

# Memo “minimum last, stop/start en degeneratie van elektrolyzers”

December 2021

## Inleiding

Op basis van de eerdere consultaties en input van bedrijven bestond bij het EZK/RVO waterstofteam het beeld dat te vaak uitzetten van een elektrolyser tot een onnodig hoge degeneratie en daarmee hoge kosten (voor vervangen van de stacks) zou leiden. Daarom zou een elektrolyser minimaal op basislast (5-15% van vermogen) moeten draaien. In gesprekken met de Europese Commissie is dit uitgangspunt ter discussie gesteld. Het waterstofteam heeft besloten om in meer detail uit te zoeken hoe vaak een elektrolyser uitgezet kan worden. Dit memo doet daarvan verslag. Er zijn ca. 10 elektrolyser-fabrikanten benaderd met een verzoek om informatie of om een gesprek, twee fabrikanten hebben informatie aangeleverd. Ook zijn bedrijven benaderd die elektrolyseprojecten ontwikkelen, uitgebreide input is verkregen van experts van drie bedrijven. Tot slot is op 2 november ook breder per mail een vraag gesteld onder alle bedrijven die meededen aan de eerdere consultaties (januari, juni) rond de opschalingsregeling. Hierop zijn circa 20 reacties binnen gekomen, waarvan enkele zeer gedetailleerd. In deze memo wordt over “experts” gesproken omdat bij diverse bedrijven elektrotechnici in dienst zijn genomen die kennis opbouwen rond water-elektrolyse. Dit geldt zowel voor de bedrijven die direct zijn benaderd als de bedrijven die hebben gereageerd op de mail van 2 november.

## Minimum last

Elektrolyzers zijn regelbaar binnen een bepaald bereik dat door de fabrikanten wordt opgegeven in percentage van de nominale last waarvoor de elektrolyser is ontworpen. Voor PEM melden de meeste fabrikanten een regelbereik van 5-100% (en soms een bereik dat boven de 100% uit stijgt als de maximale last hoger is dan de nominale last). Voor alkali elektrolyzers is de minimale last hoger, fabrikanten melden doorgaans een bereik van 10-100% of 15-100% met uitschieters naar boven (bijvoorbeeld: Cummins: 40-100%).

Uit gesprekken met experts blijkt dat er onderling significante verschillen zijn tussen elektrolyzers van verschillende leveranciers, bijv. wat betreft membranen, materiaal van kathode en anode (alhoewel het aantal leveranciers van kathoden/anoden beperkt is), de manier waarop warme startup wordt uitgevoerd en waarschijnlijk nog veel meer. Dat vertaalt zich in een verschillende minimale last.

De minimale last is het minimum niveau waarop de elektrolyser bedreven kan worden. Lager dan die ondergrens ontstaan veiligheidsrisico's als gevolg van diffusie van waterstof en zuurstof door het membraan. Omdat de totale hoeveelheden geproduceerd gas lager worden en de waterstof diffusie door het membraan gelijk blijft, neemt de concentratie waterstof in de zuurstof toe (en ook de hoeveelheid zuurstof in de waterstof neemt toe). Bij een concentratie van 2% waterstof in zuurstof moet de elektrolyser worden uitgezet, om te voorkomen dat de concentratie waterstof dichterbij de explosiegrens van 4% waterstof in zuurstof komt. PEM membranen zijn minder diffuus dan alkali-membranen, dat verklaart de lagere minimale last voor PEM elektrolyzers.

Wanneer een elektrolysesysteem bestaat uit meerdere modules, dan kan de minimale last van het systeem verder worden verlaagd door één of enkele elektrolysemodules op stand-by (dus 0% last) te zetten en één of enkele andere modules op minimale last (bijv. 15% last) te laten doordraaien.

## Stop / start

Als een elektrolyser wordt uitgezet en later weer wordt aangezet, dan kan dat op twee manieren:

1. **Warme stand-by:** de elektrolyser wordt uitgezet en de zuurstof- en waterstofdruk worden op peil gehouden. De elektrolyser koelt langzaam (typisch in 24 uur) af, en gedurende deze tijd is de opstarttijd korter dan bij een koude start. Die opstarttijd ligt in de range van 30 sec. tot ruim 5 minuten. Voor PEM en (sommige?) druk-alkali elektrolyzers is de opstarttijd het laagste (30 sec.

tot enkele minuten), voor atmosferische alkali elektrolyzers en andere druk-alkali elektrolyzers ligt de opstarttijd hoger dus tot ruim 5 min. vanuit warme stand-by.

Overigens: elektrolyserleveranciers zijn niet consistent v.w.b. de naam "warme stand-by". Volgens een van de experts is er namelijk tenminste één elektrolyserleverancier die onder "warme stand-by" verstaat het bedienen van de elektrolyser op de minimale last van 15% van de nominale last. In dit memo wordt dit "bedrijf bij minimale last" genoemd en wordt onder warme stand-by verstaan het uitzetten van de elektrolyser (0% last) onder instandhouding van zuurstof en waterstofdruk.

De periode waarin een elektrolyser in warme stand-by kan worden gehouden verschilt per leverancier, en waarschijnlijk zijn er ook leveranciers die (veelal goedkopere) elektrolyzers leveren die niet op warme stand-by kunnen worden gehouden.

Als gevolg van de stand-by gaat gedurende de opstarttijd een hoeveelheid waterstof verloren omdat deze kort na de herstart van de elektrolyser niet aan de specificaties voldoet.

Tijdens warme stand-by gebruiken het controlesysteem, het veiligheidssysteem, ventilatoren en mogelijk de compressor nog elektriciteit. De experts geven verschillende signalen af over of het elektriciteitsgebruik bij warme stand-by onder de 1% kan blijven. Dat kan waarschijnlijk niet als een compressor moet blijven draaien, omdat het elektriciteitsverbruik van een compressor vaak hoger is dan 1%. Dit is vooral relevant als de elektrolyser slechts relatief korte tijd (een uur of enkele uren) wordt uitgezet, als de elektrolyser langer uit gaat dan gaat ook de compressor uit. Daarnaast gebruiken ventilatoren (om afgesloten ruimten te ventileren, vanwege veiligheid) redelijk veel elektriciteit en zal volgens een van de geraadpleegde experts het gebruik bij kleine elektrolyzers boven de 1% uitkomen.

Een aantal experts stelt dat het mogelijk is om onder 1% elektriciteitsverbruik (t.o.v. nominale last) te blijven tijdens warme stand-by, zeker na verloop van enige tijd en/of gemiddeld over de periode van de warme stand-by. Ten minste 3 experts stellen dat dat niet kan omdat (a) er tot 5% elektriciteit nodig zou zijn (voor een deel van de periode van de warme stand-by) en (b) dat ventilatoren, nodig voor veiligheid omdat de ruimte waarin de elektrolyser staat opgesteld moet worden geventileerd, enkele procenten gebruiken t.o.v. de nominale last. Voor kleine elektrolysesystemen is het elektriciteitsverbruik tijdens warme stand-by percentageel (t.o.v. nominale last) hoger dan bij grotere elektrolysesystemen.

2. **Koude stand-by:** de elektrolyser wordt geheel uitgezet en wordt daarom gespoeld met stikstof. Er is dus geen  $H_2$ - en  $O_2$ -druk meer, en opstart duurt daarom langer (5 min. voor PEM, 20 min. tot 2 uur voor alkali). Bij koude stand-by gaat een grotere hoeveelheid waterstof verloren ten opzichte van warme stand-by.

Overigens duurt het bij een koude stand-by ook typisch 24 uur voordat de elektrolyser is afgekoeld, de benamingen "warme stand-by / warme start" en "koude stand-by / koude start" zijn dus eigenlijk foutief, want het werkelijke onderscheid is het al dan niet op peil houden van de  $H_2$ - en  $O_2$ -druk. Een "warme start" kan dus ook met een al afgekoelde elektrolyser worden uitgevoerd, en een "koude start" met een nog warme electrolyser!

Eén expert stelde uitdrukkelijk dat sommige electrolyzers minder goed geschikt zijn voor frequente warme start/stop, dat zou voor die typen electrolyzers leiden tot aanzienlijk versnelde degeneratie.

### Degeneratie en start-stop bedrijf

Elektrolyzers degenereren: over verloop van een aantal jaren worden ze minder efficiënt. Een typische degeneratiesnelheid is 1% hetgeen betekent dat een elektrolyser die in het eerste jaar een efficiëntie heeft van 55 kWh/kg waterstof, na een jaar een efficiëntie heeft van 55,55 kWh/kg. Degeneratie treedt zowel op bij gebruik van de elektrolyser op gedeeltelijke last of vollast, en bij het uitzetten van de elektrolyser. Ook het vaak op- en afregelen van een elektrolyser kan tot versnelde degradatie leiden

Bij uitzetten van de elektrolyser is degeneratie (o.a.?) het gevolg van omgekeerde stromen, die tot oxidatie van de kathode en mogelijk ook degeneratie van de anode leiden. Alle benaderde experts

stellen unaniem dat frequent start-stop bedrijf de degeneratiesnelheid van de stacks groter zal maken, maar zeggen ook dat niet goed bekend is hoe groot dit effect is. Enkele experts geven inschattingen, namelijk dat (a) de degeneratiesnelheid (standaard ca. 1%, soms 2%) verdubbelt, en (b) dat als gevolg van dagelijkse stand-by de stacks – die zonder dagelijkse stand-by na 8 jaar moeten worden vervangen – als gevolg van dagelijkse warme stand-by één of een aantal jaren eerder vervangen zouden moeten worden. Op deze manier leidt dagelijkse stand-by tot hogere operationele kosten. Ook vanuit een van de fabrikanten van elektrolyzers is informatie verstrekt die hier mee in lijn is. De andere fabrikant geeft (nog) geen gegevens anders dan een aantal algemene uitspraken waarin doorklinkt dat het met de degeneratie wel meevalt.

Sommige bedrijven hebben volgens een van de industrie-experts wel degelijk ervaring met stop/start bedrijf van hun elektrolyzers, bijv. dag/nacht (waarbij in dit geval de elektrolyser juist 's nachts wordt bedreven vanwege lagere elektriciteitsprijzen). Die worden dan echter wel een halve dag op een continue last bedreven. Andere industrie-experts noemen juist het gebrek aan ervaring met flexibel bedrijf, dat geldt dan voor zowel veelvuldig op- en afregelen (om toe- of afnemende productie uit zonnepanelen of windturbines te volgen) als met start-stop bedrijf van elektrolyzers.

Enapter, een fabrikant van kleine AEM elektrolyzers, vermeldt op [deze webpagina](#) het volgende:

***“Do frequent start/stop cycles and ramping affect the electrolyser's longevity or performance? As with all electrochemical devices, our AEM electrolyser stack's lifetime is shortened with frequent start/stops. With increasing experience in the field and operational data, we can now recommend our customers to limit the electrolyser's operative cycles to a maximum of five on/off cycles per day, and one on/off cycle per hour. This helps to ensure the longevity of the electrolyser”***

Om degeneratie tegen te gaan zou een polarisatie-unit kunnen worden toegepast. Bij een stop blijft dan een klein elektrisch stroompje lopen die oxidatie van de kathode voorkomt. Een van de experts geeft aan dat de kosten van een polarisatie-unit ongeveer 5% van de CAPEX kosten van een elektrolyser bedragen.

Leveranciers van elektrolyzers zouden huiverig zijn om garanties te geven op degeneratie van elektrolyzers (bijv. garantie dat degeneratie niet hoger is dan 1,5 of 2%). Sommige experts zeggen simpelweg dat leveranciers dat niet doen, andere experts zeggen dat enkele leveranciers dat wel doen en anderen niet (en dat voor hen voorwaarde is dat zo'n garantie wel wordt afgegeven).

### Aantal keren start-stop

De experts die stellen dat elektrolyzers flexibel kunnen worden bedreven (met als nadeel een hogere degeneratie en verlies van waterstof tijdens start-up) stellen dat dagelijkse start- en stops mogelijk zijn, sommigen houden zelfs rekening met gemiddeld twee start-stops per dag.

Indien een elektrolyser wordt afgeschakeld buiten de low-carbon uren van elektriciteit op het Nederlandse elektriciteitsnet, en weer in bedrijf gaat bij in low-carbon uren, dan zal dit naar verwachting richting 2030 gemiddeld circa één maal per dag of minder gebeuren, omdat (a) de productie uit zon gedurende een groot deel van de dagen zo hoog zal zijn dat dat leidt tot lage CO<sub>2</sub>-intensiteiten op het midden van de dag, (b) bij hoge windsnelheden de CO<sub>2</sub>-intensiteit ook gedurende de hele nacht laag blijven waardoor op sommige dagen stoppen niet nodig zal zijn, en (c) fluctuaties in zonne-intensiteit en windsterkte over heel Nederland worden uitgemiddeld waardoor stops als gevolg van tijdelijke fluctuaties (zie hier onder) veel minder vaak zullen voorkomen.

Bij een elektrolyser die direct aan een wind- of zonnepark is gekoppeld kan het aantal keren start-stop per jaar flink hoger zijn dan bij elektrolyzers die de landelijke productie volgen, omdat zon of wind soms tijdelijk wegvallen en dat wegvallen vaker lokaal gebeurt dan landelijk. Dit wordt hieronder geïllustreerd aan de hand van productiedata van een zonne-installatie. De eerste figuur laat de productie zien (als teruglevering aan het elektriciteitsnet, daarom “negatief”) op een zonnige dag, een gekoppelde elektrolyser zou 's ochtends aan worden gezet en 's avonds uit. De onderste figuur toont een dag met afwisselend zon en bewolking, en afhankelijk van de verhouding in MW's tussen zonnepark en elektrolyser (stel 1/1) en de minimale last van de elektrolyser (stel 15%) zou een direct gekoppelde elektrolyser op 31 juli om 11:45 en om 16:30 uit zijn gezet omdat op die

momenten de input van de electrolyser beneden de 15% last zakt. Het aantal malen gedurende de dag afschakelen wordt kleiner als (a) de verhouding tussen vermogen van zonnepark en electrolyser groter wordt gekozen (bijv. 2:1 of 3:1) en/of als voor een electrolyser met een lagere minimale last (bijv. 5%) wordt gekozen. Er wordt ook geëxperimenteerd met batterijen om het aantal keren uitschakelen van een aan variabele hernieuwbare elektriciteitsopwek gekoppelde elektrolyser te beperken, zoals in het pilot project “Brande” van Siemens in Denemarken.



De bovenstaande figuur laat ook zien dat een direct aan zon-PV gekoppelde electrolyser op bewolkte dagen voortdurend moeten worden op- en afgeregeld, hetgeen mogelijk ook leidt tot versnelde degradatie. Dit geldt in sterke mate voor een electrolyser die in MW's (bijna) even groot als het zonnepark, bij een veel kleiner gedimensioneerde electrolyser wordt dit effect minder groot.

Een analyse van productiedata van een windpark (op land) leidt tot de conclusie dat – afhankelijk van de verhouding van het vermogen van de elektrolyser t.o.v. het vermogen van het windpark en afhankelijk van de hoogte van de minimumlast van de elektrolyser – directe koppeling van een elektrolyser aan wind-op-land leidt tot gemiddeld per dag ruim één keer tot maximaal ruim 2 keer aan- en uitzetten van een elektrolyser.

## Conclusie

Uit de input van experts kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- Voor water-elektrolyse is er nog weinig ervaring met zowel start-stop gedrag van de electrolyzers als met electrolyzers die veelvuldig worden op- en afgeregeld om elektriciteitsaanbod uit hernieuwbare bron (zon, wind) te volgen. Er zijn nog geen goede gegevens over de gevolgen voor de degradatiesnelheid van electrolyzers. Alle benaderde experts zeggen dat start-stop bedrijf tot gevolg heeft dat stacks sneller dan de standaard eens per 8 jaar zullen moeten worden vervangen. Gevraagd naar een inschatting zijn ze voorzichtig, en zeggen dan iets als “een ruwe schatting is één of enkele jaren eerder”.
- Degeneratie tijdens start-stop bedrijf kan mogelijk (deels) worden voorkomen met een polarisatie-unit, deze kost ca. 5% van de CAPEX van een electrolyser.
- Er is een groot aantal electrolyser-leveranciers en een grote variatie aan electrolyzers (qua minimale last, materialen/eigenschappen van de elektroden, mogelijke snelheid van op- en afregelen, mogelijkheden van warme start, etc.). Het is te verwachten dat er tussen de verschillende electrolyser-uitvoeringen verschillen bestaan in de mate waarin versnelde degradatie optreedt als gevolg van flexibel opereren. Grote bedrijven met veel expertise op dit gebied kunnen waarschijnlijk een meer weloverwogen keuze maken dan kleinere partijen die over minder expertise kunnen beschikken.
- Het loslaten van de 5-15% basislast in de tijdelijke opschalingsregeling heeft de volgende (mogelijke) gevolgen:

- Zeker: de via de marginale methode berekende CO<sub>2</sub>-intensiteit van de geproduceerde waterstof zal – gegeven een eenmaal gekozen aantal vollasturen – lager worden omdat er niet meer in 5-15% basislast zal worden gedraaid tijdens uren met een hoge CO<sub>2</sub>-intensiteit van elektriciteit;
- Zeer waarschijnlijk: de stacks degenereren sneller (in vergelijking met bedrijf incl. 5-15% basislast) als gevolg van het start-stop bedrijf dat nodig is als geen basislast wordt toegestaan. Hoeveel hoger die degeneratiesnelheid is, is door gebrek aan praktijkervaring niet goed bekend. Wat er al bekend is, wordt maar moeizaam gedeeld door de leveranciers van electrolyzers. Daar waar experts inschattingen geven, komen die goed overeen. Onduidelijk daarbij echter is uit hoeveel bronnen deze informatie van experts afkomstig is, het zou kunnen dat ze zich allemaal baseren op informatie van één of enkele leveranciers en/of één of enkele studies naar het effect op degeneratie van start/stop bedrijf.
- Zeker: daarmee wordt de business case van elektrolyseprojecten onzekerder. Naar alle waarschijnlijkheid zal dit leiden tot hogere €/MW projectaanvragen in de tender van de opschalingsregeling en dus tot een lager aantal MW electrolyzers dat met de tender gerealiseerd kan worden. Dit laatste effect is niet “zeker” omdat een ander effect (vermijden van uren met dure elektriciteit) tegengesteld is.
- Mogelijk: De kans bestaat dat een aantal projecten dit risico niet wil nemen en dat de concurrentie bij de tender minder groot is. Voor de eerste ronde van het opschalingsinstrument schat het waterstof team dat er voldoende interesse is om lage inschrijvingen te stimuleren.
- Mogelijk: Dit leidt tot een grotere kans dat in één of enkele projecten een minder geschikte electrolyser wordt gekozen (een type dat minder goed tegen start-stop bedrijf blijkt te kunnen met snelle degeneratie tot gevolg) en dat daardoor één of enkele projecten minder of niet rendabel zijn (te hoge kosten, achteraf gezien te weinig subsidie gevraagd).