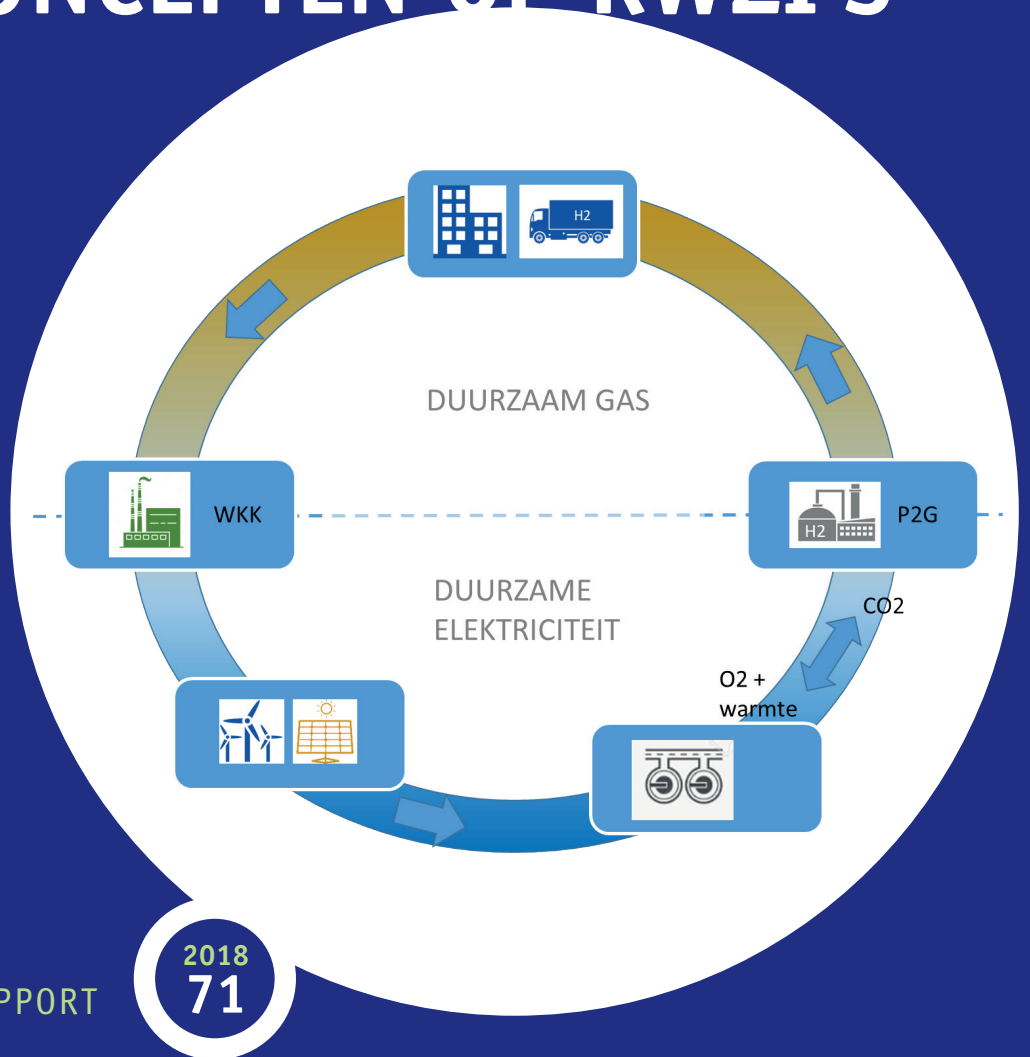


VERKENNING TOEPASSING POWER-TO-GAS CONCEPTEN OP RWZI'S



VERKENNING TOEPASSING POWER-TO-GAS
CONCEPTEN OP RWZI'S

RAPPORT

2018

71

ISBN 978.90.5773.831.9



stowa@stowa.nl www.stowa.nl

TEL 033 460 32 00

Stationsplein 89 3818 LE Amersfoort

POSTBUS 2180 3800 CD AMERSFOORT

Publicaties van de STOWA kunt u bestellen op www.stowa.nl

COLOFON

UITGAVE Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer
Postbus 2180
3800 CD Amersfoort

AUTEURS Arjen de Jong – Blue Terra
Ron Bol – Blue Terra

BEGELEIDINGSCOMMISSIE

Peter van Vugt - Waterschap Aa en Maas
George Zoutberg – Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier
Henri Maas - Waterschap Brabantse Delta
Alexandra Deeke – Waterschap De Dommel
Rafael Lazaroms – Unie van Waterschappen
Marc Vermeulen – Waterschap Rivierenland
Cora Uijterlinde - STOWA

DRUK Kruyt Grafisch Adviesbureau
STOWA STOWA 2018-71
ISBN 978.90.5773.831.9

Copyright Teksten en figuren uit dit rapport mogen alleen worden overgenomen met bronvermelding.

Disclaimer Deze uitgave is met de grootst mogelijke zorg samengesteld. Niettemin aanvaarden de auteurs en de uitgever geen enkele aansprakelijkheid voor mogelijke onjuistheden of eventuele gevolgen door toepassing van de inhoud van dit rapport.

TEN GELEIDE

Waterstof is een veelbesproken thema als oplossing voor langdurige opslag van duurzame energie. Het bestaande gasnet blijkt met geringe aanpassingen geschikt te maken te zijn voor transport van waterstof. Daarnaast vereist waterstof voor eindgebruikers ook de minste aanpassingen. De grote vraag is hoe en waar waterstof het beste geproduceerd kan worden. Door de synergievoordelen van het elektrolyseproces in te zetten (benutting van waterstof, zuurstof en restwarmte) op de zuivering is dit mogelijk één van de beste mogelijkheden voor het omzetten van duurzame elektriciteit in andere energiedragers in Nederland. Het omzetten van elektriciteit naar waterstof wordt Power-to-gas (P2G) genoemd. Verschillende waterschappen zijn de mogelijkheden van P2G technieken inmiddels concreet voor lokale situaties aan het onderzoeken.

Het produceren van waterstof gaat mogelijk ook samen met superkritische vergassing waar nu ook volop mee wordt geëxperimenteerd. In combinatie met P2G kan de hoeveelheid waterstof verder worden vergroot. Een tweede mogelijkheid is om waterstof te laten reageren met de beschikbare CO₂ uit het biogas voor de productie van groen gas. Het is vooral de vraag wat de vraag en waarde tussen de verschillende producten is op een bepaald tijdstip. De financiële toegevoegde waarde van P2G hangt daarom sterk af van de duur en omvang van prijsverschillen tussen de markten voor elektriciteit, groen gas en waterstof.

Joost Buntsma
Directeur STOWA

SAMENVATTING

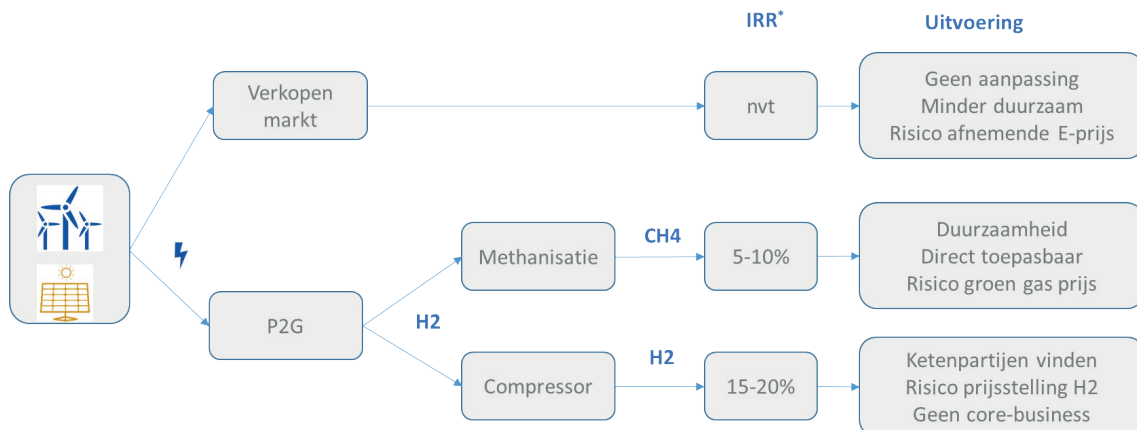
Met de toename van duurzaam geproduceerde elektriciteit uit zon- en wind én het uit bedrijf nemen van kolencentrales zal er steeds meer flexibiliteit van het energiesysteem worden vereist. Deze flexibiliteit kan slechts gedeeltelijk worden geleverd met accu systemen, voor grote volumes en de opslag voor langere duur is Power-to-gas (P2G) een interessante optie. Binnen deze studie is P2G ingezet als een techniek om overtollige elektriciteit geproduceerd op het perceel van een waterzuivering, die op dat moment vrijwel geen waarde heeft, om te zetten in een gasvormige energiedrager zoals waterstof.

Doordat de investeringskosten voor P2G technieken hoog zijn en er een beperkt aantal draaiuren op overtollige elektriciteit mogelijk is, blijkt het noodzakelijk om de synergievoordelen van waterstofproductie (het inzetten van waterstof, zuurstof en warmte) maximaal te benutten. Waterzuiveringen met slibgisting geven de mogelijkheid om deze voordelen in te zetten; waterstof kan worden verkocht aan de transportsector of d.m.v. methanisatie met eigen CO₂ uit het biogas gebonden tot groen gas; zuurstof kan worden ingezet voor het verminderen van beluchtingsenergie in de aeratietanks en de warmte kan worden gebruikt voor het op temperatuur houden van de slibgisting.

In deze verkennende studie zijn de technische mogelijkheden uitgewerkt voor het toepassen van een P2G-installatie op een grote RWZI in combinatie met 2 windmolens en 5 ha zonnepanelen. Het vertrekpunt daarbij is dat een zuivering met eigen duurzame opwekking gebruik maakt van elektriciteit die normaliter tegen relatief lage prijzen aan het openbare net geleverd moet worden. Zodoende wordt er van een product met een lage waarde (teruggeleverde elektriciteit) een product met hogere waarde gemaakt (zoals groen gas). Er is daarbij een rekenmodel ontwikkeld waarmee elke technische configuratie en marktomstandigheid kan worden doorgerekend.

Er is daarbij onderscheid gemaakt in twee typen P2G ketens. De eerste keten gaat uit van omzetten van waterstof in methaan met behulp van CO₂ uit een groen gas installatie. De tweede keten gaat om het comprimeren en benutten van waterstof in mobiliteitstoepassingen. De resultaten van deze ketenanalyses zijn versimpeld weergegeven in onderstaand schema.

FIGUUR 1 OVERZICHT TOEPASSING P2G KETENS



* IRR = Internal Rate of Return

Voor beide ketens zijn economische interessante projecten denkbaar, die ook de duurzaamheid flink vergroten op de zuivering door een verhoging van de groen gas productie en een vermindering van de beluchtingsenergie door inbreng van pure zuurstof uit de elektrolyser. De economische mogelijkheden voor het toepassen van P2G op de zuivering zijn het best voor het waterstof vulpunt. Dit komt door de hoge waarde van waterstof in de mobiliteitssector. In deze casus is het ook mogelijk om gebruik te maken van duurzame stroom die buiten de zuivering is geproduceerd (waar momenteel nog transportkosten en energiebelasting over verschuldigd zijn). Deze toepassing vraagt echter ook om directe afname door afnemers en het leveren van waterstof ligt ver buiten de bestaande activiteiten van het waterschap.

De andere mogelijkheid is het omzetten van waterstof in groen gas door een methanisatiereactor toe te passen. Deze business case is minder attractief door de lagere prijs van groen gas. Het heeft echter wel als voordeel dat het een makkelijk af te nemen en gewild product betreft.

Het is van groot belang om te realiseren dat een P2G installatie altijd een arbitragepunt vormt tussen twee markten die onafhankelijk van elkaar kunnen variëren, hetgeen de nodige risico's met zich meebrengt voor de operatie. De dimensionering van de P2G, keuze van elektrolyzers, evt. accu's en methanisatiereactoren verdienen daarom een zeer zorgvuldige afweging in relatie tot de marktrisico's.

De toepassing van P2G is daarnaast sterk afhankelijk van de prijsontwikkelingen op de elektriciteitsmarkt. Door de grote opkomst van wind- en zonneparken in Nederland en omliggende landen is het zeker dat de elektriciteitsprijzen op momenten met veel wind- en zonaanbod heel laag zullen liggen. De grote vraag is wanneer de prijzen laag genoeg zijn voor het toepassen van een P2G installatie. Onze indicatie is dat deze prijsniveaus tussen 2020 en 2025 bereikt kunnen worden.

Waterschappen kunnen hun duurzaamheid verder vergroten door het toepassen van een P2G-installatie en er zijn diverse configuraties en business cases mogelijk. Waterschappen kunnen hierdoor een interessante spilfunctie gaan vervullen bij de lokale energietransitie en meer duurzame energie gaan produceren. Elke grote zuivering van 300.000 i.e. de productie van ca 10-20 MWe aan duurzaam vermogen kan faciliteren

De kennis uit deze studie kan nu in elk geval worden meegewogen in de planvorming op (middel)lange termijn, bijvoorbeeld in wat voor vorm duurzame energie het beste kan worden geproduceerd (elektriciteit, methaan of H₂). Ook kunnen met behulp van het bij dit rapport behorende P2G- rekenmodel per zuivering worden beoordeeld wat de mogelijkheden zijn voor het toepassen van P2G.

DE STOWA IN HET KORT

STOWA is het kenniscentrum van de regionale waterbeheerders (veelal de waterschappen) in Nederland. STOWA ontwikkelt, vergaart, verspreidt en implementeert toegepaste kennis die de waterbeheerders nodig hebben om de opgaven waar zij in hun werk voor staan, goed uit te voeren. Deze kennis kan liggen op toegepast technisch, natuurwetenschappelijk, bestuurlijk-juridisch of sociaalwetenschappelijk gebied.

STOWA werkt in hoge mate vraaggestuurd. We inventariseren nauwgezet welke kennisvragen waterschappen hebben en zetten die vragen uit bij de juiste kennisleveranciers. Het initiatief daarvoor ligt veelal bij de kennisvragende waterbeheerders, maar soms ook bij kennisinstellingen en het bedrijfsleven. Dit tweerichtingsverkeer stimuleert vernieuwing en innovatie.

Vraaggestuurd werken betekent ook dat we zelf voortdurend op zoek zijn naar de 'kennisvragen van morgen' – de vragen die we graag op de agenda zetten nog voordat iemand ze gesteld heeft – om optimaal voorbereid te zijn op de toekomst.

STOWA ontzorgt de waterbeheerders. Wij nemen de aanbesteding en begeleiding van de gezamenlijke kennisprojecten op ons. Wij zorgen ervoor dat waterbeheerders verbonden blijven met deze projecten en er ook 'eigenaar' van zijn. Dit om te waarborgen dat de juiste kennisvragen worden beantwoord. De projecten worden begeleid door commissies waar regionale waterbeheerders zelf deel van uitmaken. De grote onderzoeklijnen worden per werkveld uitgezet en verantwoord door speciale programmacommissies. Ook hierin hebben de regionale waterbeheerders zitting.

STOWA verbindt niet alleen kennisvragers en kennisleveranciers, maar ook de regionale waterbeheerders onderling. Door de samenwerking van de waterbeheerders binnen STOWA zijn zij samen verantwoordelijk voor de programmering, zetten zij gezamenlijk de koers uit, worden meerdere waterschappen bij één en het zelfde onderzoek betrokken en komen de resultaten sneller ten goede aan alle waterschappen.

De grondbeginselen van STOWA zijn verwoord in onze missie:

Het samen met regionale waterbeheerders definiëren van hun kennisbehoeften op het gebied van het waterbeheer en het voor én met deze beheerders (laten) ontwikkelen, bijeenbrengen, beschikbaar maken, delen, verankeren en implementeren van de benodigde kennis.

VERKENNING TOEPASSING POWER-TO-GAS CONCEPTEN OP RWZI'S

INHOUD

	TEN GELEIDE	
	SAMENVATTING	
	DE STOWA IN HET KORT	
1	INTRODUCTIE	1
1.1	Waarom P2G op de toekomstige zuivering	1
1.2	Veranderingen bedrijfsmodel biogasbenutting	3
1.3	Waarde eindproducten	4
1.3.1	Elektriciteit	4
1.3.2	Warmte	5
1.3.3	Groen gas	6
1.3.4	H ₂	6
1.4	Aanpak onderzoek	6
2	TECHNIEK POWER-TO-GAS	7
2.1	Ketenmogelijkheden	7
2.2	Waterstof productie	7
2.2.1	Overige eigenschappen	8
2.3	Opslag en compressie van waterstof	9
2.3.1	Opslag onder druk	10
2.3.2	Compressie van H ₂ – vulpunt	10
2.4	Techniek methanisatie	10
2.4.1	Biologische methanisatie	11
2.4.2	Katalytische methanisatie	13
2.5	Keuze ketens	14
2.5.1	Keuze elektrolyser	15

3	INPASSING OP DE ZUIVERING	17
3.1	Operationele inzet	17
3.2	Dimensionering	19
3.3	Kritische randvoorwaarden	19
	3.3.1 Impact netaansluiting	20
	3.3.2 Beschikbaarheid biogas	21
3.4	Benutting restwarmte	22
3.5	Reductie beluchtingsenergie	23
3.6	Beschrijving configuraties	23
	3.6.1 Algemene opzet P2G installatie bij RWZI	24
	3.6.2 Processchema's H ₂ tankstation en methanisatie	25
4	WERKING MODEL	27
5	RESULTATEN CASUSSEN	29
5.1	Uitgangspunten	29
	5.1.1 Indexatie	30
	5.1.2 Energieprijzen	30
	5.1.3 Investering en onderhoud	31
	5.1.4 Overige uitgangspunten	31
5.2	Resultaten H ₂ tankstation	32
	5.2.1 Financiële resultaten	33
5.3	Resultaten ex-situ biologische methanisatie	34
	5.3.1 Financiële resultaten	35
5.4	Resultaten ex-situ katalytische methanisatie	36
	5.4.1 Financiële resultaten	37
5.5	Vergelijking ketens	38
6	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	39
6.1	Aanbevelingen	41
7	BIBLIOGRAFIE	42
8	BIJLAGE	43
8.1	Nomenclatuur	43
8.2	Technische uitgangspunten	43
	8.2.1 Elektrolyser	43
	8.2.2 Eigenschappen waterstof	44
	8.2.3 Elektrische opslag	44
	8.2.4 Compressie waterstof	44
8.3	Aanvullende resultaten ketens	44
	8.3.1 Resultaten ketens	44
	8.3.2 Profiel beluchtingsenergie	45
	8.3.3 Profiel duurzame opwekking	46

1

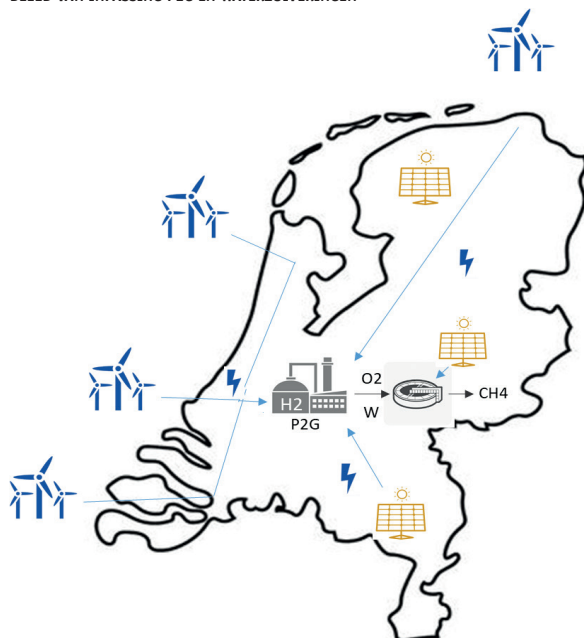
INTRODUCTIE

1.1 WAAROM P2G OP DE TOEKOMSTIGE ZUIVERING

De komst van grote zon- en windparken in Nederland vraagt om flexibiliteit in het energiesysteem. Van oudsher werd deze geleverd door gascentrales maar naar de toekomst zal deze duurzaam moeten ingevuld. De focus ligt nu op de bouw van grootschalige accu's maar de opslagcapaciteit daarvan is waarschijnlijk niet voldoende. Er is dus additionele capaciteit nodig in de vorm van omzetting van elektriciteit naar andere energievormen zoals warmte en waterstof. Het omzetten van overtollige elektriciteit naar waterstof noemen we Power-to-gas (P2G). Waterstof is momenteel een veelbesproken vorm van energieopslag, met name omdat waterstof op langere termijn en in grotere volumes op te slaan is. De nadelen van P2G zijn echter de hoge investeringskosten, het aanzienlijke conversieverlies en het ontbreken van een waterstofinfrastructuur. P2G moet dus slim worden ingepast in het energiesysteem om deze nadelen te ondervangen.

Waterzuiveringen zijn bij uitstek geschikt voor de toepassing van P2G. Het conversieverlies kan worden verminderd door de vrijkomende warmte te benutten in de gistingtanks en het probleem van de infrastructuur kan worden omzeild door het CO₂ uit het biogas te benutten om het waterstof te binden en zo meer groen gas te produceren.

FIGUUR 2 BEELD VAN INPASSING P2G EN WATERZUIVERINGEN



Een ander bijkomend voordeel is dat er zuurstof wordt geproduceerd dat op de zuivering kan worden gebruikt om de hoeveelheid energie voor beluchting te verminderen. Voor waterschappen kan P2G ook een manier zijn om meer duurzame energie op te wekken zonder de

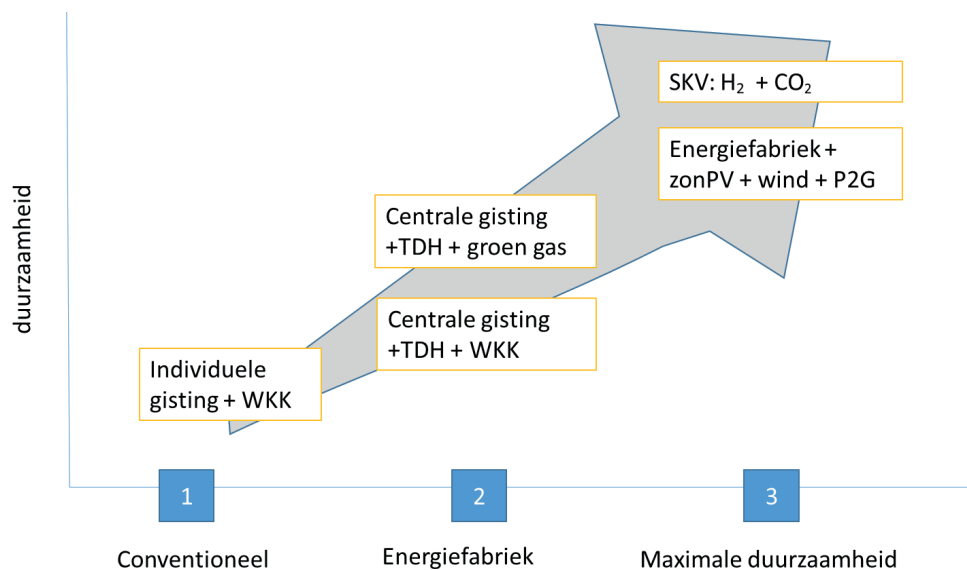
netinfrastructuur te hoeven aanpassen. P2G en waterzuiveringen lijken daarom een ideale combinatie voor de energietransitie.

AANSLUITING OP DE ENERGIE- EN GRONDSTOFFENFABRIEK

Met de komst van de energie- en grondstoffenfabrieken is er een aanzienlijke verbetering bereikt in de conversie van organisch materiaal naar nuttige energie en het terugwinnen van grondstoffen. Ook zijn veel waterschappen bezig met de implementatie van duurzame projecten zoals zonneparken en windparken. Om de volgende stap in duurzaamheid te zetten zijn nieuwe technieken en nieuwe combinaties nodig. Een mogelijke stap is het toevoegen van duurzame opwekcapaciteit in combinatie met een Power-to-Gas (hierna P2G) installatie. Hiermee kan een volgende stap worden gezet in het leveren van meer duurzame energie en grondstoffen.

FIGUUR 3

ONTWIKKELING DUURZAME ZUIVERING IN PERSPECTIEF



In Figuur 3 is te zien dat de productie van duurzame energie op verschillende wijzen kan worden vormgegeven. Een mogelijkheid is de toepassing van superkritische vergassing (SKV), waarmee de koolstofconversie wordt vergroot, mineralen én zuivere CO₂ kunnen worden geproduceerd. Een tweede route, ook te combineren met de vorige, is de toepassing van wind- en zonne-energie op of nabij de zuivering en deze middels P2G installaties om te zetten in zuivere H₂ en O₂. Het zuivere waterstof kan worden gebruikt om het CO₂ in het biogas om te zetten naar CH₄ en het zuurstof om de belichtingsenergie te reduceren. Door conversie van waterstof naar methaan ontstaat er een direct bruikbaar gas dat makkelijk te transporteren is. Een andere mogelijkheid is om het geproduceerde waterstof in druk te verhogen en een vulpunt voor auto's en vrachtwagens te realiseren.

P2G kan in principe op elke elektrische aansluiting worden gerealiseerd maar biedt juist op zuiveringen extra kansen vanwege de economische inzet van het bijproduct zuurstof, restwarmte benutting en de mogelijkheid om H₂ te binden aan een kort cyclische vorm van CO₂. Dat maakt de toepassing van P2G op zuiveringen uniek. Daarnaast maakt P2G een grotere toepassing van duurzaam vermogen mogelijk op bestaande zuiveringen, omdat het een deel van de elektriciteitsproductie kan omzetten in groene waterstof en er dus meer duurzame energie op dezelfde aansluiting kan worden gerealiseerd.

In deze studie zal worden gekeken naar de diverse technische configuraties voor P2G en de impact op de duurzaamheid en rentabiliteit van de zuivering.

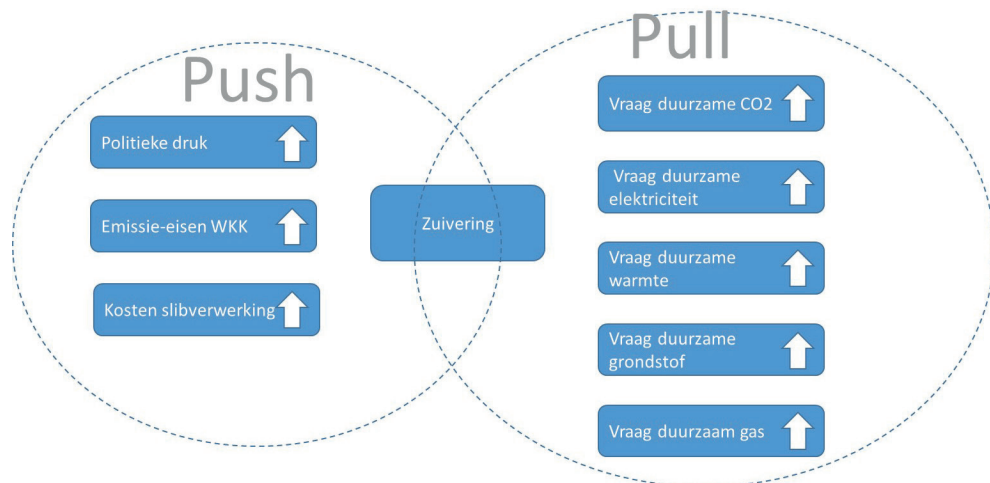
SCOPE EN AFBAKENING

- In deze studie is gekeken naar de inpassing van P2G op grote zuiveringen van 300.000 i.e.
- Er is gekeken naar de inpassing van 5 MWp zonPV en 6 MWp wind op de zuivering
- Er is gekeken naar de werking van drie technische varianten:
 - a. P2G en H₂ vulpunt
 - b. P2G en in-situ conversie naar methaan
 - c. P2G en in-situ conversie naar methaan
- Het referentiescenario is een zuivering met gelijke vermogens aan duurzame energie die aan het net worden geleverd.
- Er zal niet worden gekeken naar de mogelijkheden om H₂ om te zetten in grotere chemiënketens zoals ammoniak of mierenzuur

1.2 VERANDERINGEN BEDRIJFSMODEL BIOGASBENUTTING

Het bedrijfsmodel van zuiveringen wordt voor veel locaties momenteel vaak heroverwogen. Dat heeft te maken met verschillende factoren die vaak lokaal bepaald worden.

FIGUUR 4 INVLOEDSFACTOREN ENERGIEVOORZIENING RWZI



Het huidige dominante bedrijfsmodel is de toepassing van een warmtekrachtkoppeling (WKK) waarbij het biogas lokaal wordt omgezet in duurzame elektriciteit. Echter, toepassing van een WKK wordt steeds kostbaarder vanwege de steeds stringenter emissie-eisen en dalende opbrengsten op de elektriciteitsmarkt. Toepassing van groen gas installaties komt daarom steeds vaker voor. Ook plaatsen waterschappen meer duurzame capaciteit op hun eigen terreinen. Dit gebeurt meestal met een ondersteuning van de subsidie duurzame energie, kortweg SDE-regeling.

De grote vraag voor de toekomst is daarom welke optimalisatie waterschappen na moeten streven: vooral warmte, elektriciteit of gas produceren? Dit hangt samen met de lokale vraag naar duurzame producten en de waarde van deze producten. Die zullen de in volgende paragraaf worden behandeld.

1.3 WAARDE EINDPRODUCTEN

Wat voor duurzame energie kunnen waterschappen het beste produceren en wat is de rol van P2G hierin? Dat hangt af van het geproduceerde eindproduct, de waarde van een eindproduct is vaak het onderhandelingsresultaat bij een gegeven vraag en aanbod. Waardes van eindproducten zijn vaak sterk aan verandering onderhevig en dat geldt ook zo voor elektriciteit, warmte, groen gas en H₂. We zullen deze daarom achtereenvolgens bespreken.

1.3.1 ELEKTRICITEIT

De Nederlandse elektriciteitssector maakt momenteel een enorme verandering door. In minder dan 15 jaar moet het aandeel duurzaam van minder dan 10% naar 80-85% duurzaam in 2030 [1]. Wind op land en zee en zonne-energie zijn hiervoor de belangrijkste bronnen. Dit heeft twee belangrijke effecten die voor waterschappen relevant zijn:

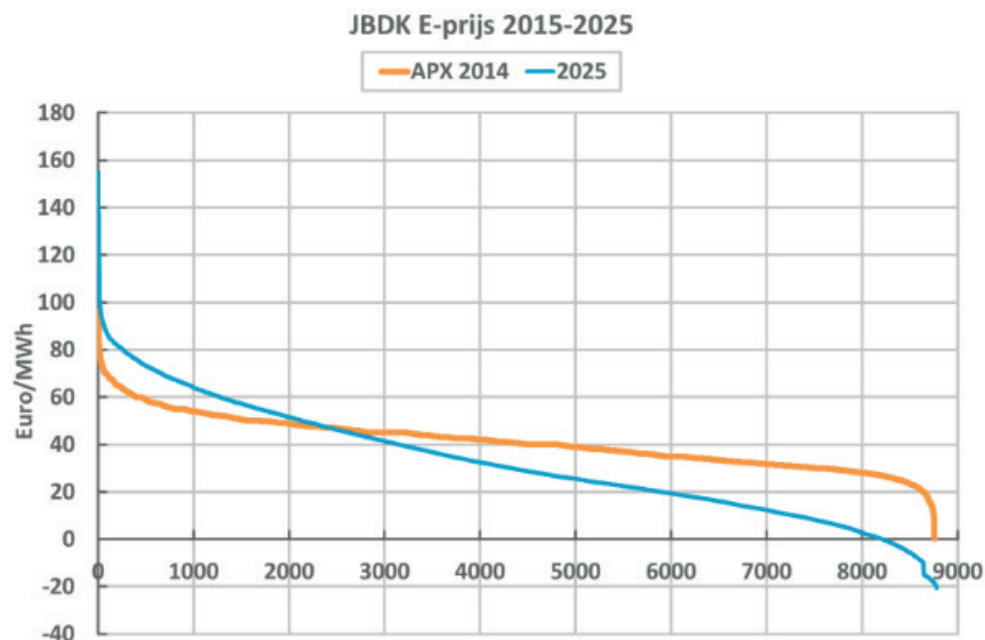
1. Veel meer uren in het jaar met (zeer) lage elektriciteitsprijzen door meer invoeding vanuit bronnen zonder brandstofkosten
2. Grote fluctuaties in aanbod van energie waardoor er meer vraag komt naar back-up en flexibele capaciteit

Er komen veel meer momenten waarop elektriciteit goedkoop wordt maar ook meer momenten waarop elektriciteit duurder wordt. Blueterra heeft een marktmodel van de Nederlandse elektriciteitsmarkt ontwikkeld waarmee voorspellingen kunnen worden gedaan over markttrends, flexmarkten en prijsniveaus. In de onderstaande sectie zijn de resultaten weergegeven van een scenario-analyse van de uitwerking van het Energie-akkoord.

ONTWIKKELING ELEKTRICITEITSPRIJS

In onderstaande jaarbelastingduurkromme (JBDK) (Figuur 5) is een overzicht gegeven van de verwachte ontwikkeling op de Nederlandse elektriciteitsmarkt voor de komende jaren.

FIGUUR 5 SIMULATIE ENERGIEMARKT 2025 VERSUS MARKTPRIJZEN 2015 GESORTEERD PER UUR [2]

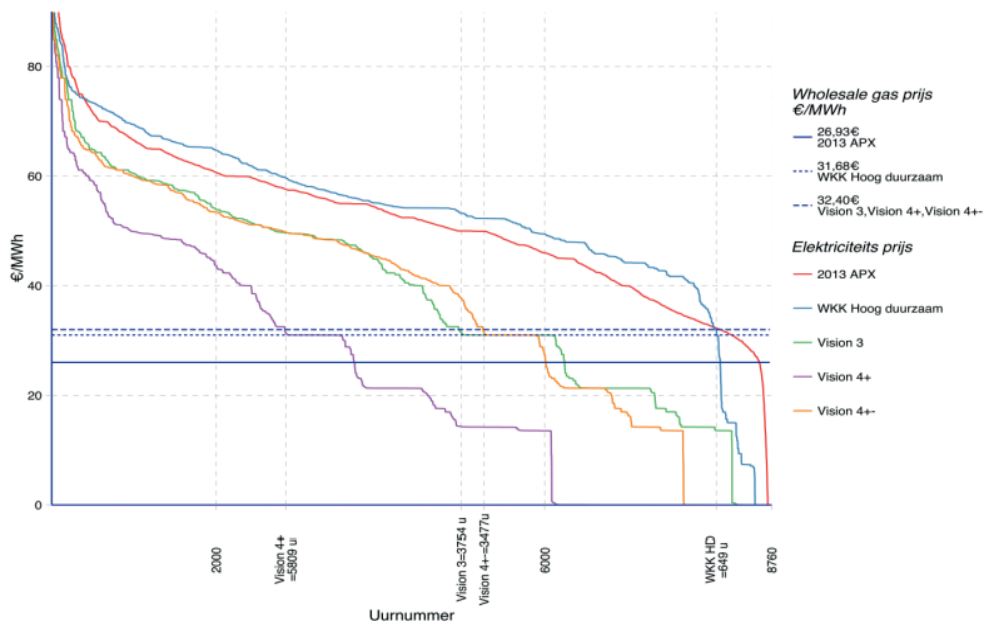


Duidelijk is te zien dat er in het 2025 scenario een groter aandeel goedkope uren zal ontstaan en in beperkte mate ook een aantal duurdere uren als gevolg van de vraag naar snel schakelbare capaciteit met weinig draaiuren (bijvoorbeeld piek gascentrales). Naar de toekomst toe zal deze trend zich naar verwachting doorzetten.

In Figuur 6 is een voorspelling voor de langere termijn weergegeven. In het figuur geven scenario's Vision 3 en Vision 4 +- de prijsontwikkeling weer waarop de jaargemiddelde prijs van 20 €/MWh is gebaseerd.

FIGUUR 6

VOORSPELLING ELEKTRICITEITSMARKT [3])



Producenten van elektriciteit, zoals de biogasWKK's van waterschappen, staan bloot aan deze ontwikkelingen. In het algemeen geldt, hoe flexibeler de vraag of productie, hoe beter voor de kosten/opbrengsten.

Voor elektriciteit geproduceerd uit zon- en windenergie door waterschappen en die op de markt wordt gezet zal de waarde dus dalen. Deze elektriciteitsstromen kunnen dan bv worden ingezet voor een P2G installatie. Er zullen naar verwachting op de langere termijn (10-20 jaar) ca 4.000 uren per jaar ontstaan met een lage prijs van gemiddeld 10 €/MWh. Voor dit rapport nemen we een gemiddeld tarief van 20 €/MWh in het startjaar voor teruggeleverde elektriciteit aan. Deze waarde zal op middellange termijn al vrij realistisch kunnen zijn voor het gewenste aantal draaiuren (ca. 4.000). Deze waarde neemt langzaam af door een negatieve indexatie.

1.3.2 WARMTE

Er is een grote vraag naar duurzame warmte in Nederland. Of het nu hoge temperatuur warmte zoals restwarmte uit een biogasWKK is of lage temperatuur zoals warmte uit effluent of rioolbuizen. Waterschappen kunnen door hun nabijheid vaak een rol spelen in de gemeente(s) waar ze aan verbonden zijn. Ook een P2G unit kan nuttige warmte produceren, hetzij voor de gistingstanks of voor externe afnemers.

De waarde van warmte is afhankelijk van het beschikbare alternatief, de locatie en de vraag van afnemer. Vaak wordt de prijs van warmte vergeleken met de kostprijs van warmte uit aardgas. Voor de nieuwbouw is aardgas nu verboden en zal moeten worden gekeken naar de kostprijs vanuit andere alternatieven.

1.3.3 GROEN GAS

Groengas zal een steeds belangrijkere rol gaan spelen binnen de transitie naar duurzame energie. Er liggen kansen bij het verduurzamen van bestaande bouw die niet kosteneffectief geschikt kan worden gemaakt voor lage temperatuurverwarming. Groengas kan voorzien in het CO₂ neutraal verwarmen van dit soort gebouwen. Ook binnen de transportsector is er een groot verduurzamingsvraagstuk, in dit geval wordt groen gas gewaardeerd in de vorm van hernieuwbare brandstof eenheden (HBE's).

De waarde van groengas wordt bepaald door de commodity prijs van aardgas + de waarde per HBE. In dit onderzoek is gerekend met een gemiddelde waarde van 0,60 €/Nm³.

1.3.4 H₂

Waterstof is nu vooral een waardevolle bouwsteen voor basischemicaliën en redox-processen. Waterstof is de laatste jaren sterk in opkomst in de mobiliteit sector, met name in zwaar transport en binnen/zeevaart.

De waarde van H₂ is sterk afhankelijk van de toepassing, drukniveau en volume. In de mobiliteit wordt een druk van 350-700 bar gehanteerd. De waarde voor deze toepassing ligt tussen 6-10 €/kg H₂ op basis van de huidige accijnsvrijstelling.

1.4 AANPAK ONDERZOEK

We hebben het volgende stappenplan gehanteerd bij dit onderzoek:

- Vaststellen operationele strategie
- Uitwerken technische inpassing
- Analyse inzet via uurmodel
- Analyse economische exploitatie
- Conclusies trekken haalbaarheid en toepasbaarheid

2

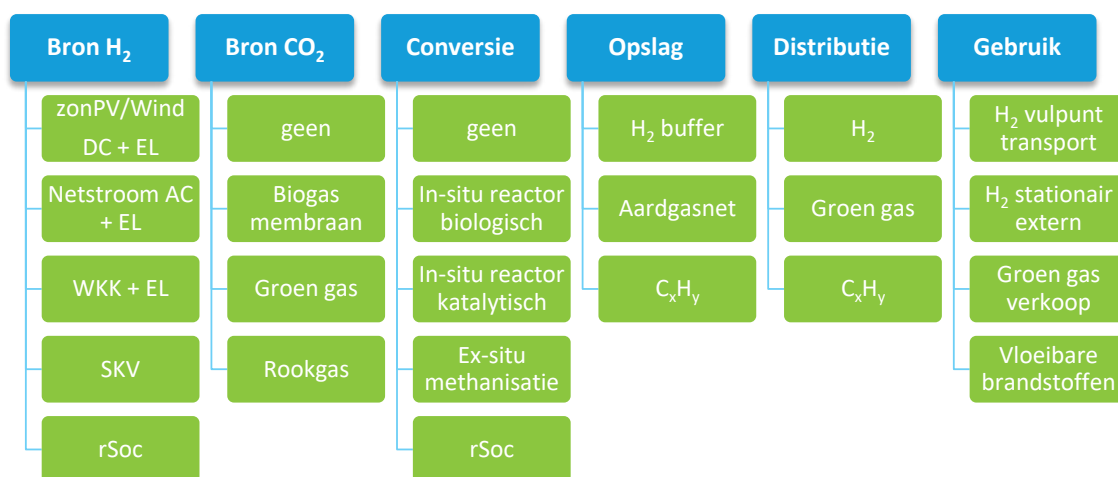
TECHNIEK POWER-TO-GAS

In dit hoofdstuk worden de mogelijkheden om P2G toe te passen uitgelicht en de diverse ketens worden beschreven. Eerst zullen de ketens worden toegelicht en daarna de afzonderlijke technieken.

2.1 KETENMOGELIJKHEDEN

Er zijn veel mogelijkheden om P2G toe te passen op een zuivering. De basis kan zijn om duurzame productie uit zon en wind om te zetten in H_2 . Daarna zijn er veel mogelijkheden om combinaties te maken met aanwezige componenten op de zuivering. Voor een overzicht van deze mogelijkheden zie Figuur 7. In het figuur worden de ketens steeds van links naar rechts gelezen, de blauwe koppen geven hierin de stappen aan.

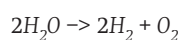
FIGUUR 7 OVERZICHT MOGELIJKE P2G KETENS



Allereerst worden de componenten toegelicht: elektrolyse, opslag en compressie van waterstof en de methanisatietechnieken. Daarna zal de keuze voor drie ketens nader worden onderbouwd.

2.2 WATERSTOF PRODUCTIE

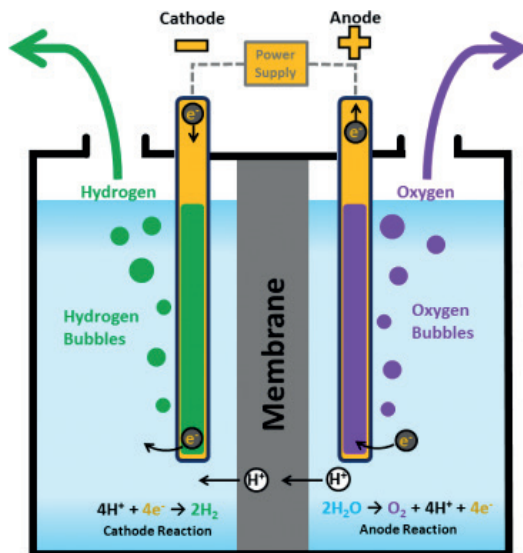
Via de elektrolyser wordt waterstof geproduceerd, waterstof wordt afhankelijk van de keten geleverd aan het H_2 tankstation of aan de methanisatiereactor. In de elektrolyser wordt elektriciteit omgezet in waterstofgas (H_2) middels de volgende reactie:



Naast elektriciteit is gedemineraliseerd water noodzakelijk voor de productie van waterstof, het bijproduct van elektrolyse is zuurstof. Per Nm^3 waterstof komt $0,5 Nm^3$ zuurstof vrij wat

gebruikt kan worden om de beluchttingsenergie in aeratietanks te verminderen. Ook komt er warmte vrij op lage- tot middelhoge temperatuur (35° – 85°C). Bij een input van 1 MW aan elektriciteit wordt er gemiddeld zo'n 220 Nm³/h waterstof bij een druk van 15 tot 30 bar geproduceerd.

FIGUUR 8 PEM ELEKTROLYSE [4]



BELANGRIJKSTE EIGENSCHAPPEN

Er zijn momenteel drie elektrolyser types beschikbaar voor de productie van waterstof: Alkaline, Polymer Electrolyte Membrane (PEM) en de Solid Oxide Electrolyser (SOEC/rSOC).

In Tabel 1 staan de belangrijkste eigenschappen van alkaline, PEM en rSOC elektrolyzers weergegeven. Dit zijn tevens de waarden waarmee de businesscases zijn doorgerekend. In de volgende sectie van dit document worden beide technieken verder toegelicht en met elkaar vergeleken. Alleen Alkaline en PEM elektrolyzers zijn momenteel commercieel verkrijgbaar, het rSOC type is daarom verder buiten beschouwing gelaten. Verdere details zijn te vinden in de bijlage.

TABEL 1 ELEKTROLYSER EIGENSCHAPPEN

Type	Deellast	Efficiency nominaal	Leveringsdruk (bar)	Degradatie %/1000 uur	Investering 2020 (€/kW)
Alkaline	Vanaf 20%	63%	30	0,11	630
PEM	Vanaf 0-150%	60%	30	0,25	1000
SOEC	Vanaf 0-125%	82%	10	0,2	-

2.2.1 OVERIGE EIGENSCHAPPEN

EFFICIENCY

De efficiency van een elektrolyser is gedefinieerd als de elektriciteitsinput per geproduceerde normaalkuub waterstofgas (kWh/Nm³ H₂). De efficiency van een elektrolyser neemt af bij een hogere belasting. De betere efficiency onder deellast is gunstig vanwege de variabele biogas-productie (zie paragraaf 3.3.2) en variaties in duurzame elektriciteitsoverschotten mits de dimensionering van de diverse componenten is geoptimaliseerd.

ONDERSTE MODULATIEGRENEN

Alkaline en PEM elektrolyzers kennen een aanzienlijk verschil in de onderste modulatiegrens (inschakel vermogen). De meeste PEM elektrolyzers zijn in staat om in te schakelen vanaf 0% tot 5% van de ondergrens van het vermogen. Alkaline elektrolyzers zijn doorgaans pas in staat om ingeschakeld te worden bij circa 20% van het minimale vermogen. Door dit verschil zullen alkaline elektrolyzers minder bedrijfsuren maken bij een sterk wisselende duurzame opwekking. Dit effect kan worden verkleind door een kleiner nominaal elektrolyse vermogen te kiezen of meerdere units in cascade te schakelen. Een andere optie is het toepassen van een elektrische accu, deze dient als buffer en kan daarmee momenten met te lage duurzame productie overbruggen.

OPSTARTEN/AFSCHAKELEN

PEM elektrolyzers staan bekend om het beter kunnen volgen van variabele duurzame opwekkingsprofielen, ze zijn vanuit een koude start snel operationeel en kennen een steile ramp-up rate (toename van het vermogen/seconde). Tevens zijn PEM's in staat om tijdelijk tot 150% van hun vermogen te leveren. Alkaline elektrolyzers reageren trager, dienen vanuit een koude start eerst verwarmd te worden en dienen enkele uren zonder verwachte duurzame opwek op bedrijfstemperatuur te worden gehouden.

DEGRADATIE EN LEVENSDUUR

Elk jaar neemt de efficiency van de elektrolyser af. Dit efficiencyverlies treedt voornamelijk op in de stacks en wordt veroorzaakt door diverse chemische en mechanische verouderingsprocessen. Doorgaans wordt dit efficiency verlies aangeduid als de degradatie en vertaald naar een efficiency verlies per duizend draaiuren. Het effect van degradatie uit zich vooral in een toename van het elektriciteitsverbruik bij een gelijkblijvende waterstofproductie.

De daadwerkelijke jaarlijkse degradatie is afhankelijk van het jaarlijks aantal bedrijfsuren en hangt daarmee af van het opgestelde duurzame vermogen én het elektrolyser vermogen. De technische levensduur van de stack is dus vooral afhankelijk van het aantal bedrijfsuren per jaar, de stacks van de elektrolyser zijn doorgaan na circa 15 jaar toe aan vervanging.

INVESTERING, ONDERHOUD EN VOLWASSENHEID

Alkaline elektrolyzers worden al sinds 1920 geproduceerd en zijn daarmee al bijna 100 jaar op de markt. Dit heeft als voordeel dat de techniek volwassen en doorontwikkeld is, dit is een van de redenen dat het prijspeil lager ligt dan van PEM elektrolyzers. Eveneens is het hierdoor de verwachting dat de techniek niet snel veel in prijs zal gaan afnemen. Dit in tegenstelling tot PEM elektrolyzers welke een stuk korter op de markt zijn. De prijzen liggen ongeveer een factor 2 hoger en zullen naar verwachting flink dalen binnen de komende 10 jaar.

2.3 OPSLAG EN COMPRESSIE VAN WATERSTOF

Waterstof is een zeer licht gas met een lage dichtheid. Mede door deze lage dichtheid is de energie-inhoud per kubieke meter gas slechts één derde ter vergelijking met dat van Gronings aardgas, respectievelijk 2,97 kWh/Nm³ en 8,79 kWh/Nm³. Ook heeft de lage dichtheid tot gevolg dat het gas moeilijker is op te slaan, de kleine moleculen ontsnappen makkelijker. De lage dichtheid en lage energie-inhoud zorgen voor extra aandachtspunten rondom de opslag van waterstofgas.

2.3.1 OPSLAG ONDER DRUK

Vanwege de lage dichtheid is het niet zinvol om waterstof onder atmosferische druk op te slaan. Er is een groot volume nodig waarbij er weinig energie wordt opgeslagen. Daarom wordt er vaak gekozen om waterstofgas onder druk op te slaan (15-200 bar). In de mobiliteitssector zijn de volumes de beperkende factor en wordt waterstof tussen drukken van 350 en 700 bar in speciale koolstofcomposiet tanks opgeslagen. Bij opslag en levering op deze drukken ontstaan extra kosten voor compressie, koeling en geschikte opslagtanks.

In de situatie waarin waterstof wordt geleverd aan de methanisatiereactor zijn drukken van circa 6-8 bar voldoende, opslag onder hoge druk is dus niet noodzakelijk. Een logische druk voor opslag resulteert uit de druk waarmee het waterstof door de elektrolyser wordt geproduceerd (circa 15-30 bar). Bij deze drukken zijn conventionele stalen cilinders toepasbaar.

OVERIGE OPSLAGVORMEN

Een alternatief is om waterstof vloeibaar op te slaan, de dichtheid neemt hiermee enorm toe waardoor het opslagvolume afneemt. Waterstof wordt echter pas vloeibaar bij een temperatuur van -253°C . Om deze temperatuur zonder teveel verliezen in stand te houden zijn zeer goed geïsoleerde opslagtanks nodig. Tevens zorgt cryogene opslag tot een energieverlies van wel 40% (zonder uitnutting van de restwarmte) vanwege het energieverbruik voor koeling.

Andere vormen van opslag zijn bijvoorbeeld metaalhydrides of het binden aan organische stoffen zoals gebeurt bij vloeibare organische waterstof dragers (LOHC's). De meeste van deze technieken zijn nog niet op commerciële schaal verkrijgbaar of hebben andere randvoorwaarden die niet passen binnen de scope van dit onderzoek.

2.3.2 COMPRESSIE VAN H_2 – VULPUNT

De mobiliteitssector heeft vanwege de beperkte ruimte voor opslag behoefte aan opslag bij drukken van 350 tot 700 bar. Hiertoe dient de geproduceerde waterstof eerst te worden gecomprimeerd vanaf circa 15 a 30 bar. Energieverliezen treden op bij compressie en bij het vullen van de tanks. De energie die benodigd is bij compressie loopt op tot circa 14% van de energie-inhoud van het waterstofgas bij compressie tot 800 bar. Het grootste gedeelte van deze compressie energie komt vrij als warmte, de verdere benutting van deze restwarmte staat beschreven onder paragraaf 3.4.

Daarnaast dient er gekoeld te worden tijdens het vullen van tanks van voertuigen, dit wordt veroorzaakt door de negatieve Joule-Thompson coëfficiënt van waterstof. Doorgaans koelt gas juist af bij expansie, in het geval van waterstof is dit niet het geval, er vindt opwarming plaats. Bij het snel vullen van tanks is dan ook koeling van het waterstof nodig om schade aan de tanks door oververhitting te voorkomen. Het energieverbruik hiervoor bedraagt circa 2-3% van de totale energie-inhoud per kg waterstof.

2.4 TECHNIEK METHANISATIE

Er bestaan diverse technieken om synthetisch methaan te produceren. Binnen dit onderzoek is alleen gekeken naar methaan productie met als bouwstenen kortcyclische CO_2 (vanuit gisting) en waterstof uit elektrolyse middels duurzame productieoverschotten. De volgende paragrafen beschrijven achtereenvolgens de volgende methanisatietechnieken:

- Biologische methanisatie
- Katalytische methanisatie

METHANISATIETECHNIEK

Het doel van methanisatie is om alle CO₂ moleculen te laten reageren zodat volledige conversie plaatsvindt en er alleen methaan wordt geproduceerd. Hiertoe is het van belang om een stoichiometrische verhouding van CO₂ en H₂ in de methanisatiereactor aan te houden. Bij het methanisatieproces is de verhouding waterstof tot CO₂ gelijk aan 4:1 en wordt beschreven middels de volgende formule:

Het exotherme methanisatieproces heeft een efficiency van circa 75-80%, het verlies bestaat uit warmteproductie ca. 15% en de productie van nieuwe cellen van circa 5%. De restwarmte kan nuttig worden ingezet voor andere processen, dit staat verder toegelicht onder sectie 3.4.. Het laten reageren van waterstof en koolstofdioxide kan zoals eerder aangeven op meerdere manieren plaatsvinden. Er is gekeken naar biologische en katalytische methanisatie.

2.4.1 BIOLOGISCHE METHANISATIE

Het biologische methanisatieproces is omstreeks 1906 uitgevonden en sindsdien verder ontwikkeld. Het proces vindt plaats onder anaerobe condities op een thermofiel temperatuurniveau (circa 50 tot 70°C). De omzetting van CO₂ en H₂ vindt plaats door micro-organismen (hydrogrotrofs) uit de Archaea bio domeinen.

Een beperkende factor bij biologische methanisatiereactoren is de reactiesnelheid van H₂ en CO₂, dit wordt vooral veroorzaakt door de lage oplosbaarheid van H₂. Om de reactiesnelheid te verhogen (compactere reactor design, lagere kosten) zijn diverse reactortypes ontworpen. De reactiesnelheid kan het simpelst worden verhoogd door gebruik te maken van roermechanismen in de reactortank.

Biologische methanisatie kan op twee manieren worden uitgevoerd, zowel in-situ als ex-situ. Beide technieken kennen hun voor- als nadelen en staan hier verder beschreven.

TABEL 2 VERGELIJKING BIOLOGISCHE METHANISATIETECHNIKEN

Type	Procesbeheersing	Reactiesnelheid	Omzetting CO ₂	Investering
In-situ	Uitdagend	Beperkt	Beperkt	Beperkt
Ex-situ	Controleerbaar	Verbeterd	Volledig	Hoog

IN-SITU BIOLOGISCHE METHANISATIE

Bij het biologische in-situ proces wordt waterstof direct aan de gistingstank gevoed. Zowel het gistingproces tot biogas als methanisatie van CO₂ en H₂ vinden in één tank plaats. Het biogas reageert met het waterstof waardoor methaan wordt geproduceerd. Het voordeel aan dit procedé is dat er geen aparte methanisatiereactor nodig is en het biogas niet vooraf gereinigd of gescheiden hoeft te worden.

Er zijn echter ook diverse nadelen te noemen aan het directe invoeden van waterstof. Het gistingproces is gevoelig voor invloeden van buitenaf zoals, temperatuur, partiële waterstofspanning¹ en samenstelling van organisch materiaal (pH-waarde). Omdat het gistingproces en het methanisatieproces beiden andere ideale condities vereisen is het is tot op heden niet mogelijk gebleken om zowel het gistingproces alsook het methanisatieproces in één tank tegelijkertijd te kunnen optimaliseren. Mede hierdoor is een volledige conversie van CO₂ niet mogelijk waardoor het biogas nog 20 tot 25% CO₂ zal bevatten. Daardoor is er nog altijd een nabewerkingsstap nodig om tot aardgaskwaliteit te komen.

1 Heeft met name invloed op de acetogenese stap in het gistingproces

Drukginging Bareau

Via de techniek Autogenerative High Pressure Digestion (AHPD) is een in-situ reactor ontwikkeld waarbij slibgisting op een druk tot 20 bar plaatsvindt. Het geproduceerde groengas heeft hierbij een methaangehalte tot 95%, wat een goed resultaat is voor in-situ methanisatie. Deze techniek wordt momenteel verder ontwikkeld door een consortium met o.a. GasTerra. Er zijn concrete plannen om deze techniek op korte termijn middels een pilot installatie op Ameland te testen om daar de groengas productie te verhogen [5].

EX-SITU BIOLOGISCHE METHANISATIE

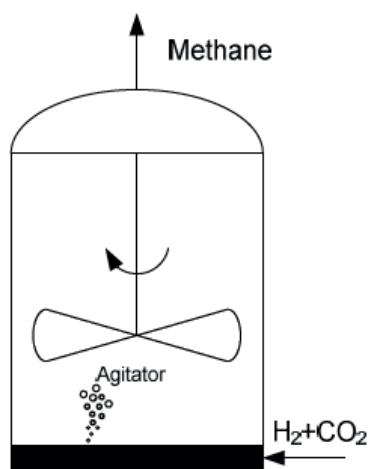
In tegenstelling tot biologische in-situ methanisatie vindt dit proces wel in een aparte reactor plaats. Er zijn twee mogelijkheden, biogas en waterstof worden aan de reactor gevoed. Hierbij is geen scheiding van het biogas noodzakelijk. De tweede optie is het dat het biogas eerst wordt gescheiden in CO_2 en CH_4 . Alleen de CO_2 stroom gaat naar de reactor toe en reageert daar met het waterstof. Beide technieken hebben voor- en nadelen:

Bij direct gebruik van het biogas is een groter reactor volume noodzakelijk, er zit immers maar 40% CO_2 in het biogas. Het alternatief is het invoeden van puur CO_2 , het biogas zal eerst moeten worden gescheiden middels een aparte installatie zoals een PSA.

Om de reactiesnelheid van het proces te verhogen wordt doorgaans een roermechanisme toegepast. Het nadeel hiervan is dat het energieverbruik van het proces toeneemt, gangbaar is een energieverbruik is van circa 1 kWh per geproduceerde $\text{Nm}^3 \text{CH}_4$ (10% van energie-output).

FIGUUR 9

BIOLOGISCHE METHANISATIETREACTOR [6]



MicrobEnergy

In het Duitse Allendorf staat een 300kW pilot P2G installatie waarbij groengas wordt geproduceerd. Waterstofproductie vindt plaats via PEM elektrolyzers van 150kW per stuk (totaal 60 $\text{Nm}^3 \text{H}_2$ per uur) [7]. De waterstofbuffer capaciteit bedraagt circa 20 minuten van de nominale productie. In de biologische methanisatiereactor komen waterstof en CO_2 samen, het methanisatieproces vindt plaats op ongeveer 60°C - 70°C bij een druk van maximaal 16 bar in een reactorvolume van 5m

FIGUUR 10

P2G INSTALLATIE MICROENERGY



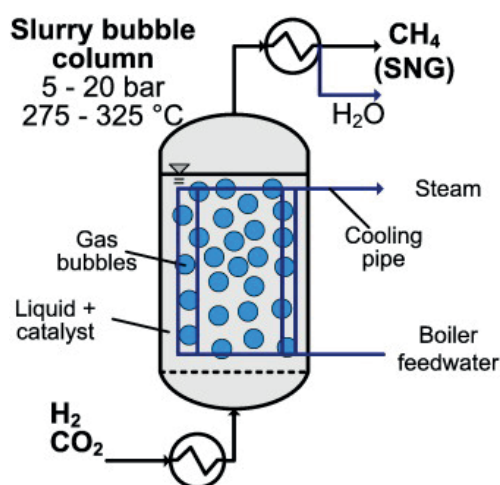
2.4.2 KATALYTISCHE METHANISATIE

Ook het katalytische methanisatieproces is al lange tijd geleden ontwikkeld (1902) en is vooral rondom de oliecrisis van de 70' er jaren veel toegepast in grote installaties. Het doel ligt nu vooral op het kosten efficiënt ontwerpen op kleinere schaal en gebruik van duurzame (intermitterende) energie. Katalytische methanisatie vindt plaats op een hogere temperatuur dan de biologische variant (200-550°). De katalysator wordt toegepast om de reactiesnelheid te verhogen. Het proces verloopt via het Sabatier proces.

Een katalytische reactor kan niet overweg met biogas en de lichte verontreinigingen, zoals zwavel, die hier doorgaans in zitten. Het is daarom van belang dat het biogas wordt gescheiden en gereinigd zodat er alleen CO₂ aan de reactor wordt gevoed.

FIGUUR 11

KATALYTISCHE METHANISATIETREACTOR [8])



ETOGAS

In 2013 is in Duitsland een 6MW P2G installatie door ETOGAS in gebruik genomen, CO₂ verkregen uit gisting wordt omgezet tot groengas en geleverd aan een wagenpark van Audi [9].

In de P2G installatie worden drie alkaline elektrolyzers van 2MW gebruikt voor de productie van waterstof (totaal 1.300 Nm³ H₂ per uur). De katalytische methanisatiereactor heeft een

capaciteit van 325 Nm³ groengas per uur. De capaciteit van de waterstofbuffer bedraagt één uur. Zowel de restwarmte van de reactor ca. 300°C als die van de elektrolyser <100°C worden benut.

De bedrijfstijd van de installatie bedraagt circa 4.000 uur per jaar.

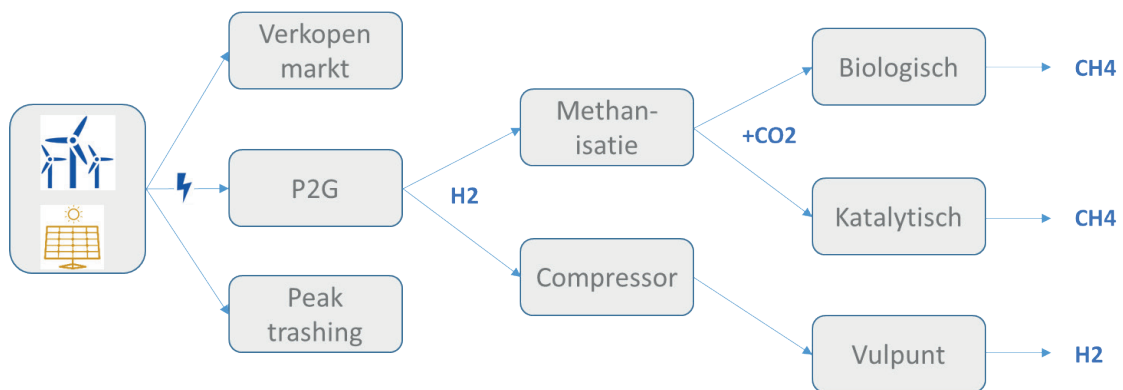
FIGUUR 12 ETOGAS P2G INSTALLATIE (BRON: EWE NETZ)



2.5 KEUZE KETENS

Om de mogelijkheden voor een P2G keten te bepalen wordt een selectie gemaakt van drie ketens. We vergelijken vervolgens de verschillende techniekroutes na de P2G unit. We maken daarbij voor methanisatie onderscheid in biologische en katalytische processen én in-situ en ex-situ oplossingen. Voor een versimpeld schema zie onderstaande figuur:

FIGUUR 13 VERSIMPELD STROOMSCHEMA P2G



In onderstaande tabel is een overzicht gemaakt van de diverse eigenschappen van de ketens na de P2G unit. De totale P2G efficiency met o.a. de inzet van restwarmte en reductie van beluchttingsenergie is afhankelijk van de dimensionering van de verschillende componenten. Deze resultaten worden in hoofdstuk 5 per keten gepresenteerd.

TABEL 3 VERGELIJKING NABEHANDELING P2G TECHNIEKEN

	TRL	Efficiency ² P2G	Directe voeding biogas	Temperatuur restwarmte	Overig
H ₂ compressie & vulpunt	8	60-65%	n.v.t.	Laag	
Biologische methanisatie in situ	7	35-40%	Altijd	Laag	Hogedruk reactor, pilot fase
Biologische methanisatie ex situ	9	45-50%	Mogelijk	Laag	Biogas of CO ₂ invoeden
Katalytische methanisatie ex situ	9	45-50%	Niet mogelijk	Midden/hoog	Ontzwaveling nodig

De biologische in-situ techniek is om de volgende redenen in dit onderzoek verder buiten beschouwing gelaten; geen volledige conversie H₂ mogelijk, het proces is erg complex om zowel te optimaliseren voor slibgisting als voor methaanproductie en daarnaast is de technologische volwassenheid momenteel nog beperkt.

In dit onderzoek is daarom gekeken naar de inpassing van verschillende ketens op basis van beschikbare en bewezen technologie:

1. Waterstofproductie middels elektrolyse en levering op hoge druk via vulpunt aan mobiliteit
2. Waterstofproductie middels elektrolyse en methaanproductie middels *ex-situ* katalytische methanisatie
3. Waterstofproductie middels elektrolyse en methaanproductie middels *ex-situ* biologische methanisatie

In de onderstaande paragraaf wordt de keuze voor de elektrolyser verder beschreven.

2.5.1 KEUZE ELEKTROLYSER

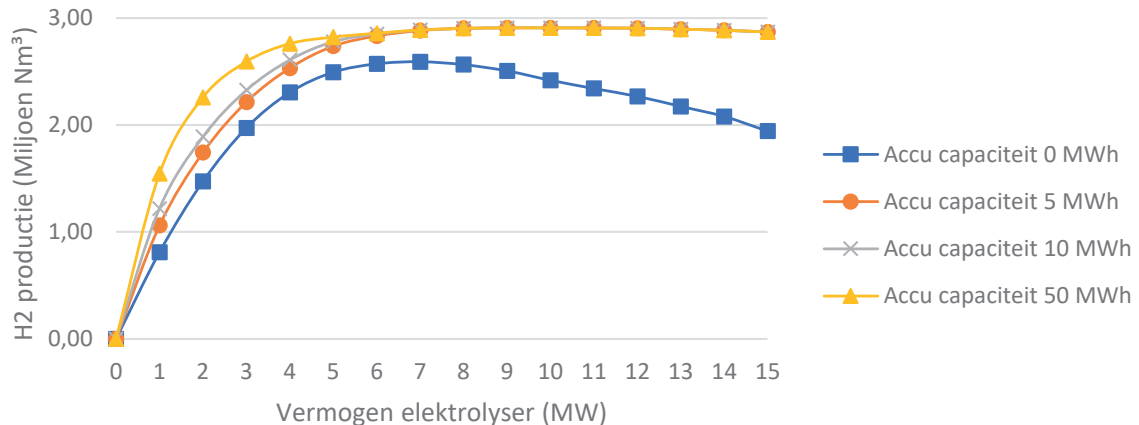
Er is onderzocht welke combinatie van elektrolyser type, elektrolyser vermogen en opslagcapaciteit tot een maximale waterstof productie leidt.

Alkaline elektrolyser

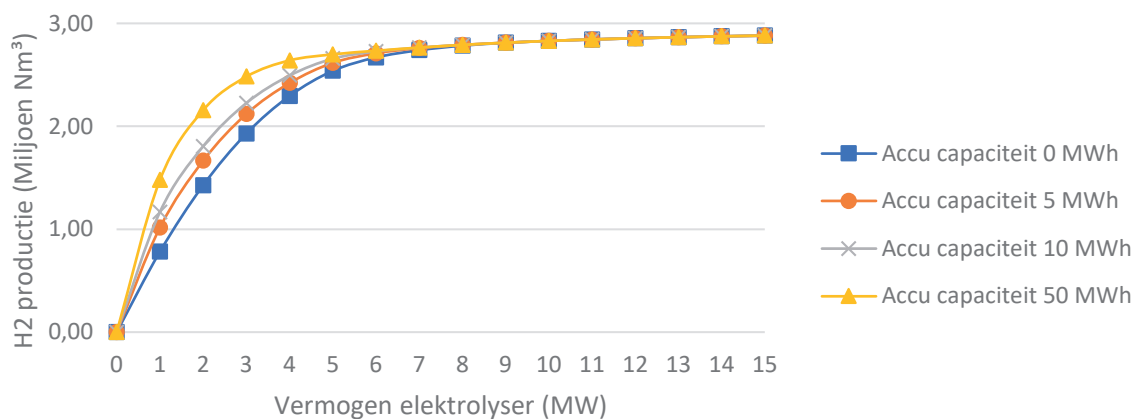
De maximale waterstofproductie vindt plaats bij een elektrolyser vermogen van 10 MW, een toename in vermogen heeft geen effect vanwege de beperkte beschikbaarheid van duurzame overschotten. Om een maximale waterstof productie te realiseren is een accupakket zinvol bij vermogens <5 MW. Bij grotere vermogens convergeren de jaarlijkse productiehoeveelheden bij de verschillende accugroottes door de beperkte hoeveelheid duurzame overschotten.

Zonder toepassing van een accupakket is er een verlaging van de productie zichtbaar, deze neemt flink af bij de grotere vermogens. Dit wordt veroorzaakt door de onderste modulatiegrens van de elektrolyser.

- 2 De P2G efficiency is gedefinieerd als de output (H₂ of CH₄) gedeeld door het elektriciteitsverbruik van de elektrolyser. Deze efficiency is exclusief de reductie in beluchtingsenergie, restwarmte inzet en het op druk brengen van het eindproduct.

FIGUUR 14 JAARLIJKSE H₂ PRODUCTIE: ALKALINE ELEKTROLYSER*PEM elektrolyser*

Ten opzichte van een alkaline elektrolyser heeft een PEM elektrolyser geen onderste modulatiegrens, hierdoor is zichtbaar dat de productie niet verder afneemt bij grotere vermogens. De elektrolyser is immers in staat om bij elk duurzaam overschot in te schakelen. Hierdoor blijft de geproduceerde hoeveelheid waterstof ook nog licht toenemen bij grotere vermogens. De inzet van accupakketten heeft een beperkte impact bij de lagere vermogens.

FIGUUR 15 JAARLIJKSE H₂ PRODUCTIE: PEM ELEKTROLYSER**VERGELIJKING**

Door de betere efficiency produceert een alkaline elektrolyser circa 4% meer waterstof op jaarbasis in vergelijking met een PEM elektrolyser bij gangbare vermogens. De combinatie van de betere energetische prestaties en de lagere investerings- en onderhoudskosten (zie ook Tabel 10) maken dat de alkaline elektrolyser verder zal worden gebruikt bij de doorrekening van de verschillende ketens.

TABEL 4 JAARLIJKSE WATERSTOFPRODUCTIE I.C.M. EEN 5 MWH ACCUPAKKET

Type	3 MW	5 MW	15 MW
Alkaline	2,21	2,74	2,87
PEM	2,12	2,62	2,88
Vershil (Alkaline vs. PEM)	4,27%	4,39%	-0,44%

3

INPASSING OP DE ZUIVERING

De configuratie van een P2G keten op een zuivering vereist een zorgvuldige voorbereiding in het schalen van de diverse componenten. De logica achter dit proces zal in dit hoofdstuk worden toegelicht.

3.1 OPERATIONELE INZET

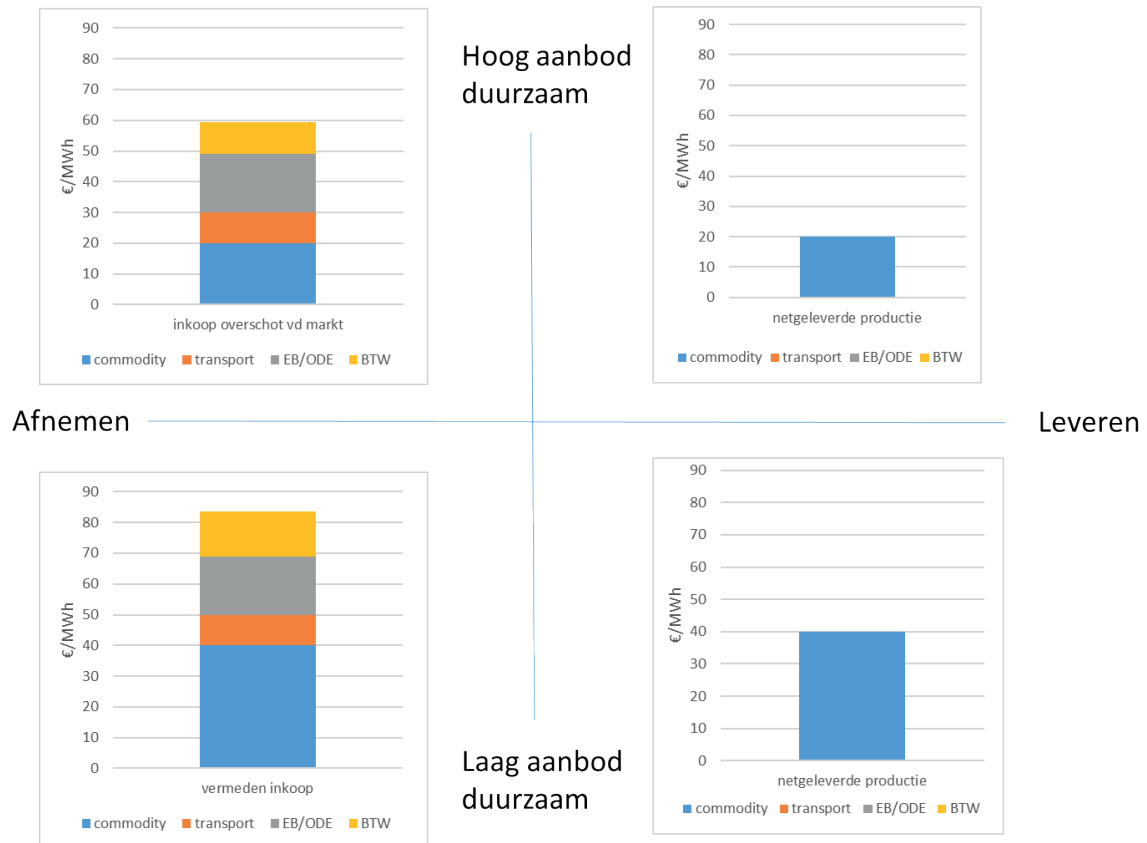
Het gebruik van een P2G installatie moet duidelijk operationeel doordacht worden. Het omzetten van 1 kWh aan elektriciteit in waterstof leidt zonder warmtebenutting tot een verlies van 30-35% van energie. Vanuit milieuoogpunt zouden daarom alleen overschotten op de elektriciteitsmarkt moeten worden omgezet in andere vormen van energie. Hierbij bedoelen we overschotten van duurzame bronnen die anders tijdelijk uitgeschakeld worden (het zgn. curtailment of peak-trashing).

Ook uit economisch oogpunt is het logisch om gebruik te maken van overschotten op de elektriciteitsmarkt omdat deze een lage kostprijs hebben. De kostprijs van de input in de elektrolyser is de gederfde waarde op de elektriciteitsmarkt. De vraag is dan wanneer er sprake is van een overschot op de markt. De nadruk in dit onderzoek ligt op werkelijke (technische) overschotten van duurzame productie op de momentane vraag in de zuivering.

VOOR/ACHTER DE METER

De grote vraag is of het noodzakelijk is om de duurzame productie ook achter de meter en dus op de eigen zuivering te hebben. Indien elektriciteit over een meter wordt geregistreerd is een variabele vergoeding voor transport verschuldigd en de fiscale vergoedingen energiebelastingen (EB) en opslag duurzame energie (ODE). Naast de locatie is het tijdstip van productie in de toekomst sterk van belang. Op momenten met veel duurzaam aanbod is de prijs laag en op momenten met weinig tot geen duurzaam aanbod is de prijs hoog. In Figuur 16 is een overzicht gegeven van de typische waarde voor en achter de meter per aanbodsituatie.

FIGUUR 16 VERGELIJKING KOSTPRIJS PER TYPE INPUT IN P2G UNIT



In Figuur 16 valt te zien wat de waarde van input is per locatie en tijdstip. Dit leidt op hoofdlijnen tot vier inputwaarden voor P2G:

TABEL 5 WAARDE P2G PER SCENARIO

Scenario	Plaats kwadrant	Type input	Typische waarde	Toelichting
1	Afnemen/ laag aanbod	Extra inkoop v.d. markt	85 €/MWh	Prijs bij onvoldoende productie duurzaam
2	Afnemen/ hoog aanbod	Inkoop overschot v.d. markt	55 €/MWh	Prijs indien ingekocht van derden
3	Leveren/ laag aanbod	Teruglevering	40 €/MWh	Prijs op de markt
4	Leveren/ hoog aanbod		20 €/MWh	

Duidelijk is dat het gebruik maken van eigen overschotten op momenten met veel duurzaam aanbod het meest wenselijk is vanwege de lage kostprijs.

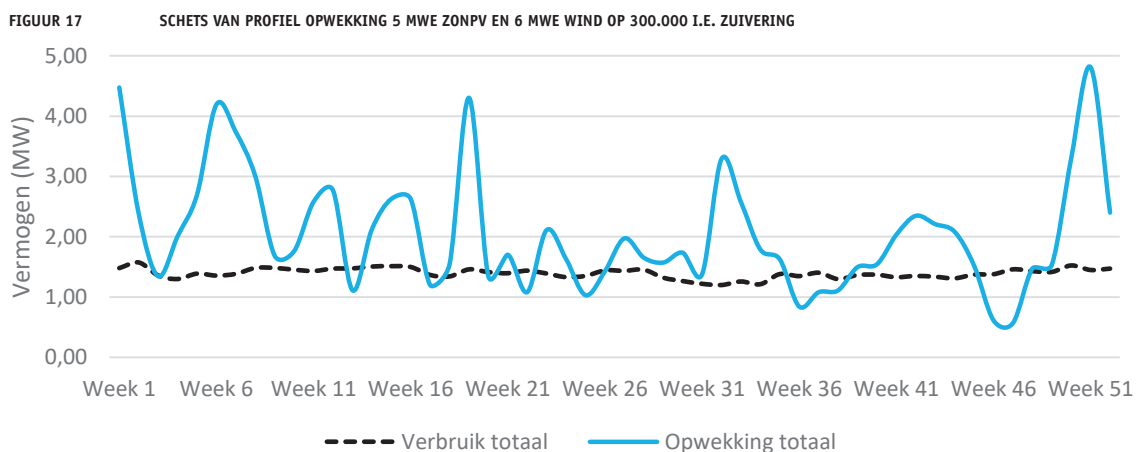
Er lopen een aantal wetgevingstrajecten die het verschil tussen scenario 2 en 4 moeten wegnemen voor aanbieders van flexibele capaciteit. Zo zijn er ideeën om de transportkosten variabel te maken zodat deze geen knelpunt vormen. Ook voor de energiebelasting is er recent een wet aangenomen die het mogelijk maakt voor partijen die een accu gebruiken om geen dubbele energiebelasting te betalen. Dubbele energiebelasting vindt plaats wanneer een accu wordt opgeladen met elektriciteit van het net (inkoop elektriciteit) en weer wordt ontladen op het net. Op dat moment koopt een andere gebruiker deze elektriciteit in en betaalt eveneens energiebelasting over dezelfde opgewekte elektriciteit.

3.2 DIMENSIONERING

In de voorgaande paragraaf werd duidelijk dat een P2G installatie het beste gebruik kan maken van duurzame productieoverschotten met een lage waarde. Maar hoe moet de P2G installatie dan worden gedimensioneerd? Kunnen alle pieken worden afgevangen of slechts een deel van de piek?

De sleutel tot een economisch zinvolle dimensionering is een optimaal gebruik van de meest kapitaalintensieve component(en), namelijk de elektrolyser eventueel in combinatie met de methanisatiereactor. Het aantal jaarlijkse draaiuren is daarbij de cruciale factor. De draaiuren van de elektrolyser zijn afhankelijk van het productiepatroon, de opgestelde vermogens van duurzame bronnen en natuurlijk de eigen vraag. Voor de methanisatiereactor geldt dat het aantal draaiuren afhankelijk is van de waterstofproductie en het productiepatroon van CO₂.

Het uitgangspunt voor de analyse is 5 MWp zonPV en 6 MWp windenergie. In onderstaande figuur is weergegeven hoe de wekelijkse productie van deze vermogens zich verhoudt tot de vraag op een zuivering van 300.000 i.e.



Duidelijk is te zien dat er flinke overschotten bovenop de vraag worden geproduceerd, zon met name in de zomer en wind met name in herfst en winter. Omdat zon en wind grotendeels complementair zijn is een systeem dat gebruik kan maken van beide bronnen het meest optimaal. Een systeem gebaseerd op alleen zonPV of alleen wind werkt beperkend voor het aantal vollasturen van de elektrolyser. Een optimaal systeem maakt ca 4000 draaiuren, waarvan het merendeel vollasturen

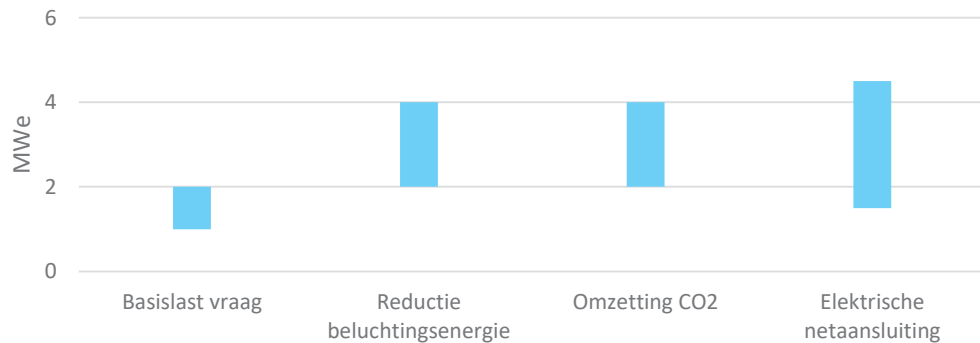
Veel meer draaiuren zijn niet logisch omdat er dan waarschijnlijk elektriciteit wordt gebruikt die ook regulier gebruikt had kunnen worden op de zuivering of andere eindgebruikers en derhalve ook niet als overschot zou worden aangemerkt. De elektrolyser moet niet op 100% van de duurzame pieken worden gedimensioneerd vanwege het lage aantal vollasturen en hoge kosten voor het geïnstalleerde vermogen.

3.3 KRITISCHE RANDVOORWAARDEN

Voor een goede inpassing van een P2G installatie in de elektriciteits-, biogas- en warmtehuishouding is een goed inzicht nodig in de verbruikspatronen, buffercapaciteiten en transportvermogens. In Figuur 18 is een overzicht gegeven van de beperkende voorwaarden voor een zuivering 300.000 i.e. waarbij alle factoren zijn teruggerekend naar MWe elektrolyser

vermogen voor conversie van CO₂ (bij de methanisatieketen) en reductie op energie voor beluchting.

FIGUUR 18 VERMOGENSGRENZEN P2G VOOR 300.000 I.E. ZUIVERING



In de figuur is te zien hoe een P2G installatie ingepast kan worden op een zuivering. Allereerst is er een behoorlijk groot piekvermogen aan duurzame energie op de zuivering nodig om voldoende elektriciteit te genereren voor de P2G installatie. Voor een maximale impact van conversie van het CO₂ in het biogas is een elektrolyser nodig van ca. 2-4 MWe (omzetting 15-20%) en voor een maximale impact op de reductie van beluchtingsenergie (reductie 20-25%) is er eveneens circa. 2-4 MWe nodig.

Voor de toepassing van P2G op de zuivering zullen daarom waarschijnlijk eerst de beschikbare duurzame energie (die anders wordt teruggeleverd) en beschikbare netcapaciteit de beperkende factoren worden.

3.3.1 IMPACT NETAANSLUITING

In de onderstaande balans is een overzicht van de beschikbare en benodigde aansluitvermogens bij de toepassing van duurzame energie op eigen perceel.

- Piek duurzaam vermogen + 10,1 MVA
- Piek eigen vermogensvraag - 2,3 MVA
- Piekvermogen teruglevering = 8,8 MVA³
- Capaciteit aansluitvermogen - 4,0 MVA
- Te realiseren verzwaring = 4,8 MVA

De inpassing van 5 MWe zonPV en 6 MWe windenergie levert een piekvermogen van 10,1 MVA. Na aftrek van eigen verbruik en de bestaande netcapaciteit blijkt dat er een flinke overschrijding wordt veroorzaakt door het opgestelde duurzame vermogen. Zonder inzet van een elektrolyser of accupakket dient het aansluitvermogen technisch en/of contractueel met tenminste 4,8 MVA te worden verhoogd.

REDUCTIE VERZWARING AANSLUITVERMOGEN

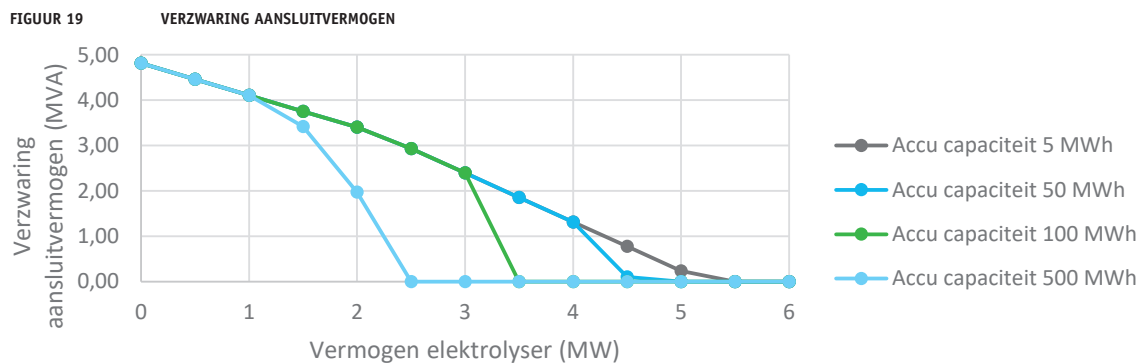
Met behulp van onderstaande grafiek is inzichtelijk gemaakt in welke mate een verzwaring van het aansluitvermogen nog nodig is wanneer een elektrolyser en accupakket worden ingezet. Hierbij is gekeken naar diverse elektrolyser vermogens en vier verschillende opslagcapaciteiten. Op de Y-as staat weergegeven met hoeveel MVA de aansluiting verhoogt dient te worden, op de X-as is het elektrolyser vermogen weergegeven.

3 Doordat de maximale duurzame overschotten en het maximale eigen verbruik niet altijd samen vallen valt het piekvermogen bij teruglevering hoger uit.

Tot een elektrolyser vermogen van 1MW is het niet zinvol om een accupakket neer te zetten, het eigen verbruik is te klein door het lage elektrolyser vermogen. De accu raakt snel vol waardoor productiepieken niet meer worden afgevangen, een verzwaring van 4MVA blijft noodzakelijk. Een betere oplossing, uit het oogpunt van reductie van netverzwaring, is het verder verhogen van het elektrolyser vermogen, dit zorgt voor een redelijk lineaire afname van de noodzakelijke verzwaring.

Om bij lage elektrolyser vermogens een netverzwaring te voorkomen is een zeer groot accupakket noodzakelijk. Bij hogere vermogens (bijvoorbeeld 4MWe) is de impact van accupakketten (5 MWh) beperkt. Accu's zijn hierbij alleen nodig voor opstart van een alkaline elektrolyser. Bij kleine opslagcapaciteiten ontstaan snel periodes waarin de accu vol zit, overschotten kunnen dan niet meer worden weggewerkt.

In Figuur 19 is de relatie tussen elektrolyser- en accuvermogen en de benodigde netverzwaring weergegeven.



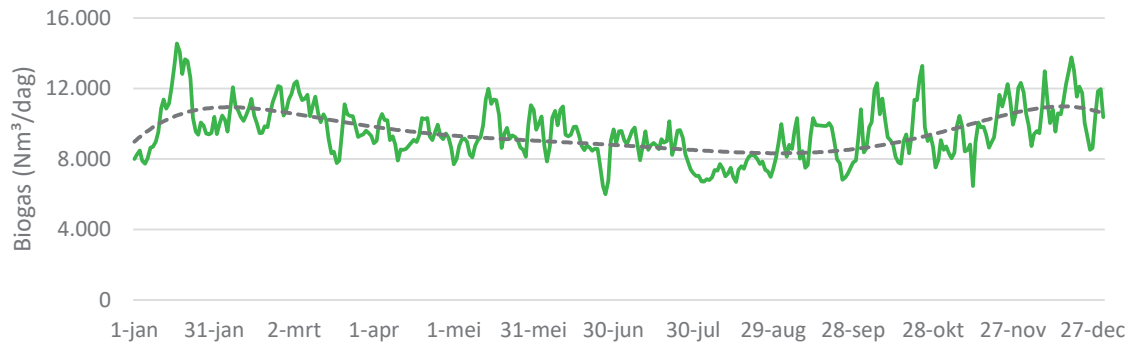
De daadwerkelijke reductie op de netverzwaringskosten is uiteindelijk sterk afhankelijk van de locatie (lengte kabeltracé) en de beschikbare capaciteiten op de kabel en in het transformatorstation.

3.3.2 BESCHIKBAARHEID BIOGAS

De opbrengst van duurzame elektriciteit heeft een grillig karakter, dit speelt in zekere mate ook voor biogas. We houden daarom rekening met beperkte buffering van elektriciteit bij een alkaline elektrolyser en waterstof. Ook moet rekening worden gehouden met afstelling op CO₂ uit biogas.

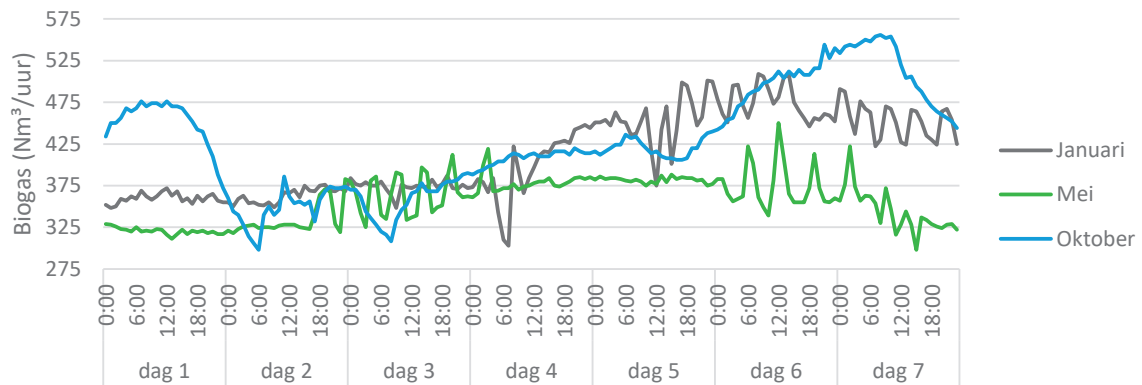
In Figuur 20 is de dagelijkse productie van biogas weergegeven. Het verloop is grillig, er zijn slechts enkele periodes zichtbaar waarop de productie een redelijk constant niveau heeft. Verder visualiseert de zwarte trendlijn de productiedip in de zomermaanden. De gemiddelde dagelijkse biogasproductie bedraagt circa 9.500 Nm³.

FIGUUR 20 JAARLIJKSE BIOGASPRODUCTIE



Voor de analyse van het verloop van de uurlijkse biogasproductie is gekozen voor drie periodes van elk zeven aaneengesloten dagen in de maanden januari, mei en oktober. Uit Figuur 21 komt naar voren dat er periodes zijn waarin de productie redelijk constant is (eerste drie dagen januari en eerste twee dagen mei), de productie in een halve dag tijd met circa 200 Nm³/uur daalt (eerste dag oktober) en dat er momenten zijn waarop de productie geleidelijk weer toeneemt (oktober dag vijf).

FIGUUR 21 UURLIJKSE BIOGASPRODUCTIE



Uit de analyse van de dagelijkse en uurlijkse data blijkt dat de biogasproductie een continue wisselend karakter heeft. Vanuit een economisch oogpunt gezien is het beter om overtollig CO₂ af te blazen dan dat de waterstofproductie- en methanisatiecapaciteit op het biogas profiel worden afgestemd (meer investeringskosten, beperkte hoeveelheid draaiuren). Hiermee dient rekening te worden gehouden bij de dimensionering van de rest van de componenten binnen de P2G installatie.

3.4 BENUTTING RESTWARMTE

Het slibgistingsproces heeft een vrij constante jaarlijkse warmtevraag (op ca. 38°C). Hiervoor wordt normaal gesproken een deel van de eigen biogasproductie ingezet door deze te verbranden in een ketel of WKK-installatie.

Door restwarmte van de elektrolyser, de methanisatiereactor of de waterstofcompressor aan het gistingsproces te leveren wordt de totale efficiency verhoogd en wordt de inzet van eigen biogas verminderd of zelfs vermeden. De mate waarin eigen biogas inzet voor warmteproductie kan worden vermeden is afhankelijk van de dimensionering en het aantal draaiuren van de componenten. Ook van invloed is de temperatuur waarop de restwarmte per compo-

nent ter beschikking komt en in hoeverre deze warmte is af te vangen. In Tabel 6 is een overzicht weergegeven van de temperatuur waarop de restwarmte naar verwachting vrijkomt en welk percentage van deze restwarmte per component is te benutten.

TABEL 6 MATE VAN RESTWARMTEBENUTTING

Component	Indicatie temperatuurniveau restwarmte	Warmte benutting van restwarmte
Elektrolyser	45°C	40%
Biologische methanisatiereactor	50°C	45%
Katalytische methanisatiereactor	70°C	60%
Waterstofcompressor	45°C	40%

Gemiddeld genomen is 10-25% van de energie-inhoud per geproduceerde m³ biogas nodig voor het handhaven van de juiste temperatuur [10]. Bij de gegeven biogasproductie in deze casussen en een energiebehoefte van 10% per m³ biogas zou er per jaar ongeveer 240.000 m³ biogas uit de eigen productie nodig zijn voor de warmteproductie. De daadwerkelijke reductie door de restwarmte inzet wordt per casus verder toegelicht.

3.5 REDUCTIE BELUCHTINGSENERGIE

Aerrietanks zijn voorzien van beluchting om de bacteriën hun werk te laten doen, hiermee wordt geurhinder tegengegaan. Beluchting vindt plaats door het inbrengen van lucht, gemiddeld genomen verbruikt een RWZI per 2,5 kg ingebrachte zuurstof 1 kWh aan elektriciteit, oftewel 0,4 kWh/kg zuurstof. Door het benutten van de zuurstof uit de elektrolyser wordt een deel van de zuurstofinbreng met lucht vervangen door pure zuurstof. In de VS wordt al sinds de jaren '70 gewerkt met de inbreng van zuivere zuurstof (high purity oxygen) bij grootschalige zuiveringen. Door de hoge kostprijs van zuurstof is de aandacht hiervoor de afgelopen jaren echter sterk afgenomen.

Doordat er pure zuurstof wordt ingebracht zal de effectiviteit per ingebrachte m stijgen, vergeleken met het zuurstofgehalte van lucht is dit een factor vijf hoger. De reductiefactor op de beluchtingsenergie die door het inbrengen van pure zuurstof wordt behaald is daarmee 1,6 kWh/kg zuurstof na toepassen van een correctie⁴.

De te behalen reductie hangt vooral af van de dimensionering van de elektrolyser en het beluchtingsprofiel. Het gehanteerde beluchtingsprofiel staat weergegeven in de bijlage sectie 8.3.2. De toepassing van zuivere zuurstof als beluchtingsbron kan daarnaast ook tot een verbetering van de slibkwaliteit te zorgen.

3.6 BESCHRIJVING CONFIGURATIES

De verschillende ketens zijn in deze paragraaf gevisualiseerd en toegelicht. Allereerst worden de uitgangspunten van de referentiesituatie verder toegelicht, hierna is een generieke beschrijving van de inpassing van een P2G installatie weergegeven. Vervolgens wordt er op de specifieke ketens ingezoomd.

4 Voor de reductiefactor is in deze studie een correctie van 20% op het maximaal theoretisch potentieel van 2 kWh/kg zuurstof aangehouden.

REFERENTIESITUATIE

Het uitgangspunt is de inpassing van een zuivering van 300.000 i.e. De profielgegevens zijn gebruikt van RWZI Nieuwveer van Brabantse Delta. Daarnaast gaan we in alle situaties uit van de toepassing van 5 MWp zonPV (ca. 5ha) en 6 MWp wind op land (ca. 2 windturbines)⁵. Bij deze uitgangspunten horen de jaarlijkse totalen zoals beschreven in Tabel 7.

TABEL 7

OVERZICHT TOTALEN REFERENTIESITUATIE

Type	Eenheid	Totaal
Totaal verbruik RWZI	MWh/jaar	12.200
Waarvan beluchting	MWh/jaar	6.700
Waarvan overig verbruik	MWh/jaar	5.500
Totale duurzame opwekking	MWh/jaar	18.000
Waarvan wind	MWh/jaar	12.800
Waarvan zonPV	MWh/jaar	5.200
Beschikbare netaansluiting	MVA	~4
Biogasproductie	Miljoen Nm ³ /jaar	3,48
Biogasgehalte	%	40
Waarvan CO ₂	Miljoen Nm ³ /jaar	1,39

De gehanteerde profielen voor de opwekking van duurzame elektriciteit, het verbruik van beluchtingsenergie⁶ en de productie van biogas zijn respectievelijk onder sectie 8.3.3, 8.3.2 en 3.3.2 terug te vinden.

De benodigde warmte voor gisting is afkomstig uit een biogasketel. Verder wordt ervan uitgegaan dat er een groengas opwaardeerinstallatie aanwezig is waardoor zuivere CO₂ ter beschikking is.

3.6.1 ALGEMENE OPZET P2G INSTALLATIE BIJ RWZI

In het onderstaande figuur zijn de belangrijkste componenten en stromen bij de inzet van een P2G installatie weergegeven. Het schema en de toelichting zijn van toepassing op zowel het H₂ tankstation als voor beide methanisatieketens.

1. Met de duurzaam opgewekte elektriciteit wordt eerst de eigen behoefte afgedekt, overschotten worden gebruikt voor de inzet van de elektrolyser.
 - a. Als er te weinig duurzame opwekking is om het eigen verbruik af te dekken dan wordt het restant ingekocht vanaf het openbare elektriciteitsnet.
 - b. Doordat de elektrolyser de benodigde beluchtingsenergie verlaagd kan een groter deel van de duurzame opwekking worden ingezet om de elektrolyser te laten draaien.
 - c. Overschotten die niet volledig door de elektrolyser kunnen worden opgemaakt worden ingezet om de accu (bij alkaline elektrolyzers) bij te laden.
 - d. Overschotten na het opladen van de accu worden terug geleverd aan het openbare elektriciteitsnet.
 - e. De accu wordt ingezet om de elektrolyser zoveel mogelijk draaiuren te laten maken.
2. De elektrolyser produceert waterstof en levert deze of aan de methanisatiereactor of direct aan het waterstof tankstation.
 - a. De vrijkomende zuurstof wordt aan de aeratietanks geleverd

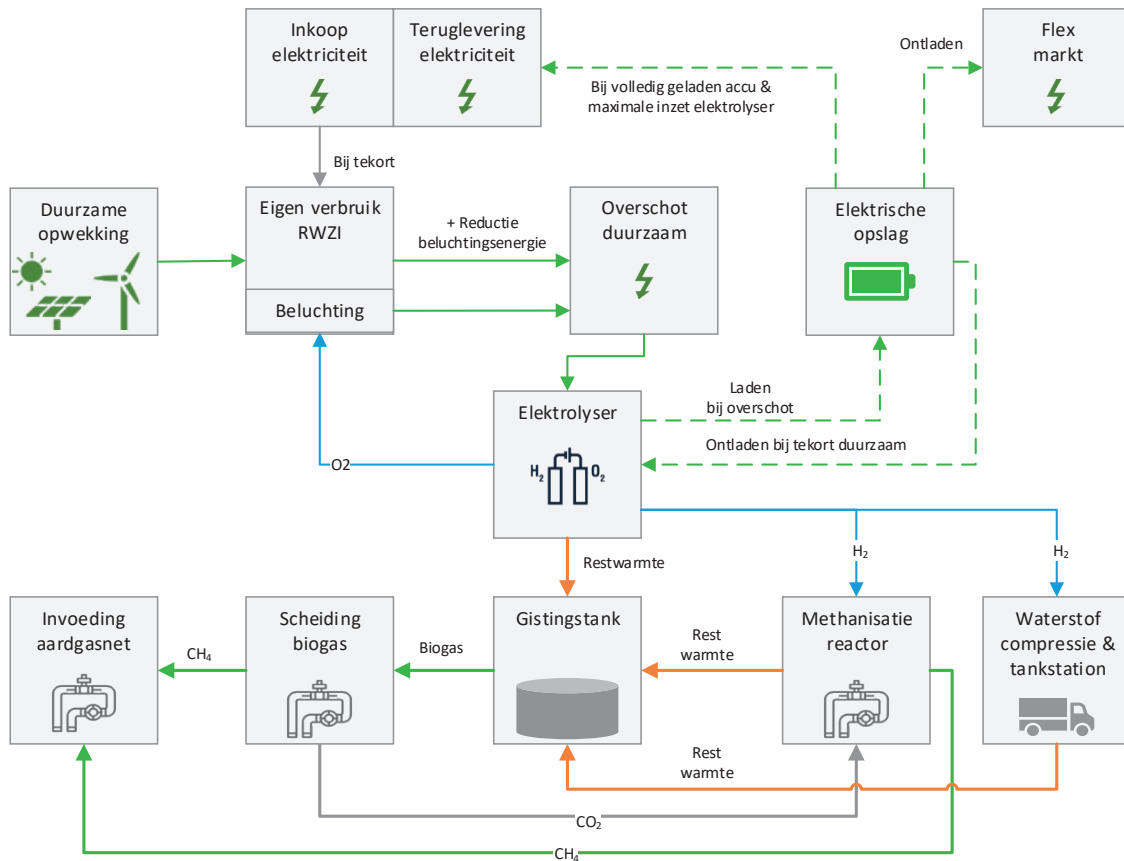
5 In samenspraak met de begeleidingscommissie is besloten om te rekenen met een opgesteld duurzaam vermogen dat leidt tot significante elektriciteitsoverschotten en dat redelijkerwijs nog op het perceel te plaatsen zou kunnen zijn.

6 Beluchtingsprofiel is gebaseerd op dagelijkse waarden gemeten waarden en teruggerekend naar een gemiddeld uurverbruik.

- b. Restwarmte vanaf de elektrolyser wordt ingezet voor het verwarmen van de gistingstank
3. In het geval van het produceren van methaan wordt een methanisatiereactor toegepast
 - a. Biogas vanuit de gistingstank wordt ontdaan van zwavel en andere verontreinigingen en gescheiden. Methaan uit het biogas wordt ingevoed in het aardgasnet, puur CO₂ wordt gevoed aan de methanisatiereactor.
 - b. Restwarmte van het methanisatieproces wordt aan de gistingstank gevoed.

FIGUUR 22

INPASSING P2G INSTALLATIE OP RWZI



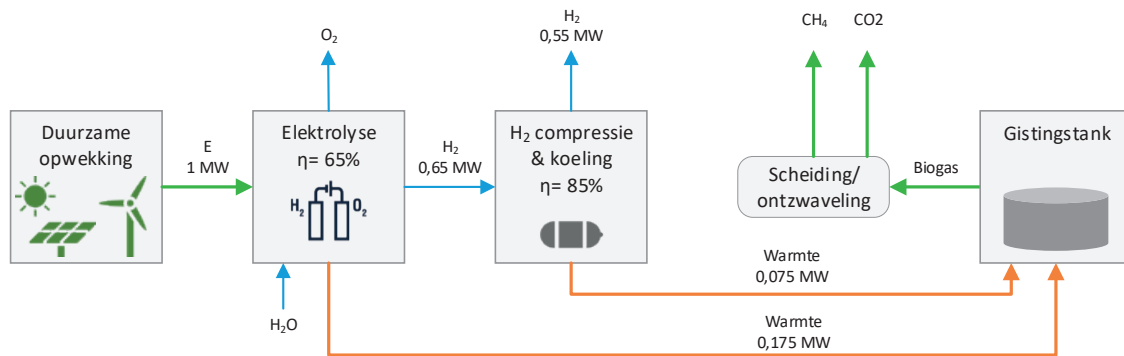
3.6.2 PROCESSHEMA'S H₂ TANKSTATION EN METHANISATIE

Voor de ketens H₂ tankstation en methanisatie staan de stromen binnen de processen in meer detail weergegeven. Tevens wordt de energiebalans per keten in kaart gebracht, hiertoe wordt er steeds met 1MW aan elektriciteit als input gestart en worden de efficiency per component en de totaal efficiency weergegeven.

H₂ TANKSTATION

In Figuur 23 staat het processchema van het waterstof tankstation weergegeven. Water wordt met elektriciteit in de elektrolyser omgezet tot waterstof, het restproduct zuurstof wordt aan de aeratietanks geleverd. Waterstof wordt standaard geproduceerd onder 30 bar, dit is te weinig voor toepassing voor de mobiliteitssector. Er vindt compressie plaats en het waterstof wordt met een druk van circa 750 bar opgeslagen.

De vrijkomende restwarmte van de elektrolyser en de H₂ compressor worden ingezet om de gistingstank van warmte te voorzien.

FIGUUR 23 PROCESSHEMA H₂ TANKSTATION

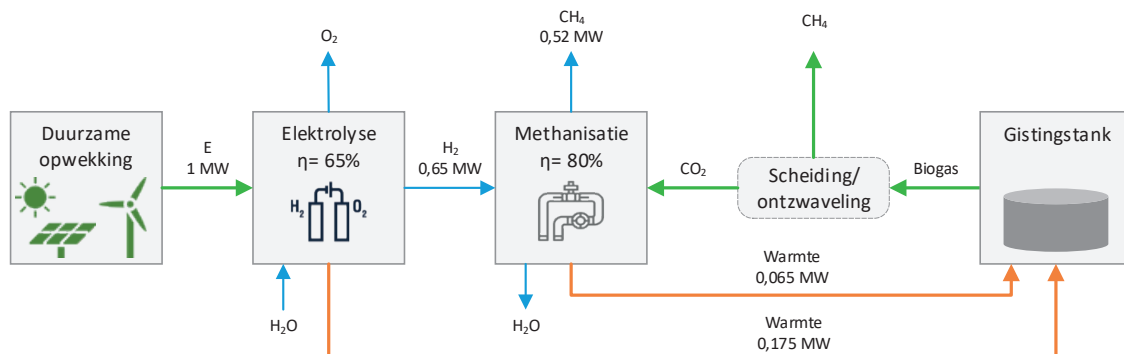
METHANISATIE

Het schema zoals in Figuur 24 is een versimpelde weergave van de ex-situ ketens biologische en katalytische methanisatie. Water wordt met elektriciteit in de elektrolyser omgezet tot waterstof, het restproduct zuurstof wordt aan de aeratiebassins geleverd. In de methanisatiereactor reageren waterstof en koolstofdioxide tot methaan. De restwarmte van de elektrolyser en de methanisatiereactor worden ingezet voor het verwarmen van de gistingstank.

Bij biologische methanisatie is het scheiden van het biogas niet noodzakelijk, er is dan wel een groter reactorvolume noodzakelijk in vergelijking met het alternatief, het voeden van pure CO₂. Bij de doorrekening van de ex-situ biologische methanisatie casus wordt het voeden van pure CO₂ aangehouden.

In het geval van katalytische methanisatie is het noodzakelijk om het biogas te ontzwellen om vergiftiging van de katalysator te voorkomen. Ook dient het gas gescheiden te worden, er wordt dus alleen CO₂ aan de methanisatiereactor gevoed.

FIGUUR 24 PROCESSHEMA METHANISATIEKETENS



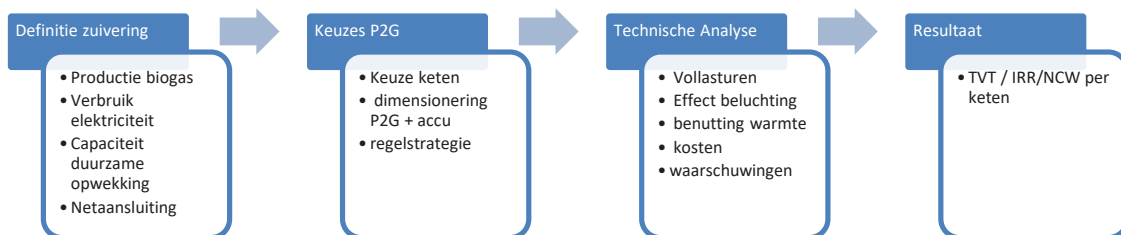
4

WERKING MODEL

Onderdeel van deze studie is de oplevering van een model dat diverse cases door kan rekenen. Dit model is te vinden op de site van STOWA. In dit hoofdstuk wordt kort beschreven wat het model doet en voor welke toepassingen deze gebruikt kan worden.

FIGUUR 25

OPBOUW MODEL





De gebruiker kan zelf optimaliseren door de waarde van diverse parameters in het model te veranderen, dit kan in de geel gearceerde velden. De optimalisatie kan zelf gekozen worden door te kijken naar uitkomsten zoals de benodigde investering, de TVT, de IRR of bijvoorbeeld de extra methaan productie.

BENODIGDE INVOER EN NAVIGATIE

In het model is de eerste stap het bepalen van de parameters van de zuivering:

1. Invullen elektriciteitsverbruik zuivering
2. Opgesteld duurzaam opwekkingsvermogen
3. CO₂ gehalte biogas en keuze voor eventuele inkoop van elektriciteit vanaf het net

 		Rekenmodel P2G Definitief v1.0 November 2018 Auteurs: Arjen de Jong & Ron Bol	
Legenda:			
Gele velden:		Invoer door gebruiker	
1: Elektriciteitsverbruik RWZI			
Referentieverbruik 300.000 i.e.		12.200	MWh/jaar
Eigen verbruik opgeven		Nee	
Eigen verbruik		-	MWh/jaar
2: Duurzame opwekking elektriciteit			
ZonPV		5	MWp
	<i>indicatie oppervlakte</i>	5,0	ha
	Opwekking elektriciteit	5.200	MWh/jaar
Wind		6	MWp
	<i>indicatie aantal stuks</i>	1,7	Turbines
	Opwekking elektriciteit	12.800	MWh/jaar

Hierna moet een keuze gemaakt worden voor het door te rekenen scenario (stap 4). Na deze keuze kiest de gebruiker de corresponderende keten in stap 5. Het model opent automatische het juiste tabblad. In elk tabblad is een knop aanwezig om snel te kunnen terugkeren naar het start tabblad. Daarnaast is de optie aanwezig om de eigen invoer op het start tabblad terug te zetten naar de standaardwaarden.

4: Keuze keten		
Klik op door te rekenen keten:	Maak keuze: H2 tankstation Ex-situ biologisch Ex-situ katalytisch	
5: Navigeer naar gekozen keten		
H2 Tankstation	Ex-Situ Biologisch	Ex-Situ Katalytisch
Optie: Terug naar standaardwaarden		
Reset invoer		

PARAMETERS PER KETEN

Vervolgens zijn afhankelijk van de gekozen keten de volgende parameters aan te passen:

1. H₂ tankstation: De gebruiker kan zelf het elektrolyser vermogen bepalen
2. Methanisatieketens: De gebruiker bepaalt zelf het vermogen van de elektrolyser en de methanisatiereactor

5

RESULTATEN CASUSSEN

De volgende drie ketens zijn geoperationaliseerd en doorgerekend:

- H₂ tankstation
- Ex-situ biologische methanisatie
- Ex-situ katalytische methanisatie

Allereerst zullen de algemene uitgangspunten, energieprijzen, jaarlijkse indexaties en investeringsgetallen worden benoemd. Per casus worden waar nodig specifieke uitgangspunten toegelicht.

WAARDE

Dimensionering vindt plaats o.b.v. de hoogste IRR over 15 jaar tijd. Om tot een optimaal rendement te komen is het van belang dat de waarde van de eindproducten en bijproducten in verhouding staan tot de investeringen en onderhoudskosten. De volgende eind/bijproducten zijn gedefinieerd:

TABEL 8

WAARDERING EIND- EN BIJPRODUCTEN

Product	H ₂ tankstation	Methanisatie
Verkoop waterstof	X	
Verkoop methaan		X
Restwarmte elektrolyser	X	X
Restwarmte methanisatiereactor		X
Restwarmte waterstofcompressie	X	
Reductie beluchtingsenergie	X	X
Flex markt accu	X	X

5.1 UITGANGSPUNTEN

Voor het doorrekenen van de cases zijn de algemene uitgangspunten zoals gedefinieerd in paragraaf 3.6 gehanteerd. De belangrijkste uitgangspunten zijn als volgt:

- Jaarlijks elektriciteitsverbruik RWZI 12.200 MWh
- Duurzame opwekking
 - Vermogen zonnepanelen 5 MWp = ca. 5 ha.
 - Vermogen windturbines 6 MWp = ca. 2 windmolens
 - Totale jaarlijkse opwekking 18.000 MWh
- Net aansluiting
 - Beschikbare aansluitcapaciteit ~4 MVA
- CO₂ productie uit biogas
- Jaarlijks productievolume 1,39 Miljoen Nm³ CO

Tevens is er gekeken naar de impact op de businesscases bij het alleen toepassen van zonPV of wind. Deze informatieve resultaten staan weergegeven in de bijlage sectie 8.3.1.

DIMENSIONERING P2G

De dimensionering van de componenten heeft plaatsgevonden o.b.v. een economische optimalisatie op de IRR. Hierbij is rekening gehouden met de in hoofdstuk drie besproken randvoorwaarden.

BEREKENINGEN LOOPTIJD

- Investerings
 - Initiële investering jaar 0
 - Herinvestering jaar 15
- Operationeel vanaf jaar 1
- Totale duur 30 jaar
- Discontovoet 5%

5.1.1 INDEXATIE

De onderstaande indexatiepercentages zijn aangehouden voor het berekenen van de variabele kosten/opbrengsten.

- Elektriciteit inkoop 2,0%
- Elektriciteit teruglevering -5,0%
- Groengas 2,0%
- Onderhoud 2,0%
- Demi-water 2,0%
- Waterstof 2,0%

5.1.2 ENERGIEPRIJZEN

Voor het bepalen van de kosten en opbrengsten die voortkomen uit de inkoop en verkoop van de verschillende energiedragers zijn de waardes uit onderstaande tabel aangehouden. De waarde in jaar 30 wordt bepaald aan de hand van de gehanteerde indexatiegetallen.

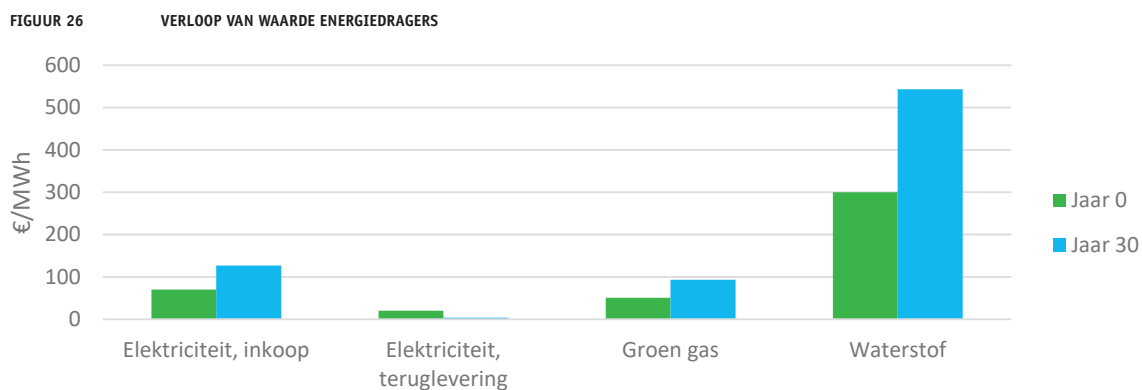
TABEL 9

WAARDE ENERGIEPRIJZEN

Type	Indexatie	Eenheid	Waarde jaar 0	Waarde jaar 30
Elektriciteit, inkoop	2%	€/MWh	70,00	127,00
Elektriciteit, teruglevering	-5%	€/MWh	20,00	4,29
Groen gas	2%	€/Nm ³	0,60	0,91
Waterstof	2%	€/kg	8,00	18,11

INZICHT ENERGIEPRIJZEN

In de onderstaande grafiek is een vergelijking gemaakt van de kosten/opbrengsten per energiedrager. De energieprijzen zijn teruggerekend naar € per MWh en staan weergegeven voor jaar 0 en jaar 30.



5.1.3 INVESTERING EN ONDERHOUD

Tabel 10 beschrijft de investeringen en onderhoudskosten. De jaarlijkse onderhoudskosten zijn gedefinieerd als percentage van de investeringskosten.

TABEL 10 KOSTEN VOOR INVESTERING EN ONDERHOUD

	Eenheid	Investering 2020	Herinvestering 2035	2035 % herinvestering	Onderhoud
Alkaline elektrolyser	€/kW	630	535	60%	2,5%
PEM elektrolyser	€/kW	1000	400	60%	3,0%
Elektrische opslag	€/kWh	630	125	60%	2,0%
Waterstof buffertank	€/kg H ₂	450	385	30%	1,0%
Biologische methanisatiereactor	€/kW	480- 540	450	30%	5,0%
Katalytische methanisatiereactor	€/kW	560- 625	385	60%	5,0%
Uitkoppeling zuurstof & restwarmte	€	60.000	60.000	20%	1,0%
Waterstof tankstation ⁷	€	1.750.000	1.488.000	25%	5,0%

5.1.4 OVERIGE UITGANGSPUNTEN

DEMI-WATER

Voor het elektrolyse proces is gedemineraliseerd water nodig. Er wordt uitgegaan van externe aanlevering voor een prijs van 2,5 €/m³.

TOEKOMSTIGE ONTWIKKELINGEN

De casussen zijn berekend over een looptijd van 15 jaar, er is beperkt rekening gehouden met toekomstige ontwikkelingen. Meegenomen in de berekeningen zijn de verwachte prijsdalingen van de componenten ten tijde van de herinvestering. Buiten beschouwing zijn gelaten de mogelijke efficiencyverbetering van de componenten.

WEERGAVE UITKOMSTEN

Het economisch rendement wordt uitgedrukt m.b.v. de IRR over een looptijd van 15 jaar. Als input voor de IRR wordt een vast rentepercentage meegenomen, de uitkomst van de IRR bevat daarmee dus ook de kapitaalslasten van een project.

⁷ Tevens zijn er jaarlijkse exploitatiekosten ter hoogte van € 70.000 in de kostencalculatie opgenomen

5.2 RESULTATEN H₂ TANKSTATION

Via duurzame elektriciteitsoverschotten wordt H₂ geproduceerd, dit wordt via een H₂ tankstation aan de mobiliteitsmarkt geleverd. Hierbij wordt ervan uitgegaan dat alle geproduceerde H₂ wordt afgenomen. In Tabel 11 staan de jaarlijkse totalen van het elektriciteitsverbruik weergegeven. De RWZI verbruikt zonder de elektrolyser 30% van de duurzame opwekking, met de P2G installatie stijgt dit tot 81%.

TABEL 11 ELEKTRICITEITSBALANS H₂ TANKSTATION ((MWH/JAAR))

	Duurzame opwekking	Verbruik elektrolyser	Teruglevering	Restant inkoop
H ₂ tankstation	18.000	9.200	2.700	4.600

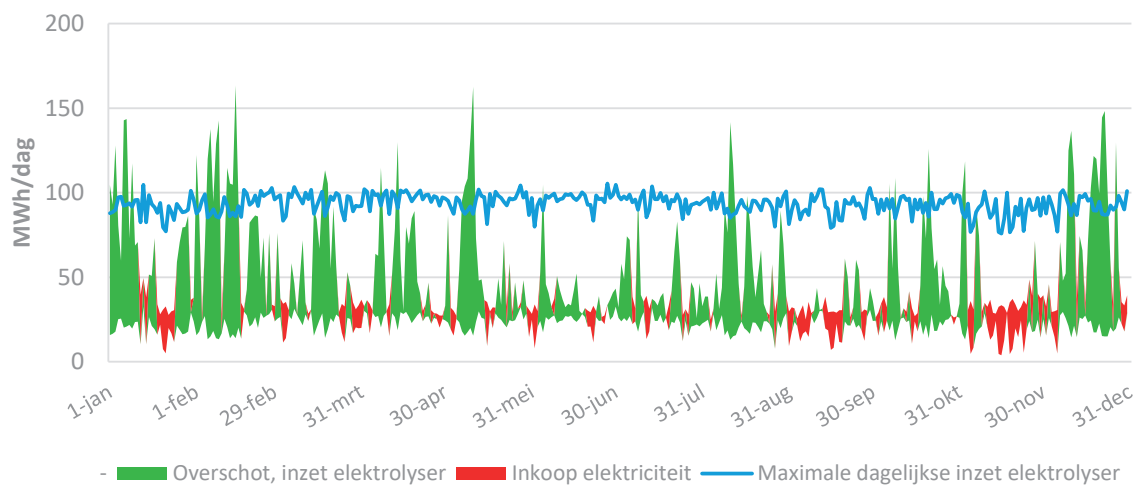
PROFIEL OPWEKKING EN VERBRUIK

In Figuur 27 is weergegeven hoe het jaarlijkse profiel van opwekking en verbruik van elektriciteit eruitziet op basis van dagelijkse totalen in MWh.

De groene pieken geven situatie weer waarin er sprake is van een overschot situatie, er wordt meer duurzame elektriciteit opgewekt dan er op de RWZI wordt verbruikt. De rode pieken geven een tekort aan, er wordt geen of te weinig duurzame elektriciteit opgewekt. Elektriciteit wordt ingekocht vanaf het openbare net.

Ten tijde van overschotten wordt de elektrolyser ingeschakeld, deze kan het overschot tot aan de blauwe lijn afnemen. Alle overschotten boven de blauwe lijn worden terug geleverd aan het elektriciteitsnet. Uit de grafiek blijkt dat de meeste overschot situaties plaatsvinden in de wintermaanden. Voor de daadwerkelijke inzet van de elektrolyser dient naar de jaarbelasting-duurkromme te worden gekeken.

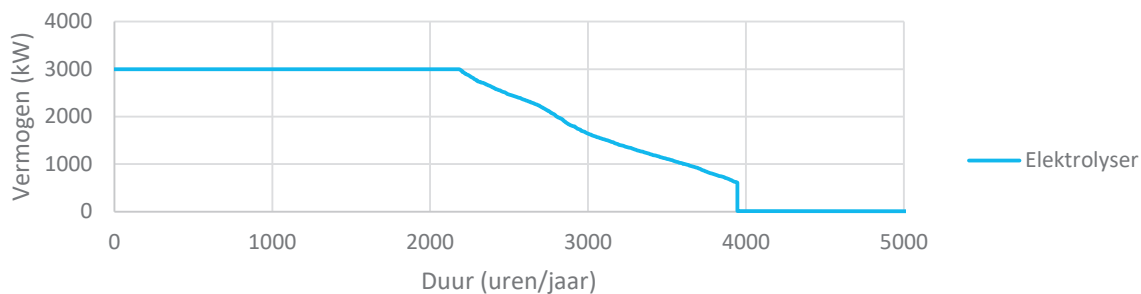
FIGUUR 27 PROFIEL OVERSCHOT/TEKORT H₂ TANKSTATION



INZET ELEKTROLYSER

Uit de analyse van het aantal bedrijfsuren blijkt dat er circa 2.100 uren op nominaal vermogen per jaar zijn. Het aantal vollasturen bedraagt 3.050.

FIGUUR 28 JAARBELASTINGDUURKROMME H₂ TANKSTATION



5.2.1 FINANCIËLE RESULTATEN

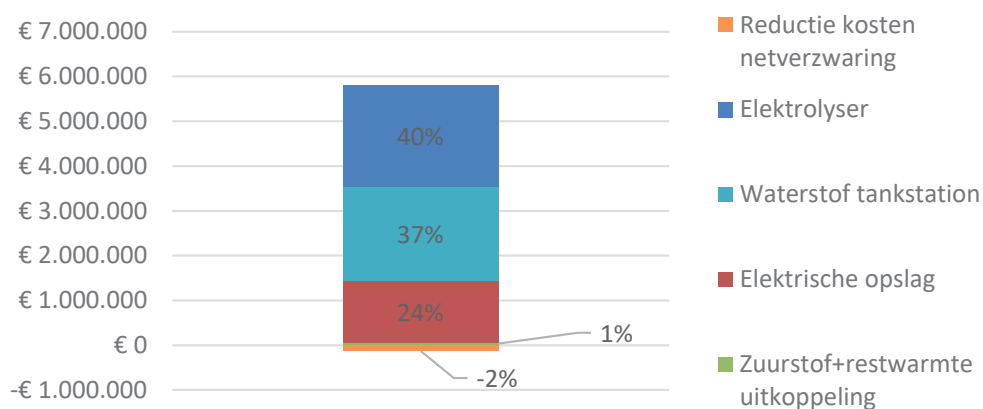
In Tabel 12 staan de belangrijkste uitkomsten van de financiële analyse weergegeven, de verdere analyse is alleen uitgewerkt voor de combinatie van zon en wind. Daarnaast is een variant toegevoegd waarbij de financiële impact wordt bekeken wanneer de overschotten van de elektriciteitsmarkt worden ingekocht. Door de hogere kosten aan elektriciteit is te zien dat het projectrendement lager uitvalt dan wanneer de eigen overschotten worden gebruikt.

TABEL 12 UITKOMSTEN H₂ TANKSTATION

	Elektrolyser (MW)	Investering (M ³)	IRR 15jaar	H ₂ productie (ton/jaar)
Zon+ wind	3	5,7	20,9%	181
Zon+ Wind inkoop markt	3	5,7	17,5%	181

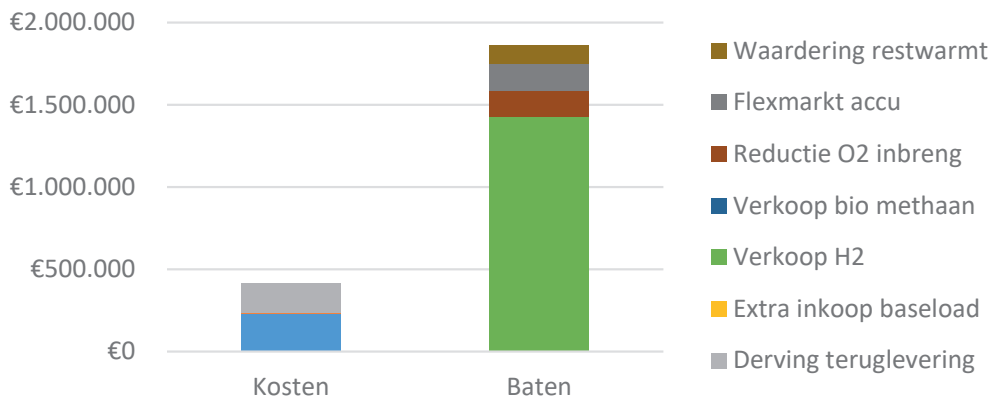
In Figuur 29 is de verdeling in investeringskosten weergegeven. Hierbij is uitgegaan van opwekking door zon & wind i.c.m. met een 3MW elektrolyser. De kosten voor de elektrolyser zijn nagenoeg even hoog als die voor het H₂ tankstation.

FIGUUR 29 VERDELING INVESTERINGSKOSTEN H₂ TANKSTATION



De resultaten in Figuur 30 geven inzicht in de verdeling in de jaarlijkse kosten en baten. Hierbij valt op dat met name de verkoop van H₂ een grote impact heeft op de baten.

FIGUUR 30

VERDELING JAARLIJKSE KOSTEN EN BATEN H₂ TANKSTATION

5.3 RESULTATEN EX-SITU BIOLOGISCHE METHANISATIE

Via duurzame elektriciteitsoverschotten wordt H₂ geproduceerd, in de ex-situ biologische reactor reageert H₂ met CO₂ tot CH₄.

In Tabel 13 staan de jaarlijkse totalen van het elektriciteitsverbruik weergegeven. De RWZI verbruikt zonder de elektrolyser 36% van de duurzame opwekking, met de P2G installatie stijgt dit tot 63%.

TABEL 13

ELEKTRICITEITSBALANS EX-SITU BIOLOGISCHE METHANISATIE (MWH/JAAR)

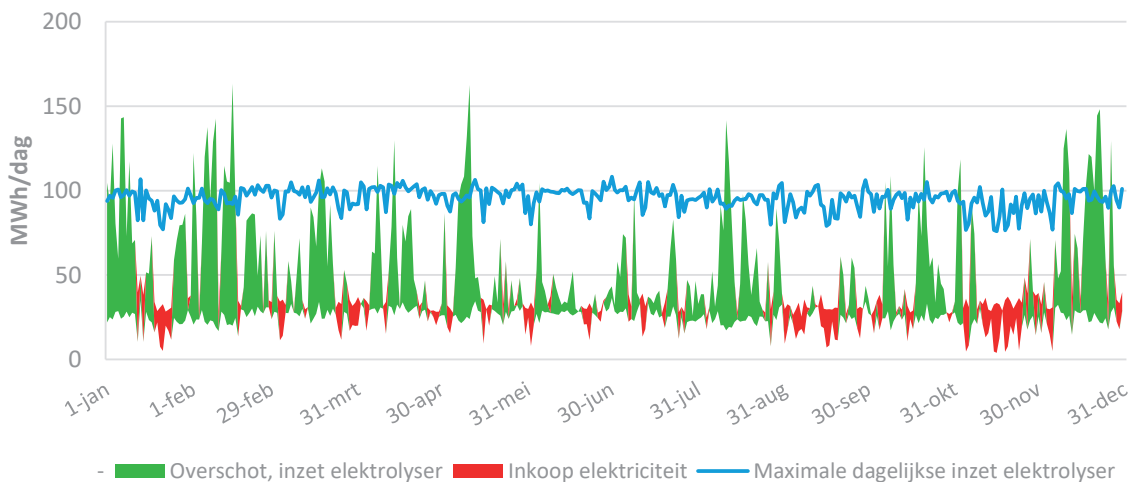
	Duurzame opwekking	Verbruik elektrolyser	Teruglevering	Restant inkoop
Biologisch	18.000	4.800	6.600	4.600

PROFIEL OPWEKKING EN VERBRUIK

Figuur 31 geeft weer dat er behoorlijk wat dagelijkse overschotten ontstaan, de overschotten ontstaan met name in de winterperiode.

FIGUUR 31

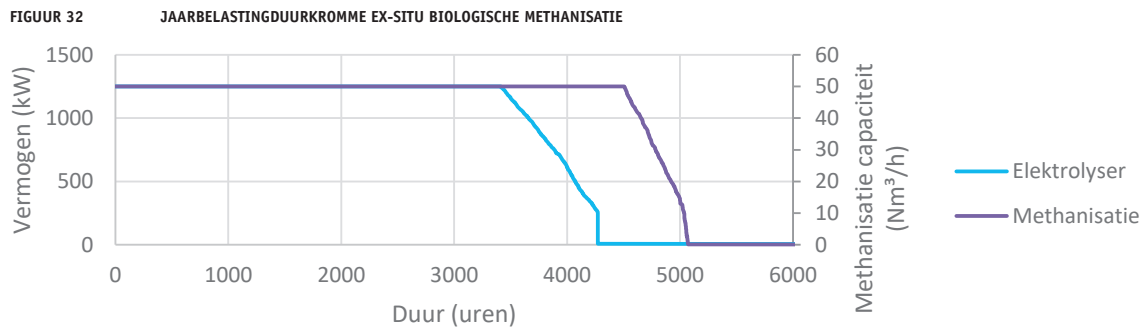
PROFIEL OVERSCHOT/TEKORT EX-SITU BIOLOGISCHE METHANISATIE



INZET ELEKTROLYSER EN METHANISATIETREACTOR

De elektrolyser maakt 3.800 vollasturen, de overige inzet bedraagt 900 uur op deellast. Voor de methanisatiereactor geldt dat deze 4.600 vollasturen per jaar maakt. Tevens zijn er ongeveer 600 uren op deellast.

Het verschil in vollasturen tussen de elektrolyser en de methanisatiereactor komt door de inzet van de waterstofbuffer. Hiermee wordt een meer continu proces van de reactor gewaarborgd.



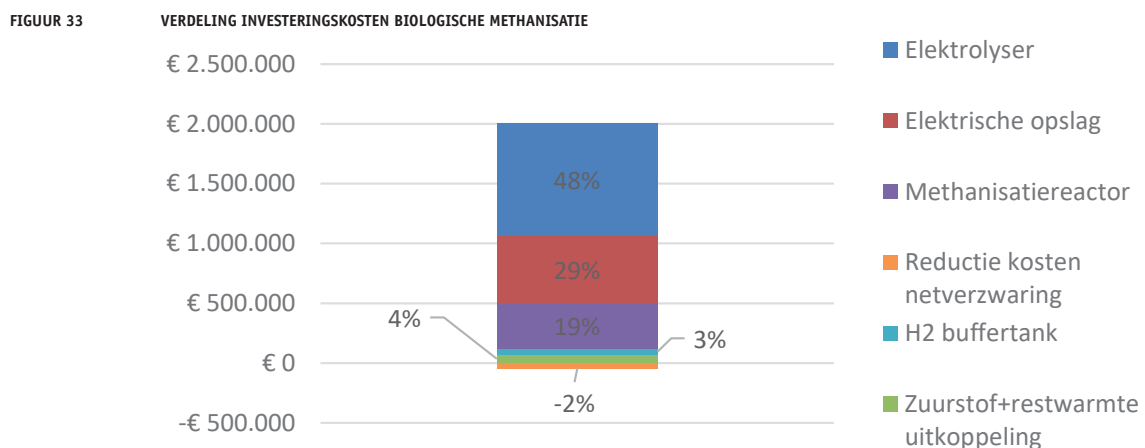
5.3.1 FINANCIËLE RESULTATEN

In Tabel 14 staan de belangrijkste uitkomsten van de financiële analyse weergegeven, de verdere analyse is alleen uitgewerkt voor de combinatie van zon en wind.

TABEL 14 UITKOMSTEN EX-SITU BIOLOGISCHE METHANISATIE

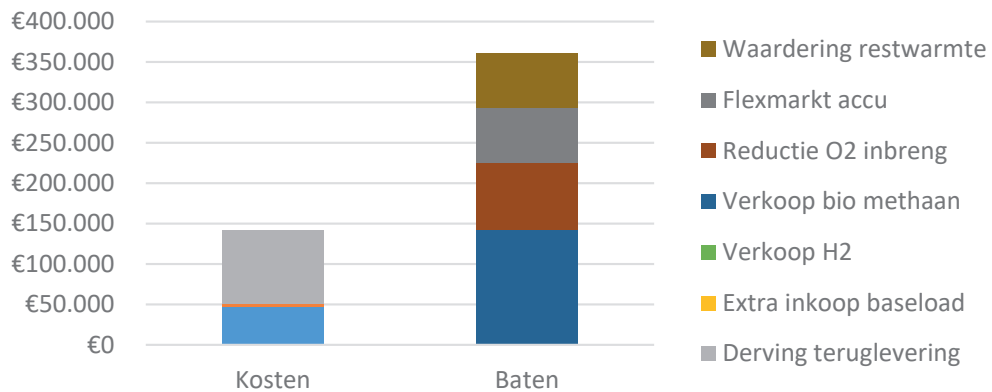
	Elektrolyser (MW)	Methanisatie capaciteit (m³/h)	Investering (M€)	TVT	IRR 15jaar	Extra CH ₄ productie
Zon+ wind	1,25	50	2,0	8,8	5,3%	10%

In Figuur 33 is de verdeling in investeringskosten weergegeven. Hierbij is uitgegaan van opwekking door zon & wind i.c.m. met een 1,25 MW elektrolyser. De elektrolyser investering draagt voor bijna de helft mee aan de totale investeringsbehoefte.



FIGUUR 34

VERDELING JAARLIJKSE KOSTEN EN BATEN EX-SITU BIOLOGISCHE METHANISATIE



5.4 RESULTATEN EX-SITU KATALYTISCHE METHANISATIE

Via duurzame elektriciteitsoverschotten wordt H₂ geproduceerd, in de ex-situ katalytische reactor reageert H₂ met CO₂ tot CH₄.

In Tabel 15 staan de jaarlijkse totalen van het elektriciteitsverbruik weergegeven. De RWZI verbruikt zonder de elektrolyser 35% van de duurzame opwekking, met de P2G installatie stijgt dit tot 66%.

TABEL 15

ELEKTRICITEITSBALANS EX-SITU KATALYTISCHE METHANISATIE (MWH/JAAR)

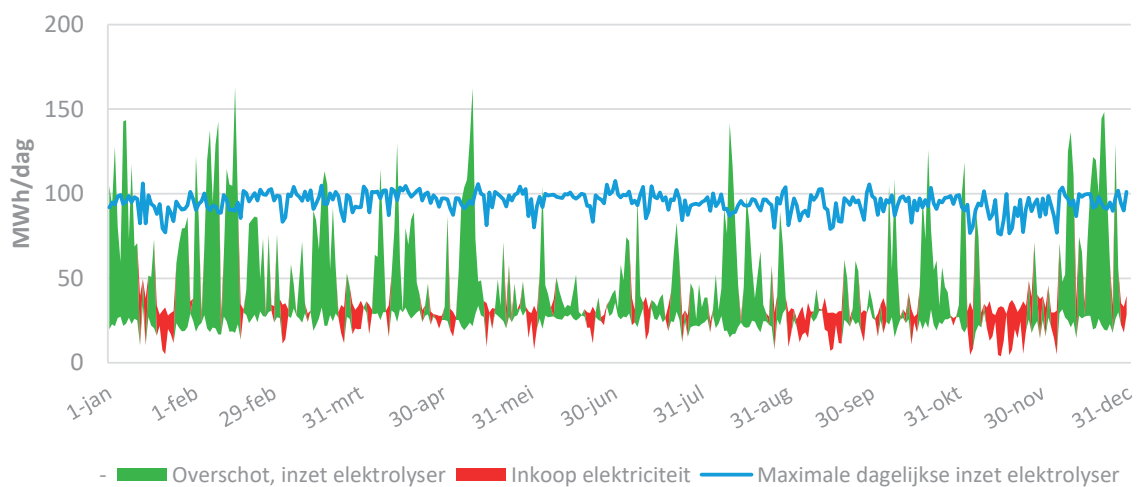
	Duurzame opwekking	Verbruik elektrolyser	Teruglevering	Restant inkoop
Katalytisch	18.000	5.800	6.500	4.500

PROFIEL OPWEKKING EN VERBRUIK

Vergeleken met de voorgaande ketens is een soortgelijk profiel zichtbaar. Doordat de elektrolyser iets groter is gedimensioneerd dan bij de biologische methanisatie ontstaan er eerder overschotten (toename reductie beluchtingsenergie). Doordat de elektrolyser groter is, wordt er ook een groter overschot ingezet door de elektrolyser, hierdoor daalt de terug geleverde hoeveelheid elektriciteit t.o.v. de biologische methanisatie.

FIGUUR 35

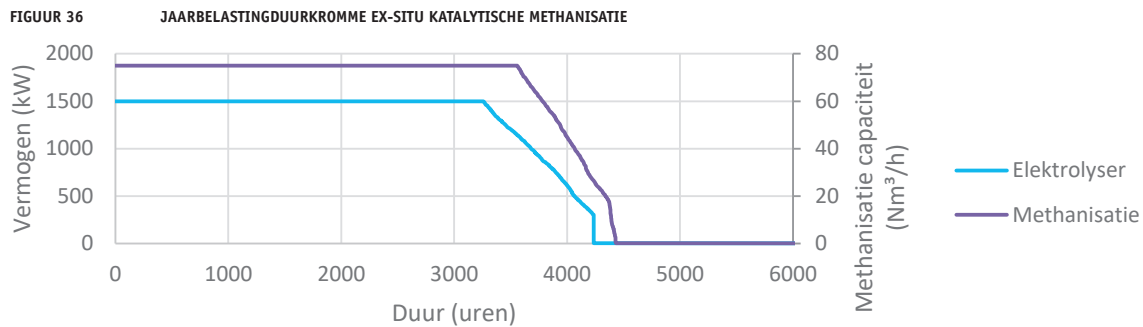
PROFIEL OVERSCHOT/TEKORT EX-SITU KATALYTISCHE METHANISATIE



INZET ELEKTROLYSER EN METHANISATIETREACTOR

De elektrolyser maakt 3.800 vollasturen, de overige inzet bedraagt 1.000 uur op deellast. Voor de methanisatiereactor geldt dat deze 3.900 vollasturen per jaar maakt. Tevens zijn er ongeveer 930 uren op deellast.

In vergelijking met de biologische methanisatie keten is er vooral een verschuiving in de methanisatiereactor inzet te zien. Dit wordt veroorzaakt door de hogere methanisatiecapaciteit (75 i.p.v. 50 m³ CH₄ per uur).



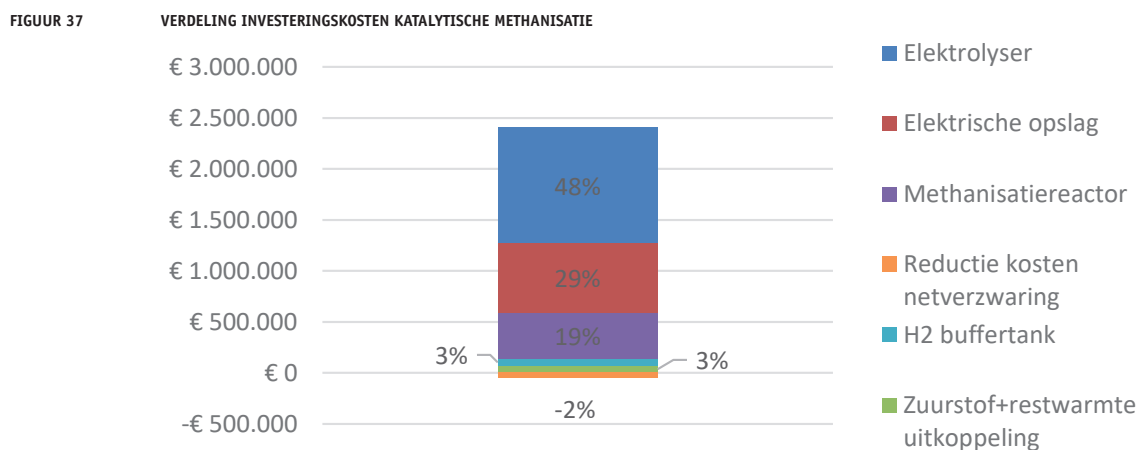
5.4.1 FINANCIËLE RESULTATEN

In Tabel 16 staan de belangrijkste uitkomsten van de financiële analyse weergegeven, de verdere analyse is alleen uitgewerkt voor de combinatie van zon en wind.

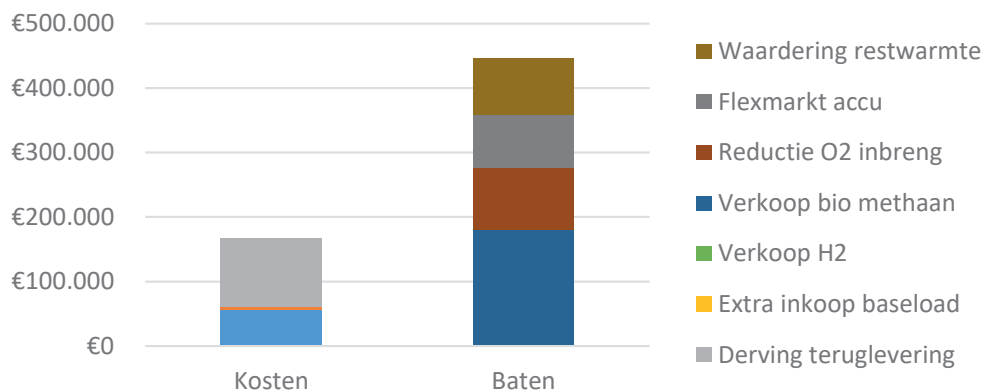
TABEL 16 UITKOMSTEN EX-SITU KATALYTISCHE METHANISATIE

	Elektrolyser (MW)	Methanisatie capaciteit (m ³ /h)	Investering (M ³)	TVT	IRR 15jaar	Extra CH ₄ productie
Zon+wind	1,5	75	2,4	8,3	6,1%	12%

In Figuur 37 is de verdeling in investeringskosten weergegeven. Hierbij is uitgegaan van opwekking door zon & wind i.c.m. met een 1,5 MW elektrolyser en een methanisatiecapaciteit van 75 m³/h.



FIGUUR 38 VERDELING JAARLIJKSE KOSTEN EN BATEN EX-SITU KATALYTISCHE METHANISATIE



5.5 VERGELIJKING KETENS

De uitkomsten van de ketens H₂ tankstation en de ex-situ keten biologische- en katalytische methanisatie worden in deze paragraaf met elkaar vergeleken. De weergegeven resultaten zijn opgesplitst in energetische resultaten (Tabel 17) en financiële resultaten (Tabel 18) en zijn alleen uitgewerkt voor de scenario's waarbij de opwekking van wind en zon gecombineerd zijn.

ENERGETISCH

Uit de resultaten blijkt dat hoe groter de elektrolyser wordt gedimensioneerd, des te hoger het eigen verbruik is, eveneens stijgt hiermee de reductie van de beluchtingsenergie en de totale waterstofproductie. Het aantal vollasturen neemt wel af met stijgende vermogens, er zijn minder pieken beschikbaar waarop het nominale vermogen kan worden aangewend.

TABEL 17 ENERGETISCHE VERGELIJKING KETENS

	Eenheid/opmerking	H ₂ tankstation	Biologisch	Katalytisch
Direct verbruik duurzame opwekking	t.o.v. totale opwekking	80%	63%	66%
Reductie beluchtingsenergie	t.o.v. referentie	33%	17%	20%
H ₂ productie	Miljoen Nm ³ H ₂ /jaar	1.960	1.000	1.800
Toename CH ₄ productie	t.o.v. referentie	n.v.t.	10%	12%
Vollasturen elektrolyser	Uur/jaar	3.050	3.800	3.700
Vollasturen methanisatiereactor	Uur/jaar	n.v.t.	4.600	3.900

FINANCIEEL

Door de hoge waarde van waterstof binnen de mobiliteitsmarkt komt het H₂ tankstation als beste keten naar voren wanneer wordt gekeken naar de IRR over 15 jaar. Hierbij hoort eveneens de hoogste investering van de drie vergeleken ketens. De verschillen tussen de biologische en katalytische ketens komen voornamelijk voort uit de kostprijs van de methanisatiereactor.

TABEL 18 FINANCIËLE VERGELIJKING KETENS

	Eenheid/opmerking	H ₂ tankstation	Biologisch	Katalytisch
Kosten	M ³ /jaar	0,42	0,14	0,17
Baten	M ³ /jaar	1,7	0,35	0,44
Investing	M ³	5,67	2,00	2,40
TVT	Jaar	3,9	8,8	8,3
IRR 15 jaar	-	20,9%	5,3%	6,1%

6

CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

Power-to-gas (P2G) installaties kunnen overtollige elektriciteit omzetten in waterstof. Het geproduceerde waterstof kan worden opgeslagen en op een later tijdstip worden gebruikt voor energie- en grondstoftoepassingen. In deze studie zijn de mogelijkheden voor het toepassen van P2G voor waterschappen doorgelicht. Het vertrekpunt daarbij is dat een zuivering met eigen duurzame opwekking gebruik maakt van elektriciteit die normaliter tegen relatief lage prijzen aan het openbare net geleverd moet worden. Zodoende wordt er van een product met een lage waarde (teruggeleverde elektriciteit) een product met hogere waarde gemaakt (zoals groen gas).

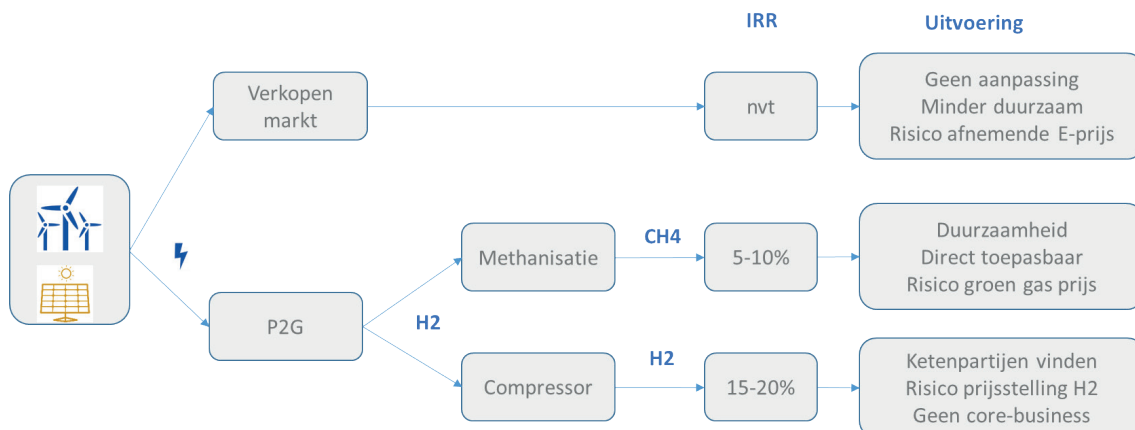
Naast deze arbitrage kan op de zuivering een grote meerwaarde worden gerealiseerd door:

1. Benutting van restwarmte voor de gistingstank
2. Het benutten van zuivere zuurstof voor de aeratietanks
3. Het vermijden van kosten voor het verzwaren van de netinfrastructuur
4. De omzetting van waterstof naar methaan middels CO₂ uit biogas

Om de kansen voor P2G te beoordelen is er een model ontwikkeld waarmee elke technische configuratie en marktomstandigheid kan worden doorgerekend. Voor een beoordeling van verschillende technische P2G-ketens is in deze studie gekozen voor een grote zuivering (300.000 i.e.) in combinatie met 2 windmolens en 5 ha zonnepanelen. Dit levert normaliter een grote teruglevering van elektriciteit op die nu nuttig ingezet kan worden. Er is daarbij onderscheid gemaakt in twee typen P2G ketens. De eerste keten gaat uit van omzetten van waterstof in methaan met behulp van CO₂ uit een groen gas installatie. De tweede keten gaat over het comprimeren en benutten van waterstof in mobiliteitstoepassingen.

De resultaten van deze analyse zijn versimpeld weergegeven in onderstaand schema.

FIGUUR 39 OVERZICHT TOEPASSING P2G KETENS



De economische mogelijkheden voor het toepassen van P2G op de zuivering zijn het best voor het waterstof vulpunt. Dit komt door de hoge waarde van waterstof in de mobiliteitssector. In deze casus is het ook mogelijk om gebruik te maken van duurzame stroom die buiten de zuivering is geproduceerd (waar momenteel nog transportkosten en energiebelasting over verschuldigd zijn). Deze toepassing vraagt echter om directe afname door afnemers en het leveren van waterstof ligt ver buiten de bestaande activiteiten van het waterschap.

De andere mogelijkheid is het omzetten van waterstof in groen gas door een methanisatiereactor toe te passen. De business case is minder attractief door de lagere prijs van groen gas. Het heeft echter wel als voordeel dat het een makkelijk af te nemen en gewild product betreft.

In beide situaties neemt het energiegebruik op de zuivering af en de productie van duurzame brandstof toe. Dit zal tot uitdrukking moeten komen in duurzaamheidsinstrumenten als de MJA.

GEVOELIGHEID BUSINESS CASE

Het is van groot belang om te realiseren dat een P2G installatie altijd een arbitragepunt vormt tussen twee markten die onafhankelijk van elkaar kunnen variëren, hetgeen de nodige risico's met zich meebrengt voor de operatie. De dimensionering van de P2G, keuze van elektrolyzers en evt. accu's, methanisatiereactoren verdienen daarom een zeer zorgvuldige afweging in relatie tot de marktrisico's.

De toepassing van de P2G is sterk afhankelijk van de prijsontwikkelingen op de elektriciteitsmarkt. Door de grote opkomst van wind- en zonneparken in Nederland en omliggende landen is het zeker dat de elektriciteitsprijzen op momenten met veel wind- en zonaanbod heel laag zullen liggen. De grote vraag is wanneer de prijzen laag genoeg zijn voor het toepassen van een P2G installatie. Onze indicatie is dat dit tussen 2020 en 2025 het geval zou kunnen zijn.

HANDELINGSPERSPECTIEF

Waterschappen kunnen hun duurzaamheid verder vergroten door het toepassen van een P2G-installatie en er zijn diverse configuraties en business cases mogelijk. De kennis uit deze studie kan worden meegewogen in de planvorming op (middel)lange termijn, bijvoorbeeld in wat voor vorm duurzame energie het beste kan worden geproduceerd (elektriciteit, methaan of H₂).

Individuele waterschappen kunnen nu bovendien zelf kijken of een P2G installatie voor hen interessant is. Daarbij zijn de volgende vragen relevant:



- 1 Is er of komt er een grote duurzame opwekcapaciteit op of nabij de zuivering?
- 2 Gelden er lokaal netbeperkingen of is nieuwe aansluitcapaciteit erg duur?
- 3 Zijn er natuurlijke vervangingsmomenten rond biogasproductie en -conversie?
- 4 Is de timing op de markt al goed voor toepassing van een P2G installatie?

Indien het antwoord op vraag 1 positief is, kan het interessant zijn om de volgende vragen te onderzoeken. Met behulp van het rekenmodel kunnen lokale business cases worden aangeemaakt en doorgerekend.

6.1 AANBEVELINGEN

Uit alle lange termijn projecties blijkt dat er behoefte is aan langdurige opslagvormen van duurzame elektriciteit waaronder P2G. Het blijkt dat er economische mogelijkheden liggen voor het toepassen van P2G op een zuivering, veel meer dan op een eenvoudig knooppunt tussen het elektriciteits- en gasnet. Waterschappen kunnen hierdoor een interessante spil-functie gaan vervullen bij de lokale energietransitie en meer duurzame energie gaan produceren.

Uit dit onderzoek is duidelijk geworden dat er verschillende technische configuraties mogelijk zijn voor een P2G systeem. Er zijn ook veel verschillende leveranciers van componenten. Het grootste vraagteken rond de techniek is de impact van inpassing van zuivere zuurstof in de aeratietanks. Wereldwijd gezien is er veel ervaring met deze toepassing maar naast resultaten op het gebied van zuurstof-efficiency zijn er ook claims op betere kwaliteiten van het slib. We bevelen aan om deze impact nader te onderzoeken, bv door een praktijkbezoek.

We bevelen daarnaast aan om in meer detail te gaan kijken naar concrete projecten waar lokale overschotten van duurzame energie kunnen worden gelinkt aan een waterzuivering, want voor elke casus is een zorgvuldige dimensionering noodzakelijk. We denken hierbij met name aan situaties waar duurzame opwekking nog gebouwd gaat worden, daar kunnen de voordelen van een vermeden netverzwaring immers hoog zijn.

Daarnaast is de afweging rond een mogelijke P2G installatie compleet als deze wordt afgezet tegen de ontwikkelingsroute naar duurzame grondstoffen. We bevelen aan dit verder te onderzoeken.

Het opslaan van overtollige duurzame energie is een opgave die in Nederland breed moet worden ingevuld. Er is veel discussie over hoe er vanuit de regulering en nettarifiering moet worden gekeken naar de verschillende vormen van opslag. Transportkosten en energiebelasting werken momenteel belemmerend voor het flexibel innemen van overschotten, ook voor waterschappen. Hier zou meer aandacht voor kunnen worden gevraagd omdat waterschappen potentieel een belangrijke rol kunnen spelen omdat elke grote zuivering van 300.000 i.e. de productie van ca 20-30 MWe aan duurzaam vermogen kan faciliteren.

7

BIBLIOGRAFIE

- [1] Klimaatberaad, „Voorstel voor hoofdlijnen van het Klimaatakkoord - sector Elektriciteit,” 2018.
- [2] BlueTerra, „Electricity Forecast Model,” 2018.
- [3] Berenschot, CE Delft en ISPT, „Power to Products,” 2015.
- [4] *PEM electrolysis*, U.S. Department of Energy’s Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, 2018.
- [5] Nederland circulair!, „AHPD – Groen gas uit rioolwaterzuivering,” 18 3 2018. [Online]. Available: <https://www.circulairondernemen.nl/cirkel/afval-circulaire-economie/oplossingen/ahpd-gas-uit-rioolwaterzuivering>. [Geopend November 2018].
- [6] G. Benjaminsson, J. Benjaminsson en R. B. Rudberg, „Power-to-gas - A technical review,” Svenskt Gastekniskt CenterAB, 2013.
- [7] IEA Bioenergy, „BioPower2Gas in Germany,” 2 2018. [Online]. Available: https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2018/02/2-BioPower2Gas_DE_Final.pdf. [Geopend November 2018].
- [8] J. Lefebvre, M. Götz, S. Bajohr, R. Reimert en T. Kolb, „Improvement of three-phase methanation reactor performance for steady-state and transient operation,” *Fuel Processing Technology*, vol. 132, pp. 83-90, 2015.
- [9] Strategieplatform Power to Gas, „Audi e-gas Projekt,” [Online]. Available: <http://www.powertogas.info/power-to-gas/pilotprojekte-im-ueberblick/audi-e-gas-projekt/>. [Geopend november 2018].
- [10] Agentschap NL, „Evaluatie van de vergisters in Nederland,” Utrecht, 2013.

8

BIJLAGE

8.1 NOMENCLATUUR

TABEL 19

NOMENCLATUUR

Afkorting/definitie	Omschrijving
TRL	Technology readiness level
DC	Direct Current
SNG	Synthetic Natural Gas
Peak trashing	Uitschakelen van duurzaam vermogen bij groter aanbod dan vraag
rSOC	Reversibele Solid Oxide Cell
PEM	Polymeer Elektrolyte Membraam
WKK	Warmtekrachtkoppeling
IRR	Internal Rate of Return
	Uitdrukking van projectrendement waarmee de kosten van financiering kunnen worden vergeleken.
NCW	Netto contante waarde
	Optelsom van alle contant gemaakt cashflows
TVT	Terugverdientijd
	De netto meerinvestering gedeeld door de jaarlijkse netto meeropbrengsten
MWp	MegaWattpiek
	Opgesteld vermogen
MVA	MegaVoltAmpere
	Definitie voor vermogen van kabel of transformator

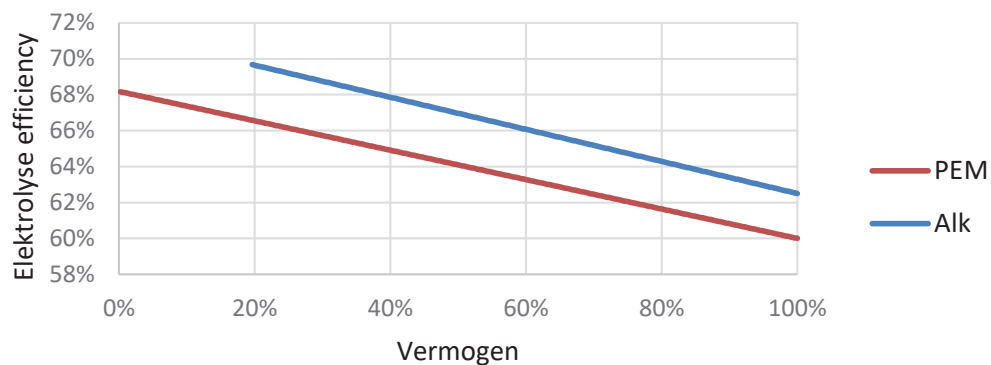
8.2 TECHNISCHE UITGANGSPUNTEN

8.2.1 ELEKTROLYSER

De visualisatie in Figuur 40 is een weergave van hoe de elektrolyser efficiency is gemodelleerd. Er is uitgegaan van ene lineaire afname van de efficiency bij hogere vermogens.

FIGUUR 40

EFFICIENCYCURVE ELEKTROLYSE



GEBRUIKTE WAARDEN ELEKTROLYSERS

De waarden in onderstaande tabel zijn toegepast in het rekenmodel en zijn eveneens gebruikt voor het doorrekenen van de businesscases.

TABEL 20 TECHNISCHE UITGANGSPUNTEN ELEKTROLYSERS

Onderwerp	Eenheid	Alkaline	PEM
Efficiency bij minimaal vermogen	%	70,8	67,6
Efficiency bij maximaal vermogen	%	61,9	59,5
Onderste modulatiegrens	% van max. vermogen	20	0
Degradatie	% per jaar	0,44	0,69

8.2.2 EIGENSCHAPPEN WATERSTOF

- Dichtheid
 - 11,21 Nm³ H₂/kg H₂
- Energie inhoud (onderste verbrandingswaarde)
 - 119,94 MJ/kg
 - 33,32 kWh/kg
 - 2,97 kWh/Nm³

8.2.3 ELEKTRISCHE OPSLAG

Bij gebruik van elektrische opslag zijn de volgende waarden voor het laden en ontladen gebruikt.

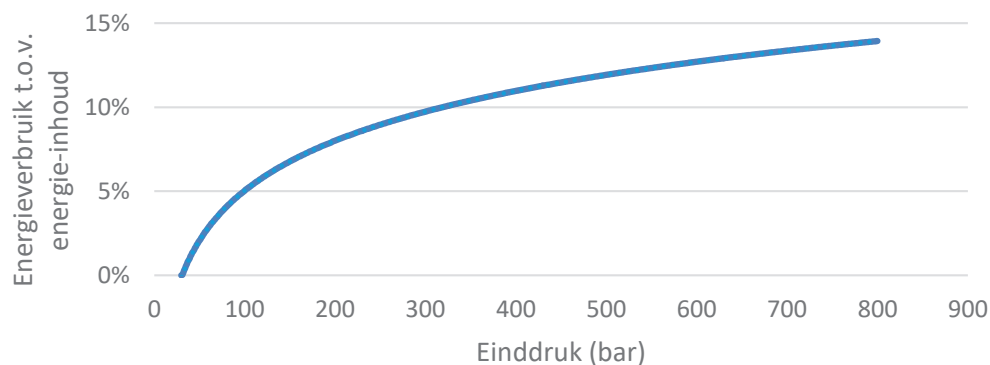
- Opladen 95%
- Ontladen 95%
- Round-trip efficiency 90%

Er is geen beperking opgenomen in het laad/ontlaad vermogen.

8.2.4 COMPRESSIE WATERSTOF

Onderstaand model is gebruikt om de benodigde energie voor de compressie van waterstof te bepalen. Het verbruik is gedefinieerd als het aantal kWh elektrische input t.o.v. de energie-inhoud van het waterstof per Nm³.

FIGUUR 41 COMPRESSIE ENERGIE WATERSTOF



8.3 AANVULLENDE RESULTATEN KETENS

8.3.1 RESULTATEN KETENS

De hier beschreven resultaten beschrijven de effecten bij andere opwekkingsprofielen (alleen zon of alleen wind). Het elektrolyse vermogen en de methanisatiecapaciteit zijn gebaseerd op economische optimalisaties behorende bij de opgestelde duurzame vermogens.

H₂ TANKSTATION

TABEL 21 AANVULLENDE UITKOMSTEN H₂ TANKSTATION

	Elektrolyser (MW)	Investering (M ³)	IRR 15jaar	H ₂ productie (ton/jaar)	Vollasturen elektrolyser
Alleen zon	2,5	4,9	-3,5%	50	980
Alleen wind	3	5,5	11,6%	122	2.050
Zon+wind	3	5,7	20,9%	181	3.050

EX-SITU BIOLOGISCHE METHANISATIE

TABEL 22 AANVULLENDE UITKOMSTEN EX-SITU BIOLOGISCHE METHANISATIE

	Elektrolyser (MW)	Methanisatie capaciteit (m ³ /h)	Investering (M ³)	TVT	IRR 15jaar	Extra CH ₄ productie	Vollasturen elektrolyser
Alleen zon	2,25	25	2,8	19,1	-5,8%	5%	1.100
Alleen wind	1,25	50	1,8	11,1	1,8%	7%	2.700
Zon+wind	1,25	50	2,0	7,8	5,3%	12%	3.850

EX-SITU KATALYTISCHE METHANISATIE

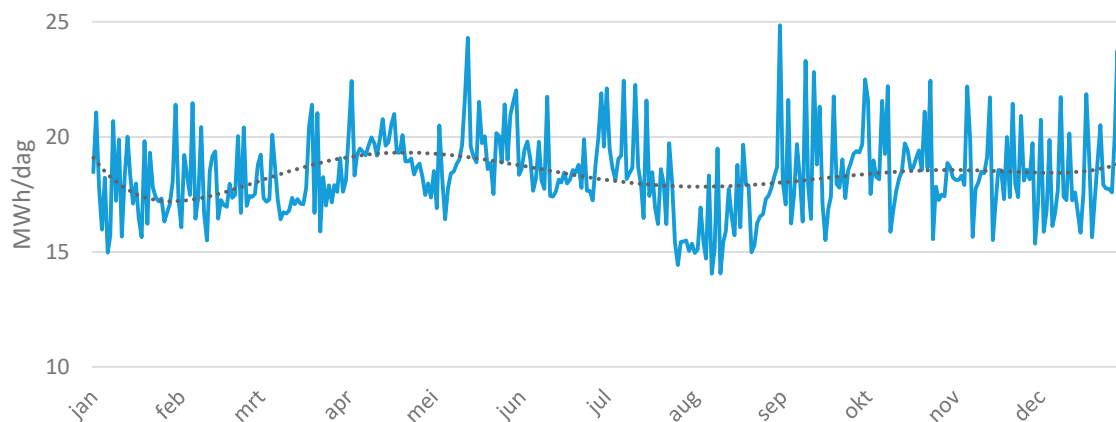
TABEL 23 AANVULLENDE UITKOMSTEN EX-SITU KATALYTISCHE METHANISATIE

	Elektrolyser (MW)	Methanisatie capaciteit (m ³ /h)	Investering (M ³)	TVT	IRR 15jaar	Extra CH ₄ productie	Vollasturen elektrolyser
Alleen zon	2,5	50	3,2	19	-5,6%	6%	1.050
Alleen wind	1,5	75	2,1	10,6	2,3%	10%	2.600
Zon+wind	1,5	75	2,4	7,3	6,1%	15%	3.750

8.3.2 PROFIEL BELUCHTINGSENERGIE

Voor het bepalen van de mogelijke reductie op beluchtingsenergie is het onderstaande beluchtingsprofiel van RWZI nieuwveer aangehouden.

FIGUUR 42 DAGELIJKS BELUCHTINGSPROFIEL RWZI NIEUWVEER



8.3.3 PROFIEL DUURZAME OPWEKKING

Het opgestelde vermogen zorgt voor het onderstaande opwekkingsprofiel. Hierbij geven de trendlijnen een indicatie van de gemiddelde dagelijkse opwekking weer.

FIGUUR 43 DAGELIJKS OPWEKKINGSPROFIEL ZONPV & WIND

