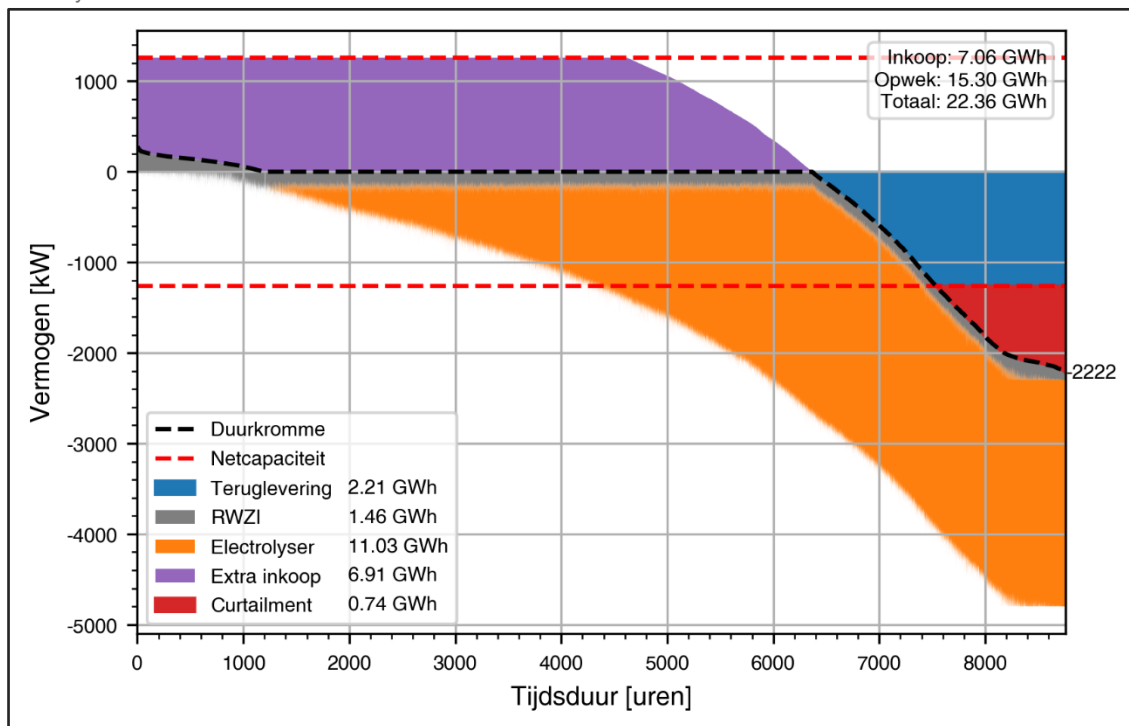
Op het moment dat de electrolyser niet op vol vermogen kan draaien vanwege een tekort aan duurzame opwek, kan er overwogen worden om extra elektriciteit uit het net in te kopen. Het effect hiervan is weergegeven in de betreffende figuren. Het electrolyse-systeem draait ongeveer 4400 vollasturen. Dit is te herleiden uit Figuur 3.9, waarin de belastingduurkromme van de electrolyser is weergegeven. Het aantal vollasturen kan worden verhoogd naar zo'n 7200 uur als er nog maximaal elektriciteit uit het net wordt ingekocht. Dit figuur laat ook zien dat voor ongeveer 1200 uur de electrolyser niet in bedrijf is (vermogen 0 kW) in het geval er niet aanvullend elektriciteit wordt ingekocht, wat overeenkomt met 13.7% van de tijd. Dit is zichtbaar aan de rechterzijde van deze figuur, waar het groene vlak nul bereikt. De waterstof productie is niet evenredig met de inzet van de electrolyser, maar afhankelijk van het vermogen waarop hij draait, zoals getoond in Figuur 3.2. Hieruit blijkt dat als de electrolyser op vol vermogen draait, niet de hoogste efficiëntie behaald wordt.

Gemiddeld wordt er per maand 18 ton waterstof en 100 ton zuurstof geproduceerd, zie Figuur 3.10. Er is wel een seizoenseffect te zien, waarbij er in de zomermaanden minder duurzame energieopwekking is. Indien er nog 6.91 GWh aan elektriciteit uit het net ingekocht wordt, kan dit verhoogd worden naar respectievelijk 29 ton en 165 ton.

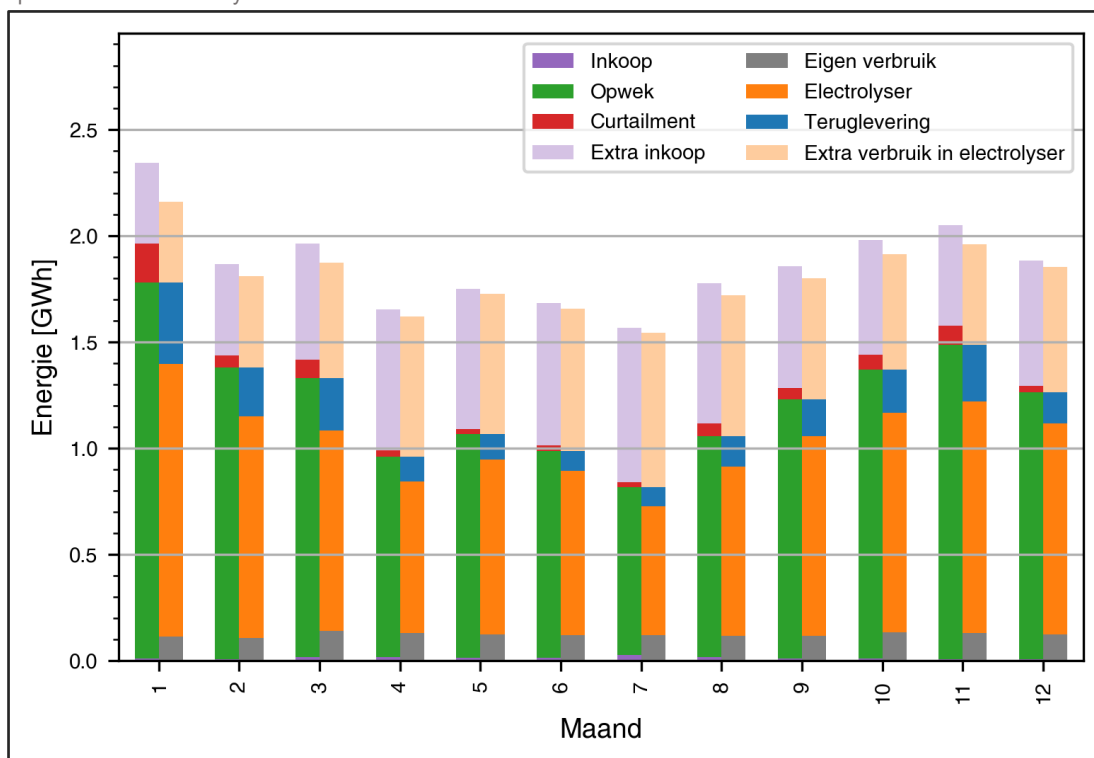
Figuur 3.5 De belastingduurkromme van rwzi Kampen met een windturbine. Positieve vermogens zijn afkomstig van het net, negatieve vermogens zijn afkomstig van duurzame opwek.



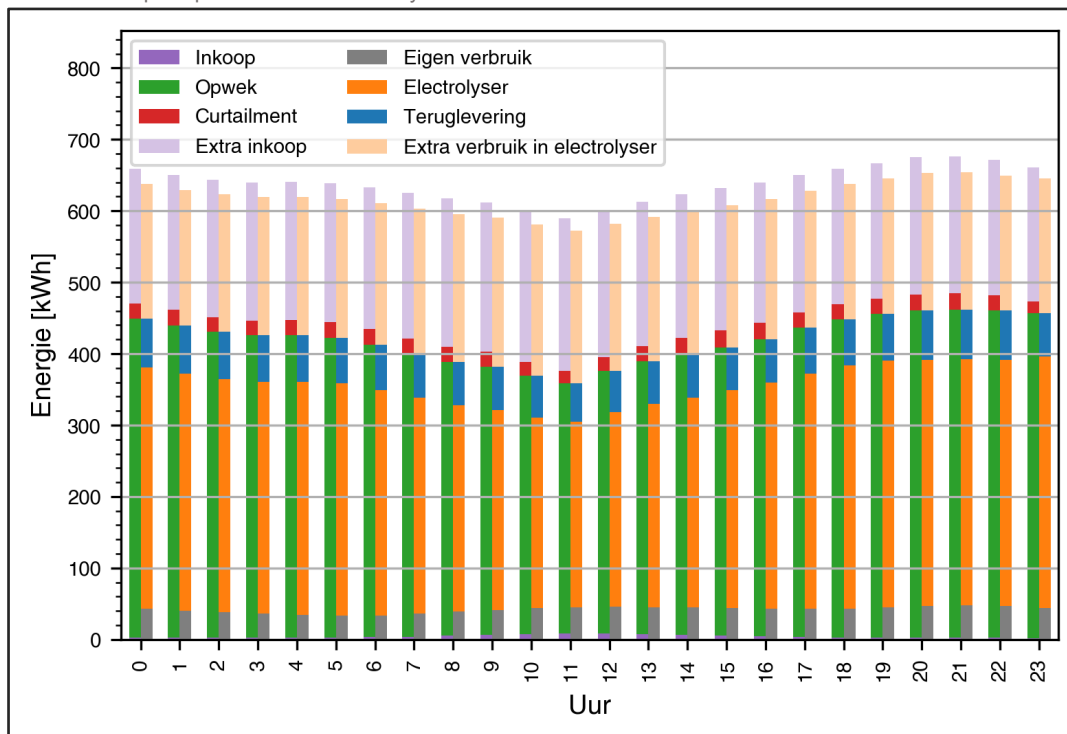
Figuur 3.6 Belastingduurkromme van rwzi Kampen met een windturbine en electrolyser. Positieve vermogens zijn afkomstig van het net. Negatieve vermogens zijn afkomstig van eigen opwek. De extra inkoop is optioneel om de electrolyser meer te benutten.



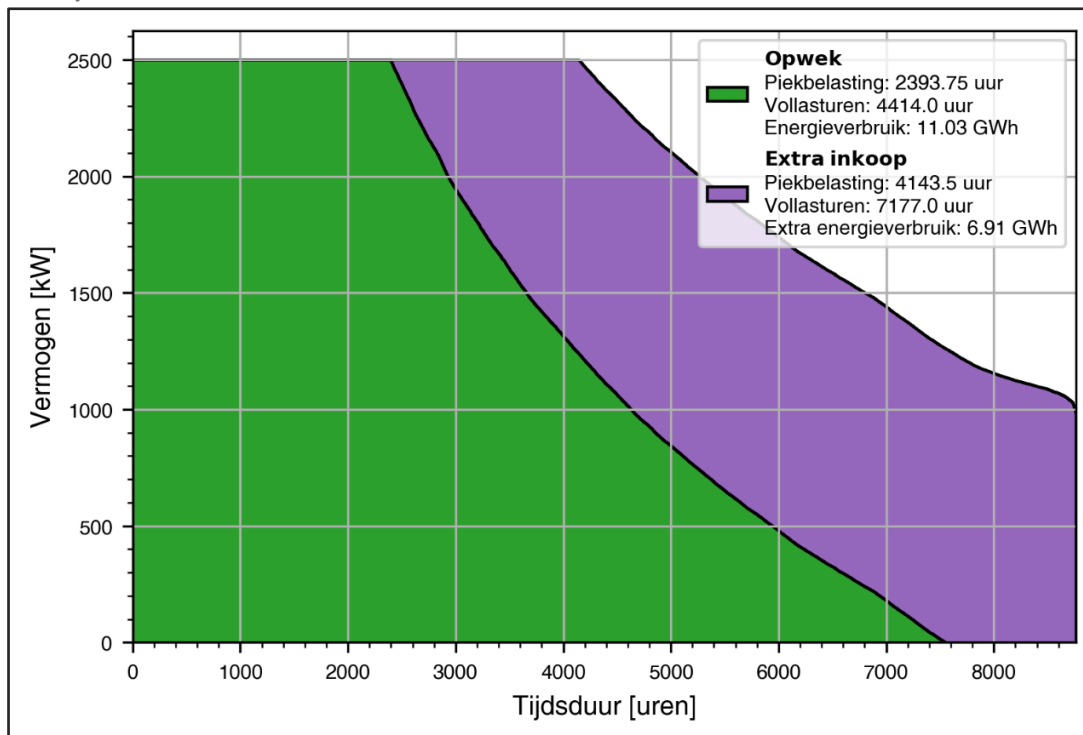
Figuur 3.7 De energiebalans van rwzi Kampen met een windturbine en een electrolyser per maand. De extra inkoop is optioneel om de electrolyser meer te benutten.



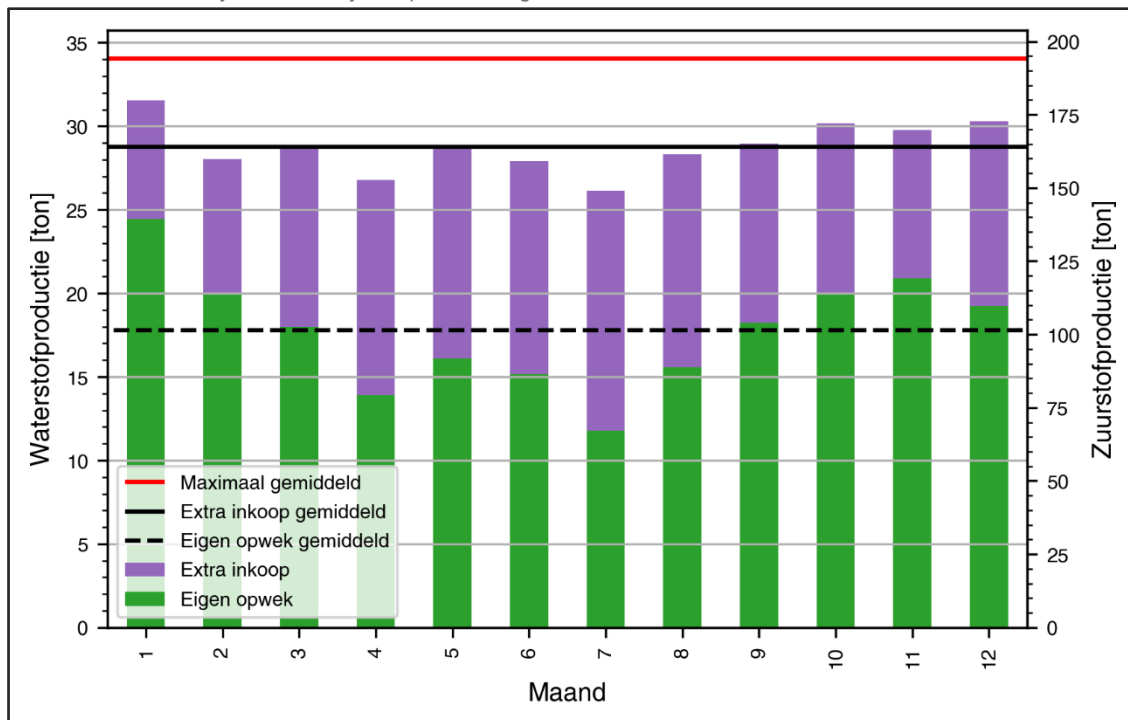
Figuur 3.8 De energiebalans gemiddeld per uur van de dag van rwzi Kampen met een windturbine en een electrolyser. De extra inkoop is optioneel om de electrolyser meer te benutten.



Figuur 3.9 Belastingduurkromme van de electrolyser van rwzi Kampen met een windturbine en een electrolyser. Het aantal vollasturen wordt berekend door het totale energieverbruik te delen door het maximale vermogen van de electrolyser.



Figuur 3.10 Waterstof- en zuurstofproductie per maand van rwzi Kampen met een windturbine en een electrolyser. Het groene vlak geeft de productie weer indien er alleen eigen opwek wordt gebruikt. Het paarse vlak geeft de maximale productie weer indien er nog maximaal energie wordt ingekocht van het net. De rode lijn geeft de maximale productie weer indien de electrolyser ten alle tijden op vol vermogen draait.



3.2.2 Energiebalans 1 windturbine van 4.8 MW en een zonnepark van 1 MW

Wanneer er een zonnepark van 1MW wordt toegevoegd, is er een groter overschot aan duurzame energie dan in de situatie met alleen een windturbine. Dit is weergegeven in Figuur 3.11. Hierdoor is er een verlies van 7.2 GWh (44.3%). Als er een 2,5 MW electrolyse-systeem wordt toegevoegd verandert de energiebalans positief, zoals te zien in Figuur 3.12, Figuur 3.13 en Figuur 3.14.

In deze situatie wordt er 11.66 GWh van de eigen opwek gebruikt in de electrolyser. Op momenten dat er meer energie opgewekt wordt dan gebruikt kan worden, wordt er energie teruggeleverd aan het net, dit bedraagt 2.3 GWh. Een klein deel van het overschot kan niet teruggeleverd worden vanwege de beperkte netcapaciteit, hierdoor wordt er 0.83 GWh gecurtaild. Indien het gewenst is dat het volledige overschot van duurzame energie teruggeleverd kan worden aan het net, moet 2800 kW teruggeleverd kunnen worden. Dit vereist een aansluitcapaciteit van 1.400kVA die in tweevoud is uitgevoerd.

De energiebalans per maand en per dag tonen de fluctuaties van de eigen opwek. Hierin is te zien dat er ook met een zonnepark nog steeds meer duurzame opwek is in de wintermaanden. Dit komt doordat het vermogen van de windturbine vele malen groter is dan het vermogen van het zonnepark. Toch zijn de fluctuaties over de dag zijn afgevlakt, wat aangeeft dat deze verhouding van zon en wind gunstig is ten opzichte van het relatief vlakke verbruiksprofiel van een rwzi. Om in de behoefte van de rwzi te kunnen voorzien op momenten dat er geen eigen opwek is, moet er 0.72 GWh worden ingekocht in de situatie met alleen een windturbine. In de situatie met de toevoeging van het zonnepark is dit nog maar 0.45 GWh. Ook leidt de toevoeging van het zonnepark tot betere benutting van het electrolyse-systeem, wat verder wordt toegelicht in de businesscase.

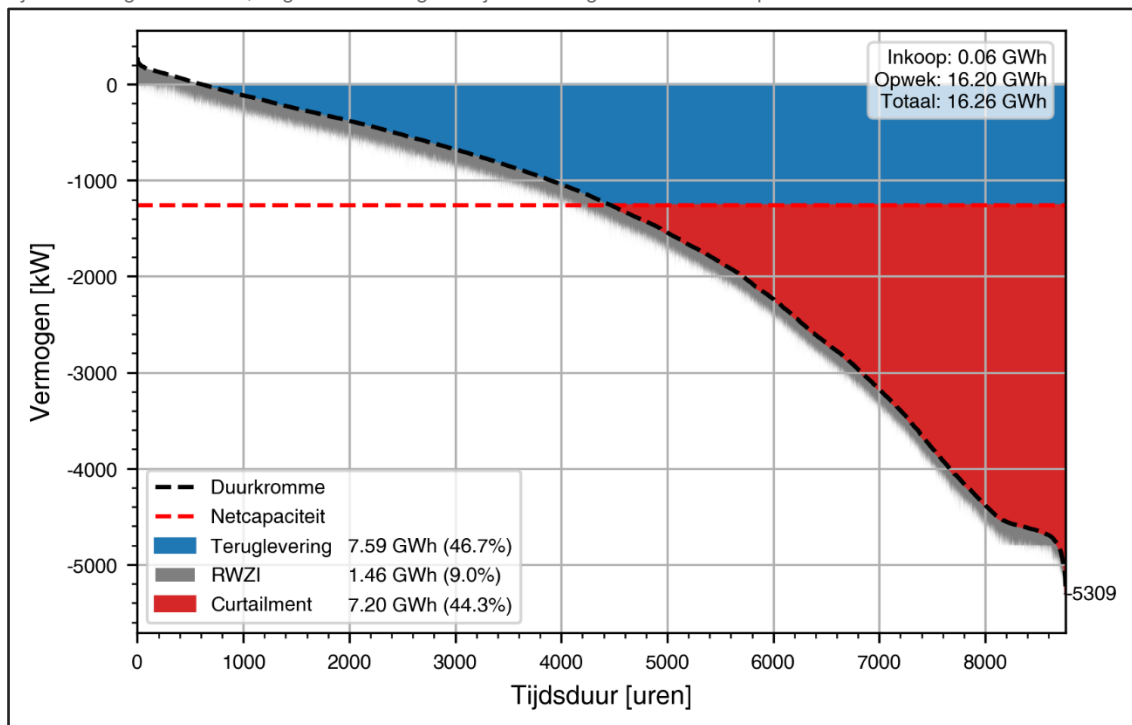
Op het moment dat de electrolyser niet op vol vermogen kan draaien vanwege een tekort aan duurzame opwek kan er overwogen worden om extra elektriciteit uit het net in te kopen. Het effect hiervan is weergegeven in de betreffende figuren.

Het electrolyse-systeem draait zo'n 4650 vollasturen, zie Figuur 3.15. Dit kan worden verhoogd naar 7400 uur als er nog maximaal elektriciteit uit het net wordt ingekocht. Dit figuur laat ook zien dat voor ongeveer 600 uur de electrolyser niet in bedrijf is (vermogen 0 kW) in het geval er niet aanvullend elektriciteit wordt ingekocht, wat overeenkomt met zo'n 7% van de tijd. De waterstof productie is niet evenredig met de inzet van de electrolyser, maar afhankelijk van het vermogen waarop hij draait, zoals getoond in Figuur 3.2. Hieruit blijkt dat als de electrolyser op vol vermogen draait niet de hoogste efficiëntie behaald wordt.

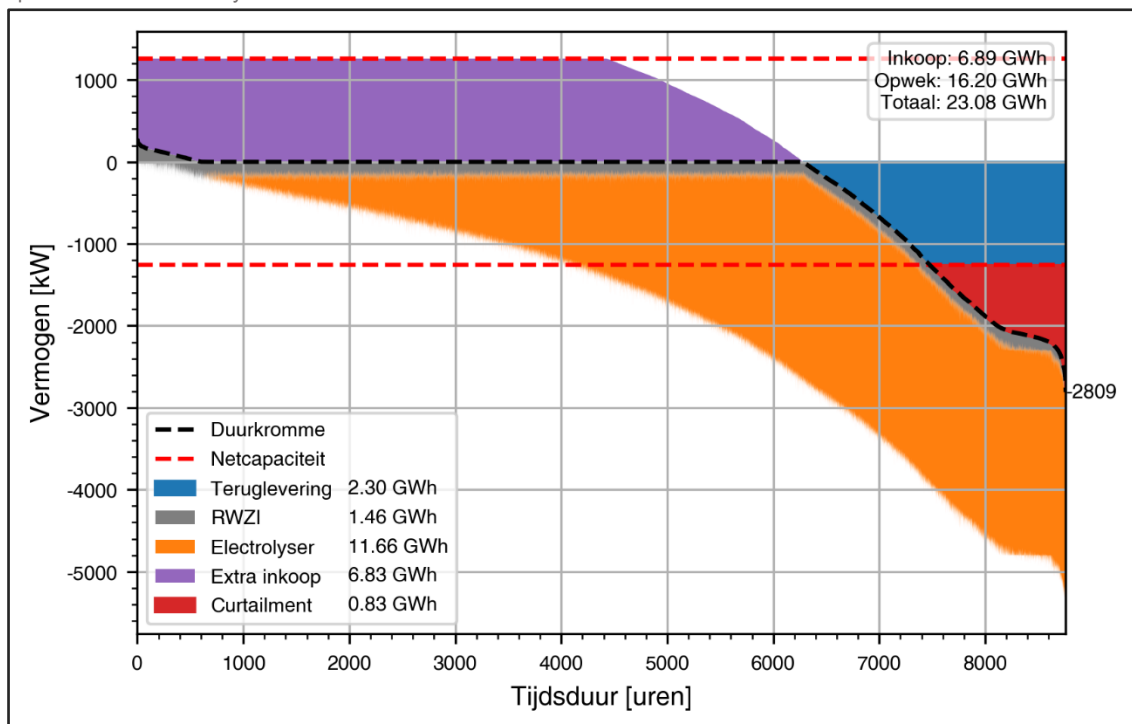
Gemiddeld wordt er per maand 19 ton waterstof en 110 ton zuurstof geproduceerd, zie Figuur 3.15. Indien er nog 6.91 GWh aan elektriciteit uit het net ingekocht wordt, kan dit verhoogd worden naar respectievelijk 29.5 ton en 175 ton.

Vergeleken met de situatie met alleen een windturbine is er in mindere mate een seizoenseffect te zien. Het dagprofiel is in vergelijking tot alleen een windturbine ook een stuk vlakker.

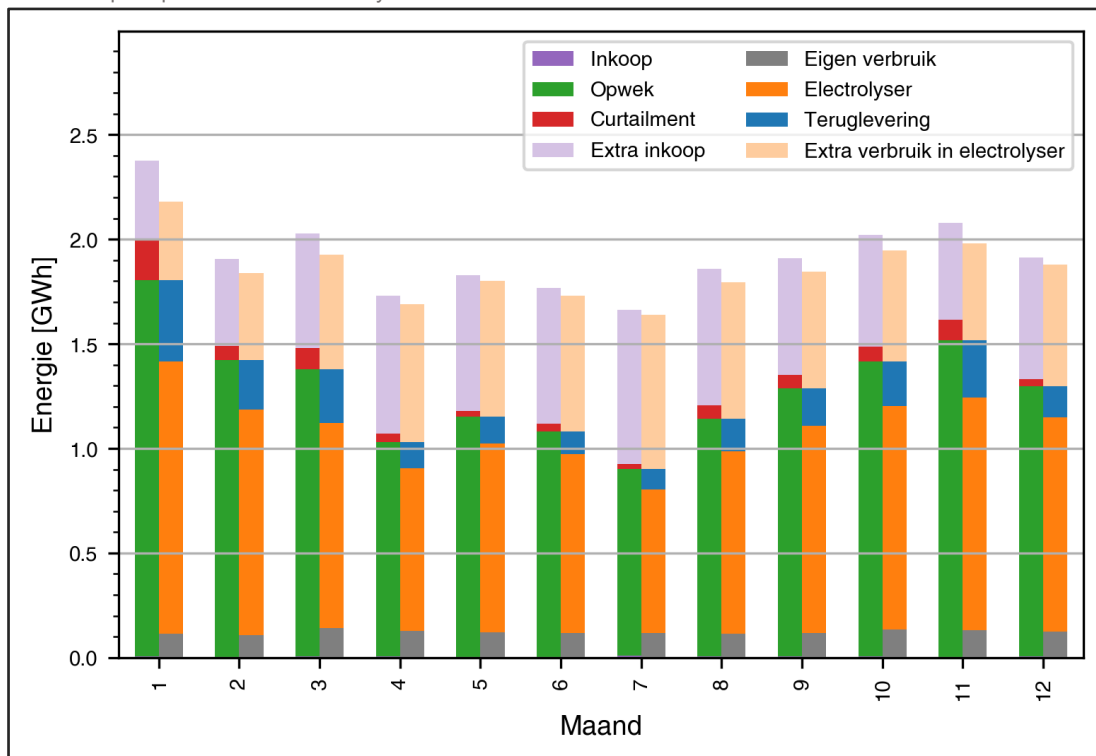
Figuur 3.11 De belastingduurkromme van rwzi Kampen met een windturbine en een zonneveld. Positieve vermogens zijn afkomstig van het net, negatieve vermogens zijn afkomstig van duurzame opwek.



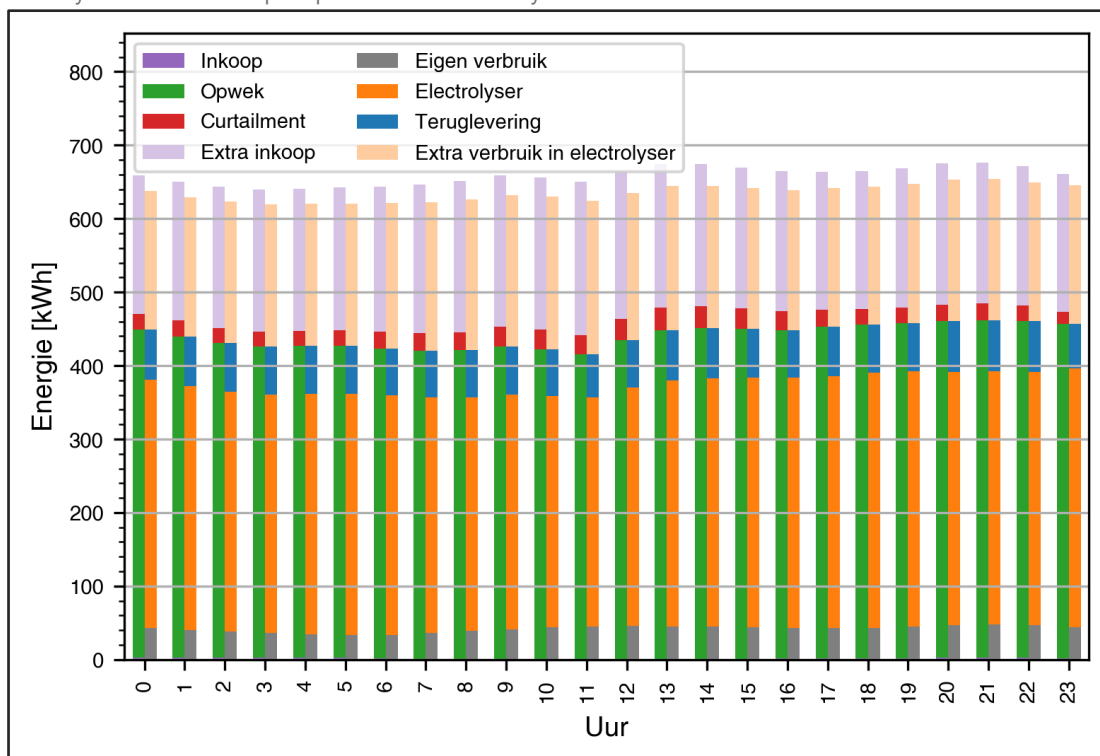
Figuur 3.12 Belastingduurkromme van rwzi Kampen met een windturbine, zonneveld en een electrolyser. Positieve vermogens zijn afkomstig van het net. Negatieve vermogens zijn afkomstig van eigen opwek. De extra inkoop is optioneel om de electrolyser meer te benutten.



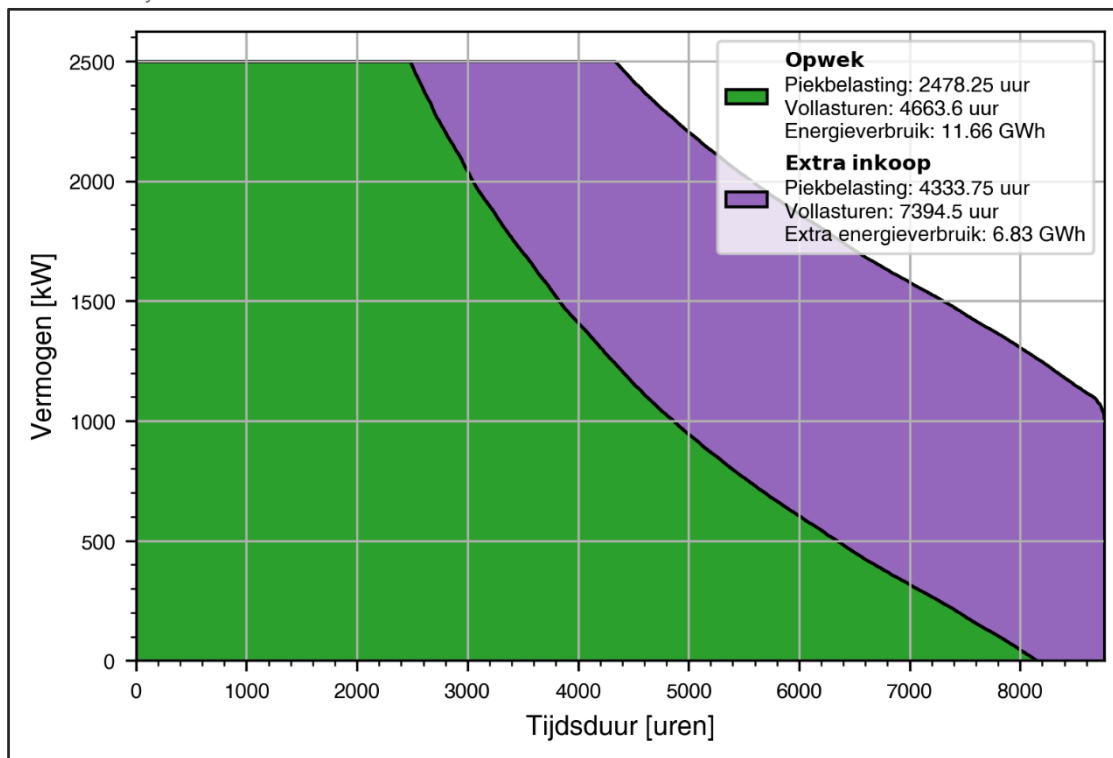
Figuur 3.13 De energiebalans per maand van rwzi Kampen met een windturbine, zonneveld en een electrolyser. De extra inkoop is optioneel om de electrolyser meer te benutten.



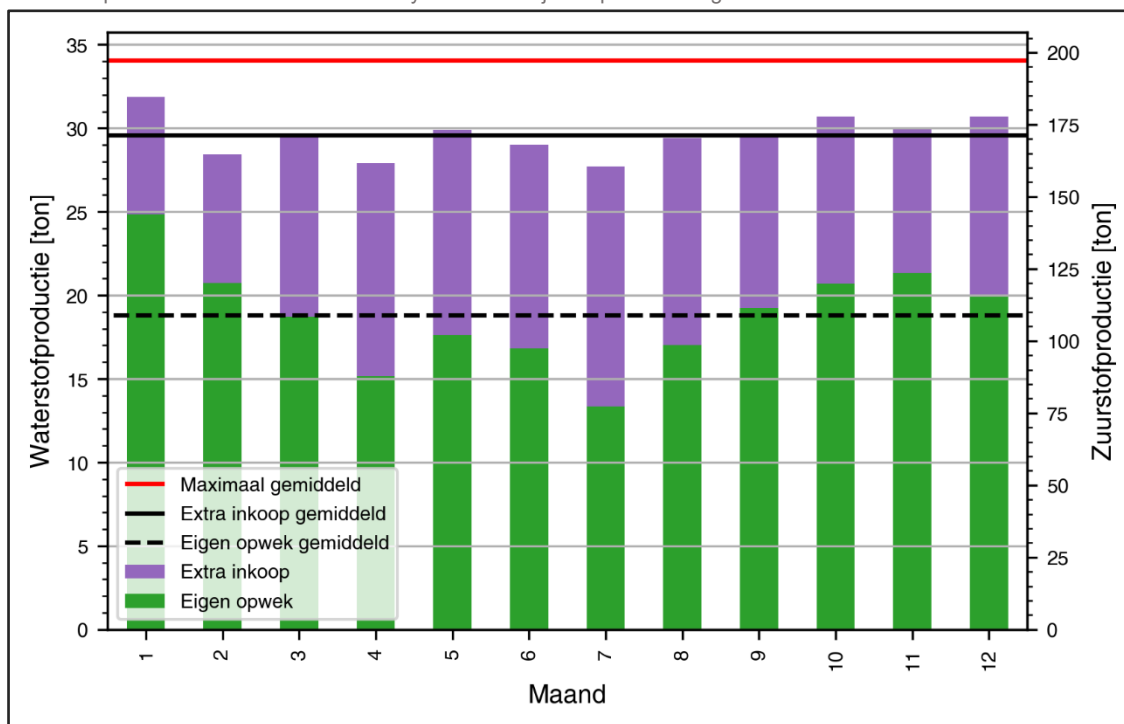
Figuur 3.14 De energiebalans gemiddeld per uur van de dag van rwzi Kampen met een windturbine, zonneveld en een electrolyser. De extra inkoop is optioneel om de electrolyser meer te benutten.



Figuur 3.15 Belastingduurkromme van de electrolyser van rwzi Kampen met een windturbine, zonnenveld en een electrolyser. Het aantal vollasturen wordt berekend door het totale energieverbruik te delen door het maximale vermogen van de electrolyser.



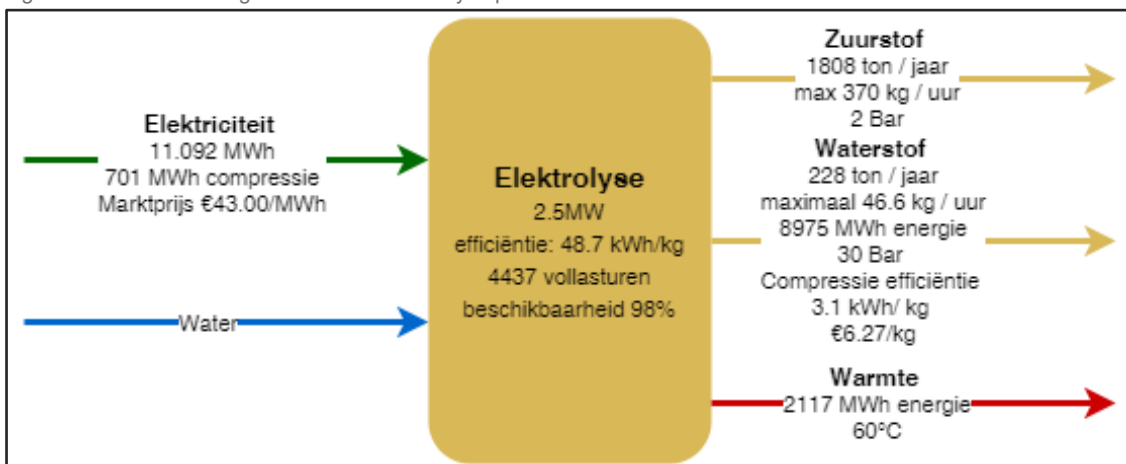
Figuur 3.16 Waterstof- en zuurstofproductie per maand van rwzi Kampen met een windturbine, zonnenveld en een electrolyser. Het groene vlak geeft de productie weer indien er alleen eigen opwek wordt gebruikt. Het paarse vlak geeft de maximale productie weer indien er nog maximaal energie wordt ingekocht van het net. De rode lijn geeft de maximale productie weer indien de electrolyser ten alle tijden op vol vermogen draait.



3.3 Toepassing electrolyse

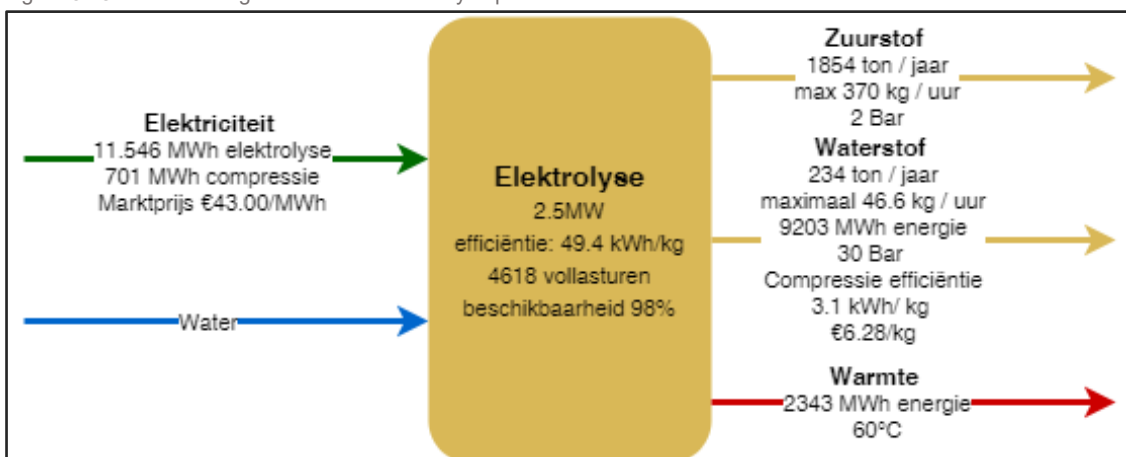
Indien electrolyse wordt toegepast en gekoppeld aan de duurzame energieopwekking van 1 windturbine van 4,8 MW, is het mogelijk om door middel van een electrolyser van 2,5 MW 228 ton waterstof en 1808 ton zuurstof op jaarbasis te produceren. Bovendien komt hierbij gemiddeld 2117 MWh warmte op 60 graden vrij. De kwantificering van de stromen benodigd voor het electrolyse proces zijn weergegeven in Figuur 3.17.

Figuur 3.17 Kwantificering stromen voor electrolyse proces met alleen een windturbine



Indien electrolyse wordt toegepast en gekoppeld aan de duurzame energieopwekking van 1 windturbine van 4,8 MW en een zonneweide van 1 MW, is het mogelijk om door middel van een electrolyser van 2,5 MW 234 ton waterstof en 1854 ton zuurstof op jaarbasis te produceren. Bovendien komt hierbij gemiddeld 2343 MWh warmte op 60 graden vrij. De kwantificering van de stromen benodigd voor het electrolyse proces zijn weergegeven in Figuur 3.18.

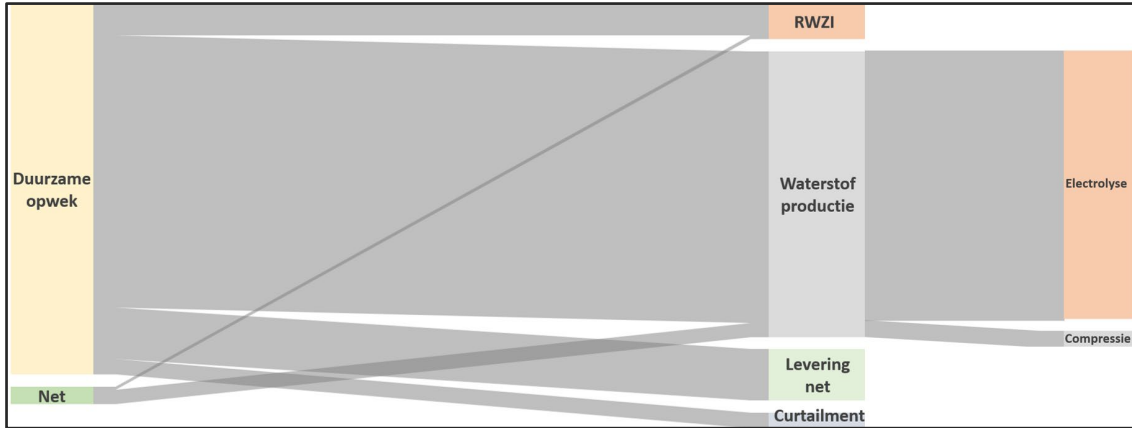
Figuur 3.18 Kwantificering stromen voor electrolyse proces met een windturbine en zonneweide



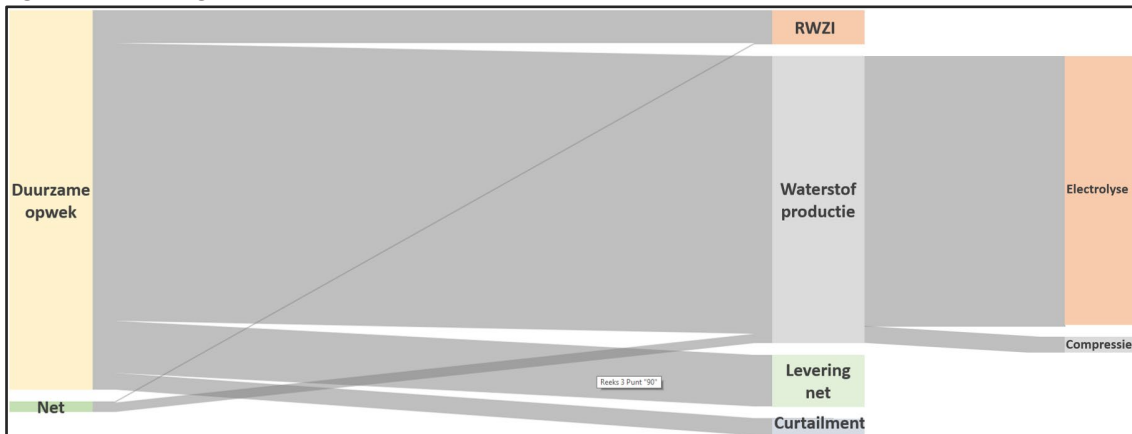
Het grootste gedeelte van de duurzame opgewekte energie gaat naar de waterstof productie. Ook is te zien dat slechts een beperkt gedeelte van de elektriciteit nodig is voor de zuiveringsprocessen op de rwzi. In de situatie met een zonneweide erbij is dit nog kleiner. Het overgrote gedeelte van de elektriciteit voor de waterstofproductie gaat naar de electrolyser, en slecht een beperkt gedeelte is nodig voor de

compressie. De energiebalans voor de twee situaties is beschreven in De verdelingen van de elektriciteit stromen is verder inzichtelijk gemaakt in Figuur 3.19 en Figuur 3.20.

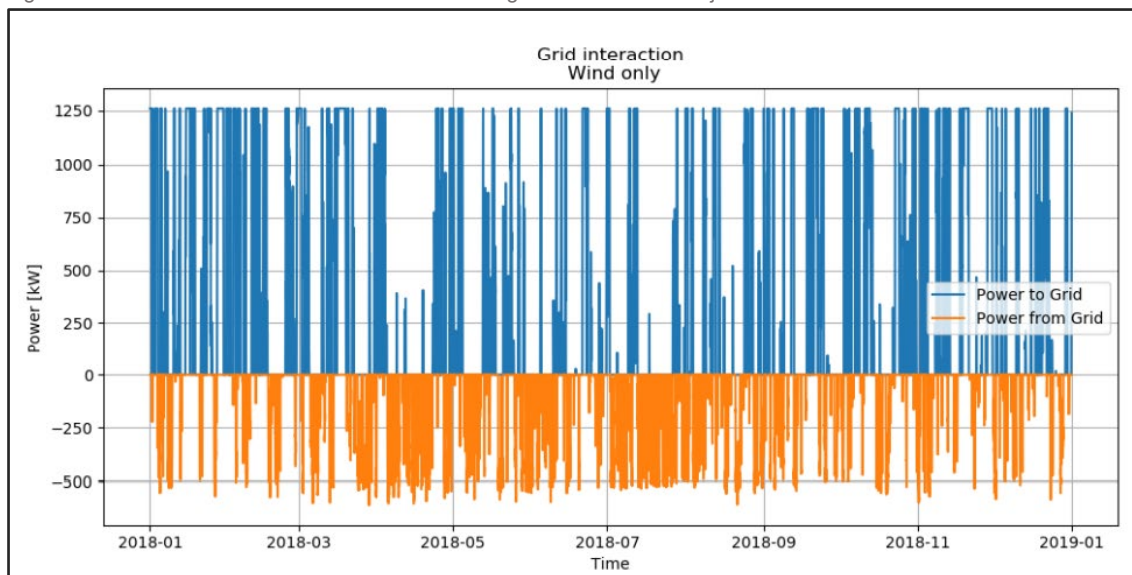
Figuur 3.19 Verdeling van de elektriciteitsstromen van alleen een windturbine



Figuur 3.20 Verdeling van de elektriciteitsstromen van een windturbine en zonneweide



Figuur 3.21 Stroom die van het net af en aan het net geleverd wordt over tijd.



Figuur 3.21 laat zien dat er per tijdeenheid meer elektriciteit aan het net geleverd wordt dan er elektriciteit van het net gehaald wordt. Dit kan worden uitgelegd aan de hand van het feit dat de elektriciteit die van het net gehaald wordt, vooral gebruikt wordt voor het electrolyse proces, welke afgestemd is op de waterstof vraag.

3.4 Business case

In Tabel 3.4 wordt de businesscase toegelicht voor een jaarproductie van 228 ton waterstof voor de situatie met een windturbine en 234 ton voor de situatie met een windturbine en een zonneweide. De opbouw van de totale investering is weergegeven in Tabel 3.2. Hieruit blijkt dat de kostprijs per kg waterstof in het geval van een situatie met alleen een windturbine €6,27 en met een aanvullende zonneweide €6,28. In het geval van de operationele kosten van de productie worden de onderhoudskosten gemiddeld over 20 jaar beschouwd, gezien alle systemen dezelfde operationele levensduur hebben. In werkelijkheid blijkt dat deze onderhoudskosten voor de windturbine in de loop der jaren toeneemt.

De ontmantelingskosten zijn voor het gehele systeem; de windturbine, de zonneweide en het electrolyse systeem.

De opgewekte elektriciteit wordt voor een gedeelte verkocht aan de elektriciteitsmarkt waaruit inkomsten vloeien. Daarnaast worden er kosten bespaard door het niet hoeven inkopen van elektriciteit. De huidige elektriciteitskosten van de rwzi zijn €0,10 / kWh. Deze beïnvloeden de business case op een positieve wijze.

De verdienste van elektriciteitsverkoop liggen in de twee situaties dicht bij elkaar. Er wordt iets meer elektriciteit verkocht in de situatie waar ook een zonneweide aanwezig is. Echter wordt er dan ook meer waterstof geproduceerd, waardoor deze impact op de verdiensten per kg waterstof kleiner wordt.

Tabel 3.4 Business case

	Windturbine		Windturbine en zonneweide		
Business case	Totaal (x miljoen)	per kg h2	Totaal (x miljoen)	per kg h2	variantie
Totale investeringen	€ 14,09	€ 3,09	€ 14,65	€ 3,13	1%
Onderhoud turbine	€ 1,28	€ 0,28	€ 1,36	€ 0,29	2%
Onderhoud zonnenveld	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,19	€ 0,04	100%
Onderhoud electrolyse systeem	€ 0,41	€ 0,09	€ 0,42	€ 0,09	-2%
Elektriciteitsinkoop electrolyse	€ 0,91	€ 0,20	€ 0,56	€ 0,12	-39%
Overige OPEX productie	€ 1,23	€ 0,27	€ 1,22	€ 0,26	-3%
Onderhoud compressie systeem	€ 0,36	€ 0,08	€ 0,33	€ 0,07	-2%
Onderhoud HRS	€ 0,05	€ 0,01	€ 0,05	€ 0,01	-2%
Elektriciteitsinkoop compressie	€ 0,87	€ 0,19	€ 0,89	€ 0,19	-2%
Overige OPEX compressie	€ 0,96	€ 0,21	€ 0,94	€ 0,20	-2%
Vervoerskosten	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	0%
Ontmantelingskosten	€ 0,14	€ 0,03	€ 0,14	€ 0,03	-2%
Kosten eigen vermogen	€ 6,29	€ 1,38	€ 6,55	€ 1,40	1%
Kosten banklening	€ 2,05	€ 0,45	€ 2,11	€ 0,45	1%
LCoH	€ 28,59	€ 6,27	€ 29,39	€ 6,28	-2%

Andere verdiensten per jaar	€ x 1000	per kg h2	€ x 1000	per kg h2	variantie
Huidige elektriciteitskosten rwzi	109,9	- € 0,48	109,9	- € 0,47	0%
Verdiensten elektriciteitsverkoop	80,3	- € 0,04	83,6	- € 0,05	1%
Kostprijs waterstof		€ 5,75		€ 5,76	0%

Echter moet wel gesteld worden dat in deze prijs een businesscase risico zit. Bij het stellen van de kostprijs van waterstof wordt ervan uitgegaan dat de berekende hoeveelheid waterstof daadwerkelijk geproduceerd wordt en dat deze hoeveelheid waterstof ook volledig afgezet kan worden.

Tabel 3.5 laat zien dat wanneer de kostprijs van waterstof vergeleken wordt met de prijs van diesel, deze niet erg ver uit elkaar liggen. Bovendien is er in deze berekening geen subsidie voor waterstof meegenomen. Ook is de winst die behaald wordt door het toepassen van zuurstof in plaats van beluchting niet meegenomen, en is de aanname gemaakt dat er 20% eigen vermogen ingelegd moet worden, waar 15% kapitaalkosten tegenover staan. Als deze factoren, waar nu nog geen duidelijkheid voor is, wel meegenomen worden en aangepast naar de waarden die acceptabel zijn voor het waterschap, zal dit de waterstof mogelijk nog concurrerender kunnen maken ten opzichte van diesel.

In dit model is de aanname gemaakt dat 4 liter diesel gelijk staat aan 1 kg waterstof. De werkelijke factor hangt af van de inzet van het voertuig. Vanwege de beperkte vloot waterstof voertuigen, zijn er slechts beperkte metingen beschikbaar.

Tabel 3.5 Vergelijking prijs waterstof en diesel

	Hoeveelheid	Windturbine	Windturbine en zonneweide
Waterstofprijs	1 kg	€ 5,75	€ 5,76
Diesel prijs	4 liter	€ 4,58	€ 4,58
Vershil		€ 1,17	€ 1,18

Een ander voordeel wat waterstof heeft ten opzichte van diesel, is dat de prijs zekerder is. Zo hangt de diesel prijs af van de olieprijs, en is het nog niet duidelijk wat het beleid rondom CO₂ heffing in de toekomst wordt.

De totale kosten per vermeden ton CO₂ zijn respectievelijk €137 en €139 voor de situatie met alleen een windturbine of een windturbine en een zonneweide. De CO₂ besparing is in relatie tot grijze waterstof productie. Hierbij gaat het over alle kosten die gemaakt zijn om een ton CO₂ uitstoot te voorkomen. Bij veel andere waterstof projecten ligt dit tussen de €300 en €500 per ton CO₂. Hiermee is dit een interessant project op de korte termijn. Gezien de relatief lage kosten per vermeden ton CO₂ is het project ook relatief kansrijk om in aanmerking te komen voor een SDE++ subsidie, mits er een geschikte en voldoende zekere afzet van de geproduceerde waterstof kan worden vastgelegd.

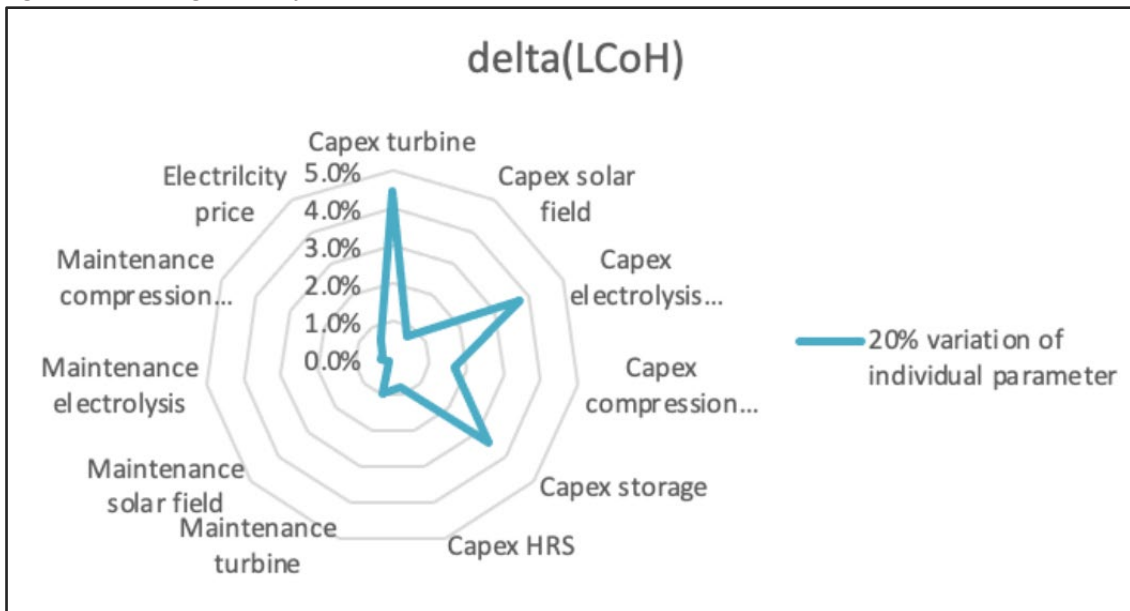
3.4.1 Gevoeligheidsanalyse

De businesscase is gebaseerd op een aantal aannames met betrekking tot investeringskosten, onderhoudskosten en de inkoopprijs van elektriciteit. Deze aannames zijn gemaakt op basis van de huidige marktprijzen. Omdat deze prijzen afhankelijk zijn van onder andere grondstofprijzen en ontwikkelingen van technologieën, is het mogelijk dat deze prijzen fluctueren. In Tabel 3.6 is het resultaat van een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd ten opzichte van de situatie waarin waterstof geproduceerd wordt op basis van de opwek van een windturbine en een zonneweide. In Figuur 3.22 is het verschil van de verschillende onderzochte gevoeligheden weergegeven. Hieruit blijkt dat vooral de hoogte investeringen een groot effect hebben op de uiteindelijke kosten van waterstof.

Tabel 3.6 Gevoeligheidsanalyse

Gevoeligheden	Referentie wind & zon	-20%		+20%	
	LCoH	LCoH	Delta LCoH	LCoH	Delta LCoH
CAPEX turbine	€ 6,28	€ 6,00	- 4,5 %	€ 6,56	4,5 %
CAPEX zonneveld	€ 6,28	€ 6,23	- 0,7 %	€ 6,32	0,7 %
CAPEX electrolyse systeem	€ 6,28	€ 6,04	- 3,7 %	€ 6,51	3,7 %
CAPEX compressie systeem	€ 6,28	€ 6,17	- 1,7 %	€ 6,38	1,7 %
CAPEX opslag	€ 6,28	€ 6,06	- 3,4 %	€ 6,49	3,4 %
CAPEX HRS	€ 6,28	€ 6,23	- 0,8 %	€ 6,33	0,8 %
Alle CAPEX onderdelen	€ 6,28	€ 5,35	- 14,8 %	€ 7,21	14,8 %
Onderhoudskosten turbine	€ 6,28	€ 6,22	- 1,0 %	€ 6,34	1,0 %
Onderhoudskosten zonneveld	€ 6,28	€ 6,27	- 0,1 %	€ 6,29	0,1 %
Onderhoudskosten electrolyse	€ 6,28	€ 6,26	- 0,3 %	€ 6,60	0,3 %
Onderhoudskosten compressie en HRS	€ 6,28	€ 6,26	- 0,3 %	€ 6,60	0,3 %
Elektriciteitsprijs	€ 6,28	€ 6,24	- 0,6 %	€ 6,32	0,6 %

Figuur 3.22 Gevoeligheidsanalyse



4 Conclusies

- Op basis van de huidige plannen wordt er een windturbine van 4,8 MW geplaatst, plus een zonnepark van ongeveer 1,0 MWp. Op basis van deze vermogens en rekening houdend met het huidige verbruik en de beschikbare netaansluiting, is een elektrolyse systeem van 2,5 MW kostentechnisch gezien optimaal. Het toevoegen van extra zonne-energie aan deze configuratie levert naar verwachting geen economisch voordeel op voor de prijs van de waterstof.
- Het is mogelijk om de productie van elektriciteit uit zonne- en windenergie op de rwzi Kampen te integreren in combinatie met waterstofproductie, zonder daarbij de netaansluiting te hoeven verzwaren of vernieuwen. Op basis van de analyse kan circa 95% van de duurzaam geproduceerde elektriciteit worden benut, allereerst in de vorm van eigen verbruik voor het zuiveringsproces op de rwzi (8,7%), vervolgens voor de productie van groene waterstof (72,1%) en in geval van overschot als teruglevering aan het net (14,2%).
- Het productieprofiel van het scenario met wind- én zonne-energie is aanzienlijk vlakker dan het productieprofiel van het scenario met alleen windenergie, echter vraagt het zonnenveld ook om extra investeringen, waardoor er naar verwachting geen economisch voordeel optreedt.
- De resultaten van de businesscase laten zien dat de kosten voor de productie van waterstof uit zonne- en windenergie €6,28 per kg H₂ zijn, op basis van de gehanteerde uitgangspunten. Wanneer we de vermeden kosten voor elektriciteitsinkoop voor de rwzi, plus inkomsten voor teruglevering van het overschot aan elektriciteit meenemen in het kostenplaatje, dalen de kosten voor een kg H₂ naar €5,76. Om een haalbaar project te realiseren, dienen de inkomsten uit de afzet van de geproduceerde waterstof gelijk te zijn aan deze kosten. Een van de mogelijk afzetmarkten is in de mobiliteit, ter vervanging van bijvoorbeeld diesel. In het geval dat alle geproduceerde waterstof tegen de prijs van diesel kan worden afgezet, laten de resultaten zien dat het project nog een onrendabele top heeft van €1,19 per kg H₂. Hierbij zijn eventuele investeringen voor de vervanging van werk- en voertuigen met dieselmotoren door brandstofcel-aandrijving niet meegenomen. Echter, er zijn in het model enkele aannames gedaan die in werkelijkheid mogelijk geoptimaliseerd kunnen worden.
- Andere toepassingen van de geproduceerde groene waterstof zijn bijvoorbeeld de vervanging van 'grijze' waterstof in de industrie of als bijmenging in het aardgas netwerk, ter vervanging van fossiele aardgas. Beide toepassingen hebben naar verwachting een lagere waardering dan de toepassing van waterstof als vervanging van diesel en kennen op dit moment dus nog een hogere onrendabele top.
- Ten behoeve van de leveringszekerheid van de waterstofproductie is het soms nodig elektriciteit van het net in te kopen voor zover de netaansluiting het toelaat. Theoretisch zou een aanvullend batterijsysteem gebruikt kunnen worden om overschotten die nu gecurtaild worden op te slaan en in te zetten op momenten wanneer er elektriciteit van het net benodigd is. Naar verwachting weegt de investering in een dergelijk batterijsysteem niet op tegen de vermeden kosten voor inkoop van elektriciteit van het net.
- Omdat de elektrolyse capaciteit niet vast is maar variabel, heeft de rwzi een beperkt schakelbaar vermogen tot zijn beschikking, dat op termijn ingezet kan worden voor netstabilisatie of sturing op onbalansprijzen. De mate waarin er flexibel vermogen beschikbaar is, hangt af van het aanbod van duurzame elektriciteit, de waterstofbehoefte, beschikbare opslagcapaciteit voor waterstof en het eigen verbruik van de rwzi, op basis van day-ahead voorspellingen. Om te bepalen voor welke aanvullende flexibilitiedienst een dergelijke elektrolyse systeem geschikt is en om de beschikbaarheid van flexibel vermogen te kunnen kwantificeren is aanvullend onderzoek nodig.
- De omzetting tot waterstof maakt het mogelijk om de (zware) mobiliteit te verduurzamen. In de omgeving van de rwzi zijn veel (duurzame) tank voorzieningen. Veel mobiliteit komt dus naar dit gebied om te tanken. Dit is een mooie kans om hierop in te spelen (en eventueel samenwerken met

partijen voor de afzet van waterstof). Hierdoor kan de geproduceerde waterstof tegen een zo hoog mogelijke waarde worden afgezet.

- De directe koppeling van wind – elektrolyse maakt een extra conversie tussen AC-DC overbodig maken, wat mogelijk zou kunnen zorgen voor een 25% goedkoper systeem, en een 10% efficiëntere productie, deze zal echter pas over enkele jaren op de markt gebracht worden door de windturbine leveranciers.



Bijlage 2: Pilot Harderwijk

De rwzi als Energiehub

Bijlage 2: Pilot rwzi Harderwijk

Waterschap Vallei en Veluwe / Unie van Waterschappen

720174 | V3.0

01/10/2021





De rwzi als Energiehub

Bijlage 2: Pilot rwzi Harderwijk

Waterschap Vallei en Veluwe / Unie van Waterschappen

720174 | V3.0

1-10-2021



Pondera

Hoofdvestiging Nederland
Amsterdamseweg 13
6814 CM Arnhem
088 – pondera (088-7663372)
info@ponderaconsult.com

Postadres
Postbus 919
6800 AX Arnhem

Vestiging South East Asia
Jl. Mampang Prapatan XV no 18
Mampang
Jakarta Selatan 12790
Indonesia

Vestiging North East Asia
Suite 1718, Officia Building 92
Saemunan-ro, Jongno-gu
Seoul Province
Republic of Korea

Colofon

Soort document
De rwzi als Energiehub

Projectnaam
Bijlage 2: Pilot rwzi Harderwijk

Versienummer
V3.0

Datum
1-10-2021

Project nummer
720174

Opdrachtgever
Waterschap Vallei en Veluwe / Unie van
Waterschappen

Auteur
Anne de Boer; Jim Quick

Nagekeken door
Steven Geujen

Disclaimer

In het onderzoek is gebruik gemaakt van algemeen geaccepteerde uitgangspunten, modellen en informatie die ten tijde van het opstellen van dit rapport ter beschikking stonden. Aanpassingen in de uitgangspunten, modellen of gebruikte gegevens kunnen leiden tot andere uitkomsten. De aard en de nauwkeurigheid van de gebruikte gegevens voor het onderzoek bepalen in belangrijke mate de nauwkeurigheid en de onzekerheden van de berekende uitkomsten. Pondera is niet aansprakelijk voor gederfde inkomsten of schade die wordt geleden door opdrachtgever(s) en/of derden uit conclusies die gebaseerd zijn op gegevens die niet van Pondera afkomstig zijn. Deze rapportage is opgesteld met de intentie dat deze alleen gebruikt wordt door de opdrachtgever en slechts voor het doel waarvoor de rapportage is opgesteld. Er mag geen beroep worden gedaan op de informatie uit deze rapportage voor andere doeleinden zonder schriftelijke toestemming van Pondera. Pondera is niet verantwoordelijk voor de consequenties die kunnen voortvloeien uit het oneigenlijk gebruik van de rapportage. De verantwoordelijkheid voor het gebruik van (de analyse, resultaten en bevindingen in) de rapportage blijft bij de opdrachtgever. De Rechtsverhouding opdrachtgevers – architect, ingenieur en adviseur conform DNR 2011 is te allen tijde van toepassing.

Inhoudsopgave

1	Inleiding	1
1.1	Aanleiding	1
1.2	Aanpak	2
2	Mogelijkheden hub;	3
2.1	Energiehub bouwstenen	3
2.2	Stromen die plaatsvinden	8
3	Resultaten	10
3.1	Opwek en verbruiksprofielen op rwzi	10
3.2	Flexibiliteit in de netaansluiting	21
3.3	Flexibiliteit verbruik op de rwzi	23
4	Conclusies	28

1 Inleiding

In het kader van het onderzoek naar de mogelijkheden van rioolwaterzuiveringsinstallaties (rwzi) om te fungeren als een energiehub, in opdracht van de Unie van Waterschappen, worden specifiek voor twee locaties concrete mogelijkheden voor een pilot onderzocht en uitgewerkt. Eén van deze pilotlocaties betreft de rwzi te Harderwijk, in eigendom van Waterschap Vallei en Veluwe. Deze rapportage vormt bijlage 2 bij het hoofdrapport en beschrijft de pilot voor de locatie Harderwijk.

1.1 Aanleiding

De rwzi in Harderwijk is naast een rioolwaterzuivering ook een locatie waar zuiveringsslib vergist wordt. Met dit vergistingsproces wordt biogas geproduceerd. Op dit moment maakt de rwzi Harderwijk gebruik van een wkk om het biogas te verbranden. De warmte die hierbij vrijkomt wordt ingezet in het slibvergistingsproces, het verwarmen van de bedrijfsgebouwen en indien noodzakelijk het verwarmen van de BECH. Het overschot aan warmte wordt weggekoeld. De wkk produceert daarnaast ook elektriciteit, welke door de rwzi verbruikt wordt. In geval van een overschot wordt deze teruggeleverd aan het elektriciteitsnet. In het geval dat de elektriciteitsvraag van de rwzi groter is dan de productie van de wkk, wordt er elektriciteit ingekocht van het net.

In de nabije toekomst wordt er een zonneveld (1,8-2,4 MWp) en een windturbine ($\pm 3,5$ MW) op het terrein van de rwzi gerealiseerd. Hiermee wenst het waterschap bij te dragen aan de energietransitie. Deze toekomstige energievoorziening kent echter een grillig aanbod, dat niet altijd aansluit bij de elektriciteitsbehoefte van de rwzi. Alhoewel er in de toekomstige situatie met zonne- en windenergie waarschijnlijk veel minder elektriciteit ingekocht hoeft te worden vanuit het net voor de eigen energievraag van de rwzi (2,4 miljoen kWh), is de verwachting echter ook dat er op momenten van veel zon en/of harde wind er grote overschotten aan elektriciteit kunnen ontstaan die ontsloten dienen te worden. Het elektriciteitsnet in Nederland kent echter momenteel op een toenemend aantal plekken beperkte of zelfs helemaal geen aanvullende mogelijkheden om elektriciteit terug te leveren. De capaciteit van het elektriciteitsnet in de directe omgeving van rwzi Harderwijk is zeker tot 2025 kritisch. Er is daarom een behoefte om alternatieve afzetmogelijkheden voor het surplus aan duurzame elektriciteit te onderzoeken. In dit onderzoek blijft het een randvoorwaarde dat de uitvoering van het primaire proces van de rwzi, namelijk het zuiveren van rioolwater, altijd geborgd blijft. Dit betekent dat er dus altijd voldoende energie beschikbaar dient te zijn voor de zuivering en dat nieuwe processen of energie-/productstromen geen nadelige invloed hierop mogen hebben. In deze pilot onderzoeken we of het mogelijk is om een maatschappelijk dienst te leveren wanneer er energiestromen gekoppeld kunnen terwijl de inspanningen van de rwzi het elektriciteitsnet ondertussen ontlasten.

Met bijkomende duurzame opwek in de vorm van zonnenvelden en windturbines op en rondom het rwzi terrein en met beperkte mogelijkheden voor het terugleveren van elektriciteit naar het net, ontstaat de vraag;

Op welke wijze kan de rwzi Harderwijk de autonome ontwikkeling van duurzaam opgewekte elektriciteit op de locatie en in de directe nabijheid van de rwzi faciliteren, met een zo klein mogelijke belasting van het elektriciteitsnet?

1.2 Aanpak

Om tot beantwoording van de hoofdvraag te komen, zijn eerst de verschillende bouwstenen waaruit een energiehub kan bestaan in hoofdstuk 2 beschreven en toegepast op de huidige en verwachte toekomstige situatie op rwzi Harderwijk.

Verschillende scenario's worden vervolgens onderzocht in hoofdstuk 3. Hierbij is er een analyse gemaakt op basis van kwartierwaarden. De gebruikte gegevens van rwzi Harderwijk zijn aangeleverd door WDOD. Het verbruiksprofiel van 2018 is gebruikt. De energieproductie van de WKK van rwzi Harderwijk van 2018 is ook aangeleverd door WDOD. De energieproductie van de windturbine die beoogd is bij rwzi Harderwijk is berekend met behulp van het programma WindPRO. Hier is de ERA5 winddataset voor gebruikt van de afgelopen 20 jaar. Vervolgens is de energieproductie van 2018 gebruikt voor de berekeningen in dit rapport. De definitieve windturbinekeuze staat nog niet vast, daarom zijn de berekeningen gemaakt met een Vestas V117-3,45MW op 116,5m ashoogte, wat een representatief beeld geeft van de opwek van een dergelijke windturbine. De energieproductie van het zonneveld is berekend met het programma Helioscope, waar gebruik wordt gemaakt van een TMY (typical meteorological year) dataset. Deze dataset geeft een representatief beeld van de opwek van zonne-energie.

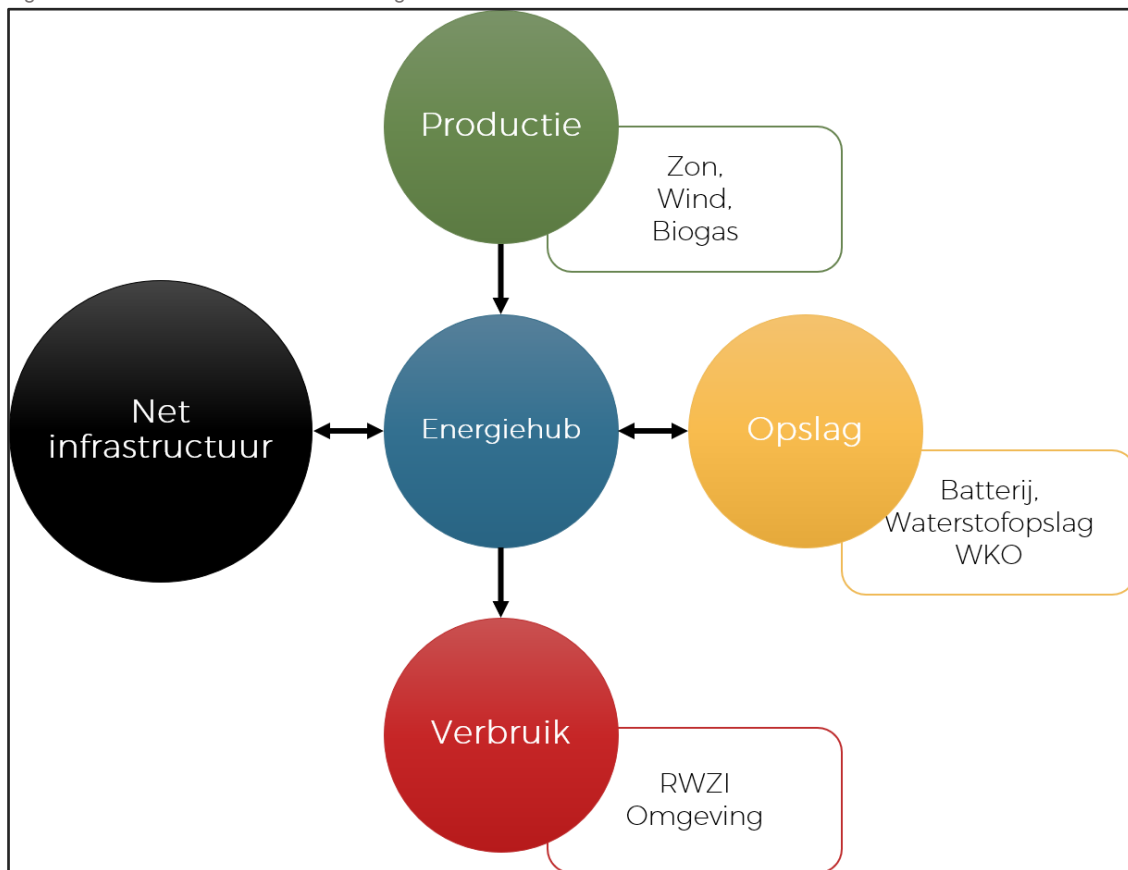
Bij het bepalen van de mogelijkheden in de verschillende scenario's, wordt gestructureerd een stappenplan (besluitvormingsmatrix) doorlopen op basis waarvan verschillende mogelijkheden worden toegelicht.

Aanvullend wordt er nog ingegaan op de relatie tussen de rwzi en het omliggende elektriciteitsnetwerk en hoe het verbruik, opwek en conversie dat plaatsvindt op de rwzi hierop in kan spelen.

2 Mogelijkheden hub;

Zoals beschreven in hoofdstuk 2 van het hoofdrapport “De rwzi als Energiehub”, zijn er verschillende functionaliteiten die, wanneer gecombineerd, ingezet kunnen worden om een energiehub functie te realiseren. Deze verschillende functionaliteiten zijn nogmaals weergegeven in Figuur 2.1. De verschillende functionaliteiten en de mogelijkheden toegespitst op rwzi Harderwijk worden hieronder beschouwd.

Figuur 2.1 Functionaliteiten van een energiehub



2.1 Energiehub bouwstenen

De rwzi in Harderwijk is een rwzi met verschillende energiestromen; naast het primaire zuiveringsproces van afvalwater ook de vergisting van primair slib plaatsvindt en er is een aparte bio-energie centrale (BECH) gelegen aangrenzend aan het rwzi-terrein. Met betrekking tot warmtevraag en -productie lopen er diverse stromen binnen de inrichting van de RWZI. Dit zijn zowel elektrische energiestromen als warmtestromen en gasstromen.

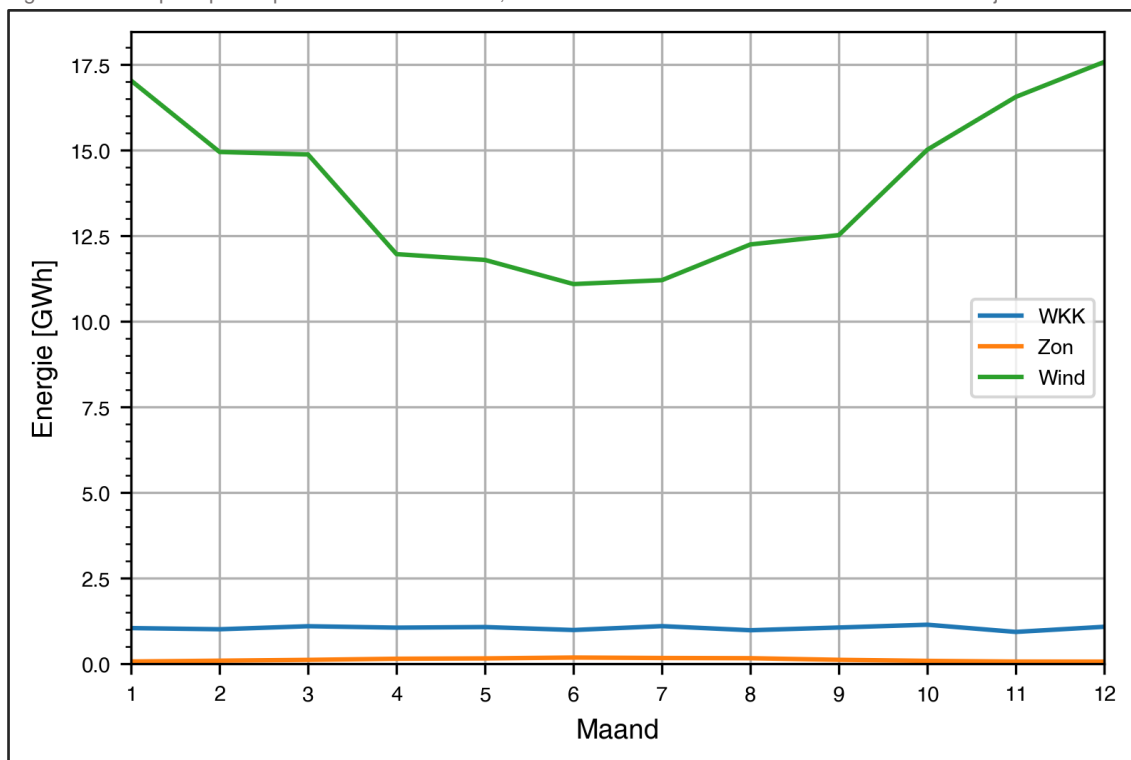
2.1.1 Productie

Er zijn plannen voor het plaatsen van een zonneveld binnen de eigen terreingrenzen van 1,7 tot 2,3 MWp en de plaatsing van één windturbine van ongeveer 3,5 MW. In de nabije omgeving zijn er ook duurzame energie opwek initiatieven; er komt een solar carport op een parkeergelegenheid aangrenzend aan de RWZI en twee windturbines (parallel aan de rwzi windturbine) in het industriële gebied Lorentz. Lorentz

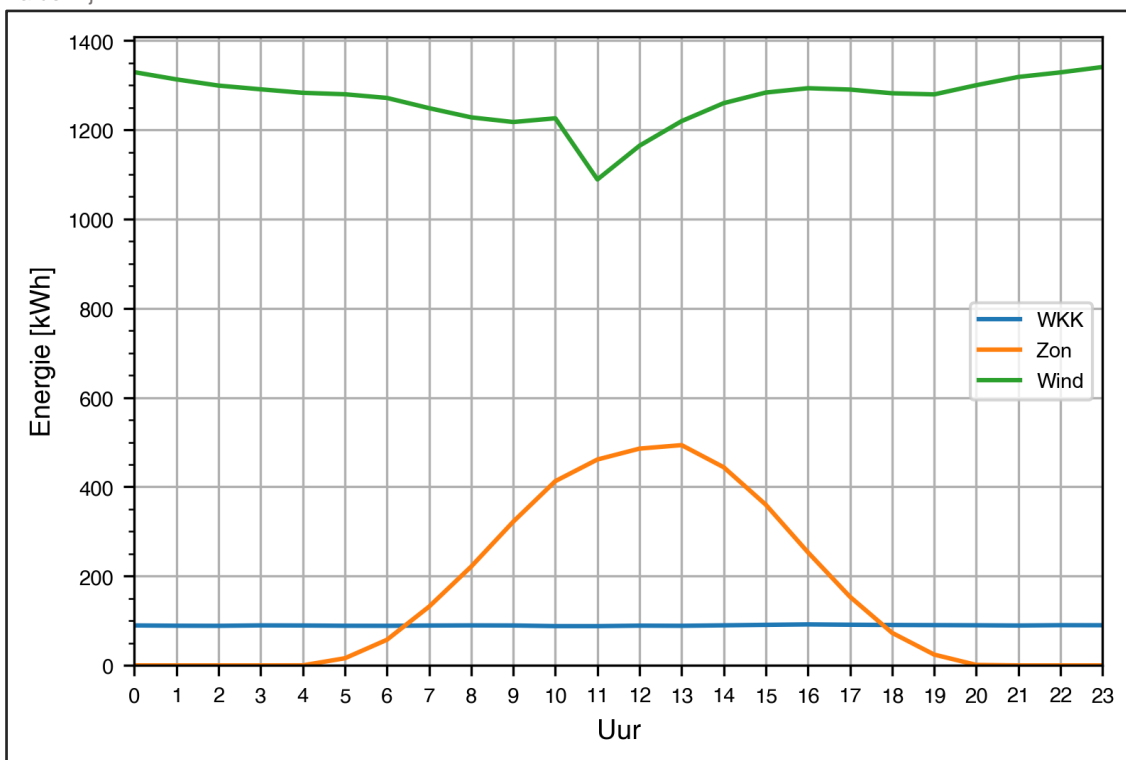
maakt plannen om grootschalig zonnepanelen op dak te realiseren. Er zal in de omgeving van de rwzi dus veel variabele energie opwek bij komen.

Op dit moment produceert de rwzi biogas door het vergisten van het eigen primaire slib en primair slib dat wordt aangevoerd van andere rwzi's. Het geproduceerde biogas wordt in de wkk verbrand. Hierbij kan de warmte die vrijkomt gebruikt worden voor de vergisting van het slib en voor het verwarmen van de ruimtes op de rwzi. De elektriciteitsproductie van de WKK, het beoogde zonnepaneel en de beoogde windturbine zijn in Figuur 2.2 en Figuur 2.3 weergegeven.

Figuur 2.2 Het opwekprofiel per maand van de WKK, het zonnepaneel en de windturbine van rwzi Harderwijk.



Figuur 2.3 Het opwekprofiel per uur gemiddeld over het jaar van de WKK, het zonneveld en de windturbine van rwzi Harderwijk.



Het is een mogelijkheid dat de wkk's verdwijnen en om al het biogas op te waarden tot groengas. Het natuurlijke moment van deze verwijdering is volgend decennium. Wanneer dit gebeurt, ontstaat er een warmte gat, aangezien het slibvergistingsproces een warmtebehoefte heeft. De misgelopen elektriciteitsopwekking kan opgevangen worden met de duurzame elektriciteitsproductie uit zon en wind. Het warmte gat kan bijvoorbeeld worden opgevangen door of een gedeelte van het biogas te gebruiken voor directe verbranding (zonder elektriciteitsopwekking) of door elektrisch te verwarmen met de elektriciteit die duurzaam opgewekt is. Naast deze geschetste opties, zijn er ook alternatieve warmtebronnen. Er ligt een onderzoeksvoorstel bij de STOWA om een nieuwe warmtebron te onderzoeken bij volledige groengasopwerking.

Uit het effluent kan ook warmte onttrokken worden, wat vervolgens door middel van een warmtepomp opgewaardeerd kan worden naar een hogere temperatuur. Deze warmte kan gebruikt worden om aan de warmtevraag in de omgeving te voldoen. In de nieuwbouwwijk het Waterfront is er behoefte aan warmte en wordt er gewerkt aan een warmtenet waarbij de warmte uit het effluent van de rwzi is geïdentificeerd als bron.

Er zijn mogelijkheden om de warmteopbrengst te beïnvloeden wanneer het debiet wordt aangepast. Bij de rwzi in Appeldorn wordt nu onderzocht wat de mogelijkheden zijn en het effect is om op bepaalde momenten van de dag een gedeelte van het effluent te bufferen, om vervolgens een groter debiet te creëren op momenten dat de warmtevraag groter is. Hierdoor ontstaat er de mogelijkheid om beter aan te sluiten op de warmtevraag over de dag heen.

De toepassing van aquathermie kan mogelijk worden gecombineerd met een WKO, waarbij de wisselende warmtevraag tussen de seizoenen opgevangen kan worden. Het DWA-debiet van rwzi Harderwijk is

1350m³/uur¹. Wanneer een ΔT van 5 °C wordt gehanteerd, resulteert dit een potentie² van 7,3 MW. Deze warmte kan vervolgens nog door middel van een warmtepomp worden opgewaardeerd tot de gewenste temperatuur.

Naast de WKK, is er ook een bio-energie centrale (BECH), welke voor 50% eigendom is van de het Waterschap Vallei en Veluwe. In deze centrale wordt mest en andere co-producten vergist waarmee er 13 miljoen m³ biogas per jaar wordt geproduceerd. Hiervan wordt 8 miljoen m³ in het gasnet geïnjecteerd. Voor dit proces heeft de BECH een continue energievraag van 0,6 MW. De BECH heeft een eigen netaansluiting die los staat van de aansluiting van de rwzi. Het vergistingsproces dat plaatsvindt op de BECH is anders dan de slibvergisting op de rwzi waarbij andere droogstofpercentages worden toegepast. De toekomst van de BECH is echter onzeker; de BECH draait nu op subsidie die nog 8 jaar verstrekt wordt. Na deze tijd is het onzeker of de subsidie verlengd wordt en of de BECH anders operationeel kan zijn zonder subsidie, zeker omdat de prijzen van de co-producten nu al stijgen en dit de businesscase negatief beïnvloedt.

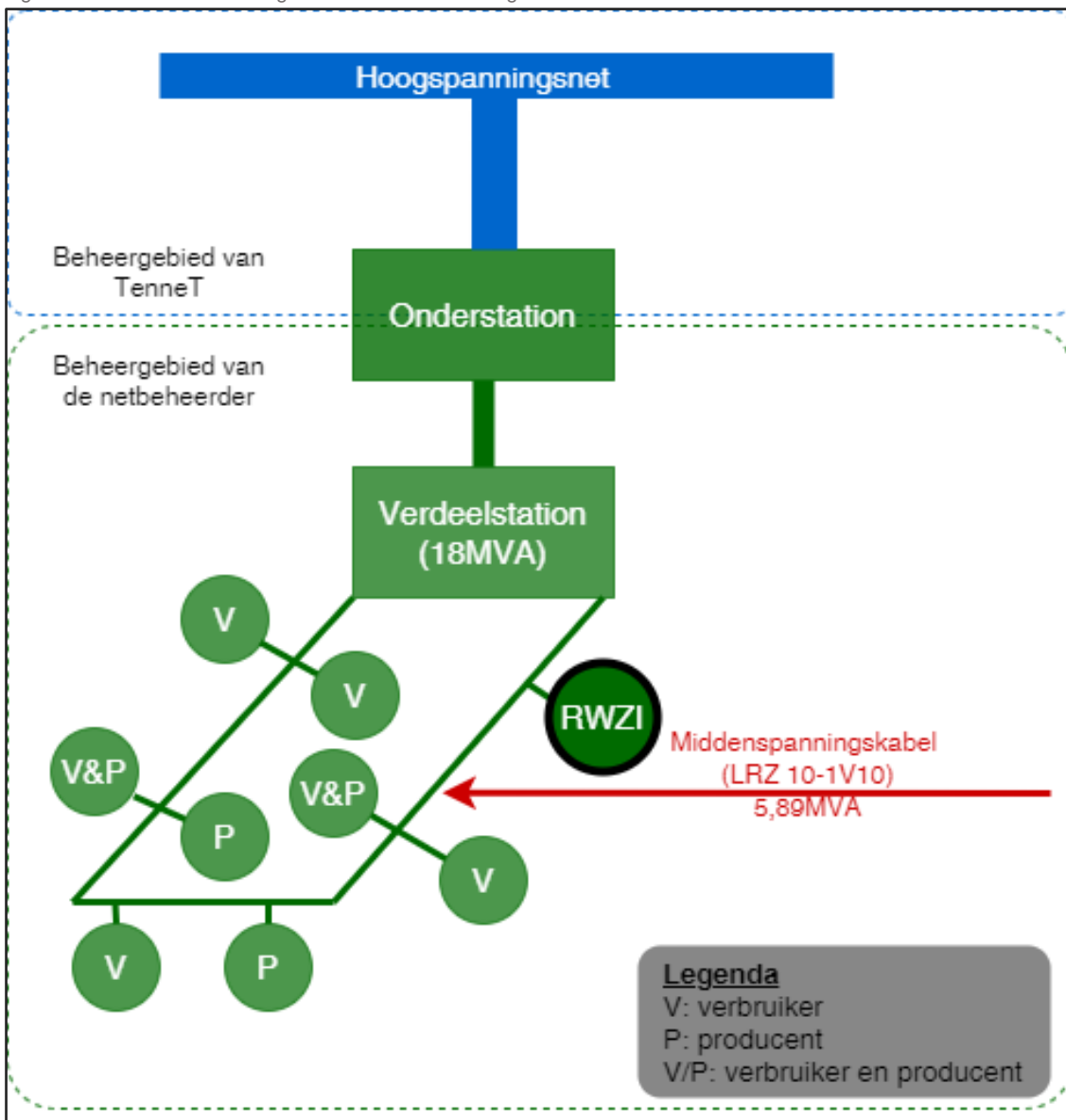
2.1.2 Net

De fysieke capaciteit van huidige netaansluiting van de rwzi is 2 MVA (~2 MW) en is, zoals de meeste verbruiksaan-sluitingen, dubbel uitgevoerd. Dit betekent dat in geval van een storing of defect aan een kabel, het verbruik altijd nog geleverd kan worden via de reservekabel. Echter, in het geval van de rwzi in Harderwijk is deze fysieke capaciteit niet volledig te benutten. Vanwege netcongestie is de mogelijkheid om elektriciteit terug te leveren aan het net beperkt tot een piekvermogen van 0,85 MW. De gecontracteerde capaciteit voor verbruik is ongeveer 1,6 MW. Op basis van informatie van Liander kan worden geconcludeerd dat de begrenzing op de teruglevering gerelateerd is aan de fysieke capaciteit van de middenspanningskabel (LRZ 10-1V10) waar de rwzi op is aangesloten (5,89 MVA). De begrenzing van de levering is gerelateerd aan de fysieke capaciteit van het verdeelstation waar deze middenspanningskabel op zijn beurt weer op aangesloten is (18 MVA). Een schematische weergave van de aansluiting is weergegeven in *Figuur 2.4*. Beide beperkingen zijn een resultaat van een overschrijding van de fysieke capaciteit door het totaal aan de gecontracteerde transportvermogens van andere verbruikers en producenten van elektriciteit op dit netvlak. Op dit moment zijn netuitbreidingen al door Liander in gang gezet en worden naar verwachting de werkzaamheden met betrekking tot het verdeelstation in kwartaal 3 van 2022 afgerond en met betrekking tot de middenspanningskabel in kwartaal 2 van 2024. Hoeveel capaciteit er dan beschikbaar is, is niet bekend.

¹<https://www.watersector.nl/rwzi/293/rwzi>.

² Formule uit STOWA rapport 47 (2018) <https://www.uvw.nl/wp-content/uploads/2018/10/Handreiking-Aquathermie.pdf>

Figuur 2.4 Schematische weergave van hoe de rwzi aangesloten is aan het elektriciteitsnetwerk



Vanwege de plannen voor een zonneveld en een windturbine op eigen terrein, wordt er een aanzienlijke hoeveelheid aan duurzame elektriciteit verwacht. Het huidige verbruik van de rwzi is echter niet toereikend om alle geproduceerde elektriciteit direct te verbruiken en de verwachting is dat de het huidige beschikbare vermogen voor teruglevering niet voldoende is om altijd het overschot aan elektriciteit te kunnen ontsluiten.

2.1.3 Verbruik

Het primaire proces van de rwzi is het zuiveren van afvalwater. Rwnzi Harderwijk heeft een zuiveringscapaciteit van 231.000 i.e. à 136 gr. TZV / dag¹.

De zuivering van het afvalwater kan onderverdeeld worden in vijf stappen. In de eerste stap wordt het zand, vet en roostergoed tot 3-6 mm verwijderd. Vervolgens gaat het afvalwater naar de voorbezinktank

waar het primaire slib van het afvalwater gescheiden wordt. Dit slib, aangevuld met slib van onder andere slachterijen, wordt op de rwzi van Harderwijk vergist. Na de scheiding van het primaire slib, wordt het afvalwater belucht in de beluchtingstank en zorgt het actieve slib, wat bestaat uit bacteriën en andere organismes, voor de zuivering. De compressor en de vier beluchters samen zijn verantwoordelijk voor bijna de helft van het energieverbruik. In stap vier wordt vervolgens het actieve slib afgevangen. Dit slib kan hergebruikt worden voor het zuiveringsproces, en het surpluslib wordt gespuid en gaat naar de slibvergisting. Vanwege de andere samenstelling van het actieve slib, wordt deze slib niet vergist samen met het primaire slib op rwzi Harderwijk, maar op rwzi Appeldoorn.

In de laatste stap wordt het water gefilterd door een zandfilter. Hierbij wordt het water extra schoon gemaakt en wordt het zwevende slib en fosfaat verwijderd.

Het totale energieverbruik van rwzi Harderwijk is 2,4 GWh elektriciteit per jaar. Slechts een klein gedeelte is nodig voor de warmtevraag van de gebouwen op het terrein van de rwzi. Deze warmtevraag wordt geleverd door 1.600 GJ aardgas. Het maximale verbruiksvermogen van de rwzi is 1,2 MW.

Kader 2.1

Bio Energie Centrale Harderwijk (BECH)

De BECH heeft een constante elektriciteitsvraag van 600 kW. In relatie tot de rwzi met een gemiddelde elektriciteitsvraag van 275 kW is dit een substantiële toevoeging. Door het koppelen van de elektriciteitsvraag van de BECH aan het verbruiksprofiel van de rwzi, zal deze toenemen en wordt het restprofiel verkleind. In eerste instantie kan dit een positieve toevoeging voor de energiebalans betekenen, gezien er in mindere mate andere aanvullende maatregelen nodig zijn om het overschot aan opgewekte duurzame energie nuttig te kunnen gebruiken. Echter is de toekomst van de BECH onzeker, zeker gezien de subsidieperiode over 8 jaar afloopt. De levensduur van productie-installaties voor zonne- en windenergie die nu gerealiseerd worden overschrijdt de nu geprojecteerde levensduur van de BECH ruimschoots. Indien er nu grote investeringen gedaan worden met de aanname dat de BECH als verbruiker wordt toegevoegd aan de rwzi, is het mogelijk dat deze niet optimaal gedimensioneerd zijn wanneer de BECH uiteindelijk wegvalt. Om deze reden zijn er zowel scenario's zonder de BECH als een scenario zonder de BECH beschouwd.

2.1.4 Opslag

Om als energiehub te kunnen inspelen in pieken en dalen van zowel energieproductie als energievraag, is er opslag en/of conversie van energie nodig. Een aantal mogelijkheden zijn een electrolyser, een warmte opslag in de vorm van een warmte koude opslag (WKO), bovengrondse warmteopslag, ecovat en buffervaten of een biogas opslag. De meest voor de hand liggende vorm van electrolyser systeem binnen de gronden van een rwzi is Polymer electrolyte membrane (PEM). De vergelijking tussen PEM systemen en Alkaline electrolyse (AE) staat beschreven in Bijlage Kampen.

2.2 Stromen die plaatsvinden

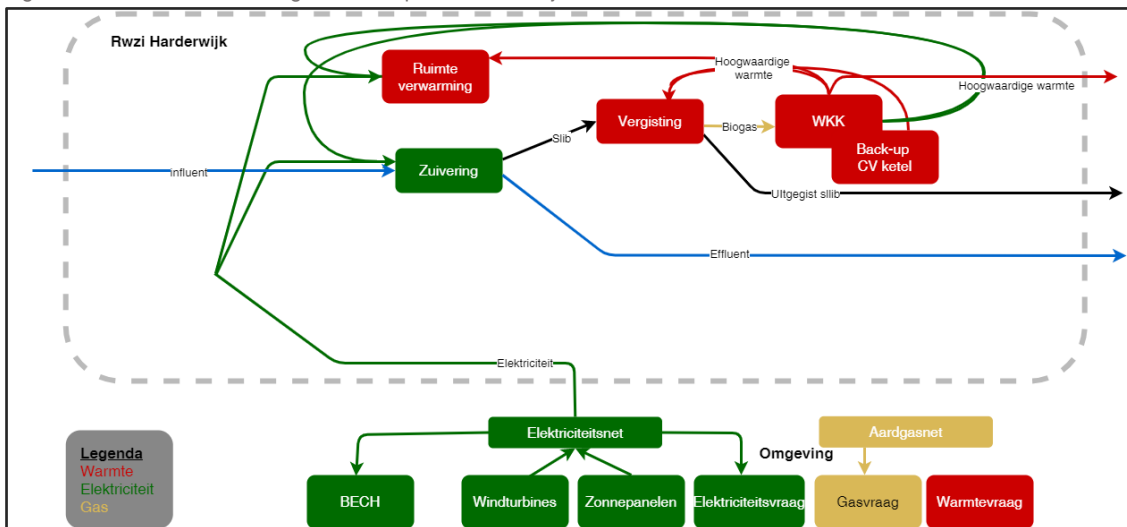
In de huidige situatie op rwzi Harderwijk vinden er al veel energiestromen plaats, zoals te zien in [Figuur 2.5](#). Door de vergisting van het slib is er een warmtestroom, en ook het biogas kan middels een WKK gebruikt worden om elektriciteit en warmte te produceren. Ook bestaat er de mogelijkheid om een (flexibel) gedeelte van het biogas op te waarderen tot groengas.

Figuur 2.6 laat de situatie van een potentiële energiehub zien waarbij verschillende bronnen, conversie en opslagmogelijkheden zijn toegevoegd. Elektriciteitsoverschotten kunnen omgezet worden in waterstof door middel van een electrolyse systeem, of via een warmtepomp warmte produceren.

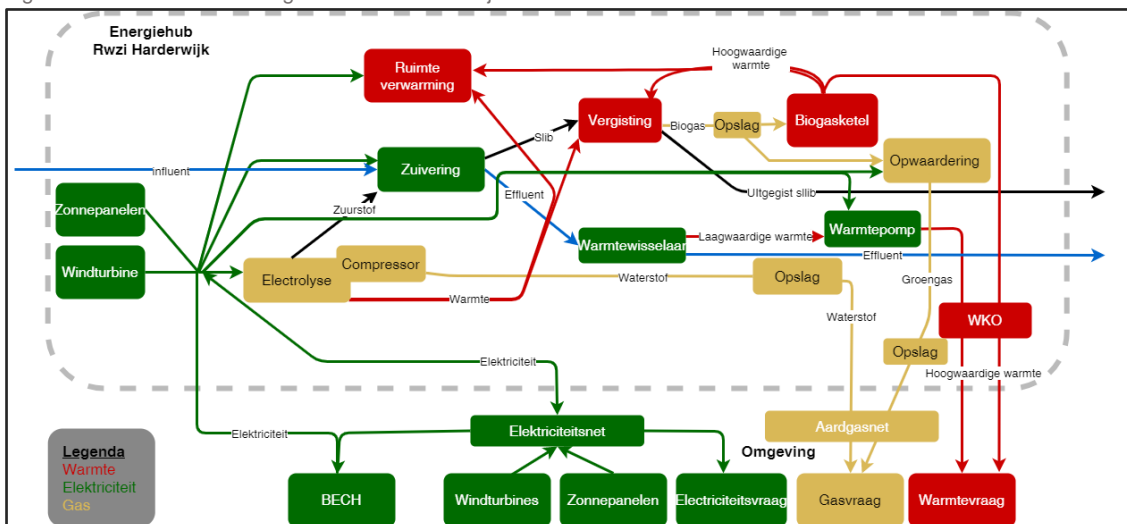
Bij de productie van waterstof door middel van een electrolyse systeem, komt warmte en zuurstof vrij welke ingezet kan worden in het zuiverings- en vergassingsproces.

Een warmtepomp kan warmte opwaarderen tot een warmte waar het gebruikt kan worden. Bronnen voor de warmtepomp kunnen de warmte afkomstig van het electrolyse systeem of effluent warmte zijn. Warmte afkomstig van de WKK is van hoog genoeg temperatuur om toegepast of opgeslagen te worden in een WKO.

Figuur 2.5 Stroom in de huidige situatie op rwzi Harderwijk



Figuur 2.6 Stroom voor energie hub rwzi Harderwijk

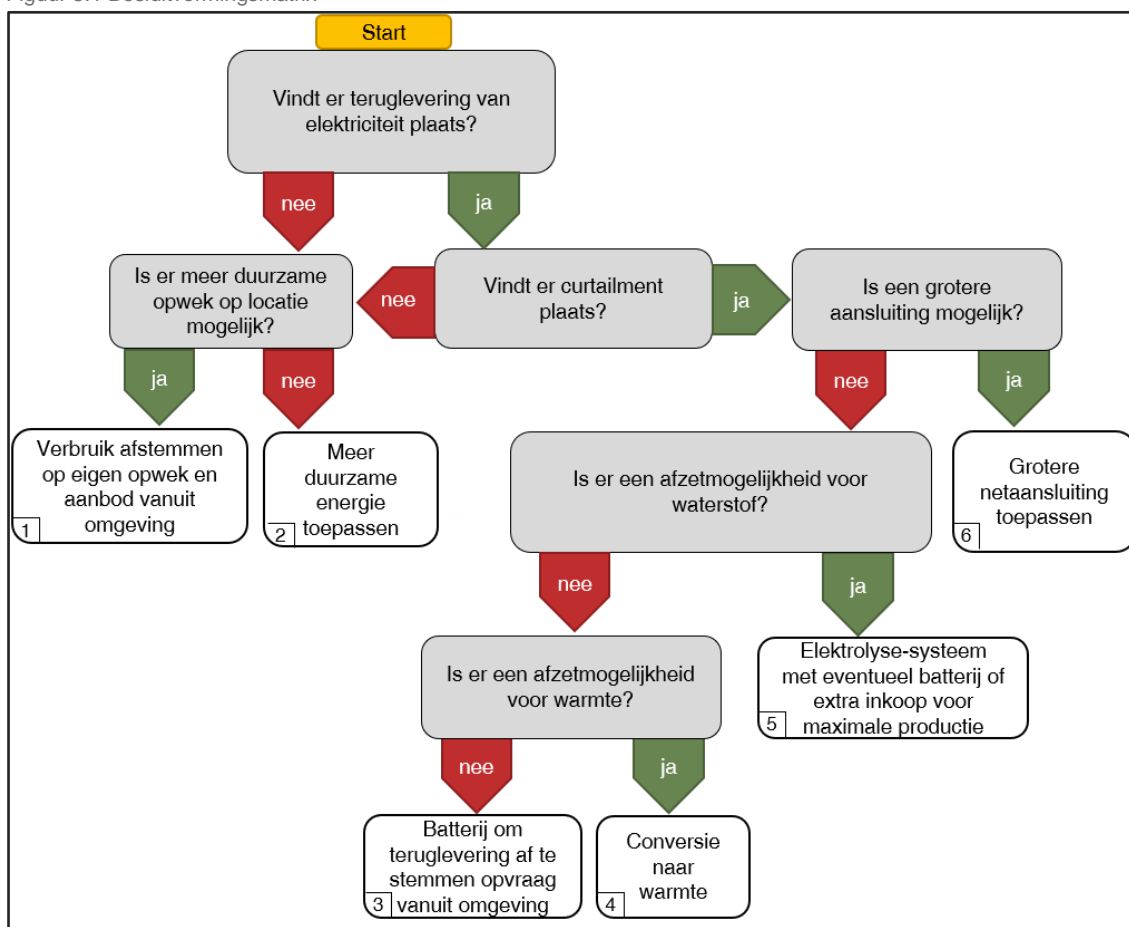


3 Resultaten

3.1 Opwek en verbruiksprofielen op rwzi

Door het combineren van een opwekprofiel met het verbruiksprofiel kan er inzicht worden verkregen of er op bepaalde momenten een tekort of een overschot aan elektriciteit is. Afhankelijk van de uitkomst van deze vergelijking, zijn er vervolgens verschillende strategieën die uitgevoerd kunnen worden om alle elektriciteit nuttig te benutten. Als hulpmiddel om tot een goede strategie te komen, is een besluitvormingsmatrix samengesteld. Deze is weergegeven in Figuur 3.1.

Figuur 3.1 Besluitvormingsmatrix



In deze matrix zijn een zestal strategieën geselecteerd die in de meeste situaties een oplossingsrichting kunnen bieden om meer duurzaam geproduceerde elektriciteit te kunnen faciliteren. De strategieën zijn niet gerangschikt op prioriteit en het is dus altijd mogelijk om direct een gewenste situatie te onderzoeken. Vanwege de grote complexiteit van een mogelijke energiehub zijn er afhankelijk van de situatie ook andere opties mogelijk. Deze besluitvormingsmatrix dient derhalve als ondersteuning bij eventuele strategische keuzes, maar de strategieën vergen vervolgens nog een nader onderzoek om de toepasbaarheid te toetsen. Ook in het geval een bepaalde strategie (succesvol) is onderzocht of zelfs is geïmplementeerd, kan het schema opnieuw worden doorlopen.

De genoemde zes strategieën worden hieronder uiteengezet:

1. Verbruik afstemmen op eigen opwek en aanbod vanuit omgeving.

In het geval dat er niet meer duurzame energie toegepast kan worden moet de omgeving beschouwd worden. Indien daar zich duurzame bronnen bevinden kan er gekeken worden naar de mogelijkheden om het eigen verbruik af te stemmen op de geringe eigen opwek en het aanbod vanuit de omgeving.

2. Meer duurzame energie toepassen.

In deze situatie vindt er geen curtailment plaats en is er meer duurzame opwek mogelijk. In dit geval is het gewenst om meer duurzame energie toe te passen, om zo ten eerste het eigen verbruik op te wekken. In de nieuwe situatie moet de besluitvormingsmatrix opnieuw doorlopen worden, aangezien er mogelijk dan wel curtailment plaats kan vinden.

3. Batterij om teruglevering af te stemmen op vraag vanuit omgeving.

Indien de eigen duurzame opwek niet geheel teruggeleverd kan worden, of dat de eigen opwek groter is dan het eigen verbruik, kan er gekeken worden naar de vraag vanuit de omgeving. Indien mogelijk kan een batterij overwogen worden om de eigen opwek af te stemmen op de vraag vanuit de omgeving.

4. Conversie naar warmte.

Bij een overschot aan eigen opwek en een vraag naar warmte voor ofwel eigen verbruik ofwel de omgeving kan het overschot worden omgezet in warmte. In deze situatie is het wel van belang dat de warmte ook getransporteerd kan worden naar de vraag, dus mogelijk is een warmtenet een vereiste. Mogelijk zou ook een warmte-opslag toegepast kunnen worden, waarin bijvoorbeeld zonne-energie uit de zomer opgeslagen wordt voor gebruik in de winter.

5. Elektrolyse-systeem met eventueel batterij of extra inkoop voor maximale productie.

In deze situatie is er een overschot aan duurzame energie, en een vraag naar waterstof. Dan kan een elektrolyse-systeem een uitkomst bieden. Het elektrolyse-systeem kan in de eerste instantie gebruikt worden om het overschot aan eigen opwek op te vangen. Indien dat niet toereikend is voor de waterstofvraag zijn er nog twee opties: een batterij toepassen om pieken in eigen productie alsnog te benutten, of extra energie inkopen. Voor dit systeem is wel essentieel dat de geproduceerde waterstof genoeg afzet heeft, aangezien waterstofopslag zeer kostbaar is. In de ideale situatie is een waterstofnet beschikbaar.

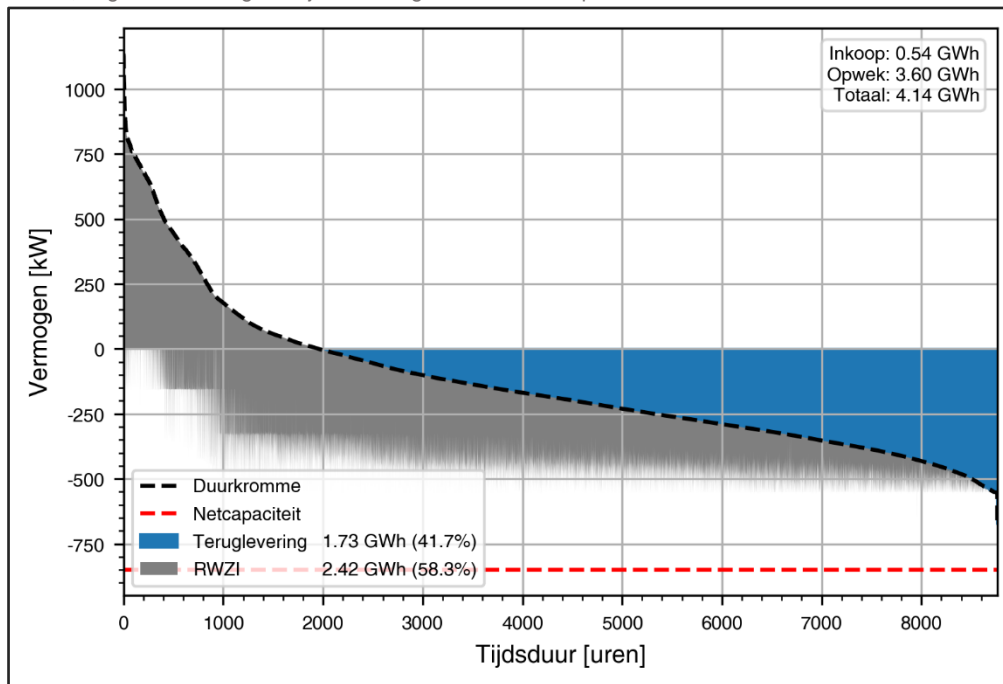
6. Grotere netaansluiting toepassen.

In deze situatie vindt er wel curtailment plaats, en is er ruimte voor een grotere netaansluiting. Om de hub-functie ten goede te komen is het in dit geval wenselijk de grotere aansluiting ook te realiseren.

3.1.1 Rwzi Harderwijk met WKK

Als startpunt van deze analyse wordt de situatie beschouwd van rwzi Harderwijk in combinatie met een WKK. De WKK produceert duurzame energie die grotendeels direct gebruikt wordt op de rwzi. Het maximale vermogen van de WKK is 550 kW. De belastingduurkromme van deze situatie is weergegeven in Figuur 3.2. Hieruit blijkt dat de wkk meer elektriciteit opwekt dan er door de rwzi verbruikt wordt. Hierdoor wordt 41,7% van de opgewekte elektriciteit teruggeleverd aan het net. Deze teruglevering valt binnen de aansluitcapaciteit van de netaansluiting.

Figuur 3.2 De belastingduurkromme van rwzi Harderwijk met de huidige WKK. Positieve vermogens zijn afkomstig van het net, negatieve vermogens zijn afkomstig van duurzame opwek.

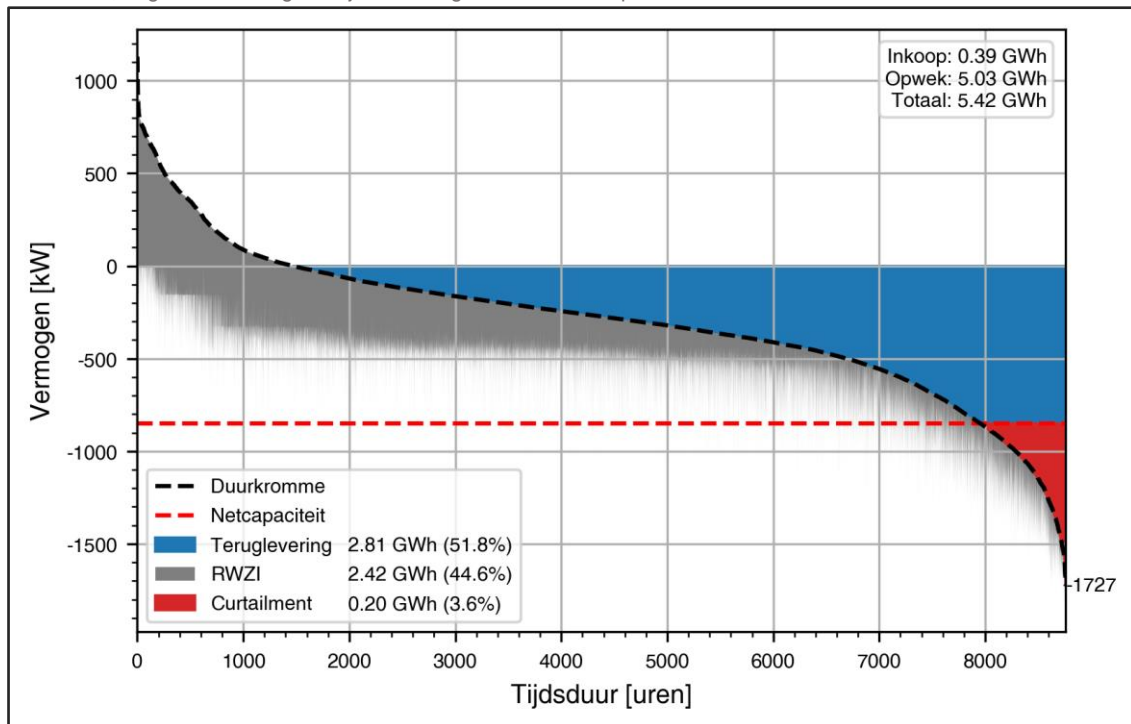


Op basis van de besluitvormingsmatrix kan er geconcludeerd worden dat optie 2: meer duurzame opwek toegepast en onderzocht kan worden, want er vindt geen curtailment plaats. Na het toevoegen van aanvullende elektriciteitsopwekking, zal de situatie opnieuw bekeken moeten worden en kan de matrix opnieuw worden doorlopen. Als eerste zal het zonnenveld toegevoegd worden, dit wordt behandeld in de volgende sectie waarbij de situatie van rwzi Harderwijk met de wkk en een zonnenveld als startpunt genomen wordt.

3.1.2 Rwzi Harderwijk met WKK en zonneveld

De belastingduurkromme in deze situatie is weergegeven in Figuur 3.3. Het piekvermogen van het zonneveld (1,7 MWp³) samen met de opwek van de WKK leidt tot een klein verlies van energie vanwege curtailment.

Figuur 3.3 De belastingduurkromme van rwzi Harderwijk met WKK en zonneveld. Positieve vermogens zijn afkomstig van het net, negatieve vermogens zijn afkomstig van duurzame opwek.



Aan de hand van de besluitvormingsmatrix zijn er enkele opties:

- Optie 3: Op basis van de (beperkte) meetdata van Liander, is het vermoeden dat de beperking in teruglevering wordt veroorzaakt door het aanbod van zonne-energie door andere aangeslotenen op de middenspanningskabel. De piek in teruglevering zal dus plaatsvinden rond de middag, net zoals het zonneveld bij de rwzi. Om de congestie op de middenspanningskabel te verlichten, zijn er verschillende opties mogelijk. Allereerst is het aan te raden om het zonneveld op de rwzi in een oost/west opstelling te realiseren, waardoor de piek output wordt verlaagd. In het model is hier reeds van uit gegaan. Ten tweede zou de wkk kunnen worden teruggeregeld tijdens de momenten van veel zonnenschijn. Ten derde zou er een batterij kunnen worden bijgeplaatst om ten tijde van piekproductie de teruglevering aan het net te beperken. Aangezien de curtailment in dit scenario gering is, zal het zich waarschijnlijk niet lonen om deze investering te doen.
- Optie 4: Er is 1,7 GWh aan duurzame opwek aanvullend ter beschikking. Indien dit 1-op-1 omgezet wordt in warmte levert dit 6.120 GJ op en kunnen hiermee ongeveer 140 huishoudens per jaar van warmte worden voorzien. Het jaarprofiel van het overschot aan duurzame energie is

³ Het piekvermogen van een zonnepark toont het opgestelde vermogen aan zonnepanelen. Aangezien een PV paneel gelijkstroom (DC) produceert en het elektriciteitsnet is ingericht op wisselstroom (AC), worden er omvormers geplaatst. Afhankelijk van o.a. de oriëntatie van de panelen en de zonne-instraling wordt het omvormervermogen geoptimaliseerd. Voor het beoogde zonnepark van 1,7 MWp wordt een maximale output (AC) vermogen van 1,3 MW verwacht.

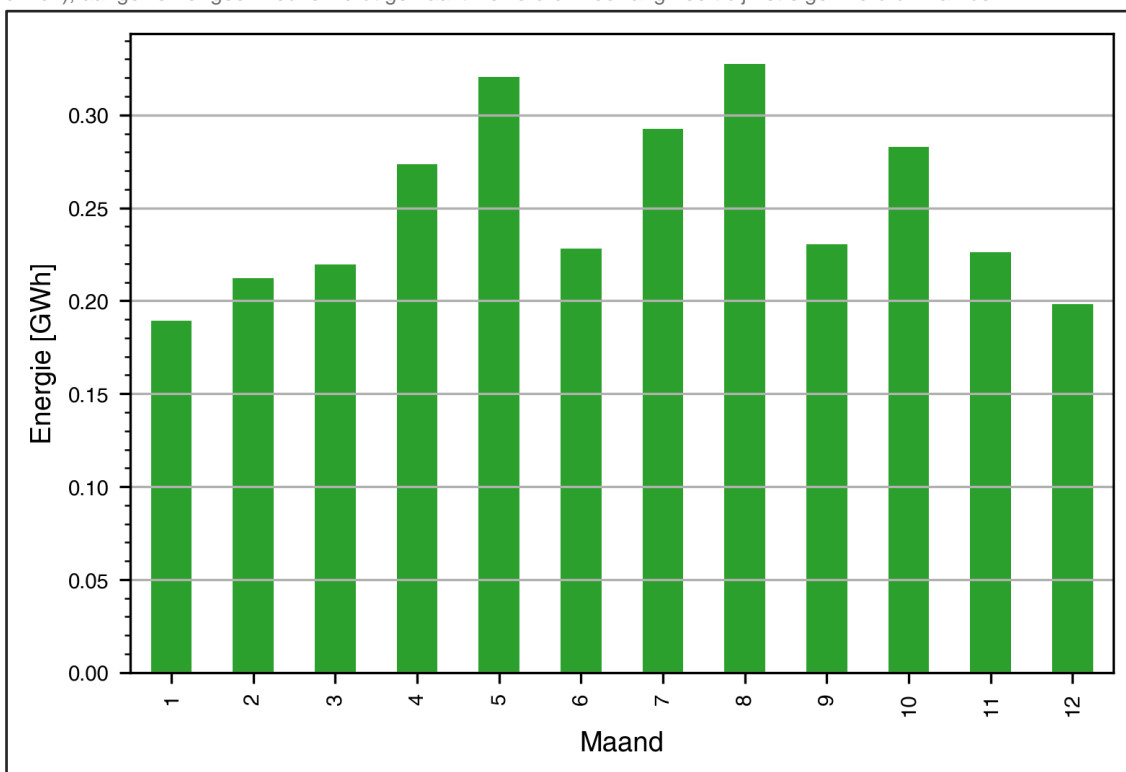
weergegeven in Figuur 3.4. Hieruit blijkt wel dat vooral in de zomer een overschot is, terwijl er juist in de winter een vraag naar warmte is.

- Optie 5: Vanwege het relatief kleine vermogen en kleine beschikbaarheid van duurzame energie (vanwege zonne-energie) wordt er niet geadviseerd om een elektrolyse-systeem toe te passen. Dit zal een relatief duur systeem vereisen die weinig vollasturen kan draaien.
- Optie 6: Vanwege de zeer geringe curtailment (3,6%) wordt niet geadviseerd om een grotere netaansluiting toe te passen. Dit zal in dit geval relatief weinig winst opleveren.

In deze situatie wordt er nog geen rekening gehouden met mogelijke flexibiliteit in de inzet van de wkk, en vind er mede om deze reden curtailment van zonne-energie plaats. Echter is de wkk, in tegenstelling tot opwek uit zon (en later ook uit wind), wel regelbaar. In de meest optimale situatie zou de wkk afgeregeld kunnen worden op het moment dat het zonneveld de piekproductie levert. Door het afregelen van de wkk dient er biogas gebufferd te worden. De grootte van de benodigde biogas opslag hangt af van het volume aan biogas dat door de curtailment niet wordt verbrand, wat bepaald wordt door de tijdsduur van de gewenste buffering en de intervalduur tussen momenten waarop er gebufferd wordt (de buffer moet immers ook weer geleegd kunnen worden).

Om als rwzi zelfvoorzienend te zijn in haar elektriciteitsbehoefte, moet de wkk op jaarbasis ongeveer 1,8 GWh elektriciteit produceren. Om aan de piek vraag te kunnen voldoen, moet de wkk een minimale capaciteit hebben van 1.130 kW. Het dimensioneren van de wkk op deze piekvraag is echter niet wenselijk, aangezien deze zich slechts enkele uren per jaar voordoet. De resterende elektriciteitsbehoefte dient dan nog altijd te worden afgenomen van het elektriciteitsnet.

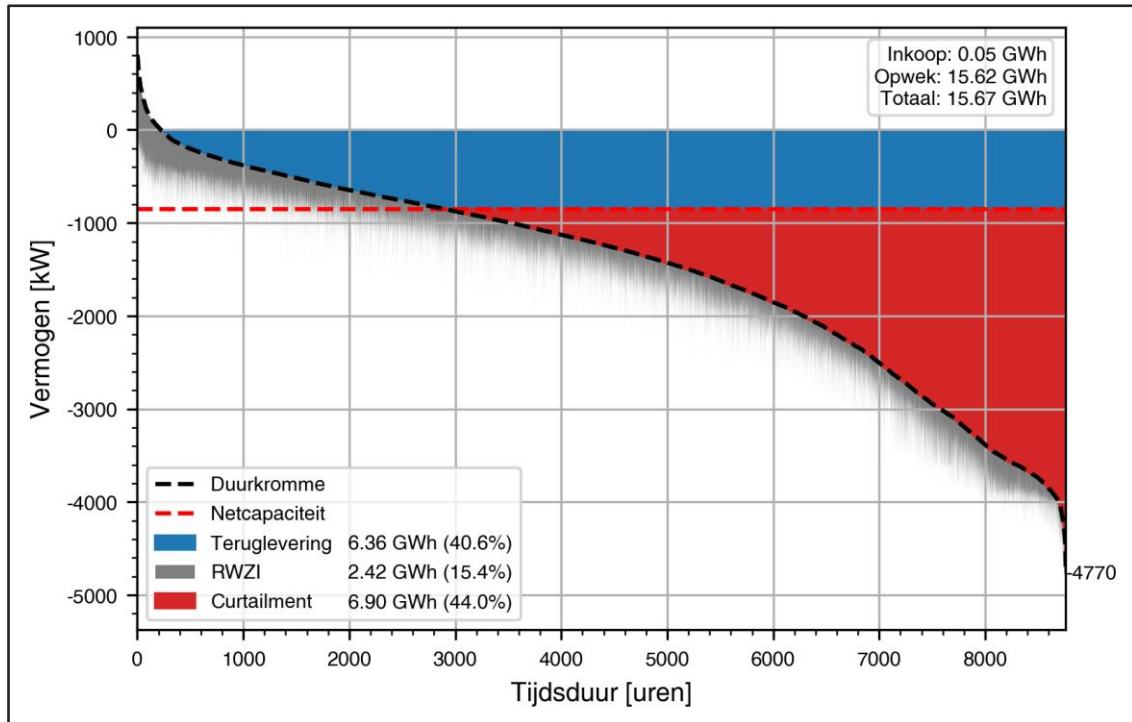
Figuur 3.4 Aanvullend beschikbare duurzame energie per maand van rwzi Harderwijk met een WKK en een zonneveld. Toelichting 1: In de gebruikt dataset heeft de rwzi meer verbruikt en de wkk minder geproduceerd tijdens de maand juni. Toelichting 2: Deze energiestroom wordt niet uitgesplitst c.q. is niet afkomstig van specifieke productie-installaties (wkk of zon), aangezien er geen keuze wordt gemaakt welke bron voorrang heeft bij het eigen verbruik van de rwzi.



3.1.3 Rwzi Harderwijk met WKK, zonneveld en windturbine

De situatie verandert aanzienlijk wanneer ook de windturbine (3,5 MW) toegevoegd wordt, zie de belastingduurkromme in Figuur 3.5. Vanwege het beperkte vermogen voor teruglevering van de netaansluiting is er een grote hoeveelheid duurzame energie die niet ontsloten kan worden via het elektriciteitsnetwerk in de huidige situatie.

Figuur 3.5 De belastingduurkromme van rwzi Harderwijk met WKK, zonneveld en windturbine. Positieve vermogens zijn afkomstig van het net, negatieve vermogens zijn afkomstig van duurzame opwek.



Om deze energie toch te benutten zijn de volgende opties mogelijk:

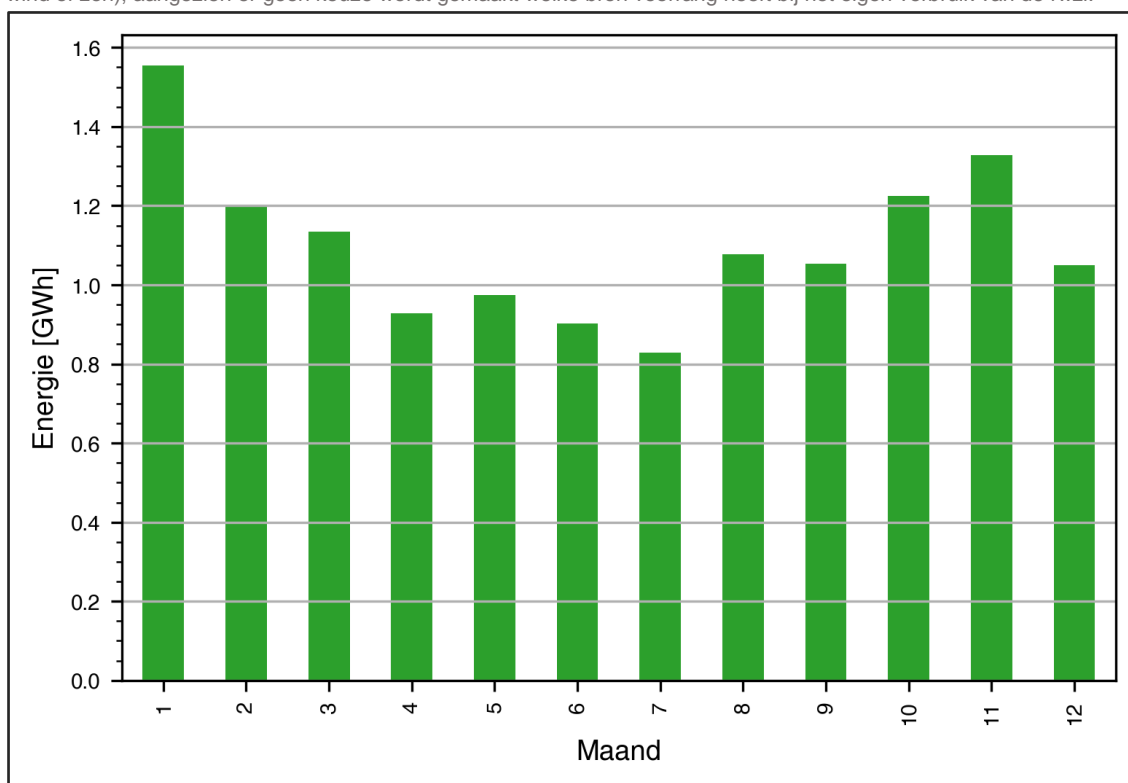
- Optie 3: De congestie met betrekking tot teruglevering heeft met name betrekking op de zonnepiek tijdens middaguren. Aangezien windenergie een beperkte gelijktijdigheid kent met zonne-energie, zou in theorie er op flexibele basis meer dan 0,85 MW teruggeleverd kunnen worden buiten de zonnepiek om. Tijdens bewolkte dagen en de nachtelijke uren zou dit mogelijk zelfs tot de maximale capaciteit van de netaansluiting kunnen (~2MW), aangezien de andere aangeslotenen waarschijnlijk niet hun maximale piekvermogen in teruglevering zullen aanspreken. Een andere mogelijkheid is om het verbruik van elektriciteit te verhogen, om zo de teruglevering te beperken. De situatie van een constante energievraag vanuit de omgeving wordt in Voorbeeld 1 uitgewerkt. Het gebruiken van een batterij is in deze situatie praktisch gezien niet aan te bevelen, omdat ten tijde van veel windproductie de batterij snel vol loopt en het curtailment volume van 6,9 GWh (rode oppervlakte) bijna 7 keer zo groot is als het volume dat teruggeleverd kan worden op momenten dat het maximale terugleververmogen niet wordt benut (ongeveer 1 GWh). Dit betekent dat alleen een batterij (ongeacht hoe groot vermogen/volume) in geen enkel geval ervoor kan zorgen dat alle elektriciteit kan worden teruggeleverd, tenzij het terugleververmogen (tijdelijk) kan worden verhoogd, zoals hiervoor is beschreven.

- Optie 4: Het 13,2 GWh overschot aan duurzame opwek kan omgezet worden in warmte. Indien dit 1-op-1 omgezet wordt in warmte levert dit 47.520 GJ en kunnen ongeveer 1000 huishoudens per jaar van warmte worden voorzien. Het maandelijkse overschot is weergegeven in Figuur 3.6. Er is meer warmte beschikbaar in de winter, wat op hoofdlijnen overeenkomt met de vraag naar warmte bij huishoudens. Echter is er ook in de zomermaanden nog steeds veel warmte beschikbaar, zo'n 1 GWh. Om dit ook goed te kunnen gebruiken dient er een vorm van warmteopslag te worden toegepast.
- Optie 5: Het grote overschot aan duurzame energie kan goed gebruikt worden in een elektrolyse-systeem. Het formaat van het elektrolyse-systeem hangt af van de vraag naar waterstof. Om een beeld te schetsen van de mogelijkheden wordt een 2,5 MW electrolyser hieronder uitgewerkt in Voorbeeld 2. Deze situatie verschilt van de pilot Kampen vanwege andere verhoudingen van duurzame opwek en een andere aansluitcapaciteit.
- Optie 6: Een grotere netaansluiting is met het huidige energieoverschot gewenst.

Om als rwzi zelfvoorzienend te zijn, moet de wkk op jaarbasis ongeveer 0,2 GWh elektriciteit produceren. Om aan de piek vraag te kunnen voldoen, moet de wkk een minimale capaciteit hebben van 825 kW.

Figuur 3.6 Aanvullend beschikbare duurzame energie per maand van rwzi Harderwijk met een WKK, windturbine en een zonnepark, voor nader te bepalen toepassingen.

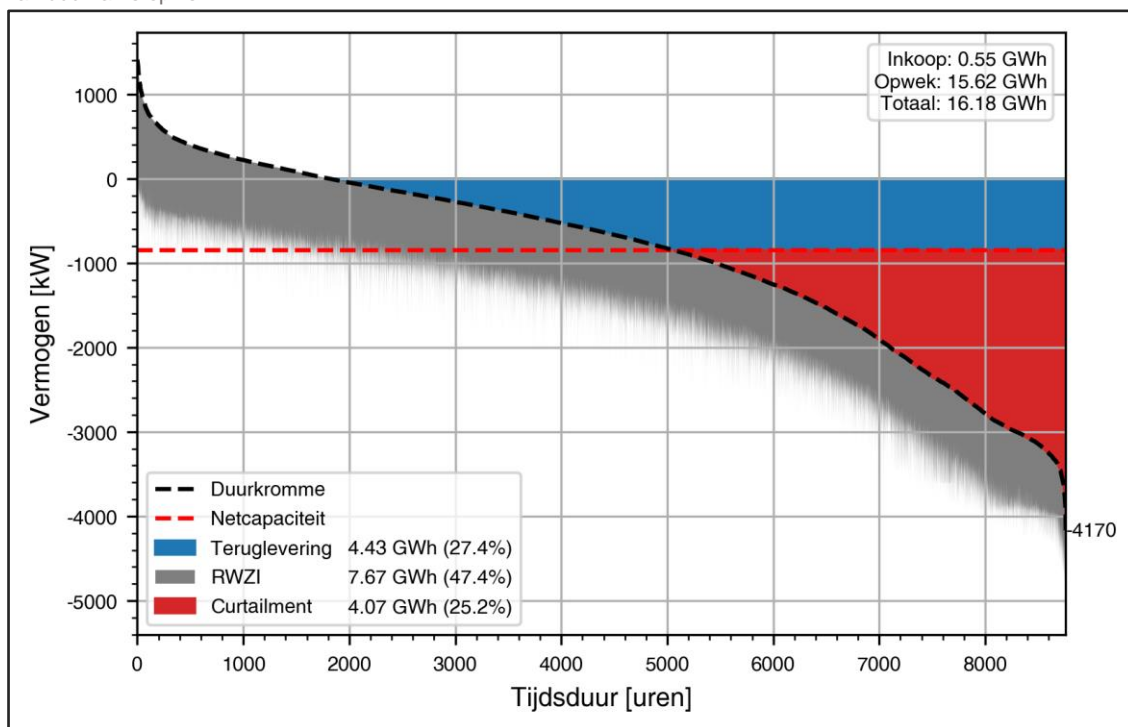
Toelichting: Deze energiestroom wordt niet uitgesplitst c.q. is niet afkomstig van specifieke productie-installaties (wkk, wind of zon), aangezien er geen keuze wordt gemaakt welke bron voorrang heeft bij het eigen verbruik van de rwzi.



Voorbeeld 1: Constante vraag vanuit omgeving

Indien er een constante energievraag in de nabijheid is zoals bijvoorbeeld van een datacentrum, of in het geval van Harderwijk de BECH, ziet de gecombineerde belastingduurkromme er uit als weergegeven in Figuur 3.7. Hier is uitgegaan van een constant vermogen van 600 kW, wat gelijk is aan de behoefte van de BECH. Echter kunnen de conclusies die in deze situatie getrokken worden ook worden toegepast op andere gebruikers met een constante behoefte. De extra energievraag is opgeteld bij de energievraag van de rwzi om de belastingduurkromme weer te kunnen geven. Dit vereist wel dat de rwzi en de betreffende externe partij met een constante energiebehoefte gebruik maken van dezelfde aansluiting of is aangesloten op dezelfde middenspanningskabel als de rwzi. Het effect van deze extra energievraag is dat de belastingduurkromme omhoog schuift met 600 kW. Hierdoor wordt er minder curtailed, en minder teruggeleverd. Tegelijkertijd wordt er ook meer energie ingekocht vanuit het net om aan deze verhoogde energiebehoefte te kunnen voldoen op momenten dat er te weinig duurzame opwekking is.

Figuur 3.7 De belastingduurkromme van rwzi Harderwijk met WKK, zonneveld en windturbine en een constant verbruik van 600 kW vanuit de omgeving. Positieve vermogens zijn afkomstig van het net, negatieve vermogens zijn afkomstig van duurzame opwek.

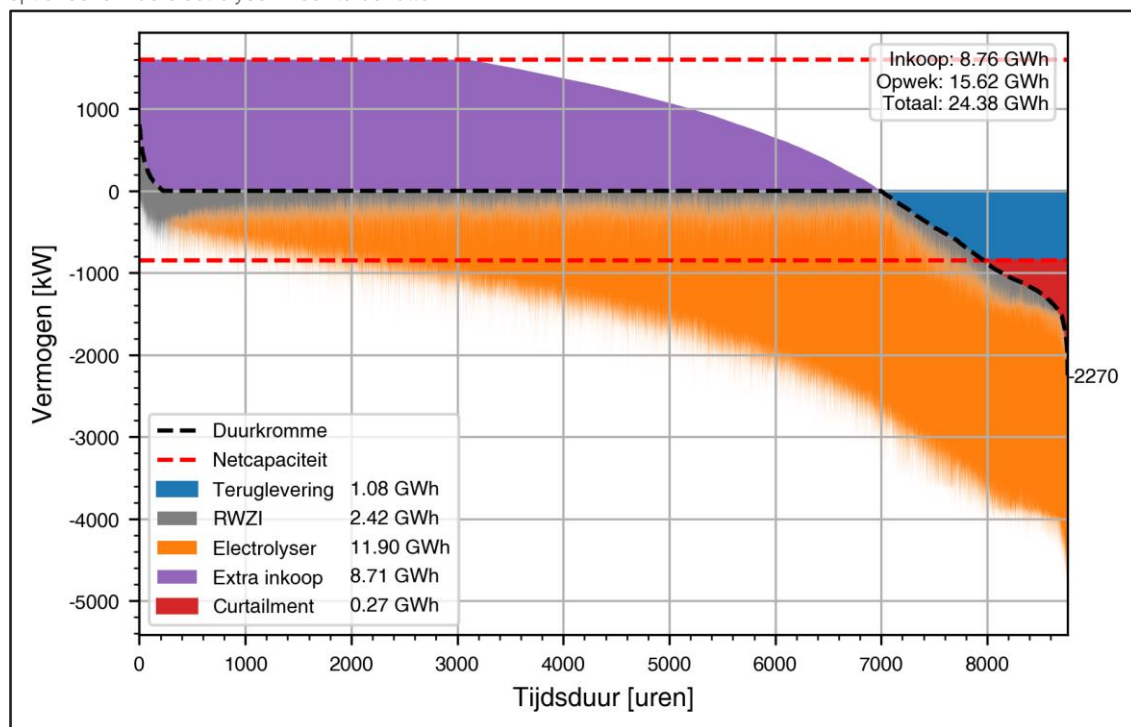


Voorbeeld 2: Toepassing van een elektrolyse-systeem

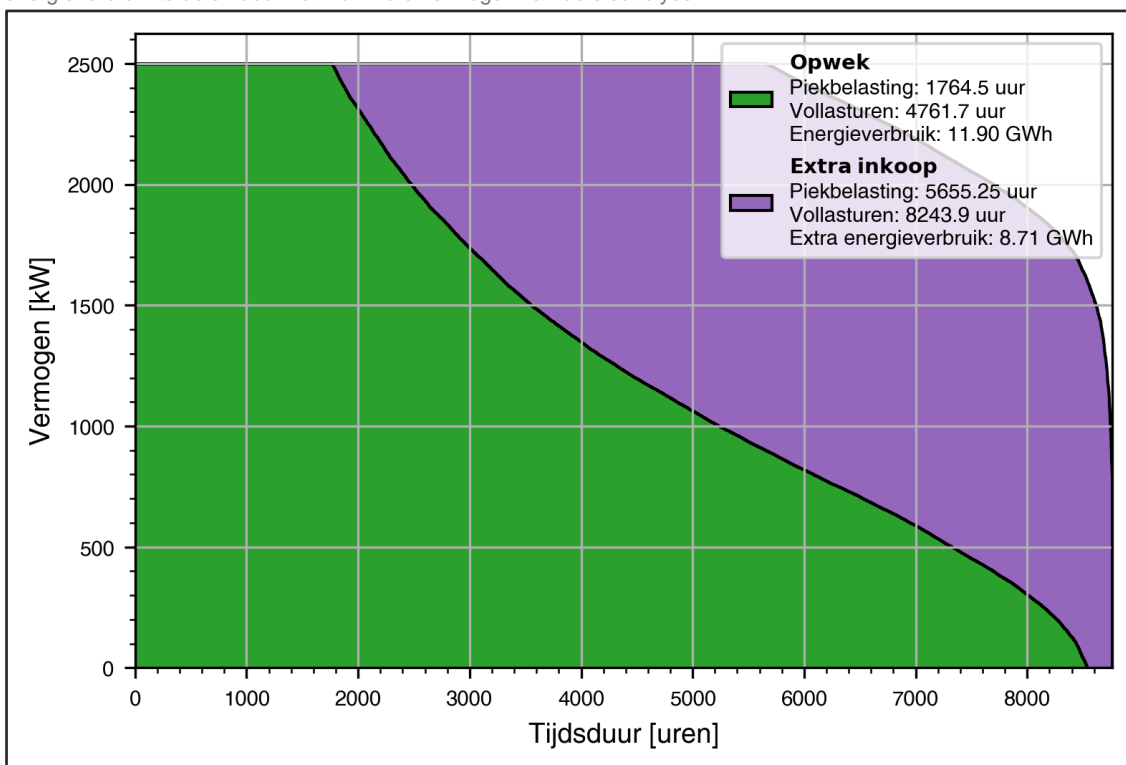
Om een beeld te geven van de mogelijkheden wordt in deze sectie een 2,5 MW elektrolyse-systeem toegepast op rwzi Harderwijk met WKK, windturbine en zonnepark. De resulterende belastingduurkromme van de energiehub is weergegeven in Figuur 3.8. Hieruit blijkt dat een significant gedeelte van de curtailde energie nu gebruikt kan worden in de electrolyser.

De belastingduurkromme van de electrolyser zelf is weergegeven in Figuur 3.9. Hierin is te zien dat de electrolyser ruim 4750 vollasturen draait indien alleen de eigen duurzame opwek gebruikt wordt. Indien gewenst kan dit worden verhoogd naar ruim 8200 vollasturen als er ook nog maximaal elektriciteit wordt ingekocht (8,7 GWh). Afhankelijk van de inkoop zal er gemiddeld 19 tot 32.5 ton waterstof en 110 tot 190 ton zuurstof per maand geproduceerd worden, weergegeven in Figuur 3.10. Vanwege de nu nog hoge investeringskosten van een waterstofsysteem, is er een hoog aantal vollasturen nodig om financieel uit te kunnen. Om deze reden is het mogelijk nu nog noodzakelijk om elektriciteit extra in te kopen.

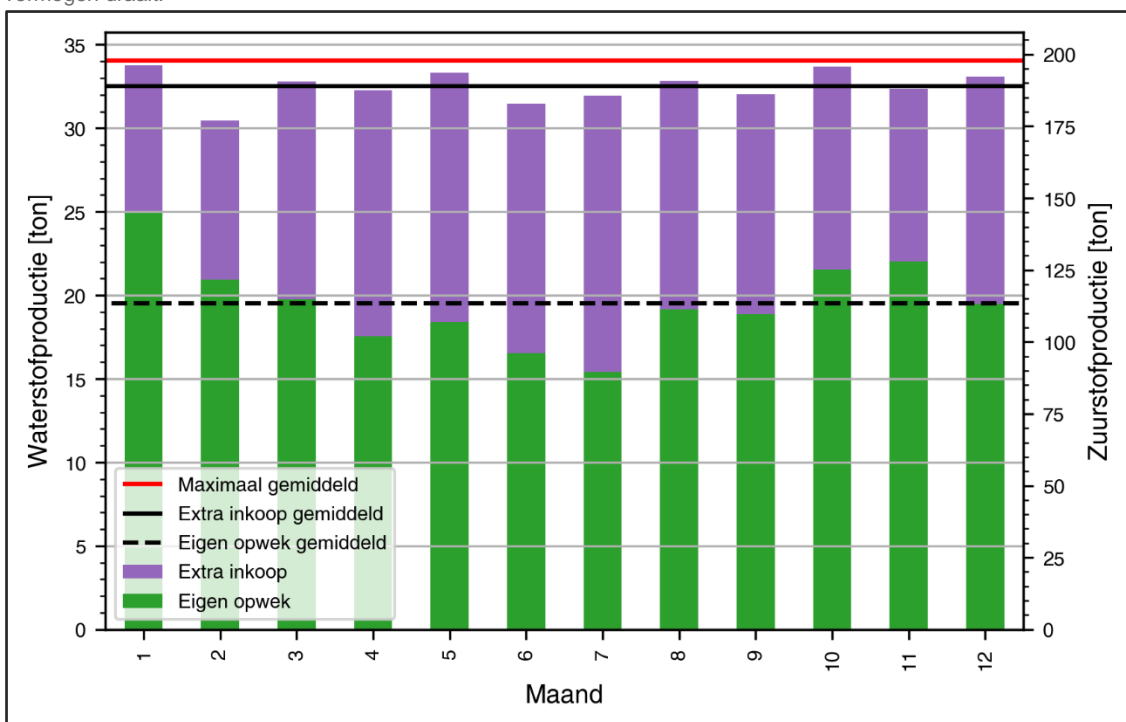
Figuur 3.8 Belastingduurkromme van rwzi Harderwijk met een WKK, zonnepark, windturbine en electrolyser. Positieve vermogens zijn afkomstig van het net, negatieve vermogens zijn afkomstig van duurzame opwek. De extra inkoop is optioneel om de electrolyser meer te benutten.



Figuur 3.9 Belastingduurkromme van de electrolyser. Het aantal vollasturen wordt berekend door het totale energieverbruik te delen door het maximale vermogen van de electrolyser.



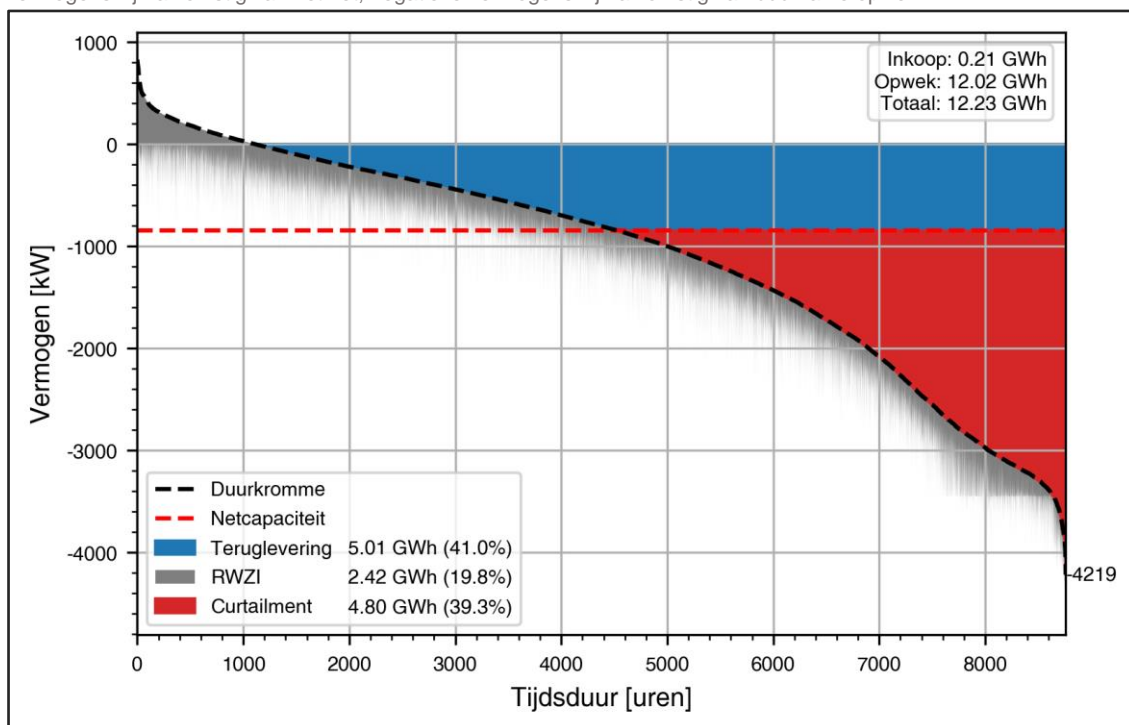
Figuur 3.10 Waterstof- en zuurstofproductie per maand. Het groene vlak geeft de productie weer indien er alleen eigen opwek wordt gebruikt. Het paarse vlak geeft de maximale productie weer indien er nog maximaal energie wordt ingekocht van het net. De rode lijn geeft de maximale productie weer indien de electrolyser ten alle tijden op vol vermogen draait.



3.1.4 Rwzi Harderwijk met zonneveld en windturbine, zonder WKK

Aan het eind van de levensduur van de huidige WKK zal deze mogelijk niet voor eenzelfde WKK vervangen worden maar kan er voor worden gekozen een andere verwaarding van het biogas toe te passen. Om inzicht te geven in deze situatie zonder WKK wordt hier de situatie beschouwd waarin wel het zonneveld en de windturbine aanwezig zijn, maar geen WKK. Dit levert onderstaande belastingduurkromme op, zie Figuur 3.11.

Figuur 3.11 De belastingduurkromme van rwzi Harderwijk met zonneveld en windturbine, zonder WKK. Positieve vermogens zijn afkomstig van het net, negatieve vermogens zijn afkomstig van duurzame opwek.



De opwek is echter nog steeds zeer groot, waardoor er veel energie verloren gaat aan curtailment. Aan de hand van de besluitvormingsmatrix zijn de volgende opties beschikbaar:

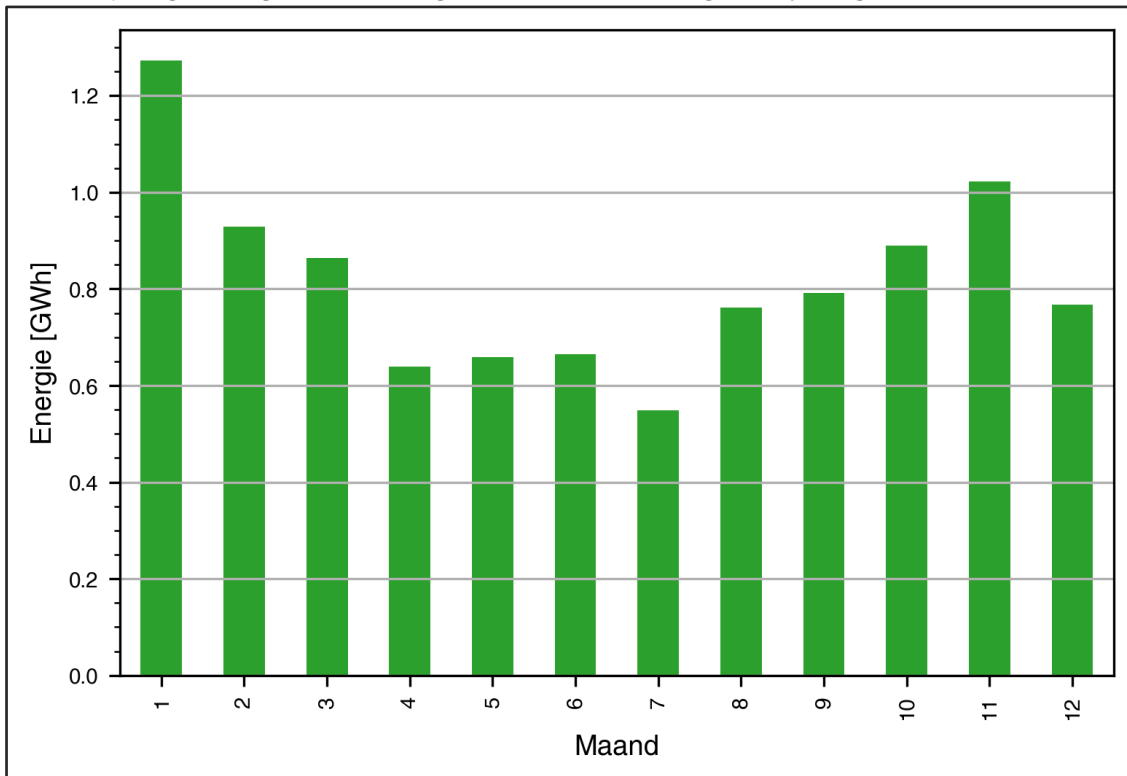
- Optie 3: De uitwerking van deze optie is in grote lijnen gelijk aan de situatie van paragraaf 3.1.3, met als verschil dat het vaste productieprofiel van de wkk wegvalt. Hierdoor is er in theorie meer ruimte om overschot aan elektriciteit door middel van een batterij te verplaatsen naar momenten waarop de teruglevercapaciteit niet volledig wordt benut. In het meest gunstige geval kan dit de curtailment verlagen naar 2,4 GWh.
- Optie 4: Het overschot aan duurzame opwek van 9,6 GWh kan omgezet worden in warmte. Indien dit 1-op-1 omgezet wordt in warmte levert dit 34.560 GJ en kunnen ongeveer 800 huishoudens per jaar van warmte worden voorzien. Het overschot per maand is weergegeven in Figuur 3.12. Wederom is er meer energie beschikbaar in de winter, wat overeenkomt met de warmtevraag. Echter is er ook nog veel energie beschikbaar in de zomer, waardoor een vorm van warmteopslag nodig zal zijn.
- Optie 5: Het grote overschot aan duurzame energie kan goed gebruikt worden in een elektrolyse-systeem. Het formaat van het elektrolyse-systeem hangt af van de vraag naar waterstof. Indien

een 2,5MW electrolyser wordt toegepast is de situatie vergelijkbaar met de vorige sectie. Echter zal door de kleinere opwek gemiddeld 15 tot 33 ton waterstof en 75 tot 165 ton zuurstof per maand geproduceerd worden, afhankelijk van hoeveel stroom er nog extra ingekocht wordt.

- Optie 6: Een grotere netaansluiting is met het huidige energieoverschot gewenst.

Figuur 3.12 Overschot aan duurzame energie per maand van rwzi Harderwijk met een windturbine en een zonnepark, zonder WKK.

Toelichting: Deze energiestroom wordt niet uitgesplitst c.q. is niet afkomstig van specifieke productie-installaties (wkk, wind of zon), aangezien er geen keuze wordt gemaakt welke bron voorrang heeft bij het eigen verbruik van de rwzi.



3.2 Flexibiliteit in de netaansluiting

Op veel plaatsen in Nederland overschrijden de aanvragen bij de netbeheerders voor nieuwe transportcapaciteit de draagkracht van het netwerk. Er ontstaan steeds meer situaties waar er geen of beperkte capaciteit is om duurzaam opgewekte energie af te kunnen voeren of te voldoen aan de piekvraag in elektriciteitsverbruik; dit wordt congestie genoemd.

In de regio Harderwijk doet dit probleem zich ook voor. Zo heeft de rwzi te maken met een beschikbare transportcapaciteit voor afname van het net van maximaal 1,6 MW en 0,85 MW voor teruglevering aan het net. De fysieke capaciteit van de netaansluiting van de rwzi is 2 MVA (~2MW), wat betekent dat de rwzi contractueel gezien niet de gehele netaansluiting mag benutten. De maximale capaciteit voor afname is gerelateerd aan congestie op het verdeelstation Lorentz, terwijl de maximale capaciteit voor teruglevering is gerelateerd aan congestie op de middenspanningskabel "LRZ 10-1V10" waar de rwzi op is aangesloten.

- **Benutten van de reserve capaciteit**
Het huidige elektriciteitsnetwerk is redundant aangelegd om een stabiele en betrouwbare elektriciteitsvoorziening te garanderen. Er is namelijk een gedeelte van het netwerk gereserveerd

om deze garantie te kunnen leveren. Dit betekent dat er in veel gevallen fysiek gezien nog wel (reserve)capaciteit beschikbaar is, maar wordt er aangegeven dat er geen transportcapaciteit meer beschikbaar is. Het is de vraag of alle afnemers en producenten van elektriciteit deze zekerheid van levering, en daarmee reserve netwerkcapaciteit, te allen tijde nodig hebben. Er kan namelijk in sommige gevallen de mogelijkheid bestaan om de capaciteit van het netwerk (tijdelijk) te vergroten door de reservecapaciteit erbij te betrekken, of de niet gebruikte capaciteit tijdelijke toe te wijzen aan een andere aangeslotene, zonder dat er geïnvesteerd hoeft te worden in fysieke netverzwaringen. Hier zou eventueel een financiële prikkel aan verbonden kunnen worden.

- **Leveringszekerheid en capaciteit voor levering en in gebruik verschillend**

Voorheen konden de meeste aansluitingen geclassificeerd worden als een verbruiker, dan wel opwekker. In de huidige energievoorziening is een shift gaande waarbij er ook aansluitingen zijn waar zowel wordt opgewekt als verbruikt. Rwwi Harderwijk bijvoorbeeld, met de ambitie om een energie hub functie in te nemen, zal zelf energie opwekken, maar om de zuivering te garanderen, zal de netaansluiting voor het verbruik van elektriciteit ook nog behouden worden. In een eventueel nieuw systeem zou er onderscheid gemaakt kunnen worden in de gecontracteerde capaciteit en leveringszekerheid van de elektriciteit die bestemd is voor verbruik, dan wel productie. Als voorbeeld zou er gesteld kunnen worden dat er een dubbele aansluiting van 2MVA geïnstalleerd wordt, waarbij voor de verbruik kant een gegarandeerde levering van 1,6 MVA wordt gecontracteerd, waardoor het zuiveringsproces geborgd is, en een flexibele capaciteit voor teruglevering van $2 * 2MVA = 4MVA$ mogelijk is. Uit de analyse blijkt dat bij een aansluitcapaciteit van 3 tot 3,5 MVA, er vrijwel geen curtailment is. Echter moet er wel benadrukt worden dat dat een potentiële aansluitcapaciteit voor teruglevering van 4 MVA niet gegarandeerd is, en de capaciteit in dit hypothetische scenario afhankelijk is van de bezetting van het net per moment van de dag.

- **Per tijdseenheid capaciteit beschikbaar te stellen**

Bij het vaststellen van de beschikbare transportcapaciteit, wordt er gekeken naar de gecombineerde gecontracteerde transportcapaciteit van alle aangeslotenen. Hierdoor is het mogelijk voor alle verbruikers en producenten om tegelijk hun aansluiting maximaal te benutten zonder dat dit problemen voor het net oplevert. In de praktijk zal de totale gecontracteerde capaciteit van het netwerk slechts sporadisch gebruikt worden. Op basis van meetdata van Liander van verdeelstation Lorentz is er vanaf 2018 tot heden slechts een handvol dagen geweest waarop de maximale capaciteit van 18 MVA is overschreden. Dit leidt ertoe dat er geen optimaal gebruik gemaakt wordt van het netwerk doordat er op veel momenten van de dag de capaciteit van het netwerk niet benut wordt, terwijl er wel gesproken wordt over een capaciteitstekort. Optimaler gebruik maken van de infrastructuur zorgt ervoor dat er minder investeringen nodig zijn voor netverzwaring, waardoor de maatschappelijke kosten lager blijven. Een manier om bijvoorbeeld beter gebruik te maken van de beschikbare capaciteit is door capaciteit per tijdseenheid beschikbaar te stellen. Hierdoor zouden duurzame energieprojecten, in combinatie met opslag of conversie, wel op het net passen door terug te leveren op momenten dat deze niet volledig wordt belast. Hiervoor is een structuur nodig dat de capaciteit van het netwerk gebruikt kan worden indien deze beschikbaar is, zonder dat er een garantie is.

- **Het delen van een aansluiting met de bijbehorende capaciteit met andere aangeslotenen**
Veel klanten hebben hun aansluitcapaciteit berust op hun piekvraag. Wanneer verschillende afnemers op een ander moment hun piek hebben, of verbruikers onderling hun verbruik kunnen afstemmen, zou het mogelijk zijn dat de gedeelde aansluitcapaciteit lager is dan de som van de losse aansluitcapaciteiten. Hiermee wordt er een bijdrage geleverd aan het oplossen van congestie.

De ideeën en mogelijkheden die in deze paragraaf geschetst zijn, zijn conceptueel en theoretisch. Voordat dergelijke constructies mogelijk zijn, moet dat vastgelegd worden in de wet- en regelgeving. De zeggenschap hiervoor ligt niet in het machtsveld van de waterschappen en rwzi's, maar in die van de netbeheerders.

De mogelijkheden die een netbeheerder vervolgens biedt, geldt voor alle klanten in het biedingsgebied en er mag niet gediscrimineerd worden tussen klanten. Als bepaalde mogelijkheden vergeven worden aan een rwzi, creëert dat jurisprudentie voor andere partijen en om deze reden zullen netbeheerders geneigd zijn om alles eerst goed door te lichten en vast te leggen.

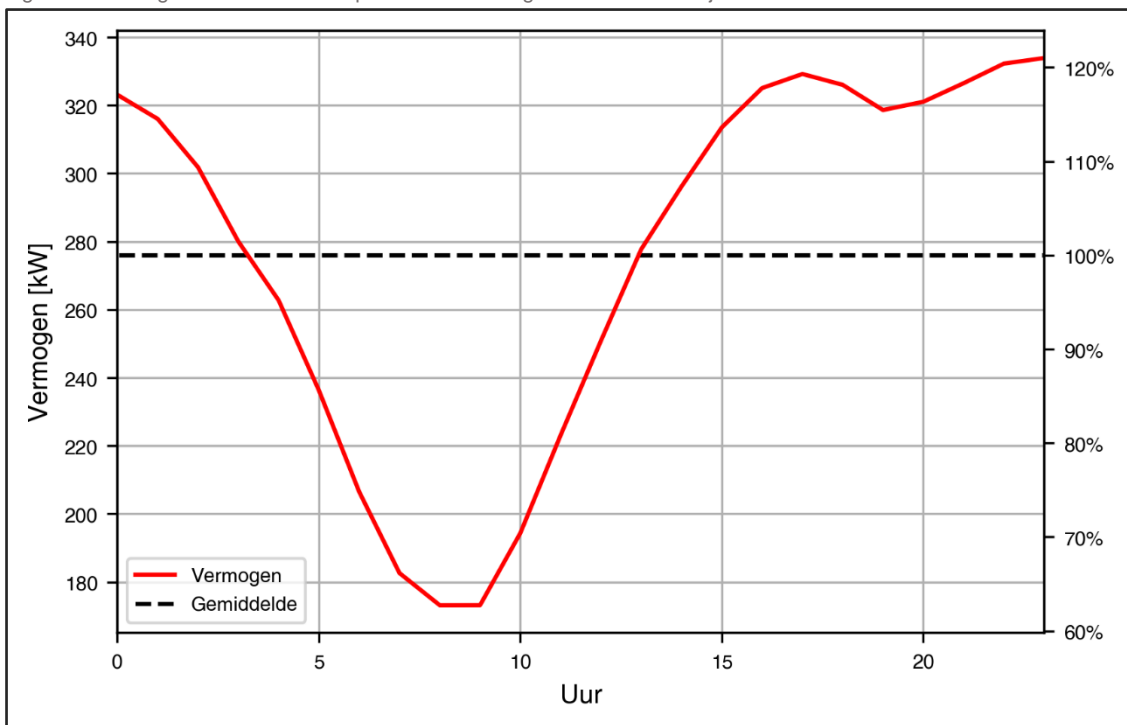
3.3 Flexibiliteit verbruik op de rwzi

De potentiële flexibele inzet van een rwzi is afhankelijk of de capaciteit voor het grootste gedeelte van de tijd volledig wordt ingezet, of dat er overcapaciteit is om flexibel te benutten. Indien systemen overgedimensioneerd zijn, is er meer potentie om flexibiliteit toe te passen.

3.3.1 Flexibiliteit in het elektriciteitsverbruik

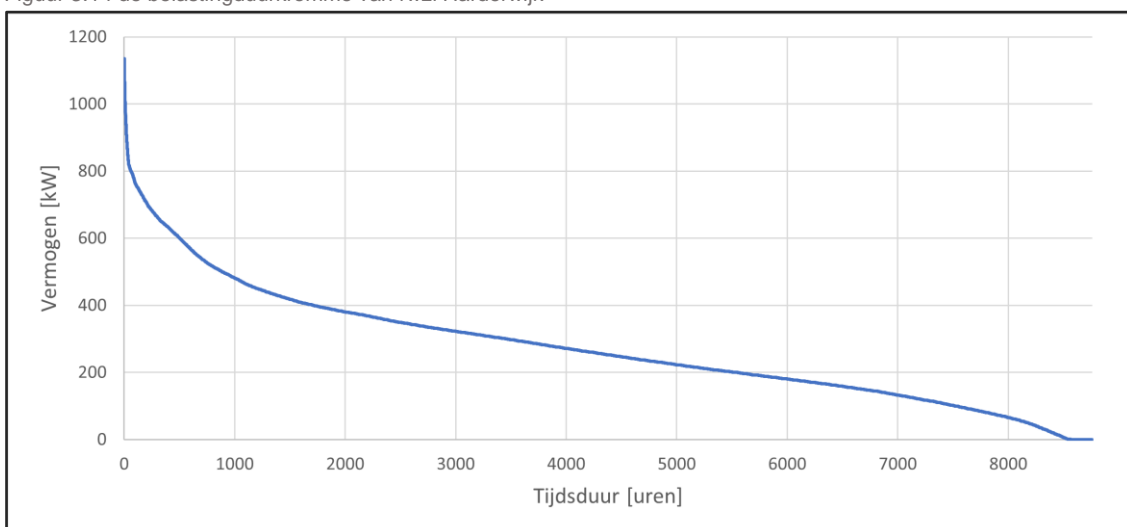
Het verbruik van de rwzi heeft een vast dagelijks patroon en hangt samen met het inkomende influent. Het gemiddelde verbruiksprofiel is weergegeven in [Figuur 3.13](#). In het zuiveringsproces wordt de meeste elektriciteit verbruikt tijdens de beluchting, namelijk 50% - 60%.

Figuur 3.13 Het gemiddelde verbruik per uur van de dag van rwzi Harderwijk.



Wanneer er naar de belastingduurkromme van rwzi Harderwijk gekeken wordt, welke weergegeven is in Figuur 3.14, is het zichtbaar dat er een relatief hoge piek is voor een klein gedeelte van de tijd. De maximale piek is 1135 kW en gedurende slechts 504 uur is verbruik meer dan 600 kW. Dit komt overeen met 5.8% van de tijd.

Figuur 3.14 de belastingduurkromme van rwzi Harderwijk

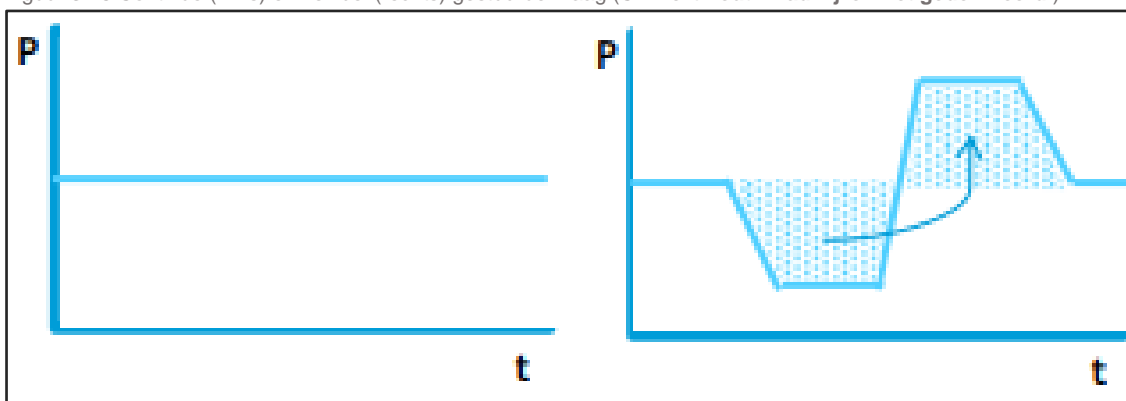


De mogelijkheden voor flexibel energiemanagement zijn onderzocht door de STOWA⁴ en door CE Delft⁵ **Fout! Bladwijzer niet gedefinieerd.**. In beide onderzoeken was de focus het realiseren van energiebesparingen en daarmee kostenbesparingen door het flexibel inzetten van de processen van het waterschap. Dit is een andere benadering dan het bepalen van de maximale flexibiliteit die de processen hebben. Hierdoor is er geen data over de maximale flexibiliteit omdat er geoptimaliseerd is op basis van kosten en niet op de schaalbaarheid van de processen. Dit maakt het niet mogelijk om de flexibele capaciteit voor het aftoppen van de pieken te berekenen omdat juist de kosten bespaard worden op momenten van hoge piekrijzen. Deze verdienste op momenten met hoge energieprijzen zijn daarmee onevenredig met de absolute energiebesparing .

Het waarborgen van de juiste effluentkwaliteit is de belangrijkste functie van rwzi's en daarom moet dit altijd bovenaan staan wanneer gekeken wordt wat de mogelijkheden voor flexibele inzet van de capaciteit.

In het onderzoek van de STOWA⁴ is er gekeken wat de energiebesparing is door alternatieve scenario's voor de luchtinbreng, flexibele sturing op het egaliseren van het debiet van de droog weer aanvoer, sturen op de voorspelbaarheid van de energievraag van rwzi's, en reductie door vraagsturing. Het onderzoek wijst uit dat 'wijzigingen in de aanvoer, bufferen over een etmaal, omdraaien dag-nacht, flexibel veranderen zuurstofsetpoints of intermitterend voeden en beluchten, (bijna) geen energiebesparing opleveren, maar resulteren vaak in een (geringe) toename van het energieverbruik'. Ook het egaliseren van de toevoer van het droog weer debiet zorgt niet voor een directe energiebesparing. Voor energiebesparing liggen de kansen vooral op het inzetten van de energievraag op momenten dat er een overaanbod aan stroom is, en niet op het aftoppen van de piekvraag. Om dit te realiseren zal de beluchting opgeschaald moeten worden op momenten dat er een overaanbod is. Ook het onderzoek van CE Delft benadrukt dat het verschuiven van de vraag naar gunstige momenten mogelijkheden biedt.

Figuur 3.15 Continue (links) en flexibel (rechts) gestuurde vraag (CE Delft **Fout! Bladwijzer niet gedefinieerd.**).



Met het verschuiven van de vraag wordt er bedoeld dat er op momenten met overaanbod, meer verbruikt wordt en op momenten met onder aanbod minder. Dit is inzichtelijk gemaakt in Figuur 3.15. Dit principe is nu berust op de nationale energiemarkt waar gekeken wordt naar de totale vraag en aanbod. Het is ook mogelijk om dit te baseren op juist regionale capaciteit van het onderstation waarop de rwzi is aangesloten. Hierdoor kan de rwzi een bijdrage leveren aan congestiemanagement.

⁴ DE (ON)MOGELIJKHEDEN VAN FLEXIBEL ENERGIEMANAGEMENT OP RIOOLWATERZUIVERINGSINRICHTINGEN. Rapport 69, 2018

⁵ Flexibiliteit en het waterschap, CE Delft, juli 2019

Echter vraagt het aanpassen van de beluchting wel verdere analyse, omdat de beluchtingsgraad bepaald wat het ammoniumgehalte en het nitraatgehalte in het effluent is. Hieraan zijn wettelijke voorwaarden verbonden in de vorm van lozingseisen. Het onderzoek van CE Delft **Fout! Bladwijzer niet gedefinieerd.** geeft aan dat er in de praktijk mogelijkheden zijn voor het sporadisch op en afschakelen van de beluchtingsinstallatie tijdens de nitrificatiefase. Het afschakelen van de beluchting mag echter maar van korte duur zijn en er moeten genoeg tussenpozen tussen zitten zodat het ammoniumgehalte niet boven de doelwaarde uitstijgt **Fout! Bladwijzer niet gedefinieerd..**

Met oog op het kostenaspect moet er ook rekening gehouden worden met mogelijk toenemende slijtage door toenemende op- en afschakeling van de beluchting⁵.

Het is denkbaar dat er in de toekomst een data gedreven systeem toegepast zal worden waarin er op momenten van schaarse capaciteit een signaal (vanuit Liander) gestuurd wordt om de beluchting tijdelijk af te schalen.

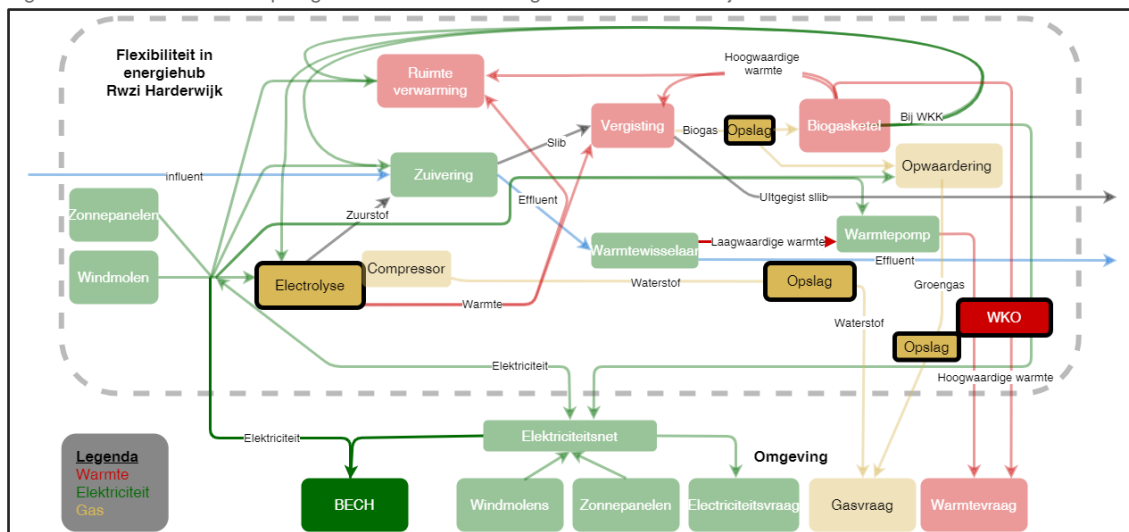
Om congestie te verhelpen, is het echter wel nodig om met zekerheid te kunnen aangeven dat er altijd op een verzoek voor afschaling van verbruik ingegaan kan worden. Dit betekent dat er een garantie gegeven wordt dat de rwzi nooit meer verbruikt dan een bepaald vermogen, bijvoorbeeld 0,6 MW, door het flexibel inzetten van de compressor en beluchters. Op dit moment is de gecontracteerde capaciteit voor verbruik 1,6 MW. Deze garantie zou betekenen dat er 1,0 MW capaciteit vrij komt. Gezien de fysieke capaciteit van de middenspanningskabel (LRZ 10-1V10) van 5,89 MVA, zou hiermee ongeveer 17% capaciteit vrijkomen. Voor het verdeelstation (met een capaciteit van 18 MVA) waar de rwzi op is aangesloten, zou dit betekenen dat er ongeveer 5,5% extra capaciteit vrijkomt. De bijdrage aan het oplossen van congestie werkt echter alleen indien er nooit over deze nieuw afgesproken aansluit capaciteit van 0,6 MW heen gegaan wordt, wat wel een risico is gezien de belastingduurkromme waar er wel momenten zijn waar dat nu gebeurt.

De belofte om duurzaam opgewekte elektriciteit te curtailen zodat de teruglevering niet boven de gecontracteerde capaciteit heen gaat is een afweging die gemaakt kan worden. De belofte om minder elektriciteit af te nemen op het moment dat dit nodig is, met een direct gevolg dat hierdoor de zuivering in het geding komt, is naar ons idee een risico die je met meer voorzichtigheid moet nemen. De primaire functie van een rwzi is immers het zuiveren van water, en niet het oplossen van congestie.

3.3.2 Flexibiliteit in de conversiestappen

Naast flexibiliteit met betrekking tot het elektriciteitsverbruik van de rwzi tijdens de zuivering, kunnen de verschillende schakels van de energiehubs ook op en afgeschakeld worden om flexibiliteit te creëren. De grootste waarde voor flexibiliteit waarbij de primaire taak van zuivering niet in het geding komt, kan behaald worden in de schakels waar er conversie plaats vindt van een energiedrager naar een andere energiedrager. Deze schakels in het gehele systeem zijn weergegeven in [Figuur 3.16](#).

Figuur 3.16 Conversie- en opslag schakels binnen energiehub rwzi Harderwijk die flexibiliteit kunnen leveren



De electrolyser maakt het mogelijk om, afhankelijk van de elektriciteitsvraag en de capaciteit van het netwerk, de opgewekte duurzame energie terug te leveren aan het net of om te zetten in waterstof, zuurstof en warmte te produceren.

Echter is de flexibiliteit van de electrolyser wel beperkt door de capaciteit van de electrolyser, welke gedimensioneerd is op het restprofiel, de waterstofvraag en de capaciteit van de opslag. Indien er meer elektriciteit terug geleverd wordt aan het net omdat hier vraag naar is en het net deze ruimte heeft, zal dit ook effect hebben op de kostprijs van waterstof en daarmee de business case van het electrolyse systeem.

In de WKK is het mogelijk om meer, minder of geen biogas te verbranden op het moment dat er meer of minder warmte of elektriciteitsvraag is. Echter draait de WKK op het aangeleverde biogas en is het systeem gebaat bij een continue vergistingsproces. Het is wel mogelijk om het biogas zelf op te slaan of op te werken naar groengas en in de gasleidingen in te voeren. Hoe groter het opslagsysteem voor het biogas, hoe groter de mogelijkheid tot flexibiliteit. Indien je groen gas produceert uit biogas dan is de buffer praktisch gezien oneindig aangezien het groen gas op het gasnet word ingevoegd. De WKK kan een bijdrage leveren aan de netproblematiek door op momenten dat er elektriciteitstekorten zijn, meer te draaien. Wanneer de huidige WKK's afgeschreven zijn, is er een kans dat deze niet vervangen worden door nieuwe WKK's maar eventueel door (bio)gaskachels. Indien dit het geval is, kan de warmtevraag flexibel bediend worden. De mogelijkheden om het net te ontlasten zijn dan echter beperkt.

4 Conclusies

De geplande geïnstalleerde duurzame elektriciteitsopwekking op het terrein van rwzi Harderwijk bedraagt 15,6 GWh. Dit wordt geleverd door een WKK (3.6 GWh), een zonneveld (1,4 GWh) en een windturbine (10,6 GWh). Gezien het verbruik van de rwzi van 2,4 GWh, kan niet alle duurzaam opgewekte elektriciteit op dit moment benut worden. Vanwege congestie is de mogelijkheid om terug te leveren op dit moment beperkt tot 0,85 MW en de verwachting is dat er pas in 2024 een netverzwaring zal worden uitgevoerd⁶. De verwachting is dat er al voor die tijd de beoogde productie-installaties van zonne- en windenergie zijn gerealiseerd. Indien deze productie-installaties geïntegreerd gaan worden met de rwzi, dient er voor het overschot aan duurzame elektriciteit een nuttige toepassing gevonden te worden. Mogelijke toepassingen zijn het produceren van waterstof door middel van een electrolyser, opslag door middel van een batterij, het produceren van warmte en levering aan de omgeving. In de situatie met wkk, zonneveld en windturbine een is er lokale afstemming nodig met betrekking tot vraag en aanbod van elektriciteit en eventueel waterstof of warmte om te zorgen dat er voor 6,9 GWh elektriciteit (44% van de opwek) een nuttige toepassing gevonden wordt.

- Het flexibel benutten van de capaciteit van de netaansluiting, boven de huidig gecontracteerde teruglevercapaciteit van 0,85 MW, op basis van data van de belasting van de distributiekabel, kan de curtailment van met name windenergie sterk reduceren. Dit hangt echter af van de gelijktijdigheid met andere producenten aangesloten op dezelfde middenspanningskabel. Deze data is echter niet volledig en daardoor is het volume wat er dan alsnog kan worden teruggeleverd niet te kwantificeren. Deze optie is echter wettelijk gezien nog niet mogelijk en conflicteert met het principe dat de netbeheerder niet mag discrimineren tussen aangeslotenen. Daarnaast biedt een flexibele teruglevercapaciteit nooit de garantie dat de elektriciteit daadwerkelijk kan worden afgezet en maakt daarom de businesscases voor de windturbine in combinatie met de zonneweide zeer onzeker.
- Het toepassen van een electrolyser van 2,5 MW heeft een potentie om het restprofiel elektriciteit nuttig in te zetten waardoor er nog maar 0,27 GWh (1,73%) overblijft wat op dit moment curtaild moet worden ten opzichte van 6,90 GWh. Een belangrijke voorwaarde voor het realiseren van een gunstige business case voor waterstof is dat er een afzet voor alle geproduceerde waterstof gevonden dient te worden.
- Het toepassen van een batterij heeft een theoretische potentie om de curtailment te reduceren tot 5,9 GWh, echter hiervoor zal een zeer grote batterij nodig zijn en gaan we uit van een ideale situatie waarop de teruglevercapaciteit van 0,85 MW 100% benut wordt, waardoor deze optie zeer kostbaar is en slechts een gedeelte van het probleem kan oplossen. In het geval de WKK verdwijnt, kan het verplaatsen van de teruglevering door middel van een batterij de curtailment maximaal beperken tot 2,4 GWh. Dit is nog altijd een aanzienlijk groot gedeelte (20%) van de opwek. Het toepassen van een batterij in een scenario met zonne- én windenergie is geen toereikende oplossing om alle geproduceerde elektriciteit nuttig te gebruiken.
- In het scenario waar een wkk, zonneveld en windturbine aanwezig is, kan door het toepassen van warmteopwekking potentieel 13,2 GWh overschot aan duurzame opwek omgezet worden in warmte, wat ruim 1000 huishoudens per jaar van warmte kan voorzien. Om hier effectief gebruik van te maken dient er een warmtenet aanwezig te zijn. Om de warmteverliezen in het netwerk te beperken, is het wenselijk dat de afstand tussen de bron en de wijk maximaal 1000 meter is, en de wijk een bebouwingsdichtheid van boven de 30 woningen per hectare heeft.

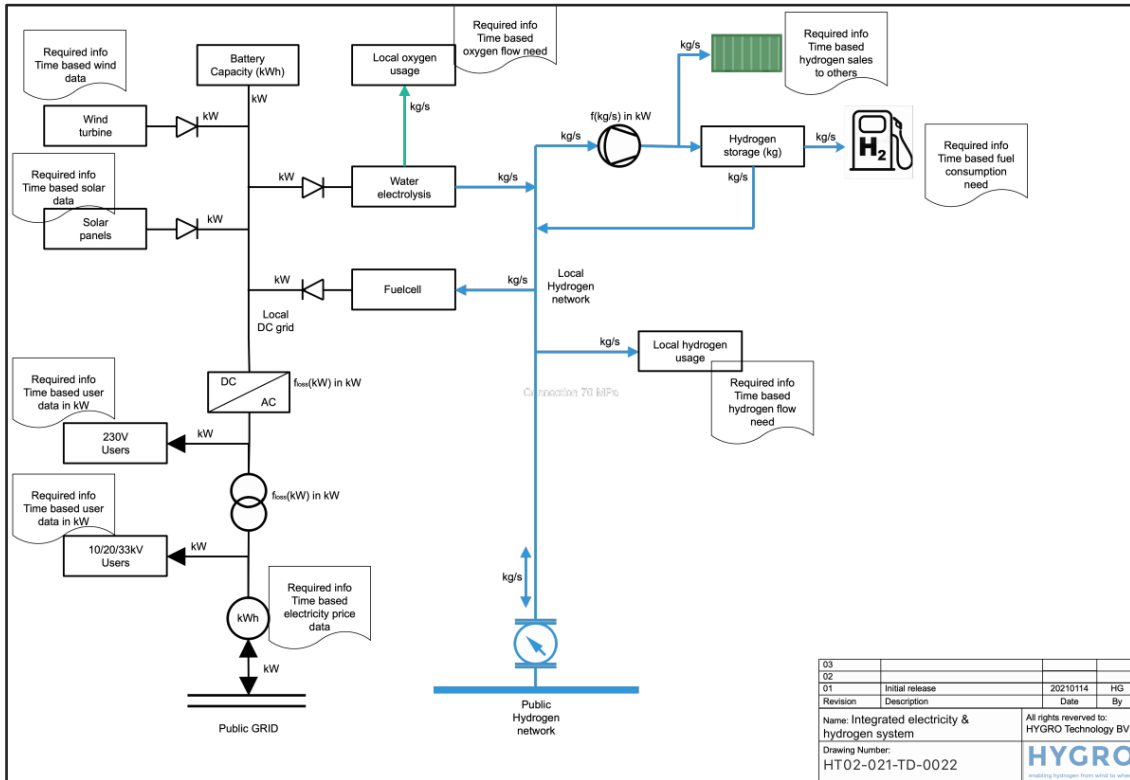
⁶ <https://www.liander.nl/sites/default/files/20210429%20Vooraankondiging%20verwachte%20congestie%20verdeelstation%20Lorentz%20v2.2.pdf>

- Indien de wkk komt te vervallen reduceert de curtailment van zonne- en windenergie tot 4,8 GWh (40%). Daarnaast ontstaat er een aanvullende warmtebehoefte voor het slibvergistingsproces, wat eventueel door het omzetten van het elektriciteitsoverschot naar warmte ingevuld kan worden. Dit kan de nuttige toepassing van het overschot aan duurzame elektriciteit nog verder verhogen. Het heeft daarbij de voorkeur om toepassingen in te zetten met hoge rendementen, zoals een (industriële) warmtepomp. Doorgaans kan hiermee een rendement van 400% (COP=4) worden bereikt (= 1 kWh elektriciteit levert 4 kWh warmte op, afhankelijk van het temperatuurverschil tussen invoer en uitvoer (Δt). Voor hoge temperaturen (bijvoorbeeld >100 °C) kan als alternatief een gedeelte van het geproduceerde biogas gebruikt worden in een gasketel, voor de verwarming van het slibvergistingsproces. De hoeveelheid elektriciteit dat omgezet kan worden naar warmte hangt af van de totale warmtevraag van de rwzi, de omgeving en de capaciteit van het warmte opslag systeem. Deze zijn niet bekend en daarom is verdere kwantificering in het kader van deze studie niet mogelijk.
- Er zijn opties om door middel van flexibele beluchting de piekvragen af te toppen. Echter vraagt het aanpassen van de beluchting wel verdere analyse, omdat de beluchtingsgraad bepaalt wat het ammoniumgehalte en het nitraatgehalte is in het effluent. Om een bijdrage te leveren aan congestie moet de garantie gegeven worden dat deze flexibele beluchting op elk benodigd moment toegepast kan worden. Gezien het primaire proces van waterzuivering, is het aan te raden flexibele beluchting alleen toe te passen indien de zuiveringskwaliteit en zekerheid hier niet onder zal leiden.

Bijlage 3: Toelichting waterstof

Onderstaande figuur geeft een uitwerking van waterstofproductie in combinatie met wind, zon en externe afzet.

Schema productie en afzet van waterstof



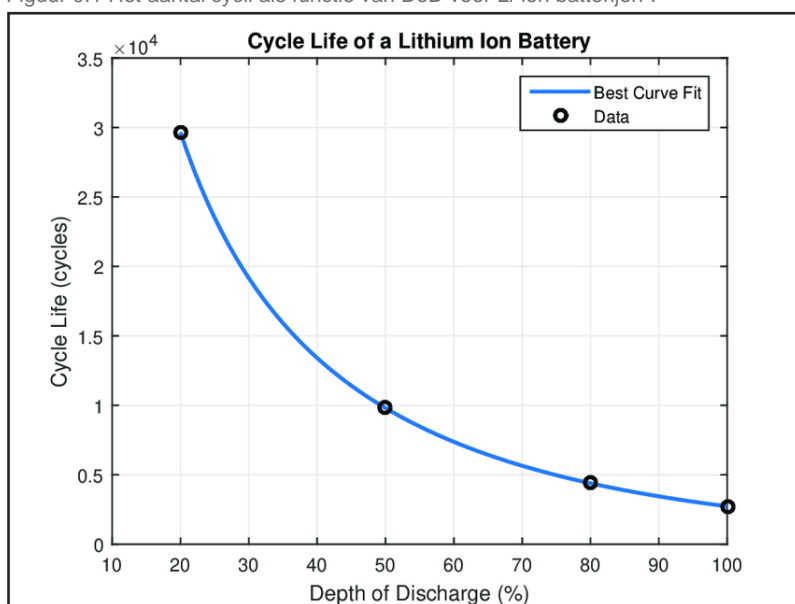
Bijlage 4: Toelichting batterijen

Batterijen zijn vrij kostbaar. Een 500 kWh batterij die continue geladen en ontladen kan worden met 250 kW en een piek van 300 kW heeft een budgetprijs van circa 300.000 euro (systeem geïnstalleerd in een 10ft container). Lithium ion batterijen krijgen langere levensduur door de systemen tussen de 40% en 80% state of charge te houden. Dit kan oplopen tot factor 2 van het aantal cycli. De levensduur van een batterij wordt bepaald aan de hand van het aantal cycli dat een batterij kan laden en ontladen voordat een component van de batterij vervalt waardoor er nog maar 80% van de initiële capaciteit beschikbaar blijft¹.

Voor Li-ion en Vanadium Redox Flow batterijen (VRFB) wordt alleen de round trip efficiency (RTE), depth of discharge (DoD) en het aantal cycli worden beschouwd. Charging/discharging rates en charging/discharging regimes worden niet meegenomen vanwege de grote complexiteit die dit toevoegt. Elektrische autos (EVs) worden niet gezien als een geschikte oplossing vanwege het constante verbruik van de rwzi. Dit zou vereisen dat er 24 uur per dag auto's aan dit systeem gekoppeld zijn, wat niet realistisch is.

De levensduur hangt af van de DoD, is weergegeven in Figuur 0.1. Er dient dus een afweging gemaakt te worden tussen het aantal cycli en de DoD. In het onderzoek van Mallon et al. (2017) wordt een DoD van 0.75 aangehouden. De levensduur van de twee beschouwde technologieën staat beschreven in Tabel 0.1.

Figuur 0.1 Het aantal cycli als functie van DoD voor Li-ion batterijen².



Tabel 0.1 De beschouwde batterijtechnologieën en specifieke eigenschappen.

Technologie	RTE	DoD	Levensduur (cycli)
Li-ion	0.9	0.75	5000
VRFB	0.7	0.75	10000

¹ C. Poncede León, A. Frías-Ferrer, J. González-García et al. "Redox flow cells for energy conversion." *Journal of Power Sources*. 09.26.2006. Accessed 02.07.2019. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877530600437X>

² Mallon, Kevin & Assadian, Francis & Fu, Bo. (2017). Analysis of On-Board Photovoltaics for a Battery Electric Bus and Their Impact on Battery Lifespan. *Energies*. 10. 943. 10.3390/en10070943.