

Microwaterstof

Onderzoek naar het gebruik van waterstofbuffers voor onbalansmanagement in duurzame energieproductie

Naam student:	Bram Boereboom
Studienummer:	4556232
Begeleider:	Pieter Bots
Inleverdatum:	10-07-2020

Voorwoord

Dit verslag bevat het bachelor eindproject van Bram Boereboom. Het is geschreven ter afronding van de bachelor Technische Bestuurskunde aan de TU Delft. De onderzoeksmethode van dit eindproject is simulatie en modellering. Hier is gericht voor gekozen als voorbereiding op de master Engineering and Policy Analysis.

Ik wil graag mijn begeleider Pieter Bots bedanken voor de ondersteuning tijdens het project. De begeleiding en de tools, die ik dankzij meneer Bots ter beschikking heb gekregen, hebben mij in staat gesteld om dit eindproject goed uit te voeren. Ook wil ik graag Kas Hemmes bedanken, die mij in de eerste fase van dit project heeft begeleid.

Delft, juni 2020

Samenvatting

Waterstof krijgt steeds meer aandacht in de energietransitie. Veel partijen zien waterstof als de energiedrager van de toekomst. Echter is de productiemethode nog niet helder. Groene waterstof wordt gedefinieerd als waterstof die geproduceerd is met energie uit hernieuwbare bronnen. Uit eerder onderzoek is gebleken dat deze methode weldegelijk CO₂ uitstoot op systeemniveau met zich meebrengt. Dit onderzoek concludeerde dat waterstofproductie alleen volledig groen is als het uit overtollige stroom wordt gemaakt. Dit komt op nationaal niveau nauwelijks voor. Toch blijft de noodzaak om de schommelingen van groene bronnen op te vangen aanwezig. Overschotten en tekorten zijn te vinden in de onbalans in stroomproductie van groene energiebronnen die veroorzaakt wordt door fouten in weersvoorspelling. De stroom uit deze onbalans is economisch van aard en dus strikt genomen niet overtollig. Echter kan het praktisch gezien wel als overtollig worden beschouwd. Deze onbalans valt te compenseren met behulp van een waterstofbuffer.

De hoofdvraag van dit onderzoek is als volgt:

“Welke voordelen vallen er te behalen door het gebruik van een waterstofbuffer voor het opvangen van onbalans in duurzame elektriciteitsproductie?”

Windparken moeten voor de onbalans die zij creëren een boete betalen. Dit wordt gecompenseerd door een interne waterstofbuffer te plaatsen. Deze kan onbalans opvangen die gecreëerd wordt door onnauwkeurigheid in de voorspelde energie-output van het park. Deze manier van waterstofproductie is 100% groen, doordat het uit “micro-overschotten” wordt gemaakt. Deze stroom zou anders weggegooid worden (curtailment). Hierdoor kan de stroom als overtollig worden beschouwd.

Allereerst is er een model gebouwd om het gedrag van een windpark met waterstofbuffer te kunnen bestuderen. Verschillende data-reeksen zoals het verloop van de onbalans, de onbalansprijs en de stroomprijs zijn vergaard om realistische resultaten te genereren. Het model is gemaakt met het programma Linny-R en simuleert een windpark voor één jaar in tijdstappen van één uur.

Het beschreven systeem, een windpark met waterstofbuffer, behaalt een aantal voordelen. Door de mogelijkheid van opslag is curtailment omwille van het midden van kosten minder nodig. Dit resulteert in minder weggegooid energie en dus CO₂ besparing. Het voordeel waar dit onderzoek zich op focust is de potentiële winstgevendheid van een dergelijke waterstofbuffer. Uit het model zijn de volgende resultaten gekomen, te zien in tabel 1.

Tabel 1, hoofdresultaten uit het model

Hoofdresultaten	Hoogste waarde (huidige omgevingsparameters)
Toegestane marginale kosten	€0.163/kWh
Toegevoegde waarde waterstofbuffer	€1215.5/tijdsstap
Waterstofproductie	77.7 kWh/tijdsstap

Hoe lager de werkelijke marginale kosten van de waterstofproductie onder de toegestane marginale kosten liggen, hoe winstgevender de buffer wordt. De huidige geschatte prijs voor waterstofproductie valt rond de \$140/MWh (€0.12/kWh). Dit ligt onder de berekende TMK. Uit dit onderzoek blijkt de buffer winstgevend te kunnen zijn. Om dit verder te valideren is vervolgonderzoek nodig.

Inhoud

Voorwoord	1
Samenvatting.....	2
1. Inleiding.....	5
2. Conceptualisatie	6
2.1 Groene waterstofbronnen.....	6
2.2 Nederlandse elektriciteitsmarkt	6
2.2 MSMP-systemen	7
3. Datavergaring	9
3.1 Onbalans in elektriciteit.....	9
3.1.1 windsnelheid	9
3.1.2 Windstroomproductie	10
3.1.3 Onbalans in productie	11
3.2 Elektriciteitsprijs en onbalansprijs	12
4. Modelopbouw	13
4.1 Opzet model	13
4.2 Model eigenschappen	17
4.2.1 Eenheid & runtime	17
4.2.2 Look ahead	17
4.2.3 Output.....	18
5. Experimentatie.....	19
5.1 Validatie.....	19
5.2 Experimenteel ontwerp.....	20
5.3 Cashflow	21
5.4 TMK	21
6. Gevoeligheidsanalyse.....	23
6.1 Experimenteel ontwerp gevoeligheidsanalyse	23
6.1.1 Resultaten gevoeligheidsanalyse	24
6.2 Scenario-analyse	26
6.2.1 Onbalansprijs	26
6.2.2 Voorspelbaarheid productie	26
6.2.3 Experimenteel ontwerp scenario's.....	27
6.2.4 Resultaten Scenario-analyse	29
6.3 Potentieel	31
6.3.1 Theoretisch potentieel.....	31
6.3.2 Technisch potentieel	31

6.3.3 Markt potentieel	31
6.3.4 Beleid ondersteund markt potentieel	31
7. Conclusie	32
8. Vervolgonderzoek.....	33
8.1 Kosten baten analyse	33
8.2 Modelverdieping en uitbreiding	33
8.2.1 Verdieping.....	33
8.2.2 Uitbreiding	33
9. Reflectie.....	35
Bijlage A, Resultaten gevoeligheidsanalyse base case: TMK.....	36
Bijlage B, Resultaten gevoeligheidsanalyse scenario's: TMK	39
Literatuurlijst	42

1. Inleiding

Als gevolg van de Paris Agreements moet Nederland de CO₂-uitstoot sterk verminderen (EZK, 2016). Het ministerie van Economische Zaken en Klimaat heeft hier de verantwoordelijkheid voor gekregen. EZK heeft ervoor gekozen om op grote schaal hernieuwbare elektriciteitsproductie aan te leggen (Vermeulen, 2018) voor een duurzamere elektriciteitssector. Hernieuwbare bronnen leveren echter niet altijd stroom. Dit vergroot de onzekerheid van elektriciteitslevering. Om het aanbod en de vraag naar stroom te balanceren is er een energiedrager nodig.

Een mogelijke energiedrager is waterstof. Waterstof kan, in tegenstelling tot elektriciteit, in grote hoeveelheden opgeslagen worden. Waterstof heeft ook een voordeel ten opzichte van Li-ion batterijen, doordat er minder giftige materialen nodig zijn voor de opslag van energie. De Europese pilot CertifHy onderscheidt in de huidige certificatie drie verschillende soorten waterstofproductie (CertifHy, 2019): grijs (waterstofproductie op basis van aardgas waarbij CO₂ vrijkomt), blauw (grijs, maar met afvangen van CO₂) en groen (elektrolyse met groene stroom). Groene waterstof wordt door CertifHy als 100% CO₂-vrij gezien. Om CO₂ op een minimum te houden lijkt groene waterstof de beste energiedrager te zijn.

Uit onderzoek van een voorgaand bachelor eindproject over waterstofcertificatie (Waterlander, 2020) is geconcludeerd dat de door CertifHy gespecificeerde groene waterstof niet zo groen is als gedacht. Door de indirecte uitstoot die gepaard gaat met het onttrekken van groene stroom uit het stroomnetwerk zorgt groene waterstof juist voor een toename in CO₂-uitstoot in het energiesysteem als geheel (Waterlander, 2020). Dit kan “het verdringingseffect” worden genoemd. Groene waterstof uit traditionele methodes zoals elektrolyse met groene stroom blijkt dus minder groen te zijn, maar er is nog steeds een energiedrager nodig voor de energietransitie.

Waterstof is geschikt als energiedrager, maar de productie moet anders. Een veelgenoemd argument voor groene waterstof is dat er waterstof geproduceerd kan worden wanneer het aanbod groene energie groter wordt dan de totale elektriciteitsvraag. In theorie is de geproduceerde waterstof dan 100% groen, want anders zouden windturbines uitgezet moeten worden en wordt de stroom “weggegooid”. Overschotten komen voor (Hezelaar, 2019), maar nog erg weinig. Een traditionele groene waterstofcentrale die alleen produceert uit stroomoverschot zal dus maar een fractie van de tijd draaien. Dit is economisch zeer onaantrekkelijk. Zelfs 2000 draaiuren per jaar, wat door de overheid gesubsidieerd wordt in de SDE++, is economisch niet rendabel (Penders, 2020). De markt heeft een flexibele manier nodig om waterstof rendabel te produceren als energiedrager.

In onderzoek van Hemmes et al. (2007) wordt een aantal concepten onderzocht voor Multi-Source Multi-Product systemen (MSMP). Deze MSMP-systemen zijn in staat waterstof flexibel te produceren (Hemmes et al., 2007, p. 1337). MSMP-systemen hebben meerdere in- en outputs. Zo kan het Superwind concept uit gas en windenergie zowel stroom als waterstof produceren. Dit is flexibeler dan traditionele waterstof, waar alleen waterstof gemaakt kan worden.

MSMP-systemen kunnen onzekerheid van levering die gepaard gaat met groene energiebronnen laten afnemen zonder afhankelijk te zijn van een andere actor. Dit zorgt ervoor dat schommelingen in het windpatroon niet resulteren in boetes voor de producent. In dit onderzoek zal er gekeken worden naar een toepassing van MSMP-systemen op een windpark om te bepalen welke voordelen er te behalen vallen.

2. Conceptualisatie

2.1 Groene waterstofbronnen

Traditionele waterstofproductie is “groen” te noemen wanneer de benodigde energie uit overschotten bestaat (Waterlander, 2020). Door de geringe geïnstalleerde capaciteit komen overschotten op systeemniveau nog nauwelijks voor. Er zijn echter kleine bronnen van overschot die in het huidige systeem voorkomen en die gebruikt kunnen worden voor waterstof.

In een windpark staan vaak enkele turbines stil. Dit heet curtailment. Naast onderhoud kan curtailment voorkomen door een tijdelijke overcapaciteit in het lokale elektriciteitsnet (Elliot, 2019). In goed beheerde netten, zoals in de UK, is de totale hoeveelheid verloren energie niet significant (Burke & Rooney, 2018). Dit is in zwakkere of ontwikkelende netwerken echter niet het geval. Voor China betekende curtailment het afgelopen decennium een groot verlies. In 2016 is 20% van de potentiële energieopbrengst uit wind aan curtailment verloren gegaan (Yuanyuan, z.d.), met een verlies van wel 43% in sommige provincies. Als door een lokale overcapaciteit turbines uitgeschakeld moeten worden, kan de verloren energie als weggegooid worden beschouwd. Eventuele waterstofproductie uit deze micro-overschotten is 100% groen.

2.2 Nederlandse elektriciteitsmarkt

Ook in goed beheerde netten, zoals in Nederland, zijn er micro-onbalansen in windproductie. Deze micro-onbalansen zijn echter een resultaat van de werking van de Nederlandse elektriciteitsmarkt. Stroomproducten zijn namelijk programmaverantwoordelijke partijen (PVP's). PVP's zijn verplicht om minimaal één dag van tevoren op de day-ahead markt hun productie of verbruik exact per kwartier aan te geven (TenneT, 2016). Dit is nodig, aangezien er voor een goede werking van het stroomnet op elk moment productie en verbruik in balans moeten zijn (TenneT, 2020). Wanneer een PVP afwijkt van de afgesproken productie, krijgt deze een boete voor het veroorzaken van een onbalans (Agro energy, 2017). Deze boete is gelijk aan de grootte van de onbalans vermenigvuldigd met de onbalansprijs (Ledeboer & Jak, 2005). Dit systeem werkt goed voor voorspelbare stroombronnen zoals gascentrales, maar de productie van windenergie is minder voorspelbaar.

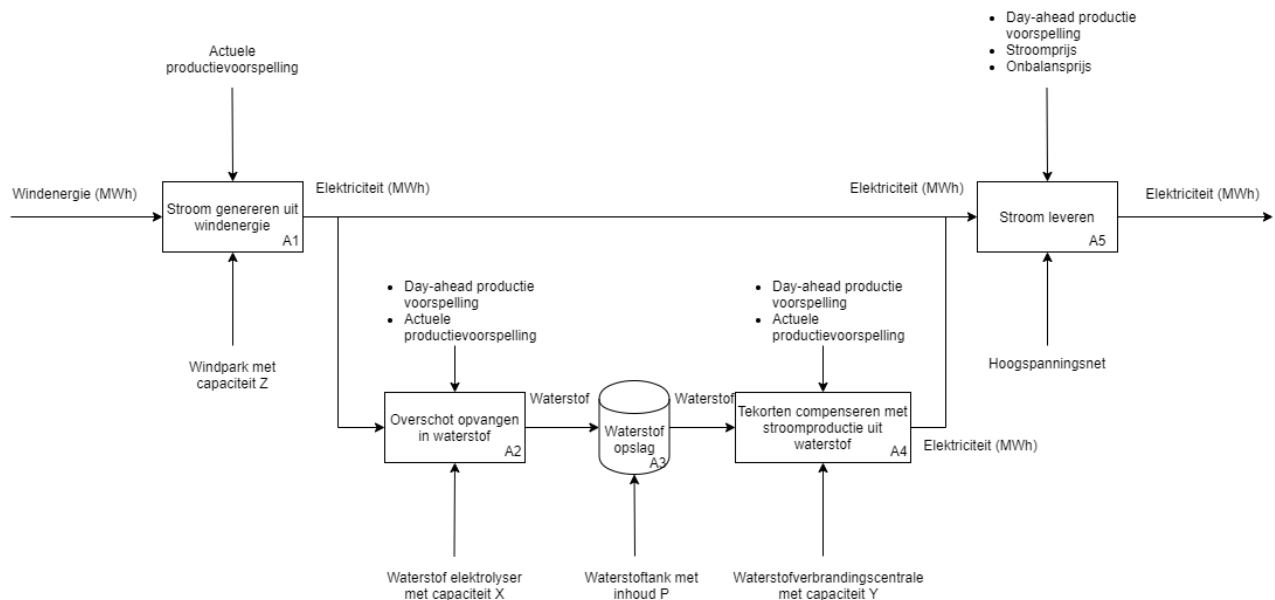
Windstroomproductie kan verschillen van de verwachte productie die is verkocht op de day-ahead markt door fouten in de weersvoorspelling. Deze onbalans resulteert in boetes voor de eigenaar van het windpark. Hier is dus ook sprake van overschotten en tekorten, alleen zijn deze van economische aard. De overschotten en tekorten zijn het beboette verschil tussen de voorspelde productie en de werkelijke productie. Inspelen op deze onbalans gebeurt met gebruik van stochastische modellen (Matevosyan & Soder, 2006, p. 1400). Dit kan de onbalans verkleinen, maar nooit volledig verwijderen. Voorspellingsfouten resulteren in een boete bij tekorten, of het verlies van energie door curtailment bij overschotten. Hieruit volgt de volgende deelvraag voor het onderzoek:

“Hoe groot is de huidige onbalans in een windpark en hoe vertaalt dit zich naar kosten voor een windpark eigenaar?”

Er blijft dus onbalans in het windpark, tenzij er een buffer aanwezig is. Windparkeigenaren zijn op zoek naar een technologie die overschotten opvangt en gaten in productie invult (Hemmes et al. 2007).

2.2 MSMP-systemen

Een buffer zou overschotten kunnen opvangen en tekorten kunnen compenseren. Dit kan door gebruik te maken van flexibele waterstofproductie geïntegreerd in een windpark. Hierdoor verandert het windpark in een MSMP-systeem. In figuur 1 is een schematische weergave te zien van een wind-waterstof MSMP-systeem.



Figuur 1, IDEF-0 schema MSMP wind-waterstof

De belangrijkste connectie in dit schema is de verbinding tussen A1 en A5. A1 produceert stroom en via A5 wordt deze stroom geleverd aan het stroomnet. Zoals besproken in de vorige paragraaf zijn de “day-ahead productie voorspelling” en de “Actuele productievoorspelling” niet in balans. Deze onbalans wordt opgemerkt door A2 en A4.

A2 vangt overschotten op door waterstof te maken van overtollige stroom met elektrolyse. Voor elektrolyse is gedemineraliseerd water nodig (Siemens, 2019). Een closed loop voor waterstof zou noodzaak voor een demineralisator verwijderen, aangezien er vooraf gezuiverde water gebruikt kan worden dat niet in aanraking komt met vervuiling. A4 produceert elektriciteit uit waterstof in geval van een tekort. Het is onduidelijk tegen welke marginale prijs voor waterstof dit proces winstgevend is. Hieruit volgen de deelvragen:

“Tegen welke marginale kosten kan een waterstofbuffer onbalans opvangen?”

“Hoe beïnvloeden ontwerpparameters zoals de capaciteiten deze marginale kosten?”

Er zijn een aantal dingen opmerkelijk aan figuur 1. Zo zijn de inputs en outputs enkel elektriciteit. Waterstof is in dit systeem een intern geproduceerd en gebruikt product. Dit heeft een aantal voordelen. Er hoeven geen pijpleidingen aangelegd te worden om de waterstofproductie aan een netwerk te binden. Hierdoor is het mogelijk om een dergelijke waterstofproductie offshore te plaatsen wanneer nodig. Hiernaast kan de waterstof en het benodigde water hergebruikt worden. In dit model wordt een closed loop aangenomen waarin het water hergebruikt wordt.

De variërende onbalans in elektriciteit en de onbalansprijzen worden in het model geplaatst. Tijdens een run kan het model hier geen invloed op uitoefenen, maar het gebruik van de waterstofbuffer wordt hier wel door beïnvloed. Uit deze omgevingsparameters zijn verschillende scenario's te maken. Hieruit volgt de vraag:

“Onder welke scenario's is de waterstofbuffer het meest winstgevend?”

Dit model is niet een volledig MSMP-systeem zoals beschreven door Hemmes et al. (2007). Echter is het wel mogelijk om van een normaal windpark in stappen naar een MSMP-systeem toe te werken. Het toevoegen van een waterstofbuffer is een van deze stappen. Een volgende stap kan het aansluiten van deze waterstofloop aan een waterstofnetwerk zijn. Hier kan in een vervolgonderzoek naar worden gekeken.

De gestelde deelvragen zijn gericht op het beantwoorden van de hoofdvraag van dit onderzoek:

“Welke voordelen vallen er te behalen door het gebruik van een waterstofbuffer voor het opvangen van onbalans in duurzame elektriciteitsproductie?”

3. Datavergaring

Zoals vermeld in hoofdstuk 2 zijn de belangrijke benodigde tijdreeksen de onbalans en de onbalansprijs. In dit hoofdstuk wordt toegelicht hoe deze tijdreeksen zijn opgebouwd en geïmplementeerd.

3.1 Onbalans in elektriciteit

Voor dit onderzoek had het voldoende kunnen zijn geweest om een reeks van onbalans als enkele tijdreeks in het model te zetten. Dit is echter niet realistisch. De onbalans wordt veelal gegeven als een percentage afwijking ten opzichte van de werkelijke productie. Om een beter verloop van de onbalans weer te geven is gekozen om de onbalans op te stellen op basis van een tijdreeks van stroomproductie. Deze stroomproductie is weer afhankelijk van de wind.

De onbalans wordt als tijdreeks in het model gezet. De ondersteunende reeksen van productie en windsnelheid komen in mindere mate naar voren in het model. Daarom wordt er minder aandacht gegeven aan detail in de datareeksen van windsnelheid en stroomproductie. Gedetailleerdere reeksen produceren uiteraard een realistischer resultaat, maar het doel van deze datareeksen in dit onderzoek is alleen om een natuurlijker verloop aan de onbalans te geven.

3.1.1 windsnelheid

Op basis van de snelheid van de wind wordt stroom uit windparken geproduceerd. Deze stroom wordt een dag van tevoren op de day-ahead markt verkocht en op kwartierbasis gebalanceerd (TenneT, 2016). Voor de data omtrent windsnelheid is het “etmaalgemiddelde windsnelheid” (KNMI, z.d.) van de weerstations in Hoek van Holland en in Oosterschelde genomen. De uiteindelijke dataset is een enkele kolom in Excel met 8760 (het aantal uren in een jaar) datapunten. Via Excel kan de data gemakkelijk naar een model worden overgezet.

De originele datareeks bestaat uit 365 datapunten over de gemiddelde windsnelheid voor een gekozen jaar: 2019. De gemiddeldes uit hoek van Holland en Oosterschelde zijn met elkaar gemiddeld om een algemener gemiddelde te geven. Deze data geeft echter een gemiddelde per dag, terwijl de markt op kwartierbasis functioneert. Voor dit model is ervoor gekozen om winddata per uur te modelleren. Dit geeft een totaal van 8760 datapunten voor een jaar. Als de data per kwartier wordt ingevoerd is het, door het grote aantal tijdstappen, niet meer mogelijk om een heel jaar te modelleren met de middelen die voor dit onderzoek ter beschikking staan.

Om het etmaalgemiddelde te converteren naar een uurgemiddelde is gebruik gemaakt van de datareeks “Hoogste uurgemiddelde windsnelheid” (KNMI, z.d.) van dezelfde weerstations. Deze datareeks bestaat wederom uit 365 datapunten van de maximaal gemeten gemiddelde windsnelheid per dag voor een gekozen jaar (2019). Met deze data is uit de etmaalgemiddeldes een uurgemiddelde te maken. Hiervoor is de volgende formule gebruikt:

$$V_{i,j} = \frac{G_j * \left(1 + \text{random}\left(-\frac{M_j}{G_j}, \frac{M_j}{G_j}\right)\right) + V_{i-1}}{2}$$

$$V_{gem,dag(j)} = G_j$$

$$V_{max,dag(j)} = M_j$$

$$V_{wind \text{ op } t_{uur i,dag j}} = V_{i,j} \quad , \quad 0 \leq V_{i,j} \leq M_j$$

Voor elk uur wordt G_j vermenigvuldigt met een factor. Deze factor is op basis van de relatieve afwijking van de maximumsnelheid van het daggemiddelde bepaald. De relatieve afwijking “A” is altijd positief ($M_j > G_j$). Er wordt een random getal getrokken tussen -A en A en hierbij wordt 1 opgeteld om op de factor te komen waar de gemiddelde snelheid mee wordt vermenigvuldigt. Dit creëert voor elk uur een unieke snelheid.

De windsnelheid is echter ook afhankelijk van hoe hard het in de tijdstap ervoor heeft gewaaaid. Daarom wordt $V_{i,j}$ het gemiddelde tussen de unieke snelheid en de windsnelheid op de vorige tijdstap. Hierdoor ontstaat een meer continue reeks windsnelheden. Aan $V_{i,j}$ zijn een aantal beperkingen toegevoegd. $V_{i,j}$ moet minimaal nul zijn en mag niet hoger zijn dan de maximale gemeten windsnelheid (G_j) op die dag.

3.1.2 Windstroomproductie

Voor de conversie van windsnelheid naar elektriciteitsproductie wordt aangenomen dat de productie gedurende een uur constant is. De uiteindelijke dataset is een enkele kolom in Excel met 8760 datapunten. De elektriciteitsproductie afhankelijk van windsnelheid is te benaderen met de volgende formule (Viré, 2019):

$$P_{turbine} \sim \rho A U^3$$

Een belangrijk gegeven uit deze formule is derdemachtsrelatie tussen de windsnelheid en de opgewekte stroom. ρ en A zijn onbekend. Echter zijn deze variabelen voor dit onderzoek samen te nemen tot een constante C . Een turbine kan echter niet bij alle windsnelheden produceren. Bij een windsnelheid lager dan 3 m/s kan er geen stroom geproduceerd worden en boven een snelheid van 25 m/s moet de turbine stilgelegd worden uit veiligheidsoverwegingen (Dupont et al., 2018b, p. 332). Tevens kan de productie op een bepaald tijdstip niet hoger zijn dan het maximaal opgesteld vermogen. Voor dit onderzoek wordt het geaggregeerde vermogen van windturbines in Nederland in 2019 gebruikt. Dit is aldus TenneT een opgesteld vermogen van 5.6 GW. Met deze beperkingen kan de stroomproductie als volgt worden berekend:

$$P = \begin{cases} 0 & \text{if } U \leq 3 \\ 0 & \text{if } U \geq 25 \\ P = cU^3 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$P \leq P_{opgesteld}$$

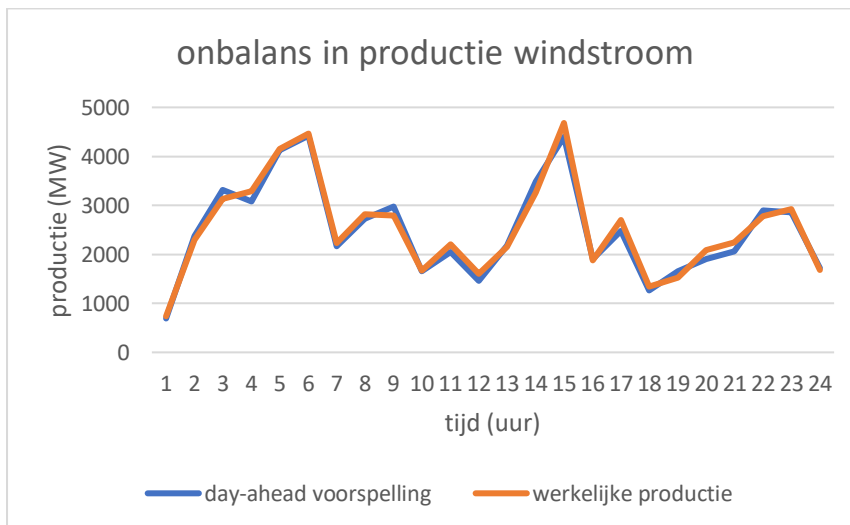
Om de constante c te berekenen is de totale geproduceerde hoeveelheid windenergie gebruikt. In 2019 is 11.5 TWh aan windenergie geproduceerd (CBS, 2020). Door dit te vergelijken met de som van de productie in de tijdreeks is de factor c te vinden. Met $c = 2.517$ is het ratio werkelijk/modelproductie gelijk aan 1.000.

In de resulterende dataset is de maximale productie 5.6 GW. De minimale productie is 0 GW en de gemiddelde productie is 1.3 GW. Dit komt overeen met de gestelde beperkingen. Bij een windsnelheid van 13.1 m/s wordt in het model op vol vermogen geproduceerd. Bij een snelheid van 11-17 m/s produceert een turbine normaliter op vol vermogen (Dupont et al., 2018b, p. 332). De data presteert dus binnen de verwachte marge.

3.1.3 Onbalans in productie

Nu er een tijdreeks van elektriciteitsproductie is gemaakt, kan hier overheen de onbalans worden geplaatst. Het KNMI doet voorspellingen over de windsnelheid in Nederland. Hierbij gebruiken zij het Harmonie-Systeem. De voorspellingsfout van het Harmonie-systeem is 0.3 m/s zonder specifieke afwijking naar boven of onder (KNMI, 2014).

Om deze onbalans in het model te verwerken is van de originele windsnelheid een tweede aangepaste reeks gemaakt. Deze datareeks telt bij elk datapunt een uniform verdeeld random getal tussen de -0.3 en 0.3 op. Van deze datareeks is een nieuwe windstroomproductiereeks gemaakt volgens dezelfde methode als de originele reeks. Het gemiddelde verschil tussen deze datareeksen is 0.0. Hierdoor blijft de totale productie in de twee reeksen gelijk aan de productiedata van het CBS (2020). In figuur 2 is de onbalansreeks te zien.



Figuur 2, onbalans windstroom

De onbalans valt verder te analyseren door middel van de absolute gemiddelde fout (AGF). Deze methode wordt gebruikt bij onbalansanalyse van wind, omdat deze minder gewicht geeft aan outliers in de data (Landberg, 2001, p. 239). Goed voorspelde winddata vind een AGF ter grootte van 10% van de geïnstalleerde capaciteit, maar bij slecht voorspelde winddata kan dit oplopen tot 20% (Landberg, 2001, p. 239). Het gebruikte voorspellingsmodel is in de analyse van Landberg HIRLAM. Echter is de AGF van de datareeks van dit onderzoek 1.2%. Dit is een ordegrrootte lager dan de verwachting bij “goed” voorspelde data aldus landberg (2001). Er zijn een aantal redenen die dit verschil kunnen verklaren.

Ten eerste is het onderzoek van landberg nu bijna 20 jaar oud (2001). Windenergie, en vooral offshore wind energie, stond toen nog in de kinderschoenen (Shahan, 2019). Sindsdien is de voorspelling en dus de AGF verbeterd. In recenter onderzoek (Jung & Broadwater, 2014, p. 766) wordt de AGF voor voorspellingen <24 uur vooruit tussen de 5-15% geschat. Deze afwijking kan verder gereduceerd worden door de AGF van meerdere parken en locaties te nemen. Zo leidt een aggregatie van de AGF van 4 windparken tot een reductie van 2% ten opzichte van de AGF van een enkel park (Holtinen et al., 2016). In dit onderzoek is dit ook het geval, aangezien de gehele windenergieproductie van Nederland samen wordt genomen. Ook is vanaf 2012 het KNMI overgestapt op HARMONIE voor weersvoorspellingen (KNMI, 2017). Dit is de verbeterde opvolger van HIRLAM. Dit kan ook een nauwkeurigheidsverbetering hebben opgeleverd.

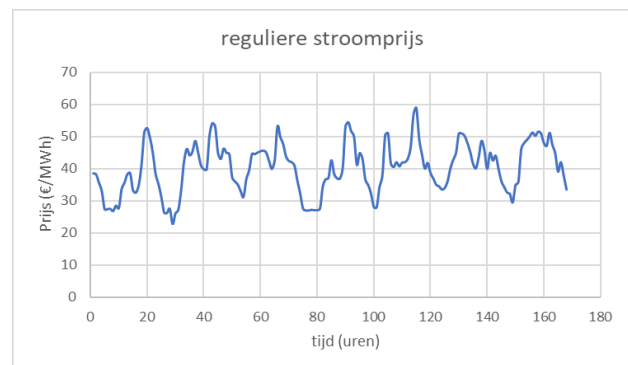
3.2 Elektriciteitsprijs en onbalansprijs

Nu er onbalans in de opwekking is, zal dit gecompenseerd moeten worden. Dit kan, naast het gebruik van de waterstofbuffer, met het in- en verkopen van onbalansstroom aan het net. De prijs van onbalansstroom is een weerspiegeling van de onbalans in het gehele elektriciteitssysteem (TenneT, 2016). Wanneer er een overschot op het net èn in het windpark is moet de eigenaar van het windpark een boete betalen. Wanneer er echter een tekort op het net is en een overschot in het windpark krijgt de eigenaar van het windpark juist betaald. Als de onbalans van het park tegengesteld is aan de onbalans in het systeem verdient de eigenaar van het windpark juist geld.

De data van de onbalansmarkt is de onbalansprijs per MWh per kwartier (Bots, 2020). Om de data in het model te plaatsen is deze geconverteerd naar uren door de gemiddelde prijs in een bepaald uur te nemen. Een voorbeeld uit de dataset is te zien in figuur 3. Het is belangrijk om op te merken dat in de data de prijs om onbalansstroom in te kopen en te verkopen niet altijd hetzelfde is. In figuur 4 is de reguliere stroomprijs te zien. Deze data is wederom de prijs per MWh per kwartier (Bots, 2020).



Figuur 3, onbalansprijzen 2015, 168 uur (1 week)



Figuur 4, reguliere stroomprijzen 2015, 168 uur (1 week)

Aan figuren 3 en 4 is duidelijk te zien dat onbalansprijzen een stuk grilliger zijn dan reguliere stroomprijzen. Reguliere stroom is gebaseerd op een voorspelbare vraag en aanbod en daardoor een stuk beter te regelen. Dit stabiliseert de prijs met een cyclus van 24 uur. De onbalansprijs volgt geen duidelijke cyclus. Het is van nature onbekend wanneer er een onbalans zal optreden in het systeem. Op $t=100$ is in figuur 3 te zien dat de inkoopprijs van stroom sterk negatief is. Dit betekent een overschot op het net. Op onder andere $t=120$ is een piek te zien in de prijs. Dit betekent een tekort op het net. Deze prijzen gecombineerd met de reguliere stroomprijs bieden een kans voor de windparkeigenaar om hier slim op in te spelen. Een waterstofbuffer die slim overschotten kan opvangen als de onbalansprijs hoog is kan de windparkeigenaar veel geld besparen. Als de inkoopprijs laag is kan de actor ervoor kiezen om in plaats van waterstof onbalansstroom te gebruiken in tijden van een tekort.

4. Modelopbouw

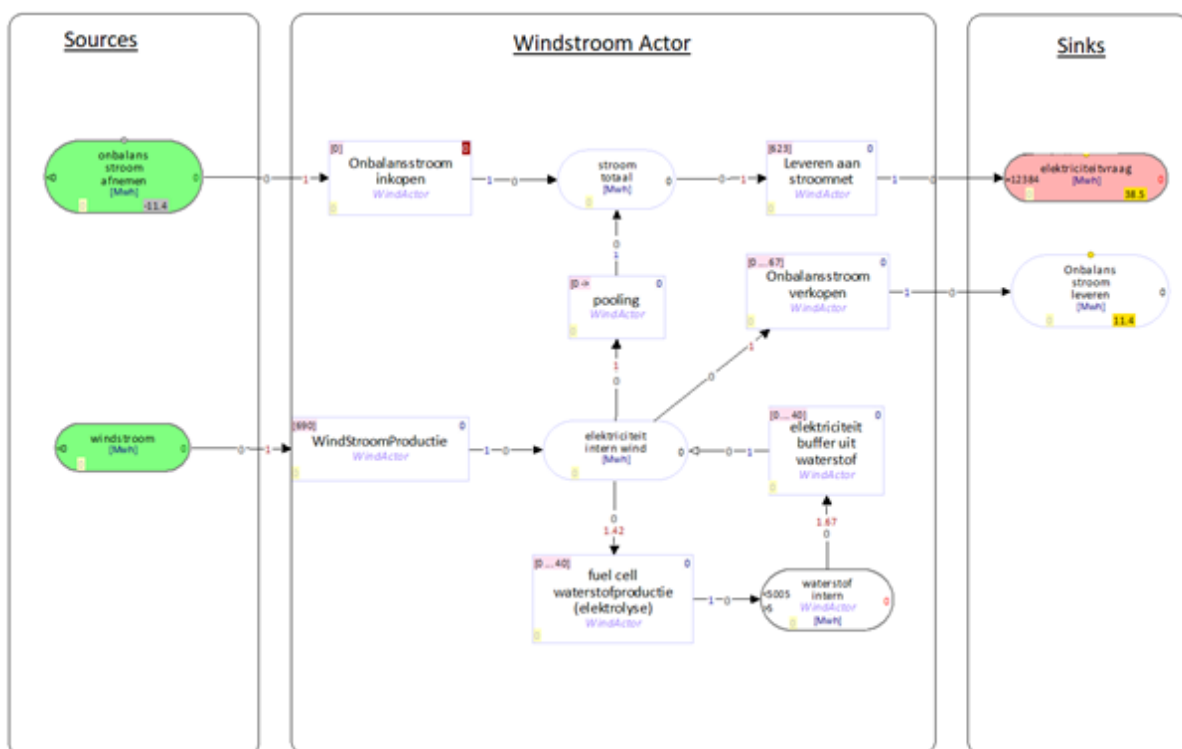
4.1 Opzet model

Figuur 5 vertoont het Linny-R model waar mee zal worden geëxperimenteerd. Om het overzicht te houden is het model opgedeeld in drie vlakken: sources, de Windstream Actor (WA) en sinks. De tijdseenheid van het model is uur. Alle productie is in MW, dus zijn de hoeveelheden stroom in dit model in MWh. Ook voor waterstof is de eenheid MWh gekozen. De energiedichtheid van waterstof is 0.033 MWh/kg (WaterstofNet, 2010).

In dit model is ervoor gekozen de verliezen in stroomkabels te verwaarlozen. Verlies in de kabels vermindert de output ongeacht of er een waterstofbuffer in het systeem zit. Het heeft geen effect op de vergelijking en wordt dus weggelaten.

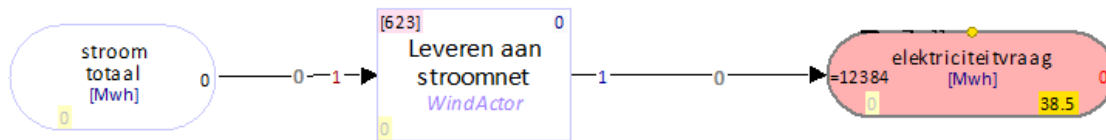
Door middel van een structural walkthrough zal de werking van het model nader besproken worden.

Figuur 5, volledig Linny-R model



4.1.1 Structural walkthrough

Dit model produceert aan de hand van de opgegeven productie op de day-ahead markt. Windparkeigenaren voorspellen hun productie per kwartier (in dit model per uur) en verkopen de productie voor de volgende dag. Deze stroom (in MWh) moet geleverd worden. Het proces *Leveren aan stroomnet* heeft de tijdreeks van voorspelde productie als minimum- en maximumproductie staan. *Leveren aan stroomnet* neemt stroom uit het product *stroom totaal* en levert stroom aan de sink *Elektriciteitsvraag* zoals te zien in figuur 6. De prijs die voor de stroom wordt betaald is een tijdreeks van de prijs in de sink *Elektriciteitsvraag*.



Figuur 6, modelopbouw stap 1: stroomlevering aan het net

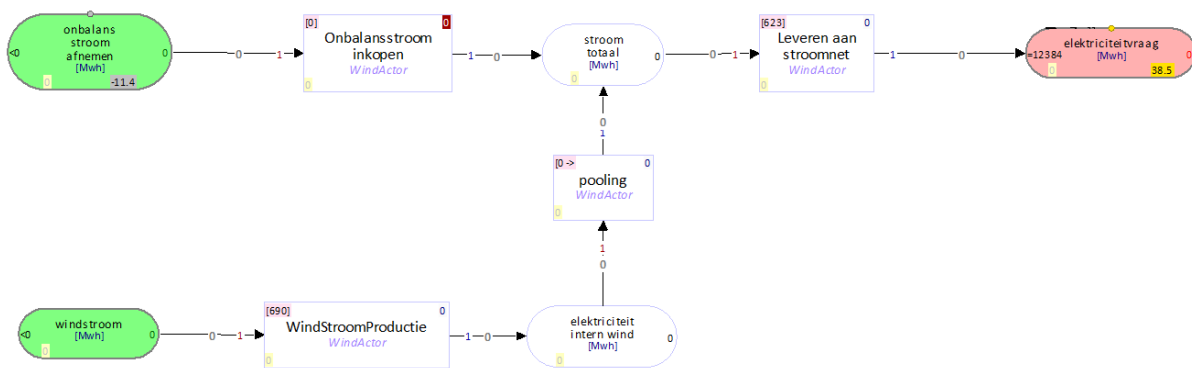
De WA heeft twee manieren om stroom te verschaffen aan het proces “*Leveren aan stroomnet*”:

- Stroom genereren uit wind
- Stroom kopen op de onbalansmarkt

Stroom genereren uit wind gaat via het proces *windstroomproductie*. Dit proces haalt uit de source *Windstroom* elektriciteit. De hoeveelheid stroom die *Windstroomproductie* genereerd is gebaseerd op een tijdreeks soortgelijk aan degene van *Leveren aan stroomnet*, maar in deze tijdreeks is een foutmarge toegevoegd. De tijdreeksen van *Windstroomproductie* en *Leveren aan stroomnet* zijn dus in onbalans. Deze onbalans is niet positief of negatief biased. Het totaal aantal MWh is in beide reeksen hetzelfde. Een belangrijke modelleerkeuze is dat het voor het model niet toegestaan is om met curtailing productie te verlagen. *Windstroomproductie* moet produceren. Hierdoor gaat er geen groene stroom verloren en wordt de maximale hoeveelheid groene stroom geproduceerd uit het windpark.

Uit *Windstroomproductie* komt de elektriciteit in *Elektriciteit intern wind* terecht. Dit product heeft geen storage en kan als het ware als de interne bekabeling van het windpark gezien worden. Om de elektriciteit te leveren gaat via het interne proces *Pooling* de stroom naar het product *Stroom totaal*, om daarna via *Leveren aan stroomnet* geleverd te worden.

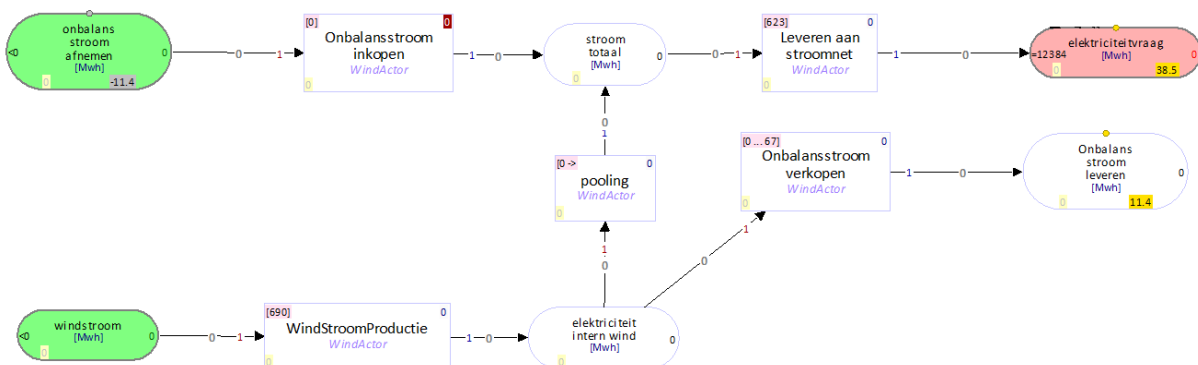
De WA kan stroom kopen op de onbalansmarkt via het proces *Onbalansstroom inkopen*. Dit is nodig wanneer het proces *pooling* niet genoeg stroom kan leveren om aan de productie van *Leveren aan stroomnet* te voldoen. *Onbalansstroom inkopen* haalt de elektriciteit uit de source *Onbalans stroom afnemen* zoals te zien in figuur 7. De prijs die voor de onbalansstroom wordt betaald is een tijdreeks van de prijs in de source *Onbalansstroom inkopen*. Het productielimiet van *Onbalansstroom inkopen* is per tijdsstap gelijk aan het verschil tussen de productiereeksen van *Leveren aan stroomnet* en *Windstroomproductie* (mits deze positief is. PL = 0 bij negatief verschil). Via het proces *Onbalansstroom inkopen* komt de ingekochte stroom in *Stroom totaal* terecht. Een belangrijke observatie is dat de prijs om onbalansstroom in te kopen af en toe negatief is. Hierop kan het model inspelen door expres onbalansstroom in te kopen.



Figuur 7, modelopbouw stap 2: toevoeging productie en onbalansstroom

Natuurlijk kan het ook het geval zijn dat er meer stroom geproduceerd wordt dan was voorspeld. In dat geval kan de WA de overtollige stroom leveren als onbalansstroom. Hiervoor moet echter betaald worden. Wanneer *Windstroomproductie* meer stroom geleverd heeft dan door middel van *Pooling* en *Leveren aan stroomnet* geleverd kan worden, kan de overtollige stroom verkocht worden met het proces *Onbalansstroom verkopen*. Het productielimiet van *Onbalansstroom verkopen* is net als bij *Onbalans inkopen* per tijdsstap gelijk aan het verschil tussen de productiereeksen van *Leveren aan stroomnet* en *Windstroomproductie*. Echter moet hier het verschil negatief zijn. $PL = 0$ bij positieve waarden. *Onbalansstroom verkopen* levert de elektriciteit aan de sink *Onbalans stroom leveren*. De prijs die voor de onbalansstroom wordt betaald is een tijdreeks van de prijs in de sink *Onbalans stroom leveren*.

Wat er tot nu toe geschetst is de "base case zonder waterstof". Stroom wordt geproduceerd, de voorspelde hoeveelheid wordt verkocht en tekorten en overschotten worden verwerkt met onbalansstroom. Een schema van het base case model is te zien in figuur 8.



Figuur 8, modelopbouw stap 3: base case model (zonder waterstofbuffer)

Vervolgens wordt het base case model uitgebreid met een waterstofbuffer. Deze buffer is intern en zal daarom verbonden worden aan het product *Elektriciteit intern wind*. De waterstofbuffer bestaat uit drie delen:

- Een elektrolyser, *Fuel cell waterstofproductie (elektrolyse)* (proces)
- Een opslag, *Waterstof intern* (product)
- Een verbranding *Elektriciteit buffer uit waterstof* (proces)

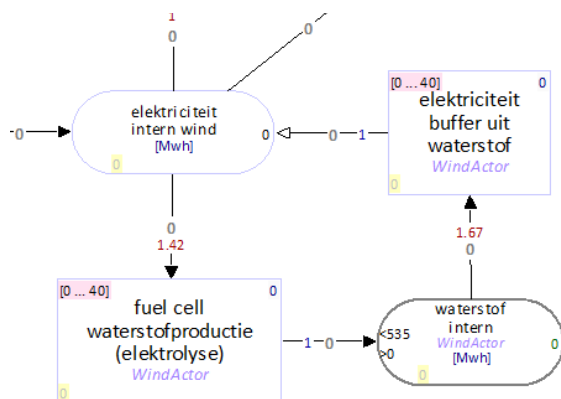
De efficiëntie van de elektrolyser is 70% (1.42) en van de verbranding 60% (1.67) (Bernholz, 2018). Er om het overzicht in Linny-R te vergroten voor gekozen om alle outputs van processen op 1 te zetten en de efficiënties bij de inputs te verwerken. Deze waarden zijn achter de efficiënties te zien.

Waterstof wordt uit overtollige stroom gemaakt. Wanneer er een stroomtekort is kan er waterstof ingezet worden om elektriciteit bij te maken. De totale efficiëntie van deze waterstofloop is 42%.

Om een indicatie voor de productiecapaciteit van de elektrolyser, de verbranding en de opslagcapaciteit te krijgen wordt er gekeken worden naar een vergelijkbare installatie. Een 1MW waterstofinstallatie is aan een bestaand 140MW onshore windpark toegevoegd samen met een waterstoftank van 4500Nm³ (Hydrogenics, 2016). De grootte van het gebruikte park in dit onderzoek is 5.6GW, een factor veertig hoger. Door de capaciteit met deze factor te vermenigvuldigen komen we uit met de startwaarden voor de waterstofinstallatie in dit model:

- 40 MW elektrolyser
- 535 MWh opslagcapaciteit
- 40 MW verbrandingsinstallatie

Aan de opslag van waterstof is van tevoren een bedrag van 1 cent/MWh per tijdstap gesteld. Wanneer opslag gratis is, is het voor Linny-R mogelijk om veel verschillende optimumoplossingen te vinden. Opslag is in de praktijk niet gratis. Hoe duur dit is, is echter onbekend. Vandaar het bedrag van 1 cent/MWh. Met deze waarden toegevoegd kan de waterstofbuffer in het model gezet worden. Zoals te zien in figuur 9 verbindt de waterstofloop zich aan *elektriciteit intern wind*. Hierdoor krijgt het model de keuze om windstroom ofwel aan het net te leveren, aan de onbalansmarkt te verkopen (mogelijk tegen hoge kosten) of om de stroom om te zetten in waterstof. Ook kan het model waterstof opslaan in de buffer en weer om te zetten in stroom.

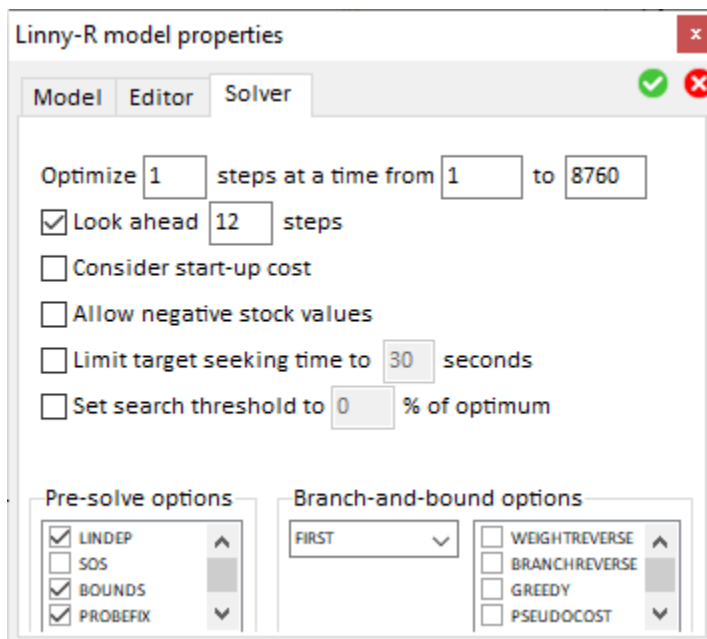


Figuur 9, modelopbouw stap 4: waterstofbuffer

Sinds er in het model evenveel overschotten als tekorten zijn, is het vanaf het begin al duidelijk dat deze waterstofbuffer, met een efficiëntie < 100%, niet alle gaten kan opvullen. De buffer voegt echter wel een dynamisch element toe aan het model. Het model kan bijvoorbeeld ervoor kiezen om op periodes dat de onbalansstroom goedkoop is geen waterstof te gebruiken, om zo over te hebben voor wanneer de onbalansstroom duurder is en waterstof dus rendabeler. Met de waterstofbuffer erbij is het model compleet zoals te zien in figuur 5.

4.2 Model eigenschappen

In figuur 10 zijn de model eigenschappen weergegeven. Een verdere uitleg van de run properties volgt daaraan.



Figuur 10, model properties weergave in Linny-R

4.2.1 Eenheid & runtime

Zoals eerder is vermeld is de tijdstap van het model “uur”. Dit model is niet initieel gemaakt voor opslag van waterstof om voor seizoen fluctuaties in vraag te compenseren. Echter is er, omdat waterstof vaak in de context van seizoensopslag in een jaar wordt vermeld (Gabrielli et al., 2020, p. 109629), toch voor gekozen om een heel jaar (8760 uur) te simuleren. Een bijkomend voordeel van het runnen van een heel jaar is dat dit een veel betrouwbaarder resultaat zal opleveren dan het runnen van enkele dagen. Wanneer het model bijvoorbeeld maar een week kan runnen zou deze week toevallig een week zijn waarin het meer waait dan voorspeld, waardoor meer waterstof geproduceerd kan worden en het scheve resultaten geeft. Een langere periode van simulatie minimaliseert dit soort toevalligheden.

Producenten van stroom moeten per tijdseenheid hun stroomverbruik aangeven. Aangezien dit per individuele tijdseenheid wordt gedaan is ervoor gekozen om dit model één stap tegelijk te laten optimaliseren. Van de look-ahead functie wordt wel gebruik gemaakt.

4.2.2 Look ahead

De look ahead functie is van groot belang voor dit model. Door vooruit te kijken kan het model dynamisch inspelen op het verschil in productie en voorspelde stroom op de day-ahead markt door slim waterstof te produceren en te gebruiken. Ook kan er vooruit gekeken worden naar de onbalansprijzen om hier zo winstgevend mogelijk mee in te spelen. Een te grote look ahead is echter niet alleen onrealistisch, maar ook niet ideaal voor de runtime van het model. Een nauwere kijk naar de facetten van de look ahead is nodig om deze te bepalen.

Allereerst kan de look ahead conceptueel gezien niet hoger zijn dan 24 uur. De voorspelde output van het windpark is minimaal één dag (24 uur) van tevoren verkocht. Als een windparkeigenaar meer dan 24 uur perfect vooruit kan kijken zou de eigenaar simpelweg de voorspelde output gelijkzetten aan de werkelijke productie 24 uur van tevoren. Hier bovenop geeft een grote look ahead grote

gevolgen voor de runtime van het model, sinds het model per stap deze extra stappen ook moet berekenen. Bijvoorbeeld: Linny-R zal met een look ahead van 24 is voor 8760 tijdstappen meer dan tweehonderdduizend tijdstappen moeten optimaliseren.

Ten tweede kijken we naar de voorspelbaarheid van de gebruikte data, met name de wind. De meetapparatuur van het KNMI heeft een voorspellingsfout van 0.3 m/s (KNMI, 2020). Deze voorspelling wordt gedaan met het HARMONIE systeem. Een dergelijk voorspellingssysteem voorspelt windsnelheden beter dan een statistische aanpak als er meer dan 6 uur vooruit wordt gekeken (Landberg, 2001b, p. 237). Nauwkeurigheid van voorspelling neemt echter af naarmate er verder in tijd vooruit wordt gekeken. De nauwkeurigheid is het grootst als er op de korte termijn, tot 24 uur vooruit, wordt voorspeld (Jung & Broadwater, 2014b, p. 765).

Alle facetten die de look ahead beïnvloeden zijn meegenomen in de uiteindelijke bepaling van de look ahead. De look ahead van het model wordt op 12 tijdstappen vastgezet voor alle scenario's.

4.2.3 Output

Dit onderzoek richt zich op de toegevoegde waarde van een interne waterstofbuffer bij windparken. De output zal deze toegevoegde waarde moeten reflecteren. De waterstofbuffer kan eigenlijk gezien worden als een soort "tweede productieroute" voor het windpark om elektriciteit te genereren. Alle soorten elektriciteitsproductie worden op de elektriciteitsmarkt vergeleken op basis van hun marginale kosten (De Vries, 2020). Om deze rede is er gekozen om de prestatie van de waterstofbuffer ook op basis van marginale kosten te presenteren.

De marginale kosten van waterstof zijn gedefinieerd als €/kWh_{stroom uit waterstof}.

Als de behaalde besparing door het toevoegen van een waterstofbuffer per kwh hoger is dan de marginale productiekosten, is een investering in een waterstofbuffer winstgevend. De behaalde besparing door het toevoegen van een waterstofbuffer per kWh waterstof wordt in dit onderzoek de toegestane marginale kosten (TMK) genoemd.

Deze TMK worden verkregen door middel van de formule P. Het verschil in totale cashflow van de Wind Actor met en zonder waterstof wordt met elkaar vergeleken en gedeeld door de hoeveelheid geproduceerde stroom uit waterstof (*10 voor €/MWh → €cent/kWh). Bij de totale cashflow van de Wind Actor met waterstof worden de kosten die gemaakt zijn door de opslag (€/MWh/tijdstap) opgeteld om een volledig beeld van de winst te verkrijgen. Dit wordt gedaan door de totale stock van de waterstofbuffer te vermenigvuldigen met de prijs. Er is ervoor gekozen om opslag een representatieve prijs van één cent te geven. Wanneer opslag gratis is kan Linny-R zich onvoorspelbaar gaan gedragen. Voor de cashflow zonder waterstof wordt het "base case zonder waterstof" model gebruikt.

De cashflow met waterstof zal afhangen van het scenario en de bijbehorende conversie-efficiënties, voorspellingsfout etc. Als de werkelijke productiekosten van waterstof onder de TMK zitten, is de technologie winstgevend. Daardoor is een hogere toegestane marginale kosten gewenst.

$$(P) \quad TMK \left(\frac{\text{€cent}}{\text{kWh}} \right) = \frac{(Cflow_{met H_2} + Stock_{H_2 buffer} * C_{opslag}) - Cflow_{zonder H_2}}{PL_{electriciteit uit H_2 buffer} * 10}$$

5. Experimentatie

5.1 Validatie

Nu het model is gemaakt is het belangrijk om te kijken of het model juist functioneert. Daarom zal het model, voordat verdere experimentatie plaatsvindt, worden gevalideerd. Er wordt verwacht dat door de toevoeging van een waterstofbuffer de boetes door onbalans afnemen en de totale cashflow dus toeneemt. In tabel 2 is te zien dat dit inderdaad het geval is.

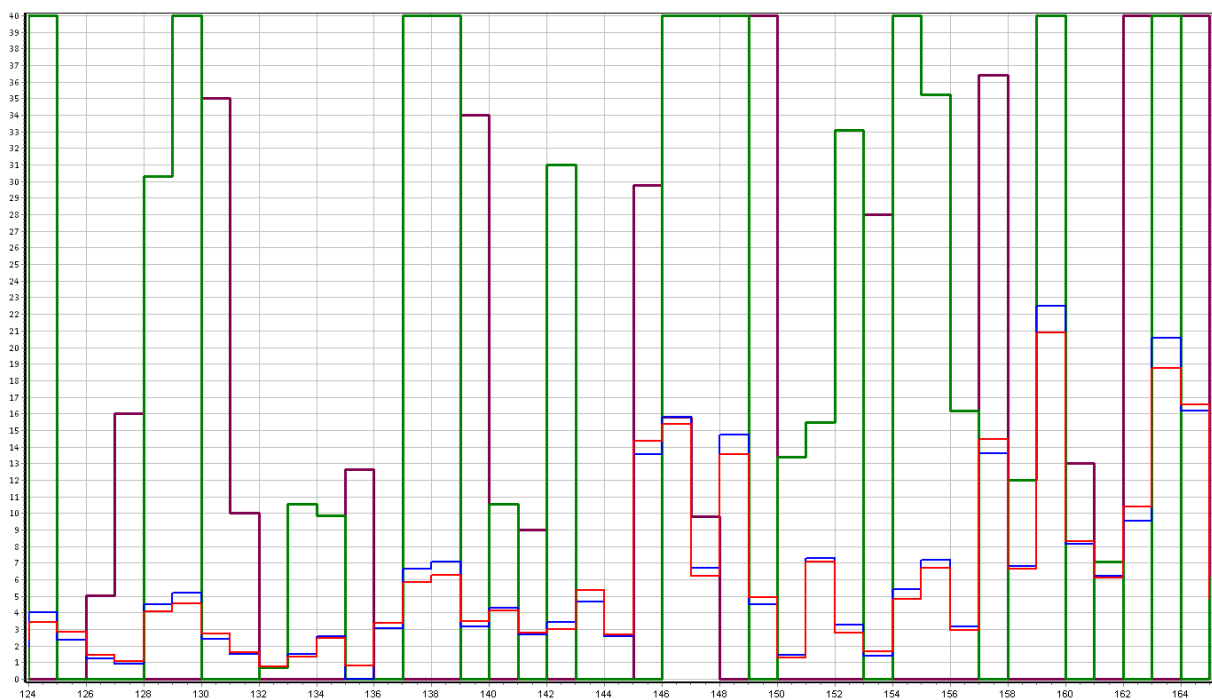
Tabel 2, cashflow geen/wel waterstof

setup	Cashflow (€gem. /tijdstep)
Geen waterstofbuffer	49951
Wel waterstof (EPBo, WPo)	51094
Verschil	+2.3%

Er wordt per tijdstap door het toevoegen van een waterstofbuffer een extra winst van 2.3% behaald. In een jaar zal dit de totale winst met €10 miljoen laten toenemen. De TMK van deze waterstofbuffer kan ook worden berekend met de formule P. Deze staat op €0.158/kWh. Dit valt in de ordegrootte van stroomprijzen. In hoofdstuk 6.3 zal worden gekeken naar het potentieel van waterstof met deze prijs.

Ook kan er gekeken worden naar het gedrag van de buffer op individuele tijdstappen. In figuur 11 is een willekeurige veertig stappen uit een run te zien. In dit figuur zijn de productieniveaus (PL) te zien van:

- De elektrolyser (groen)
- De waterstofverbranding (paars)
- De day-ahead voorspelde stroomproductie (rood)
- De werkelijke productie (blauw)



Figuur 11, EPB_{PL}, WP_{PL}, Windstroomproductie (*0.01), Leveren aan stroomnet (*0.01)

De verwachting is dat de elektrolyser produceert wanneer de productie hoger ligt dan de voorspelling en de waterstofverbranding produceert tijdens het omgekeerde. Dit is ook het geval. Wanneer de blauwe lijn boven de rode ligt is er een overschot en staat de elektrolyser aan en de verbrandingsinstallatie uit. Andersom staat de verbrandingsinstallatie aan en de elektrolyser uit wanneer de rode lijn boven de blauwe ligt. Tussen de tijdstappen 146 en 148 is dit echter niet het geval. Beide installaties staan hier aan. Het evenwicht wordt ook hier wel bereikt. Dit gedrag kan verklaard worden aan de hand van de kosten van het aanzetten van de installaties. Deze staan op nul, omdat dit onderzoek er juist achter wil komen hoe hoog deze kosten kunnen zijn. Doordat de kosten op nul staan zijn er meerdere oplossingen mogelijk voor het model tijdens bepaalde tijdstappen zoals t=146-148. Dit gedrag wijst dus niet op een dysfunctioneel model.

Uit de validatie is te concluderen dat het model zich gedraagt zoals in het conceptueel model is beschreven. Er kunnen nu experimenten mee worden opgezet.

5.2 Experimenteel ontwerp

De experimenten die hier en in de gevoeligheidsanalyse gedaan zullen worden zijn als volgt opgezet. In de initiële analyse zullen de resultaten vergeleken worden die verkregen zijn door de zekere input factoren van het model te variëren (zie tabel 3). Hiermee worden de ontwerpparameters bedoelt die de WindActor zelf kan beïnvloeden. Deze tabel zal geleidelijk uitgebreid worden in de gevoeligheidsanalyse en scenario-analyse met onzekere factoren.

Tabel 3, input base case

<i>Zekere factoren</i>	variatie
Capaciteit van de elektrolyser (WP)	+o-10% → 36, 40, 44 MW
Capaciteit van de waterstofverbranding (EPB)	+o-10% → 36, 40, 44 MW
<i>Onzekere factoren</i>	
--	--

Er is gekozen om voor deze analyse alle factoren met 10% te variëren. De capaciteiten WP en EPB worden naast omhoog ook omlaag gevarieerd, omdat een kleinere capaciteit opstellen voordeliger kan zijn. Om deze reden wordt onderzocht wat het effect is van een capaciteitsverlaging op de TMK en totale cashflow. De hoofdoutput van de experimenten is, zoals beschreven in het vorige hoofdstuk, de toegestane marginale kosten (TMK) voor waterstof. Hiernaast wordt er voor verdere analyse gekeken naar de volgende factoren zoals te zien in tabel 4.

Tabel 4, output base case

<i>Output</i>	eenheid
TMK	€/kWh (H ₂)
Cashflow WindActor	€

5.3 Cashflow

Uit tabel 2 is gebleken dat een waterstofbuffer met de opstelling WPo,EPBo een cashflow stijging van +2,3% oplevert. In deze paragraaf zal er gekeken worden naar het effect van het variëren van de zekere factoren. De resultaten hiervan staan in een heat map genormeerd in tabel 5 met opstelling WPo,EPBo als referentie.

Tabel 5, cashflow bij variatie zekere factoren

Cflow	EPB+	EPBo	EPB-
WP+	100.13%	100.11%	100.08%
Wpo	100.02%	1	99.97%
WP-	99.90%	99.88%	99.85%

Deze resultaten laten een aantal dingen zien. Allereerst heeft het variëren van de capaciteiten WP en EPB met 10% niet een groot effect op de cashflow. De grootste stijging van +0.13% over de base case zal over een jaar tijd de totale winst met €580,000 laten toenemen. Dit is voor een groot windpark een insignificant bedrag. Toch kan er uit deze tabel nuttige informatie worden getrokken. Zo heeft de capaciteitsvergroting van WP een groter effect op de toename van cashflow ($\approx +0.1\%$) dan de EPB ($\approx +0.03\%$). Dit kan worden verklaart door de volgorde van de waterstofloop, te zien in figuur 9. Normaal hebben de WP en EPB dezelfde capaciteit. Echter kan, door de conversie-efficiëntie, WP niet genoeg waterstof leveren om EPB elke stap te verzadigen. De resultaten in tabel 5 ondersteunen de conclusie dat een setup met een kleinere EPB en een grotere WP lucratiever is dan gelijke capaciteiten. Om altijd de EPB te verzadigen zal de WP capaciteit gelijk moeten zijn aan de EPB capaciteit gedeeld door de WP efficiëntie. Dit komt voor een 40MW EPB neer op $\approx 57\text{MW}$ ($\eta=0.7$). Dit is echter niet per se nodig, aangezien beide installaties niet tegelijk op vol vermogen aan zullen staan.

5.4 TMK

De toegestane marginale kosten worden berekend volgens de formule P (hoofdstuk 4.2.3). Door dezelfde variatie in factoren uit tabel 5 te gebruiken is er ook een heat map opgesteld voor TMK. Deze is te zien in tabel 6.

Tabel 6, TMK bij variantie zekere factoren. Referentiewaarde (100%) = €0.158/kWh

TMK	EPB+	EPBo	EPB-
WP+	99.93%	98.43%	96.60%
Wpo	101.58%	1	98.31%
WP-	103.29%	101.86%	100.09%

De referentie EPBo, WPo heeft een TMK van €0.158/kWh. Op het eerste oog zijn deze resultaten onverwacht. De hoogste TMK ligt bij WP-,EPB+ met €0.163/kWh en de laagste bij WP+,EPB- op €0.153/kWh. Om deze waarden te verklaren kan er gekeken worden naar de formule van TMK zelf. Dit is een deling tussen twee waarden. De bovenste waarde (TMK_{top}) representeert het verschil in cashflow tussen de geselecteerde optie en de base case zonder waterstof. Dit kan ook gezien worden als de toegevoegde waarde van de waterstofbuffer. De onderste (TMK_{bot}) representeert de productie van elektriciteit uit waterstof. Van deze twee waarden kunnen aparte heatmaps worden gemaakt. Deze zijn weergegeven in tabel 7 en 8.

Tabel 7, TMK_{top} Referentiewaarde: (100%) = €1147/tijdsstap

TMK_{top}	EPB+	EPBo	EPB-
WP+	105.97%	104.82%	103.45%
Wpo	101.06%	1	98.75%
WP-	95.62%	94.63%	93.46%

Tabel 8, TMK_{bot} Referentiewaarde: (100%) = 72.5 kWh/tijdsstap

TMK_{bot}	EPB+	EPBo	EPB-
WP+	106.04%	106.49%	107.09%
Wpo	99.49%	1	100.44%
WP-	92.57%	92.90%	93.37%

De TMK zelf is dus de verhouding tussen deze twee waardes. Waar de grootste verschillen liggen, zal de TMK uitwijken. TMK_{bot} is gevoeliger voor een verandering in productiecapaciteit dan TMK_{top} . Dit is logisch, aangezien TMK_{bot} ook daadwerkelijk de waterstofproductie meet. Een capaciteitsverandering heeft hier een directe impact op. Op TMK_{top} heeft deze capaciteitsverandering slechts een indirect effect, dus is het effect kleiner.

In tabel 8 is te zien dat de optie WP+,EPB- hoger scoort in TMK_{bot} dan de optie WP+,EPB+. Dit is te verklaren aan de hand van de volgorde in de productieketen, te zien in figuur 11. De waterstofproductie WP staat voor de elektriciteitsproductie EPB in de keten. Doordat bij elke stap energie verloren gaat door efficiëntie, is het nodig dat de productie aan de voorkant groter is dan aan de achterkant. WP+,EPB- is hierdoor de beste opstelling en produceert de meeste waterstof. Wanneer alle efficiënties op 100% worden gezet vervalt dit effect zoals verwacht. In dat geval resulteert elke capaciteitsverhoging in een hogere TMK_{bot} .

Het resultaat van tabel 6 kan ook verklaard worden aan de hand van de functie van de buffer. De elektriciteit uit de waterstofbuffer wordt gebruikt om te voorkomen dat de WindActor een boete moet betalen voor het veroorzaken van een onbalans. Bij een kleinste waterstofproductie (WP-,EPB+) wordt er alleen gecompenseerd voor de hoogste boetes, want daar is de waterstof het meest winstgevend. Hier is de TMK dus ook het hoogst.

De economische efficiëntie van de waterstofbuffer gaat omlaag wanneer de productie toeneemt. Naarmate de waterstofproductie groeit gaat deze namelijk ingezet worden om te compenseren voor lagere en lagere boetes. Een kleine waterstofbuffer heeft een kleinere totale toegevoegde waarde, maar een grotere economische efficiëntie en dus hogere TMK.

6. Gevoeligheidsanalyse

6.1 Experimenteel ontwerp gevoeligheidsanalyse

In dit hoofdstuk zal er gekeken worden naar TMK van de waterstofbuffer, onder verschillende omstandigheden. Ten eerste zullen de base case waardes van een aantal key factoren worden gevarieerd. De factoren zijn op te splitsen in twee soorten: zeker en onzeker. Dit is te zien in tabel 9. Onder zekere factoren worden factoren verstaan die de actor zelf kan beïnvloeden. Onder onzeker staan de omgevingsparameters die niet te beïnvloeden zijn door de actor maar wel invloed hebben op het modelgedrag.

Tabel 9, input gevoeligheidsanalyse base case

<i>Zekere factoren</i>	variatie
Capaciteit van de elektrolyser (<i>WP</i>)	+o-10% → 36, 40, 44 MW
Capaciteit van de Waterstofverbranding (<i>EPB</i>)	+o-10% → 36, 40, 44 MW
<i>Onzekere factoren</i>	
Conversie-efficiëntie van de elektrolyser (<i>efE</i>)	o+10% → 70%, 77%
Conversie-efficiëntie van de waterstofverbranding (<i>efF</i>)	o+10% → 60%, 66%

De capaciteiten worden op dezelfde manier gevarieerd als in hoofdstuk 5. De conversie-efficiënties worden alleen omhoog gevarieerd. Met de huidige technologie zijn elektrolyzers en verbrandingsinstallaties voor waterstof in staat om een efficiëntie van 70 en 60% te halen (Bernholz, 2018). Deze technologie is bekend en zal dus niet afnemen. In de toekomst zou dit echter wel kunnen toenemen.

In totaal worden er nu vijf factoren gevarieerd. Twee factoren hebben drie niveaus en de rest heeft twee niveaus. Om een full factorial experiment uit te voeren zijn er 36 experimenten nodig ($3 \times 3 \times 2 \times 2$). Een full factorial experiment kan gedaan worden met behulp van autorun software (Bots, 2020). Deze software voert experimenten uit aan de hand van een shorthand. Voor de base case experimenten is de shorthand in vergelijking (Q) gebruikt.

(Q) *shorthand*

$['efF|efF|o + ', 'efE|efE|o + ', 'WP|WP|o + -', 'EPB|EPB|o + -']$

6.1.1 Resultaten gevoeligheidsanalyse

De grote hoeveelheid resultaten uit deze gevoeligheidsanalyse zijn uit noodzaak in meerdere tabellen gezet. Niet alle tabellen zullen hier besproken worden. De volledige lijst aan resultaten is te zien in bijlage A. De resultaten die verder worden belicht zijn naast de referentie Wp_o,EPB_o de opstellingen die in de hoofdstuk 5 de hoogste (WP₊,EPB₊) en de laagste (WP₊,EPB₋) TMK-scores hadden, te zien in tabel 6.

De TMK resultaten van de gevoeligheidsanalyse zijn te zien in tabel 10, 11 en 12. Deze waarden zijn genormeerd ten opzichte van het base-case scenario met de reguliere efficiënties ef_{Fo} en ef_{Eo}. Dit is te zien doordat het resultaat links onderin een waarde van 1 (100%) heeft.

TMK

Tabel 10, TMK gevoeligheidsanalyse. Referentiewaarde (100%) = €0.158/kWh

TMK (€cent/kWh)		Wp _o , EPB _o	WP ₊ , EPB ₋	WP ₋ , EPB ₊
ef _{F+}	ef _{E+}	84.7%	80.5%	88.2%
	ef _{Eo}	91.2%	87.2%	94.5%
ef _{Fo}	ef _{E+}	93.3%	89.6%	96.6%
	ef _{Eo}	100.0%	96.6%	103.3%

Ongeacht de opstelling van WP en EPB produceert het scenario zonder efficiëntieverbetering het beste resultaat. Uit het vorige hoofdstuk is wel geleerd dat een afwijkende TMK resultaat kan zijn van een groter verschil tussen de TMK_{top} en TMK_{bot} dan normaal. Tabel 11 bevestigt dit al deels. De TMK_{bot}, die de elektriciteitsproductie uit waterstof representeert, stijgt fors met verbeterde efficiënties. Doordat de TMK_{top} in tabel 12 niet een even grote stijging ervaart is de resulterende TMK lager dan de referentiewaarde.

Het effect van het variëren van efficiënties op de TMK is in alle opstellingen ongeveer even groot. Dit wijst erop dat een bepaalde opstelling geen groter voordeel of nadeel kan behalen uit efficiëntieverbetering dan een andere opstelling.

TMK_{bot}

Tabel 11, TMK bot gevoeligheidsanalyse. Referentiewaarde: (100%) = 72.5 kWh/tijdsstap

TMK _{bot}		Wp _o , EPB _o	WP ₊ , EPB ₋	WP ₋ , EPB ₊
ef _{F+}	ef _{E+}	117.2%	127.4%	107.8%
	ef _{Eo}	111.8%	120.6%	103.3%
ef _{Fo}	ef _{E+}	104.3%	112.5%	96.2%
	ef _{Eo}	100.0%	107.1%	92.6%

In tabel 11 is door de TMK_{bot} de elektriciteitsproductie uit waterstof te zien. De waterstofloop profiteert fors van de verbeterde efficiënties. WP₊,EPB₋ heeft de grootste stijging met 127.4% als beste resultaat. Deze opstelling behaalde in hoofdstuk 5 de laagste TMK. Hier is dat ook het geval. De WP₊, EPB₋ opstelling is de beste opstelling voor waterstofproductie, zoals beschreven in hoofdstuk 5. Uit tabel 11 is te zien dat WP₊,EPB₋ ook een grotere verbetering maakt door de hogere efficiëntie dan WP₋,EPB₊. Een betere opstelling voor waterstofproductie haalt dus meer voordeel uit hogere efficiënties.

WP₋,EPB₊ scoort het laagst met 92.6%. Het is interessant om op te merken dat zelfs in het scenario Ef_{Fo},Ef_{E+} nog steeds maar 96.2% wordt behaald ten opzichte van de referentie. In dit scenario wordt waterstofproductiecapaciteit vermindert met 10%, maar waterstofproductie-efficiëntie verhoogt met 10%. Deze twee tegengestelde effecten werken elkaar niet weg. Dit is een belangrijk gegeven.

Een efficiëntieverandering van het proces heeft niet hetzelfde effect als een capaciteitsverandering. Het grote verschil tussen deze is aan welke kant er iets veranderd: input of output. Bij een capaciteitsvergroting veranderen de input en output met een vergrotingsfactor X. Bij een efficiëntieverhoging hoeft er minder binnen te komen om dezelfde output te verkrijgen. De output blijft echter per tijdsstap wel hetzelfde. Dit verschil heeft onder andere gevolgen in het gedrag van TMK_{top} .

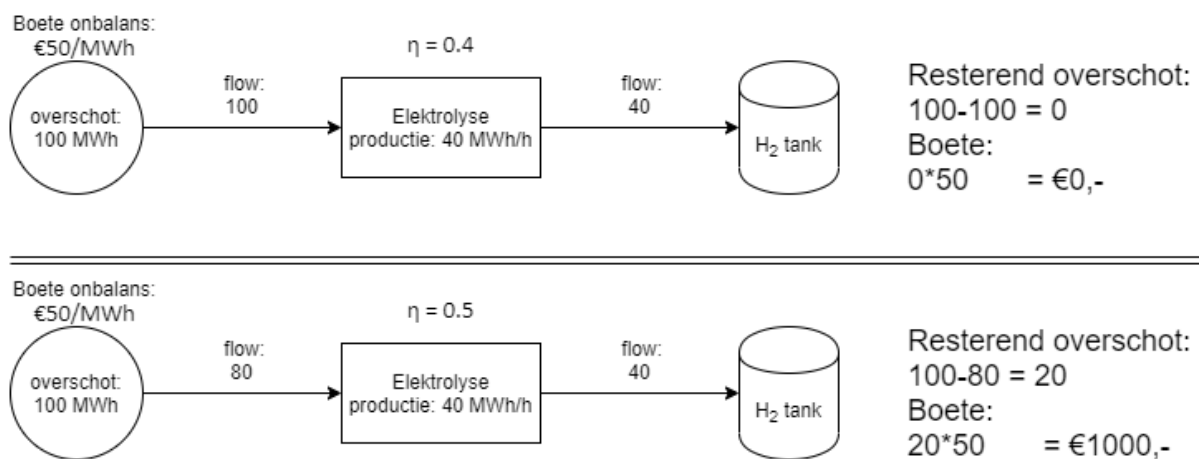
TMK_{top}

Tabel 12, TMK_{top} top gevoeligheidsanalyse. Referentiewaarde: (100%) = €1147/tijdsstap

TMK_{top}		Wpo, EPBo	WP+, EPB-	WP-, EPB+
efF+	efE+	99.3%	102.5%	95.1%
	efEo	102.0%	105.2%	97.7%
efFo	efE+	97.3%	100.8%	93.0%
	efEo	100.0%	103.5%	95.6%

In tabel 12 is door de TMK_{top} de toegevoegde waarde van de waterstofbuffer te zien. De resultaten zijn anders dan de vorige tabellen. De beste en slechtste waardes zitten niet aan de boven- en onderkant, maar in het midden. De verbrandingsefficiëntie eff heeft een positief effect op de toegevoegde waarde, maar de elektrolyser efficiëntie EfE niet.

Een verhoging van de elektrolyser efficiëntie heeft een omgekeerd effect op cashflow. Cashflow neemt af wanneer de efficiëntie van de elektrolyser toeneemt. Dit kan verklaard worden aan de hand van de fundamentele rol van de elektrolyser. Het hoofddoel van de elektrolyser is niet echt om waterstof te maken, maar om overschotten aan stroom op te vangen. Een elektrolyser met een hogere efficiëntie, maar dezelfde capaciteit, heeft minder stroom nodig als input. Hierdoor kan er dus minder overtollige stroom worden opgenomen. Een voorbeeld hiervan is te zien in figuur 12.



Figuur 12, voorbeeld effect elektrolyser

In dit voorbeeld zijn simpele getallen gebruikt, geen waardes uit de run. Er zijn twee situaties geschetst. De situaties zijn identiek, op de efficiëntie na. 100 MWh aan stroomoverschot is de input voor beide. In de bovenste situatie heeft de elektrolyser om op vol vermogen te draaien 100 MWh stroom nodig (40/0.4). Hierdoor wordt het hele overschot verbruikt. Omdat er geen overschot meer over is hoeft er ook geen boete meer betaald te worden.

In de onderste situatie heeft de elektrolyser om op vol vermogen te draaien slechts 80 MWh stroom nodig (40/0.5). Normaliter zou dit een goede ontwikkeling zijn, maar door deze efficiëntieverbetering

wordt het hele overschot niet meer verbruikt. Het resterende deel van het overschot bestaat nog en moet aan de onbalansmarkt verkocht worden met een totale boete van €1000.

De elektrolyser heeft twee doelen: waterstof maken en overtollige stroom opnemen. Het eerste is belangrijk, maar het laatste is de prioriteit. Voor de WindActor is het dus belangrijk om bij een efficiëntieverbetering ook de capaciteit van de elektrolyser te vergroten. Anders riskeert de WindActor een verminderde capaciteit om overschotten op te vangen.

Een verhoging van de efficiëntie heeft echter ook voordelen. Zo is in tabel 11 te zien dat de TMK_{bot} toeneemt met de verhoging. Ook de verbrandingsinstallatie kan baat hebben bij een verhoogde elektrolyser efficiëntie. Er wordt dan namelijk meer waterstof geproduceerd waar de verbrandingsinstallatie gebruik van kan maken. Een ander voordeel is dat bij een hogere elektrolyser efficiëntie minder energie verloren gaat door efficiëntie. Hierdoor kan er meer groene waterstof en dus meer groene stroom geproduceerd worden, mits de productiecapaciteit groot genoeg is.

6.2 Scenario-analyse

Waterstofbuffers kunnen in de toekomst ingezet worden om stabiliteit te vergroten. In de toekomst van windtechnologie is uitbreiding het sleutelwoord. Aan de Nederlandse kust wordt in 2050 17.6 GW aan opgesteld vermogen verwacht (Ministerie van I&M/EZ, 2014). De technologische en economische omstandigheden waarin deze windparken moeten functioneren is echter onduidelijk. Aan de hand van een tweetal grote onduidelijkheden zal een scenario-analyse worden gedaan. Binnen elk scenario zullen alle variaties uit de base-case experimenten worden uitgevoerd. Gevoeligheidsanalyses worden ook opnieuw uitgevoerd om het effect van scenario's op de gevoeligheid in kaart te brengen. Het tweetal grote onduidelijkheden is de onbalansprijs en de voorspelbaarheid van productie.

6.2.1 Onbalansprijs

Duurzame energieopwekking is minder controleerbaar dan traditionele energieproductie. Dit heeft effect op de onbalansmarkt, aangezien er minder controle over de productie is. De onbalansprijs zou kunnen toenemen door de vergrootte vraag. Aan de andere kant zou het ook kunnen zijn dat door grotere connectie tussen landen en efficiëntere onbalanscentrales de onbalansprijs juist afneemt. Hoe deze ontwikkeling uitpakt is moeilijk te zeggen. Het is daarom belangrijk om te kijken naar het effect van zowel een stijging als een daling van de onbalansprijs.

In de scenario's wordt de prijsverandering gerealiseerd door de bestaande prijzen met 10% te verhogen en te verlagen.

6.2.2 Voorspelbaarheid productie

Over het algemeen is de voorspellingsnauwkeurigheid van de productie van windparken met de jaren toegenomen (Jung & Broadwater, 2014b, p. 765). In de toekomst is het dus aannemelijk dat deze trend zal doorzetten. Echter is dit niet zeker. Offshore windenergie is een relatief nieuwe technologie en er liggen een aantal grote veranderingen voor windenergie op de agenda. Zo wordt er gekeken naar de toepassing van drijvende windturbines voor dieper water (EWEA, 2013). Significante variatie in de elektriciteitsproductie treedt op door de extra load van golven op de turbines (Lee & Lee, 2019, p. 17). Modellen zijn al enigszins in staat om deze variatie te voorspellen (Jeon, Lee, & Lee, 2014, p. 210), maar grote schaal drijvende windparken zijn nog niet operationeel en real-world benchmarks kunnen dus voorlopig niet worden uitgevoerd. Er zal dus gekeken worden naar zowel een verhoging en een verlaging van de voorspelbaarheid van productie.

In model wordt de voorspelbaarheidsverandering gerealiseerd door de datareeks "day-ahead voorspelling" uit hoofdstuk 3.1.3 aan te passen met de volgende formule (R).

$$(R) \quad \text{day ahead v.} \begin{cases} \text{Hogere voorspelbaarheid} = P + 0.1(P - V) \\ \text{Lagere voorspelbaarheid} = P - 0.1(P - V) \end{cases}$$

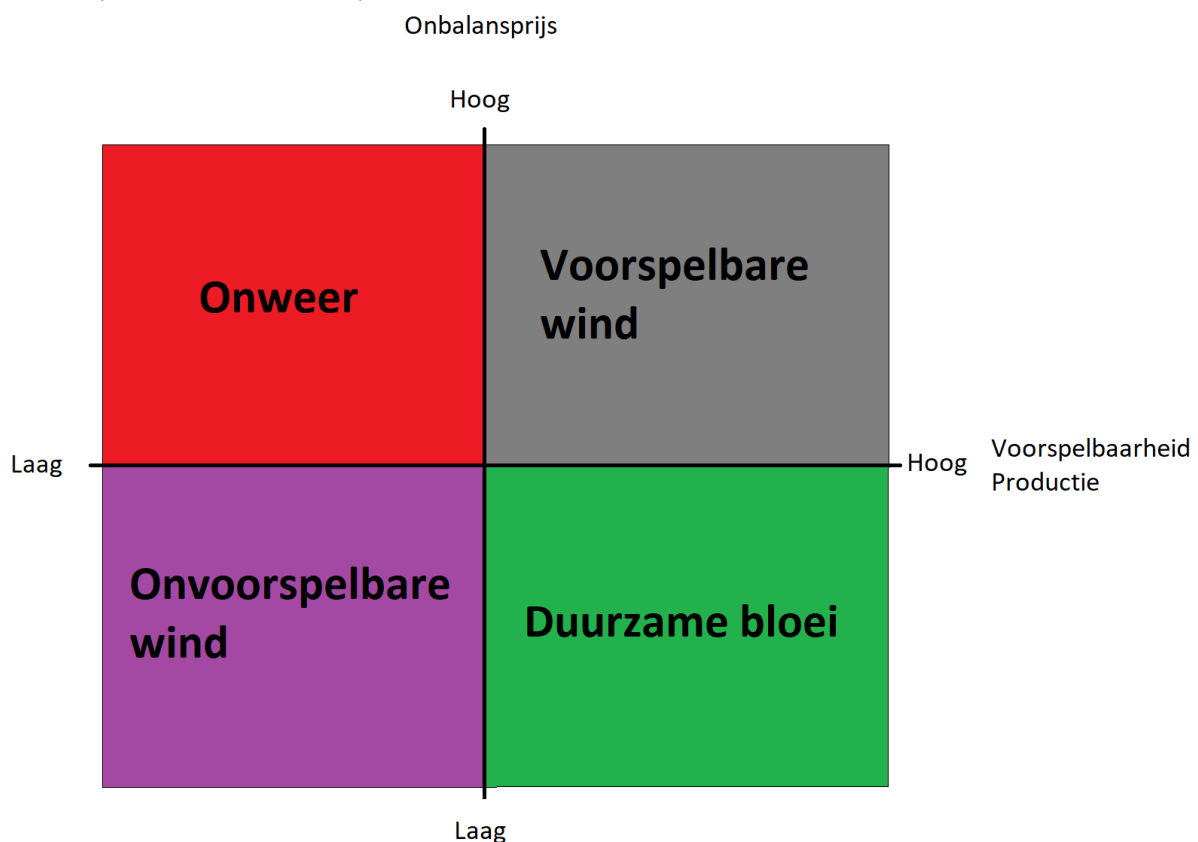
$P = \text{originele productie windstroom}$

$V = \text{originele day ahead voorspelling}$

Deze formule brengt de waardes “P” en “V” dichterbij elkaar of verder van elkaar, afhankelijk van het scenario. Wanneer de waardes dichterbij elkaar komen neemt de voorspellingsfout af en is de voorspelbaarheid als het ware toegenomen. Wanneer de waardes verder van elkaar af gaan neemt de voorspellingsfout toe en is de voorspelbaarheid als het ware afgenomen.

Aangezien de toegestane in- en verkoop van onbalansstroom afhangen van het verschil tussen productie en voorspelling (zie hoofdstuk 4.1.1), worden deze waardes in per scenario ook passend gemaakt in het model.

6.2.3 Experimenteel ontwerp scenario's



Figuur 13, scenariokaart

De namen die aan de scenario's in figuur 12 zijn gegeven komen voort uit een voorspelling van het effect op een windpark zonder waterstof. Voor een dergelijk windpark zal een lage voorspelbaarheid en een hoge onbalansprijs, “onweer”, het slechtst uitpakken. Echter zal het omgekeerde waar zijn voor “duurzame bloei”. Verwacht wordt dat “onvoorspelbare wind” minder gunstig is voor cashflow dan “voorspelbare wind”. Bevestiging van deze vermoedens is te zien in tabel 14. Ook is het vermoeden dat waterstof een hogere TMK heeft in slechtere scenario's als onweer, omdat het model waterstof kosten-effectiever kan gebruiken in die situatie. In de resultaten van de gevoeligheidsanalyse zal dit bewezen of ontkracht worden.

Tabel 13, input gevoeligheidsanalyse scenario's

<i>Zekere factoren</i>	variatie
Capaciteit van de elektrolyser (<i>WP</i>)	+o-10% → 36, 40, 44 MW
Capaciteit van de Waterstofverbranding (<i>EPB</i>)	+o-10% → 36, 40, 44 MW
<i>Onzekere factoren</i>	
Conversie-efficiëntie van de elektrolyser (<i>efE</i>)	o+10% → 70%, 77%
Conversie-efficiëntie van de waterstofverbranding (<i>efF</i>)	o+10% → 60%, 66%
Voorspelbaarheid wind (<i>grilW</i>)	+/-10%
Onbalansprijs (<i>onbP</i>)	+/-10%

In totaal worden er nu zes factoren gevarieerd. Twee factoren hebben drie niveaus en de rest heeft twee niveaus. Om een full factorial experiment uit te voeren zijn er 144 experimenten nodig ($3 \times 3 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2$). Wederom wordt een full-factorial gedaan. Voor de base case experimenten is de shorthand in vergelijking (S) gebruikt.

(S) *shorthand*

$['efF|efF|o+' , 'efE|efE|o+' , 'efE|efE|o+' , 'onbP|onbPA, onbPB| + -' grilW| grilWPL, grilWPU, grilWQL, grilWQU, grilWRU, grilWSU| + -' , 'WP|WP|o + -' , 'EPB|EPB|o + -']$

Om voor de scenario's van figuur 13 een TMK op te stellen is volgens formule (P) een referentie cashflow van een systeem zonder waterstof nodig. Voor de vier scenario's zijn deze vier referentie cashflows gemeten en in tabel 14 gezet. Hierbij is ook het verschil tussen de cashflow en de cashflow zonder waterstof uit de base case vermeld (zie tabel 2).

Tabel 14, referentie cashflows

<i>Scenario</i>	Referentie cashflow zonder waterstof (€gem. /tijdstap)
Onweer (laag, hoog)	49461 (-0.98%)
Voorspelbare wind (hoog, hoog)	49975 (+0.05%)
Onvoorspelbare wind (laag, laag)	49882 (-0.14%)
Duurzame bloei (hoog, laag)	50401 (+0.90%)

6.2.4 Resultaten Scenario-analyse

De resultaten in deze analyse zijn uit noodzaak in meerdere tabellen gezet. Niet alle tabellen zullen hier besproken worden. De volledige lijst aan resultaten is te zien in bijlage B. De opstelling die gebruikt gaat worden om de scenario's te vergelijken is de referentieopstelling WPo,EPBo. In deze analyse is besloten om de waardes zelf te gebruiken, in plaats van genormeerde waarden. Hiervoor is gekozen omdat de absolute waarden in de heatmaps duidelijker de verbanden aangeven dan de genormeerde waarden.

TMK

Tabel 15, TMK scenario-analyse

TMK		WPo		EPBo		
		Onweer	Voorspelbare wind	Onvoorspelbare wind	Duurzame bloei	Basecase referentie
efF+	efE+	14.75	14.73	12.07	12.05	13.40
	efEo	15.88	15.86	12.99	12.98	14.43
efFo	efE+	16.24	16.21	13.29	13.26	14.76
	efEo	17.42	17.39	14.25	14.23	15.82

In tabel 15 bevindt de hoogste TMK zich in het scenario "Onweer" waarin geen extra efficiëntieverbetering heeft plaatsgevonden. De TMK is in dit geval 10.1% hoger dan de referentiewaarde. Met een daling van 10% is het scenario "Duurzame bloei" met beide efficiëntieverhogingen de sterkste daler. Er is een duidelijke tweedeling te vinden in de data. De twee scenario's aan de linkerkant van tabel 15 hebben, zoals aangegeven in de scenariokaart, een hoge onbalansprijs. De onbalansprijs heeft een grotere invloed op TMK dan de voorspelbaarheid van de wind. Echter betekent dit niet dat de voorspelbaarheid geen effect heeft. Het is mogelijk dat voorspelbaarheid een significant effect heeft in zowel de TMK_{top} als TMK_{bot} . Door deze op elkaar te delen valt dit echter weg.

De scenario's hebben ook een effect op de impact die efficiëntieverbeteringen hebben op de TMK. In de referentie is de range van TMK van 13.4 tot 15.82 (2.42 cent verschil). Dit wordt versterkt in de twee linker scenario's (2.67 cent) en verzwakt in de twee rechter scenario's (2.18 cent). In scenario's waar de noodzaak voor een waterstofbuffer groter is, heeft een efficiëntieverbetering een groter effect.

Het gedrag van de TMK in tabel 15 is te verklaren aan de hand van het nut van de waterstofbuffer. De waterstofbuffer vangt onbalans op om boetes te voorkomen. In een situatie waar er grote onbalans is en hoge boetes zijn kan de buffer dus economisch efficiënter ingezet worden. Waterstof verliest nut wanneer de boetes en de onzekerheid lager worden. Dit reflecteert zich in een hoge TMK in scenario's zoals "onweer" en lage TMK in scenario's zoals "duurzame bloei", waar de noodzaak voor buffering minder groot is. Dit wordt bevestigd in tabel 16.

Tabel 16, TMK_{top} scenario-analyse

TMK _{top}		WPO		EPBo		
		Onweer	Voorspelbare wind	Onvoorspelbare wind	Duurzame bloei	Basecase referentie
efF+	efE+	1293	1205	1058	986	1139
	efEo	1330	1234	1089	1010	1170
efFo	efE+	1267	1181	1037	966	1116
	efEo	1305	1210	1068	990	1147

De toegevoegde waarde is inderdaad hoger in de linker twee scenario's. De verhoogde elektrolyser-efficiëntie verlaagt, net als in de gevoeligheidsanalyse, de toegevoegde waarde. De sterkte van dit effect neemt toe in de scenario's: 38 verschil in onweer, 31 in referentie. Dit is echter niet een significante groei.

Tabel 17 laat iets opvallends zien in de TMK_{bot}: de waardes in de scenario's zijn exact hetzelfde in "onweer" & "onvoorspelbare wind" en "voorspelbare wind" & "duurzame bloei". De overeenkomst tussen de scenario's is dat de gelijke waardes allebei aan dezelfde kant van de "voorspelbaarheid wind" as staan in de scenariokaart. Dit betekent dat bijvoorbeeld Onweer & voorspelbare wind dezelfde onbalans hebben tijdens de run. Onbalans opvangen in waterstof is meestal goedkoper dan boetes betalen in het model. Hierdoor vind Linny-R bij een gelijke onbalans hetzelfde optimum voor waterstofproductie, ongeacht de onbalansprijs. Het verschil in de onbalansprijs uit zich wel in de toegevoegde waarde in tabel 16. Daar is te zien dat bij een hogere onbalansprijs de toegevoegde waarde van de waterstofbuffer toeneemt.

Tabel 17, TMK_{bot} scenario-analyse

TMK _{bot}		WPO		EPBo		
		Onweer	Voorspelbare wind	Onvoorspelbare wind	Duurzame bloei	Basecase referentie
efF+	efE+	87.64	81.81	87.64	81.81	84.99
	efEo	83.77	77.80	83.77	77.80	81.05
efFo	efE+	78.02	72.84	78.02	72.84	75.67
	efEo	74.91	69.57	74.91	69.57	72.51

6.3 Potentieel

Nu de werking en gevoeligheid van het model bestudeerd is, kan het potentieel van de technologie bepaald worden. Blok & Nieuwlaar (2016) delen het potentieel van een technologie op in verschillende categorieën. Vier van deze categorieën worden hieronder beschreven. Door deze soorten potentieel te doorlopen is het vooruitzicht van deze technologie helderder in kaart te brengen.

6.3.1 Theoretisch potentieel

Het theoretisch potentieel “beschrijft wat er fysisch mogelijk is” (Blok & Nieuwlaar, 2016, pp. 1–3). Hieronder vallen onder andere thermodynamische limieten. In de waterstofbuffer zijn twee van dit soort limieten te vinden: de conversie-efficiënties van de verbrandingsinstallatie en de elektrolyser. Het thermodynamisch limiet bepaald de maximum efficiëntie van een verbranding. Dit ligt voor een waterstofverbrandingsinstallatie op 94.5% (Harrison et al., 2010, pp. 1–3). De efficiëntie van de elektrolyser kan maximaal 83% bedragen (Harrison et al., 2010, pp. 1–3). Echter blijkt uit het onderzoek dat dit niet voordelig is voor de TMK. Het hoofddoel van de elektrolyser is het opvangen van overschotten en dus moet er naast productie ook gekeken worden naar de opvangcapaciteit.

6.3.2 Technisch potentieel

Het technisch potentieel is “de bijdrage die een technologie tussen nu en een aantal jaar kan leveren” (Blok & Nieuwlaar, 2016, pp. 1–3). Hier worden economische overwegingen nog niet meegenomen. Het installeren van waterstofinstallaties die groot genoeg zijn om grote onbalans op te vangen is technisch mogelijk. Zo werkt Tata Steel in samenwerking met Nouryon aan een 100MW elektrolyser (Port of Amsterdam, 2019). Ontwikkeling wordt hier echter beperkt door de tijd. Voor het realiseren van een dergelijke installatie zijn meerdere jaren nodig. Dit limiteert het technisch potentieel op de korte termijn. Voor nieuwe windparken is het echter mogelijk om een dergelijke waterstofbuffer direct in het design mee te nemen. Het technisch potentieel zal op de lange termijn toenemen.

6.3.3 Markt potentieel

Het markt potentieel is “het deel van het technisch potentieel wat onder de economische omstandigheden winstgevend geïmplementeerd kan worden” (Blok & Nieuwlaar, 2016, pp. 1–3). Uit het model is voortgekomen dat de hoogste marginale toegestane kosten (TMK) onder de base case onbalansprijs en voorspelbaarheid ligt op €0.163/kWh. Onder specifieke scenario-omstandigheden kan dit toenemen naar €0.174/kWh.

De huidige waterstofprijs is snel naar beneden aan het gaan. Elektriciteit uit waterstof wordt niet grootschalig gemaakt op dit moment. Uit schattingen zou de prijs rond de \$140/MWh liggen (Patel, 2020). Dit ligt te hoog om met conventionele gascentrales te concurreren, die rond een prijs van \$50/MWh kunnen produceren (LAZARD, 2019). Echter valt \$140/MWh (€0.12/kWh) onder de berekende TMK. Belangrijk is het wel om mee te nemen dat de TMK alleen marginale kosten betreft en geen vaste kosten met zich mee neemt. Hier dient verder onderzoek naar gedaan te worden.

6.3.4 Beleid ondersteund markt potentieel

Het beleid ondersteund markt potentieel is “gelijk aan het markt potentieel, maar hier wordt ook het mogelijk effect van (nieuw) beleid meegenomen” (Blok & Nieuwlaar, 2016, pp. 1–3). Een investering in een waterstofbuffer is riskant voor bedrijven. Toch kan het voordelen opleveren voor zowel het bedrijf als de overheid. Een waterstofbuffer kan extra stabiliteit op het net geven en tegelijk CO₂ besparen door curtailment te voorkomen. De overheid kan ervoor kiezen om verder onderzoek te financieren naar deze waterstofbuffers om de implementatie te versnellen.

7. Conclusie

In een verduurzamende wereld is het noodzakelijk om een energiebuffers in te bouwen om rekening te houden met de grilligheid en onvoorspelbaarheid van duurzame energiebronnen zoals de wind. Nederland zet fors in op de uitbreiding van windenergie. Dit gaat gepaard met de uitfasering van betrouwbare fossiele energiecentrales. Onbalans is een probleem in het huidige energienetwerk, voor zowel de netbeheerder als de energieproducent.

Dit onderzoek is gericht op het beantwoorden van de hoofdvraag:

“Welke voordelen vallen er te behalen door het gebruik van een waterstofbuffer voor het opvangen van onbalans in duurzame elektriciteitsproductie?”

Het beschreven systeem, een windpark met waterstofbuffer, behaalt een aantal voordelen. Door de mogelijkheid van opslag is curtailment omwille van het midden van kosten minder nodig. Dit resulteert in minder weggegooid energie en dus CO₂ besparing. Het voordeel waar dit onderzoek zich op focust is de potentiële winstgevendheid van een dergelijke waterstofbuffer. Uit het onderzoek zijn de volgende hoofdresultaten gekomen, te zien in tabel 18.

Tabel 18, hoofdresultaten, WP = waterstofproductie (elektrolyse), EPB = elektriciteitsproductie uit waterstof

Hoofdresultaten	Hoogste waarde (huidige omgevingsparameters)	Gebruikte opstelling
Toegestane marginale kosten	€0.163/kWh	WP-,EPB+
Toegevoegde waarde waterstofbuffer	€1215.5/tijdsstap	WP+,EPB+
Waterstofproductie	77.7 kWh/tijdsstap	WP+,EPB-

De huidige productiekosten van waterstof (\$140/MWh, €0.12/kWh) vallen onder de berekende TMK. Hierdoor lijkt de buffer winstgevend te zijn. Belangrijk is het wel om mee te nemen dat dit een initiële analyse is en de TMK alleen marginale kosten meeneemt (geen vaste kosten). Aan de hand van de inzichten verkregen in dit onderzoek zijn er een aantal aanbevelingen opgesteld voor het implementeren van een waterstofbuffer:

- Vanwege de efficiëntie van de elektrolyser en de verbrandingsinstallatie is het aan te raden om de elektrolyser groter te maken dan de verbrandingsinstallatie. Dit is de meest efficiënte setup voor waterstofproductie.
- Er bestaat een afweging tussen de capaciteit van de waterstofbuffer en de TMK. Een kleinere waterstofbuffer heeft een hogere TMK, doordat de kleinere hoeveelheid waterstof alleen gebruikt wordt om hoge boetes voor onbalans op te vangen. Kleinere opstellingen hebben de voorkeur wanneer de productiekosten voor waterstof hoog zijn.
- Naarmate de waterstofbuffer opgeschaald wordt, neemt de TMK af. Dit gaat in het model wel gepaard met een algemene stijging van de cashflow. De waterstof zal gebruikt worden om steeds minder hoge boetes op te vangen. Hierdoor daalt de TMK, maar stijgt de cashflow. Het opschalen van de waterstofbuffer is aan te bevelen bij een toename van de onbalanskosten of een afname van de productiekosten van de waterstof.
- Bij het selecteren van een elektrolyse-installatie is de productiecapaciteit van secundair belang. Het hoofdbelang is de hoeveelheid overtollige elektriciteit die de elektrolyser kan opvangen. Dit schaal omgekeerd met elektrische efficiëntie. Bij een efficiëntieverhoging is het noodzakelijk om de totale capaciteit te verhogen. Anders zal de opvangcapaciteit en dus de toegevoegde waarde van de waterstofbuffer dalen.

8. Vervolgonderzoek

Vervolgonderzoek kan onder andere op twee hoofdpunten focussen. Deze zullen hier individueel worden belicht.

8.1 Kosten baten analyse

In dit onderzoek is het concept “waterstofbuffer” onderzocht aan de hand van een optimalisatiemodel. Er is echter niet gekeken naar de bredere context waarin windparken zich bevinden. Vervolgonderzoek kan kijken hoe de implementatie van waterstofbuffers in een bredere socio-technische context past.

- Wat zijn de “barriers to entry” voor deze technologie?
- Wat het huidige beleid rondom deze buffers en hoe beïnvloed dit het handelen van de actoren?
- Is het in de huidige context mogelijk om deze waterstofbuffers te realiseren?

Dit zijn enkele vragen waar een vervolgonderzoek zich op kan focussen. Door dit te doen wordt de waterstofbuffer gegrond in een brede socio-technische context. Dit verheldert de potentie van deze technologie verder.

Ook kan er verder onderzocht worden waar de grenzen liggen van deze “groene” waterstof. Puristisch gezien is de waterstof in dit model nog steeds niet groen. Direct gebruik van de windstroom had tot meer nut geleid dan de conversieroute. Door de vermindering van stroomoutput is er dus nog steeds sprake van een hogere CO₂ uitstoot door het verdrukkingseffect (Hezelaar, 2019). Echter is er in een praktische context weldegelijk een CO₂ besparing door deze groene waterstof, omdat anders de stroom weg zou kunnen zijn gegooit door curtailing. Hoe dit precies met elkaar afweegt kan verder worden onderzocht.

8.2 Modelverdieping en uitbreiding

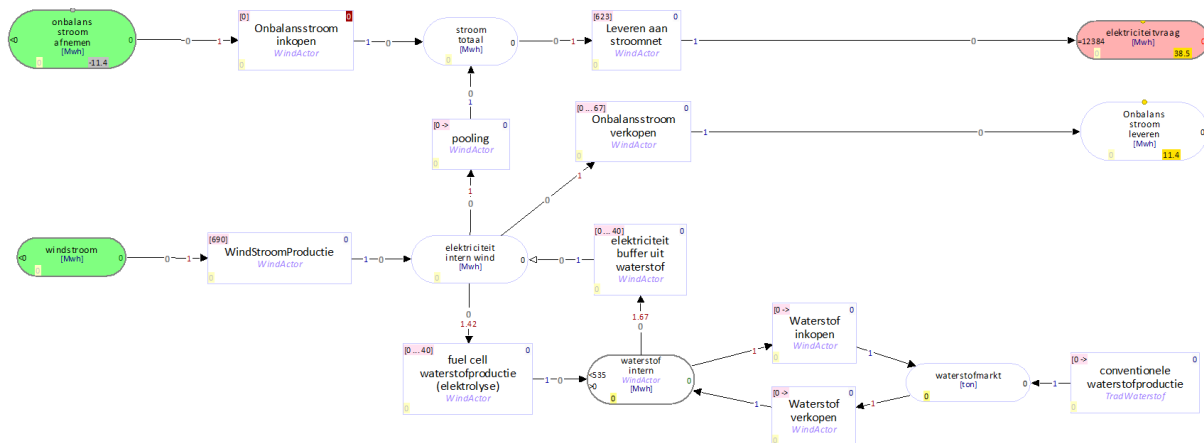
8.2.1 Verdieping

Dit model heeft een aantal assumpties gedaan die het modelgedrag beïnvloeden. Dit begint bij de datavergaring. Zo is de onbalans bijvoorbeeld gebaseerd op een minder gedetailleerde tijdreeks van windsnelheden. Windrichting is hier bijvoorbeeld niet in meegenomen. Zware weersomstandigheden en andere redenen tot shutdown zijn ook niet opgenomen in het model.

In een vervolgonderzoek kan het bestaande model worden verbeterd met nauwkeurigere data. Ook kunnen extra factoren worden toegevoegd. Er kan gekeken worden naar het transport van de waterstof en de opslag zelf. Ook kunnen de elektrolyser en verbrandingsinstallatie worden uitgebreid met ramp-up, ramp-down en opstartkosten. Als het nodig blijkt om extra onderdelen toe te voegen aan de loop is dit ook mogelijk. Een gedetailleerder model zal in staat zijn om nauwkeuriger voorspellingen te doen.

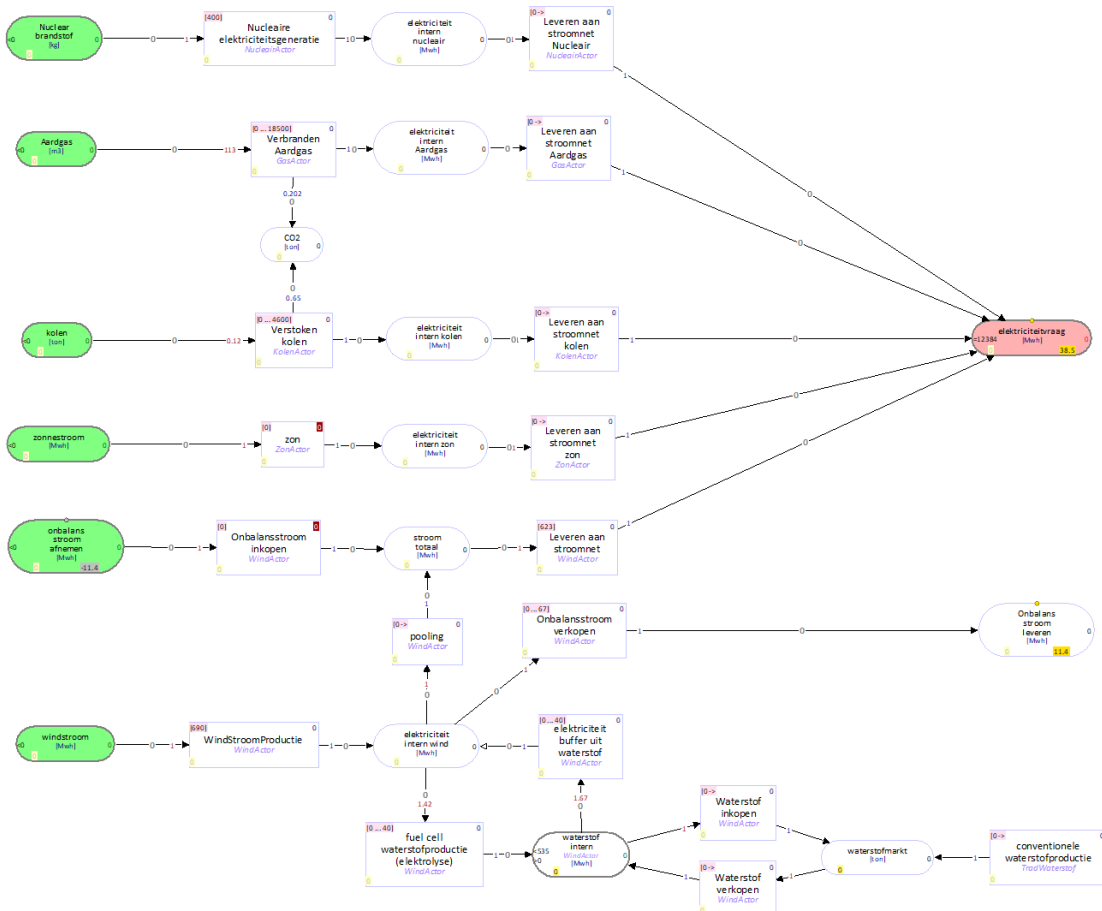
8.2.2 Uitbreiding

Het huidige model kan in een vervolgonderzoek in een bredere context worden geplaatst door het model uit te breiden. Door de waterstofbuffer aan een waterstofnetwerk te verbinden fungeert het windpark als een volledig MSMP-systeem. Dit systeem kan waterstof en windenergie als input gebruiken en zowel elektriciteit als waterstof als output hebben. Wanneer de vraag naar waterstof toe zal nemen zal dit in een prijsverhoging resulteren. Het model heeft dan een extra manier om geld te verdienen. Dit zal het modelgedrag sterk beïnvloeden. Een voorbeeld van deze uitbreiding is te zien in figuur 14.



Figuur 14, uitbreiding huidige model met verbinding waterstof

Een volgende stap voor uitbreiding in vervolgonderzoek is het modelleren van andere energieproducenten in het model. Dit is te zien in figuur 15. Met dit model kunnen een aantal dingen bestudeerd worden. Allereerst is het mogelijk om te zien wat de invloed is van een grotere hoeveelheid windenergie op de elektriciteitsmarkt. Ook is het te bestuderen welk effect het koppelen van de waterstofbuffer aan de waterstofmarkt op de elektriciteitsproductie heeft. Als windparken behalve alleen overschotten ook normale stroom mogen gebruiken om waterstof te maken, is het risico van het verdringingseffect (Hezelaar, 2019) aanwezig. Vervolgonderzoek kan hier meer inzicht in bieden.



Figuur 15, uitbreiding huidige model met meerdere elektriciteitsproducenten

9. Reflectie

Ik heb met veel plezier dit onderzoek uitgevoerd. Er waren wel een aantal dingen die ik in een volgend onderzoek anders aan had gepakt.

De gebruikte tijdreeksen zoals de onbalans en de windsnelheid zijn geen gedetailleerde representatie van de werkelijkheid. In beide reeksen zijn uniform verdeelde random getallen gebruikt om afwijkingen te creëren. Hierdoor wisselde afwijkingen naar onder en boven zich 50/50 af. Een andere manier van het creëren van afwijkingen had gevolgen kunnen hebben op de opslagcapaciteit. De grootte van de waterstofbuffer is in dit onderzoek geen limiterende factor geweest. Als er echter bijvoorbeeld langere periodes van overschotten waren geweest had de buffer vol kunnen raken. Een manier om dit nauwkeurig te modelleren is om een historische tijdreeks van onbalans van een windpark te gebruiken.

Vroeg in het onderzoek had ik besloten om het model op uurbasis te laten runnen in plaats van kwartierbasis waar de day-ahead markt op draait. Hier is voor gekozen, omdat ik vroeg in het onderzoek nog geen duidelijke indicatie had van het aantal scenario's wat ik moest gaan runnen. Het implementeren naar kwartierbasis had het aantal tijdstappen verviervoudigd van 8760 naar 35040. Door onder andere Corona moest ik vaak op een laptop werken, die deze hoeveelheid tijdstappen niet aankon. Een model op kwartierbasis zou nauwkeurigere resultaten kunnen produceren. Ook zouden historische reeksen op kwartierbasis direct zonder aanpassing in het model kunnen worden gezet. Als ik dit onderzoek opnieuw zou ik het model op kwartierbasis hebben gemaakt. Dit is wel gegeven een goede indicatie van het aantal scenario's en een computer die het aankon.

In het model is het niet toegestaan om windmolens uit te zetten omwille van kostenbesparing. Alle energie die geproduceerd kan worden, moet geproduceerd worden. Ik heb deze keuze gemaakt, omdat dit tot de hoogste productie groene stroom leidt. Aangezien de wereld in rap tempo moet overstappen naar groene stroom leek het me goed om te kijken hoe de buffer werkt bij ongeremde stroomproductie. Dit heeft echter het effect dat een lineaire verhoging van de onbalanskosten geen effect heeft op de totale waterstofproductie, aangezien het aantal prijspielen relatief hetzelfde blijven. Hierdoor wordt suggereert dat onder deze omstandigheden prijsveranderingen geen invloed kunnen hebben op waterstofproductie. Het wel toestaan van curtailing heeft grote effecten op het modelgedrag. Zo kan het model, om boetes te omzeilen, naast waterstof nu ook productie verminderen. Echter gaat hierbij weer elektriciteit verloren, terwijl een van de voordelen van de buffer juist het tegengaan van elektriciteitsverlies is.

Er was aan het begin veel onduidelijkheid van de onderzoeksrichting. Ik kon niet goed op één lijn komen met de eerste begeleider over hoe dit onderzoek precies ingericht moest worden. Gelukkig is het mogelijk gebleken om van begeleider te wisselen. Ik stel de flexibiliteit van meneer Bots zeer op prijs. Ik voelde me vrij om het onderzoek uit te voeren wat ik wilde doen, met ondersteuning waar nodig. Dit motiveerde mij verder om dit onderzoek te doen. Het onderzoek zelf vond plaats in een rumoerige tijd in de wereld. Door het coronavirus is zelfdiscipline een grotere rol gaan spelen. Het was op zijn tijd erg lastig om te weten of het onderzoek op schema lag. Daarom zal ik in een volgend onderzoek van tevoren een duidelijkere indeling maken om meer houvast te hebben.

In dit onderzoek heb ik moeten leren omgaan met python voor onder andere data-conversie en autorun software. Ik merkte dat ik hier niet vertrouwd mee was in het begin. Ik leerde het echter snel aan door er veel mee te werken. Voordat een volgend onderzoek begint verdiep ik mij graag meer in python, zodat stappen zoals data-conversie een minder groot obstakel zullen vormen in het onderzoek.

Bijlage A, Resultaten gevoeligheidsanalyse base case: TMK

TMK (€cent/kWh)		WPo				WPo				WPo			
		EPBo				EPB+				EPB-			
efF+	efE+	13.404	13.404	13.404	13.404	13.652	13.652	13.652	13.652	13.059	13.059	13.059	13.059
	efEo	14.432	14.432	14.432	14.432	14.670	14.670	14.670	14.670	14.105	14.105	14.105	14.105
efFo	efE+	14.756	14.756	14.756	14.756	14.991	14.991	14.991	14.991	14.466	14.466	14.466	14.466
	efEo	15.819	15.819	15.819	15.819	16.068	16.068	16.068	16.068	15.551	15.551	15.551	15.551
TMK genormeerd		WPo				WPo				WPo			
		EPBo				EPB+				EPB-			
efF+	efE+	1	1	1	1	101.85%	101.85%	101.85%	101.85%	97.43%	97.43%	97.43%	97.43%
	efEo	1	1	1	1	101.65%	101.65%	101.65%	101.65%	97.73%	97.73%	97.73%	97.73%
efFo	efE+	1	1	1	1	101.59%	101.59%	101.59%	101.59%	98.04%	98.04%	98.04%	98.04%
	efEo	1	1	1	1	101.58%	101.58%	101.58%	101.58%	98.31%	98.31%	98.31%	98.31%
TMKtop genormeerd		WPo				WPo				WPo			
		EPBo				EPB+				EPB-			
efF+	efE+	1	1	1	1	101.24%	101.24%	101.24%	101.24%	98.48%	98.48%	98.48%	98.48%
	efEo	1	1	1	1	101.16%	101.16%	101.16%	101.16%	98.57%	98.57%	98.57%	98.57%
efFo	efE+	1	1	1	1	101.12%	101.12%	101.12%	101.12%	98.66%	98.66%	98.66%	98.66%
	efEo	1	1	1	1	101.06%	101.06%	101.06%	101.06%	98.75%	98.75%	98.75%	98.75%
TMKbot genormeerd		WPo				WPo				WPo			
		EPBo				EPB+				EPB-			
efF+	efE+	1	1	1	1	99.40%	99.40%	99.40%	99.40%	101.08%	101.08%	101.08%	101.08%
	efEo	1	1	1	1	99.52%	99.52%	99.52%	99.52%	100.85%	100.85%	100.85%	100.85%
efFo	efE+	1	1	1	1	99.54%	99.54%	99.54%	99.54%	100.63%	100.63%	100.63%	100.63%
	efEo	1	1	1	1	99.49%	99.49%	99.49%	99.49%	100.44%	100.44%	100.44%	100.44%

WP+ EPBo				WP+ EPB+				WP+ EPB-			
13.088	13.088	13.088	13.088	13.385	13.385	13.385	13.385	12.731	12.731	12.731	12.731
14.144	14.144	14.144	14.144	14.415	14.415	14.415	14.415	13.798	13.798	13.798	13.798
14.497	14.497	14.497	14.497	14.734	14.734	14.734	14.734	14.172	14.172	14.172	14.172
15.570	15.570	15.570	15.570	15.808	15.808	15.808	15.808	15.282	15.282	15.282	15.282
WP+ EPBo				WP+ EPB+				WP+ EPB-			
97.65%	97.65%	97.65%	97.65%	99.86%	99.86%	99.86%	99.86%	94.98%	94.98%	94.98%	94.98%
98.00%	98.00%	98.00%	98.00%	99.88%	99.88%	99.88%	99.88%	95.61%	95.61%	95.61%	95.61%
98.25%	98.25%	98.25%	98.25%	99.85%	99.85%	99.85%	99.85%	96.04%	96.04%	96.04%	96.04%
98.43%	98.43%	98.43%	98.43%	99.93%	99.93%	99.93%	99.93%	96.60%	96.60%	96.60%	96.60%
WP+ EPBo				WP+ EPB+				WP+ EPB-			
104.83%	104.83%	104.83%	104.83%	106.23%	106.23%	106.23%	106.23%	103.22%	103.22%	103.22%	103.22%
104.70%	104.70%	104.70%	104.70%	105.98%	105.98%	105.98%	105.98%	103.16%	103.16%	103.16%	103.16%
105.01%	105.01%	105.01%	105.01%	106.22%	106.22%	106.22%	106.22%	103.51%	103.51%	103.51%	103.51%
104.82%	104.82%	104.82%	104.82%	105.97%	105.97%	105.97%	105.97%	103.45%	103.45%	103.45%	103.45%
WP+ EPBo				WP+ EPB+				WP+ EPB-			
107.36%	107.36%	107.36%	107.36%	106.38%	106.38%	106.38%	106.38%	108.67%	108.67%	108.67%	108.67%
106.83%	106.83%	106.83%	106.83%	106.10%	106.10%	106.10%	106.10%	107.90%	107.90%	107.90%	107.90%
106.88%	106.88%	106.88%	106.88%	106.38%	106.38%	106.38%	106.38%	107.78%	107.78%	107.78%	107.78%
106.49%	106.49%	106.49%	106.49%	106.04%	106.04%	106.04%	106.04%	107.09%	107.09%	107.09%	107.09%

WP- EPBo				WP- EPB+				WP- EPB-			
13.705	13.705	13.705	13.705	13.957	13.957	13.957	13.957	13.407	13.407	13.407	13.407
14.720	14.720	14.720	14.720	14.954	14.954	14.954	14.954	14.433	14.433	14.433	14.433
15.056	15.056	15.056	15.056	15.281	15.281	15.281	15.281	14.763	14.763	14.763	14.763
16.113	16.113	16.113	16.113	16.338	16.338	16.338	16.338	15.833	15.833	15.833	15.833
WP- EPBo				WP- EPB+				WP- EPB-			
102.25%	102.25%	102.25%	102.25%	104.12%	104.12%	104.12%	104.12%	100.03%	100.03%	100.03%	100.03%
102.00%	102.00%	102.00%	102.00%	103.62%	103.62%	103.62%	103.62%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
102.03%	102.03%	102.03%	102.03%	103.56%	103.56%	103.56%	103.56%	100.05%	100.05%	100.05%	100.05%
101.86%	101.86%	101.86%	101.86%	103.29%	103.29%	103.29%	103.29%	100.09%	100.09%	100.09%	100.09%
WP- EPBo				WP- EPB+				WP- EPB-			
94.57%	94.57%	94.57%	94.57%	95.73%	95.73%	95.73%	95.73%	93.23%	93.23%	93.23%	93.23%
94.71%	94.71%	94.71%	94.71%	95.77%	95.77%	95.77%	95.77%	93.44%	93.44%	93.44%	93.44%
94.48%	94.48%	94.48%	94.48%	95.52%	95.52%	95.52%	95.52%	93.24%	93.24%	93.24%	93.24%
94.63%	94.63%	94.63%	94.63%	95.62%	95.62%	95.62%	95.62%	93.46%	93.46%	93.46%	93.46%
WP- EPBo				WP- EPB+				WP- EPB-			
92.49%	92.49%	92.49%	92.49%	91.94%	91.94%	91.94%	91.94%	93.20%	93.20%	93.20%	93.20%
92.85%	92.85%	92.85%	92.85%	92.43%	92.43%	92.43%	92.43%	93.43%	93.43%	93.43%	93.43%
92.60%	92.60%	92.60%	92.60%	92.24%	92.24%	92.24%	92.24%	93.19%	93.19%	93.19%	93.19%
92.90%	92.90%	92.90%	92.90%	92.57%	92.57%	92.57%	92.57%	93.37%	93.37%	93.37%	93.37%

Bijlage B, Resultaten gevoeligheidsanalyse scenario's: TMK

TMK		WPo		EPBo		WPo		EPB+		WPo		EPB-	
		Hogere onbalansprijs		Lagere onbalansprijs		Hogere onbalansprijs		Lagere onbalansprijs		Hogere onbalansprijs		Lagere onbalansprijs	
		lagere voorspel baarheid	hogere voorspelba arheid	lagere voorspel baarheid	hogere voorspel baarheid	lagere voorspel baarheid	hogere voorspelba arheid	lagere voorspel baarheid	hogere voorspel baarheid	lagere voorspel baarheid	hogere voorspelbaa rheid	lagere voorspel baarheid	hogere voorspel baarheid
efF+	efE+	14.75	14.73	12.07	12.05	15.05	14.99	12.32	12.26	14.38	14.37	11.77	11.76
	efEo	15.88	15.86	12.99	12.98	16.17	16.11	13.23	13.19	15.52	15.53	12.70	12.71
efFo	efE+	16.24	16.21	13.29	13.26	16.54	16.47	13.53	13.47	15.92	15.92	13.02	13.03
	efEo	17.42	17.39	14.25	14.23	17.70	17.66	14.48	14.45	17.11	17.10	14.00	13.99
TMKtop		WPo		EPBo		WPo		EPB+		WPo		EPB-	
		Hogere onbalansprijs		Lagere onbalansprijs		Hogere onbalansprijs		Lagere onbalansprijs		Hogere onbalansprijs		Lagere onbalansprijs	
		lagere voorspel baarheid	hogere voorspelba arheid	lagere voorspel baarheid	hogere voorspel baarheid	lagere voorspel baarheid	hogere voorspelba arheid	lagere voorspel baarheid	hogere voorspel baarheid	lagere voorspel baarheid	hogere voorspelbaa rheid	lagere voorspel baarheid	hogere voorspel baarheid
efF+	efE+	1293.00	1204.96	1058.03	985.99	1309.98	1219.22	1071.92	997.65	1273.01	1187.37	1041.67	971.59
	efEo	1330.43	1233.89	1088.65	1009.65	1346.77	1247.46	1102.02	1020.76	1310.96	1217.43	1072.72	996.18
efFo	efE+	1267.30	1180.63	1037.00	966.08	1282.62	1193.25	1049.54	976.41	1249.76	1165.81	1022.65	953.95
	efEo	1304.91	1209.87	1067.77	990.00	1319.78	1222.08	1079.94	1000.00	1287.93	1195.45	1053.88	978.20
TMKbot		WPo		EPBo		WPo		EPB+		WPo		EPB-	
		Hogere onbalansprijs		Lagere onbalansprijs		Hogere onbalansprijs		Lagere onbalansprijs		Hogere onbalansprijs		Lagere onbalansprijs	
		lagere voorspel baarheid	hogere voorspelba arheid	lagere voorspel baarheid	hogere voorspel baarheid	lagere voorspel baarheid	hogere voorspelba arheid	lagere voorspel baarheid	hogere voorspel baarheid	lagere voorspel baarheid	hogere voorspelbaa rheid	lagere voorspel baarheid	hogere voorspel baarheid
efF+	efE+	87.64	81.81	87.64	81.81	87.03	81.35	87.03	81.35	88.52	82.65	88.52	82.65
	efEo	83.77	77.80	83.77	77.80	83.30	77.42	83.30	77.42	84.48	78.40	84.48	78.40
efFo	efE+	78.02	72.84	78.02	72.84	77.57	72.47	77.57	72.47	78.53	73.23	78.53	73.23
	efEo	74.91	69.57	74.91	69.57	74.57	69.21	74.57	69.21	75.29	69.90	75.29	69.90

WP+ EPBo				WP+ EPB+				WP+ EPB-			
Hogere onbalansprijs		Lagere onbalansprijs		Hogere onbalansprijs		Lagere onbalansprijs		Hogere onbalansprijs		Lagere onbalansprijs	
lagere voorspel baarheid	hogere voorspelba arheid	lagere voorspel baarheid	hogere voorspel baarheid	lagere voorspel baarheid	hogere voorspelba arheid	lagere voorspel baarheid	hogere voorspel baarheid	lagere voorspel baarheid	hogere voorspelba arheid	lagere voorspel baarheid	hogere voorspel baarheid
14.41	14.39	11.79	11.77	14.75	14.69	12.07	12.02	14.00	14.02	11.45	11.47
15.55	15.56	12.73	12.73	15.88	15.84	13.00	12.96	15.16	15.20	12.41	12.43
15.95	15.93	13.05	13.04	16.24	16.19	13.29	13.25	15.59	15.60	12.76	12.77
17.14	17.12	14.03	14.01	17.41	17.39	14.24	14.23	16.80	16.83	13.74	13.77
WP+ EPBo				WP+ EPB+				WP+ EPB-			
Hogere onbalansprijs		Lagere onbalansprijs		Hogere onbalansprijs		Lagere onbalansprijs		Hogere onbalansprijs		Lagere onbalansprijs	
lagere voorspel baarheid	hogere voorspelba arheid	lagere voorspel baarheid	hogere voorspel baarheid	lagere voorspel baarheid	hogere voorspelba arheid	lagere voorspel baarheid	hogere voorspel baarheid	lagere voorspel baarheid	hogere voorspelba arheid	lagere voorspel baarheid	hogere voorspel baarheid
1358.70	1260.20	1111.79	1031.19	1377.68	1276.01	1127.32	1044.13	1337.03	1241.48	1094.06	1015.87
1396.00	1288.79	1142.30	1054.58	1414.33	1303.66	1157.30	1066.74	1375.17	1270.86	1125.26	1039.90
1333.81	1236.54	1091.43	1011.83	1350.11	1250.13	1104.77	1022.95	1314.37	1220.13	1075.52	998.40
1371.27	1265.04	1122.07	1035.14	1386.96	1278.30	1134.91	1046.00	1352.42	1249.58	1106.65	1022.49
WP+ EPBo				WP+ EPB+				WP+ EPB-			
Hogere onbalansprijs		Lagere onbalansprijs		Hogere onbalansprijs		Lagere onbalansprijs		Hogere onbalansprijs		Lagere onbalansprijs	
lagere voorspel baarheid	hogere voorspelba arheid	lagere voorspel baarheid	hogere voorspel baarheid	lagere voorspel baarheid	hogere voorspelba arheid	lagere voorspel baarheid	hogere voorspel baarheid	lagere voorspel baarheid	hogere voorspelba arheid	lagere voorspel baarheid	hogere voorspel baarheid
94.32	87.58	94.32	87.58	93.40	86.84	93.40	86.84	95.53	88.57	95.53	88.57
89.75	82.84	89.75	82.84	89.05	82.30	89.05	82.30	90.70	83.63	90.70	83.63
83.61	77.62	83.61	77.62	83.15	77.23	83.15	77.23	84.29	78.20	84.29	78.20
79.99	73.90	79.99	73.90	79.69	73.52	79.69	73.52	80.51	74.26	80.51	74.26

WP- EPBo				WP- EPB+				WP- EPB-			
Hogere onbalansprijs		Lagere onbalansprijs		Hogere onbalansprijs		Lagere onbalansprijs		Hogere onbalansprijs		Lagere onbalansprijs	
lagere voorspel baarheid	hogere voorspelba arheid	lagere voorspel baarheid	hogere voorspelba arheid	lagere voorspel baarheid	hogere voorspelba arheid	lagere voorspel baarheid	hogere voorspelba arheid	lagere voorspel baarheid	hogere voorspelba arheid	lagere voorspel baarheid	hogere voorspelba arheid
15.10	15.05	12.36	12.32	15.40	15.31	12.60	12.53	14.77	14.75	12.08	12.07
16.21	16.17	13.26	13.23	16.50	16.42	13.50	13.44	15.88	15.88	12.99	12.99
16.60	16.52	13.58	13.52	16.86	16.77	13.80	13.72	16.27	16.24	13.31	13.29
17.75	17.71	14.52	14.49	18.00	17.94	14.73	14.68	17.42	17.40	14.25	14.24
WP- EPBo				WP- EPB+				WP- EPB-			
Hogere onbalansprijs		Lagere onbalansprijs		Hogere onbalansprijs		Lagere onbalansprijs		Hogere onbalansprijs		Lagere onbalansprijs	
lagere voorspel baarheid	hogere voorspelba arheid	lagere voorspel baarheid	hogere voorspelba arheid	lagere voorspel baarheid	hogere voorspelba arheid	lagere voorspel baarheid	hogere voorspelba arheid	lagere voorspel baarheid	hogere voorspelba arheid	lagere voorspel baarheid	hogere voorspelba arheid
1220.72	1142.77	998.89	935.10	1236.40	1155.74	1011.72	945.71	1202.85	1127.25	984.26	922.40
1256.97	1172.13	1028.54	959.12	1272.20	1184.61	1041.00	969.33	1239.60	1157.38	1014.32	947.04
1195.25	1118.37	978.05	915.14	1209.35	1130.22	989.59	924.83	1179.02	1104.70	964.77	903.95
1231.94	1148.23	1008.06	939.56	1245.41	1159.84	1019.08	949.07	1215.86	1134.92	994.90	928.67
WP- EPBo				WP- EPB+				WP- EPB-			
Hogere onbalansprijs		Lagere onbalansprijs		Hogere onbalansprijs		Lagere onbalansprijs		Hogere onbalansprijs		Lagere onbalansprijs	
lagere voorspel baarheid	hogere voorspelba arheid	lagere voorspel baarheid	hogere voorspelba arheid	lagere voorspel baarheid	hogere voorspelba arheid	lagere voorspel baarheid	hogere voorspelba arheid	lagere voorspel baarheid	hogere voorspelba arheid	lagere voorspel baarheid	hogere voorspelba arheid
80.82	75.93	80.82	75.93	80.30	75.49	80.30	75.49	81.45	76.43	81.45	76.43
77.56	72.49	77.56	72.49	77.11	72.13	77.11	72.13	78.06	72.88	78.06	72.88
72.02	67.70	72.02	67.70	71.72	67.40	71.72	67.40	72.48	68.04	72.48	68.04
69.41	64.85	69.41	64.85	69.17	64.63	69.17	64.63	69.79	65.21	69.79	65.21

Literatuurlijst

- Agro energy. (2017). De elektriciteitsmarkt in vogelvlucht. Geraadpleegd van https://www.agro-energy.nl/wp-content/uploads/2017/03/Whitepaper_Energiemarkt_in_vogelvlucht_LR.pdf
- Blok, K., & Nieuwlaar, E. (2016). *Introduction to Energy Analysis*. Abingdon, United Kingdom: Taylor & Francis.
- Bots, P. (2020). Hulpmiddelen geleverd door begeleider. TU delft, 2020
- Burke, J., & Rooney, M. (2018). *Fueling the future*. Geraadpleegd van <https://policyexchange.org.uk/wp-content/uploads/2018/09/Fuelling-the-Future.pdf>
- CBS. (2020). *Elektriciteit en warmte; productie en inzet naar energiedrager* [Dataset]. Geraadpleegd van <https://opendata.cbs.nl/statline/#/CBS/nl/dataset/80030ned/table?fromstatweb>
- CertifHy. (2019). *CertifHy-SD Hydrogen Criteria*. Geraadpleegd van https://www.certifhy.eu/images/media/files/CertifHy_2_deliverables/CertifHy_H2-criteria-definition_V1-1_2019-03-13_clean_endorsed.pdf
- De Vries, L. (2020). *Marktwerking in de elektriciteitssector* [Presentatieslides]. Geraadpleegd van <https://brightspace.tudelft.nl/d2l/le/content/195244/viewContent/1615785/View>
- Dupont, E., Koppelaar, R., & Jeanmart, H. (2018a). Global available wind energy with physical and energy return on investment constraints. *Applied Energy*, 209, 322–338. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.09.085>
- Elliot, D. (2019, 11 juli). *Curtailement: losing green power*. Geraadpleegd van <https://physicsworld.com/a/curtailment-losing-green-power/>
- ENTSOE. (2015). *Hourly load values 2006-2015* [Demand curve (MWh) Nederland 2015]. Geraadpleegd van <https://www.entsoe.eu/data/data-portal/>
- EWEA. (2013). *Deep water, the next step for offshore wind energy*. Geraadpleegd van http://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/reports/Deep_Water.pdf
- EZK. (2016). *Appreciatie parijs akkoord per thema*. Geraadpleegd van <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2016/02/19/appreciatie-parijs-akkoord-per-thema>
- Gabrielli, P., Poluzzi, A., Kramer, G. J., Spiers, C., Mazzotti, M., & Gazzani, M. (2020). Seasonal energy storage for zero-emissions multi-energy systems via underground hydrogen storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 121, 109629. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109629>
- Harrison, K. W., Remick, R., Martin, G. D., & Hoskin, A. (2010). Hydrogen Production: Fundamentals and Case Study Summaries. Gepresenteerd bij World hydrogen energy conference, Essen, Germany: NREL.

- Hemmes, K., Zachariahswolf, J., Geidl, M., & Andersson, G. (2007). Towards multi-source multi-product energy systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(10–11), 1332–1338. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2006.10.013>
- Hezelaar. (2019, 19 november). *Primeur! Negatieve prijzen op de Nederlandse elektriciteitsmarkt*. Geraadpleegd van <https://www.hezelaar.nl/energienieuws/energielevering/primeur-negatieve-prijzen-op-de-nederlandse-elektriciteitsmarkt/>
- Holtinen, H., Saarikivi, P., Repo, S., & Ikäheimo, J. (2016). *Prediction Errors and Balancing Costs for Wind Power Production in Finland*. Geraadpleegd van https://www.researchgate.net/publication/267787088_Prediction_Errors_and_Balancing_Costs_for_Wind_Power_Production_in_Finland
- Hydrogenics. (2016). *Hydrogenics selected references*. Geraadpleegd van <http://www.hydrogenics.com/wp-content/uploads/renewable-projects-references---grid-balancing-and-ptg.pdf?hsCtaTracking=418a89df-b384-4059-ab76-4e44b1e7a166%7Cd4f933bc-7f18-4333-89c8-e4ecee0bb3ad>
- Jeon, M., Lee, S., & Lee, S. (2014). Unsteady aerodynamics of offshore floating wind turbines in platform pitching motion using vortex lattice method. *Renewable Energy*, 65, 207–212. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.09.009>
- Jung, J., & Broadwater, R. P. (2014a). Current status and future advances for wind speed and power forecasting. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 762–777. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.054>
- KNMI. (z.d.). *Daggegevens van het weer in Nederland*. Geraadpleegd op 1 mei 2020, van <http://projects.knmi.nl/klimatologie/daggegevens/selectie.cgi>
- KNMI. (2014). *Windkaart van Nederland op 100 meter hoogte (TR-351)*. Geraadpleegd van <http://bibliotheek.knmi.nl/knmipubTR/TR351.pdf>
- KNMI. (2017). *Weermodellen*. Geraadpleegd van <https://www.knmi.nl/kennis-en-datacentrum/uitleg/weermodellen>
- Landberg, L. (2001a). Short-term prediction of local wind conditions. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 89(3–4), 235–245. [https://doi.org/10.1016/s0167-6105\(00\)00079-9](https://doi.org/10.1016/s0167-6105(00)00079-9)
- LAZARD. (2019). Levelized cost of energy analysis (13). Geraadpleegd van <https://www.lazard.com/media/451086/lazards-levelized-cost-of-energy-version-130-vf.pdf>
- Ledeboer, A., & Jak, M. J. G. (2005). *Onbalansreductie van duurzame energie*. Geraadpleegd van <https://www.zeeland.nl/digitaalarchief/ze0500734>
- Lee, H., & Lee, D.-J. (2019). Effects of platform motions on aerodynamic performance and unsteady wake evolution of a floating offshore wind turbine. *Renewable Energy*, 143, 9–23. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.04.134>
- Matevosyan, J., & Soder, L. (2006). Minimization of Imbalance Cost Trading Wind Power on the Short-Term Power Market. *IEEE Transactions on Power Systems*, 21(3), 1396–1404. <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2006.879276>

- Ministerie van I&M,EZ. (2014). *Noordzee 2050 gebiedsagenda*. Geraadpleegd van https://www.noordzeeloket.nl/publish/pages/122829/verslag_noordzee_2050_gebiedsagenda_3346.pdf
- Patel, S. (2020, 27 februari). How Much Will Hydrogen-Based Power Cost? Geraadpleegd van <https://www.powermag.com/how-much-will-hydrogen-based-power-cost/>
- Penders, R. J. (2020, 18 februari). *Subsidie SDE++ biedt nog geen serieuze kans voor groene waterstof*. Geraadpleegd op 22 maart 2020, van <https://opwegmetwaterstof.nl/2020/02/18/subsidie-sde-biedt-nog-geen-serieuze-kans-voor-groene-waterstof/>
- Port of Amsterdam. (2019, 6 december). *Nouryon, Tata Steel en Port of Amsterdam werken samen aan project*. Geraadpleegd van <https://www.portofamsterdam.com/nl/nieuwsbericht/nouryon-tata-steel-en-port-amsterdam-werken-samen-aan-project-h2ermes-groene-waterstof>
- Shahan, Z. (2019, 9 september). *History of wind turbines*. Geraadpleegd van <https://www.renewableenergyworld.com/2014/11/21/history-of-wind-turbines/#gref>
- Siemens. (2019). *SILYZER 300 PEM ELECTROLYSIS*. Geraadpleegd van <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/public.1524040818.abae9c1e48d6d239c06d88e565a25040ed2078dc.ct-ree-18-047-db-silyzer-300-db-de-en-rz.pdf>
- TenneT. (2016). *The Imbalance Pricing System*. Geraadpleegd van https://www.tennet.eu/fileadmin/user_upload/Company/Publications/Technical_Publications/Dutch/imbalanceprice_3.6_clean_d oc.pdf
- TenneT. (2017). *Monitoring Leveringszekerheid 2017*. Geraadpleegd van https://www.tennet.eu/fileadmin/user_upload/Company/Publications/Technical_Publications/Dutch/Rapport_Monitoring_Levering szekerheid_2017_web.pdf
- TenneT. (2020). *Balanceringsverantwoordelijkheid - TenneT*. Geraadpleegd van <https://www.tennet.eu/nl/elektriciteitsmarkt/nederlandse-markt/balanceringsverantwoordelijkheid/>
- Vermeulen, J. (2018). *Dutch offshore wind energy developments: roadmap 2023, 2030*. Geraadpleegd van <https://offshorewind.rvo.nl/file/download/55039261/Presentation+%26quot%3BDutch+Offshore+Wind+Energy+Developments%3A+Roadmap+2023+%26amp%3B+Roadmap+2030%26quot%3B+%28Ministry+of+Economical+Affairs+and+Climate+Policy%29>
- Viré, A. (2019, 10 september). *WindTurbines* [Presentatieslides]. Geraadpleegd van <https://brightspace.tudelft.nl/d2l/le/content/191919/viewContent/1341558/View>
- WaterstofNet. (2010). *Eigenschappen van waterstof*. Geraadpleegd van https://www.waterstofnet.eu/_asset/_public/Pdf-Ppt/waterstoftabel.pdf

Yuanyuan, L. (z.d.). *Wind Power Curtailment in China on the Mend*. Geraadpleegd van

<https://www.renewableenergyworld.com/2018/01/26/wind-power-curtailment-in-china-on-the-mend/>