



BACHELOR SCRIPTIE

Mogelijkheden voor elektrische energieopslag in Nederland in 2023

**Paul Ravestein (3505987)
11-07-2014
(6070 woorden -123 uit ondertekeningen)**

**Scriptie ter afsluiting van de Bachelor Liberal Arts & Sciences
Hoofdrichting: Energie & Duurzaamheid
Faculteit Geowetenschappen
Universiteit Utrecht**

**Begeleider:
Dr. H. Martin Junginger
Energy & Resources, Copernicus Institute of Sustainable Development
Faculty of Geosciences**

Samenvatting

Het toenemende aandeel van duurzame fluctuerende elektriciteitsbronnen in het elektriciteitsaanbod kan leiden tot overschotten. Elektrische energieopslag (EES) is een goede oplossing om deze overschotten op te slaan en op een later moment vrij te geven. In dit onderzoek wordt er gekeken naar EES systeem het meest geschikt is om te implementeren in Nederland in 2023. Er wordt gekeken naar het jaar 2023, omdat er voor dat jaar afspraken zijn gemaakt in het National Energieakkoord om meer duurzame energie op te wekken. Om de onderzoeksvraag te kunnen beantwoorden worden verschillende selectieprocessen uitgevoerd. Allereerst wordt geselecteerd op basis van de classificatie *high power* of *high energy*. Vervolgens is er een selectie op basis van criteria die van specifiek belang zijn voor Nederland in 2023, namelijk geografie en technologische ontwikkeling. Na deze selecties blijft een bepaald aantal systemen over. De eigenschappen van deze systemen worden dan vergeleken in een multi-criteria analyse, die gedaan wordt voor meerdere scenario's met verschillende wegingsfactoren. Hieruit blijkt dat warmte-energieopslag het meest geschikt is om geïmplementeerd te worden in Nederland in 2023, op de voet gevolgd door perslucht-opslag en loodzuur batterij.

Abstract

The increasing amount of sustainable and fluctuating electricity sources could potentially lead to electricity surpluses. Electrical energy storage (EES) is a good solution to store these surpluses and release the energy at another time. This research considers which EES systems are best suitable to implement in the Netherlands in 2023. The year 2023 is relevant because this is the year in which the plans of the national energy accord to have more sustainable energy should have been implemented. To reach an answer to this question, the research conducts various selection processes. Firstly, a selection based on the classification high power or high energy limits the possibilities. Then, a further selection is made based on criteria that are of specific importance to the Netherlands; geography and technological maturity. After these selections a limited number of EES systems remains. The characteristics of these systems will be compared in a multi criteria analysis, which will be executed for several scenarios with different weighing factors. After this analysis, the conclusion is that thermal energy storage is best suitable to implement in the Netherlands in 2023, and compressed air energy storage and lead acid battery were found to be close seconds.

Inhoudsopgave

SAMENVATTING -----	2
INHOUDSOPGAVE -----	3
1. INLEIDING -----	4
2. THEORETISCH KADER -----	6
3. METHODEN -----	7
3.1 SELECTIEPROCES VOOR GROOTSCHALIGE ELEKTRISCHE ENERGIEOPSLAG IN NEDERLAND. -----	8
3.2 EIGENSCHAPPEN VOOR VERGELIJKING VAN EES-----	8
3.2.1 <i>Efficiëntie</i> -----	8
3.2.2 <i>Kosten</i> -----	9
3.2.3 <i>Levensduur</i> -----	9
3.2.4 <i>Energiedichtheid</i> -----	9
3.2.5 <i>Aantal functies</i> -----	9
3.2.6 <i>Milieueffect</i> -----	9
3.2 MULTI-CRITERIA ANALYSE-----	10
3.2.1 <i>Standaardisatie</i> -----	10
3.2.2 <i>Scenario's en wegingen</i> -----	11
3.3 ONZEKERHEIDSANALYSE-----	13
4. ELEKTRISCHE ENERGIEOPSLAG -----	13
4.1 RESULTATEN VAN SELECTIE OP BASIS VAN CLASSIFICATIE EN SPECIFIEKE EIGENSCHAPPEN --	13
4.2 ELEKTRISCHE ENERGIEOPSLAG TECHNOLOGIEËN -----	15
4.2.1 <i>Perslucht energieopslag (CAES)</i> -----	15
4.2.2 <i>Grootschalige batterijen</i> -----	16
4.2.3 <i>Flow-batterijen</i> -----	16
4.2.4 <i>Warmte-energieopslag (TES)</i> -----	17
4.2.5 <i>Overzicht elektrische energieopslagsystemen</i> -----	18
5. RESULTATEN VAN DE MULTI-CRITERIA ANALYSE -----	19
6. DISCUSSIE -----	22
7. CONCLUSIE -----	23
8. LITERATUUR -----	24
9. APPENDIX 1, OPSLAGEIGENSCHAPPEN -----	26
10. APPENDIX 2, FUNCTIES VAN ELEKTRISCHE ENERGIEOPSLAG. -----	29
11. APPENDIX 3, ONZEKERHEIDSANALYSE -----	33

1. Inleiding

Door klimaatverandering, een wereldwijd toenemende vraag naar energie in combinatie met slinkende fossiele voorraden, en de ongewenste afhankelijkheid van andere landen zijn duurzame energiebronnen sterk in opkomst. In de Europese Unie zijn er doelen afgesproken voor meer duurzame energie. De Nederlandse overheid heeft in het energieakkoord (2013) afgesproken om in 2020 14% en in 2023 16% van de totale energievraag op te wekken uit duurzame energiebronnen. Hiervoor staat er voor 2023 onder andere 4450 MW aan wind op zee gepland (Draijer, 2013), en is mede dankzij subsidies het geïmplementeerde vermogen van zonnecellen in Nederland het afgelopen jaar verdubbeld (Volkskrant 26-04).

Duurzame elektriciteitsbronnen zoals wind- en zonne-energie zijn onvoorspelbaar en sterk afhankelijk van het weer, waardoor ze geen constante maar een fluctuerende hoeveelheid energie leveren. Daarnaast is de totale energievraag van de samenleving ook niet constant. Om te zorgen voor een stabiel elektriciteitsnet, moet de productie van elektriciteit even groot zijn als de vraag (Bradbury, Pratson, & Patiño-Echeverri, 2014). Om onregelmatigheden op te vangen wordt momenteel gebruik gemaakt van goed regelbare elektriciteitscentrales die draaien op conventionele brandstoffen.

Gezien het feit dat momenteel het aandeel van fluctuerende elektriciteitsbronnen in Nederland slechts 5.1% van de totale elektriciteitsproductie vormt (CBS), is de invloed van zulke elektriciteitsbronnen op de aanbodzijde van de markt nog klein. Echter, wanneer de afspraken uit het Nationaal Energieakkoord worden nagekomen zullen in 2023 fluctuerende elektriciteitsbronnen een gemiddeld aandeel van 30% van het totale elektriciteitsgebruik hebben.¹ Door dit stijgende percentage zullen er zich steeds vaker momenten van pieken voordoen, waarbij het aanbod van elektriciteit groter is dan de vraag. Op dit moment is dat al regelmatig het geval in Duitsland, waar momenteel ongeveer 23,5% van de elektriciteit duurzaam wordt opgewekt (Groene Courant, 2014).

Zulke elektriciteitsoverschotten kunnen meerdere nadelen hebben. Bij een overschot zullen er baseload centrales in vermogen moeten worden teruggeschroefd of worden stilgezet. Door karakteristieke eigenschappen van zulke centrales is het commercieel nadelig om deze uit te zetten of op een lagere vermogen te laten draaien (Fox, Flynn, & Bryans, 2007), omdat het uitzetten vaak meer kost dan aan laten staan. Een andere optie is het uitzetten van windmolens, maar het nadeel hiervan is dat er duurzame energie wordt weggegooid. De kosten voor de windmolen zijn al gemaakt en de geproduceerde hoeveelheid elektriciteit bepaalt hoe snel de windturbine is terugverdiend.

¹ Berekend uit tabel 9: productie hernieuwbare elektriciteit 2023, in appendix 1.

² Oorspronkelijke termen: Storage capacity, available power, energy density, discharge time,

Een mogelijke oplossing voor fluctuaties en overschotten in het elektriciteitsaanbod is elektrische energieopslag (EES). Dit houdt in dat tijdens pieken in het elektriciteitsaanbod de overtollige elektriciteit wordt opgeslagen. De opgeslagen energie kan worden vrijgegeven als energie schaarser en daardoor duurder is (Ibrahim, Ilinca, & Perron, 2008). Op deze manier kan EES de fluctuaties in elektriciteitsaanbod enigszins stabiliseren.

De afgelopen jaren is er veel onderzoek gedaan naar EES; er zijn veel verschillende technologieën en deze zijn in verschillende stadia van ontwikkeling. Er is echter nog niet veel geschreven over de toepassing van EES in Nederland, terwijl met het groeiende aandeel van fluctuerende elektriciteitsbronnen EES steeds interessanter wordt. In dit onderzoek wordt er gekeken naar de mogelijkheden voor EES in Nederland in 2023. De focus wordt gelegd op het jaar 2023 omdat dan de afspraken uit het energieakkoord geïmplementeerd zouden moeten zijn, waardoor het aandeel van fluctuerende elektriciteitsbronnen groot genoeg zou zijn om te zorgen voor overschotten (ECN, 2013).

Dit onderzoek bekijkt welke elektrische opslagtechnologieën mogelijk zijn in Nederland, en welke technologieën ver genoeg ontwikkeld zijn om in 2023 in gebruik te worden genomen. Omdat dit onderzoek kijkt naar mogelijkheden om elektriciteitsoverschotten op te slaan en later te gebruiken, wordt er uitsluitend gekeken naar grootschalige energieopslag. Het doel van dit onderzoek is om vanuit het grote aanbod grootschalige EES technologieën de meest geschikte technologieën te selecteren. Door de beperkte omvang van dit onderzoek wordt er alleen gekeken naar mogelijkheden voor energieopslag op Nederlands grondgebied; internationale oplossingen worden niet meegenomen. De hoofdvraag van dit onderzoek luidt:

Wat zijn de grootschalige elektrische energieopslag technologieën die het meest geschikt zijn om te implementeren in Nederland in 2023?

Om tot een volledig antwoord te komen, worden er ook verschillende deelvragen beantwoord:

- Welke criteria zijn van specifiek belang voor Nederland in 2023?
- Welke EES systemen blijven over na een selectie op basis van criteria die van specifiek belang zijn voor Nederland in 2023?
- Wat zijn de beste eigenschappen om opslagtechnologieën met elkaar te vergelijken door middel van een multi-criteria analyse?

2. Theoretisch kader

In dit theoretisch kader wordt het proces van EES nader toegelicht en geplaatst in de bestaande literatuur. Vervolgens wordt uitgelegd waarom een multi-criteria analyse (MCA) een geschikte methode is om te gebruiken in dit onderzoek.

Elektrische energieopslag verwijst naar een proces van het converteren van elektrische energie vanuit een elektriciteitsnet naar een vorm waarin het kan worden opgeslagen, om vervolgens op een later tijdstip weer terug omgezet te worden in elektriciteit (Chen et al., 2009). De afgelopen jaren is er veel onderzoek gedaan naar elektrische energieopslag; uitgebreide overzichten en vergelijkingen tussen die verschillende opslagtechnologieën worden gegeven door Akhil et al. (2013), Beaudin et al. (2010), Chen et al. (2009), Hadjipaschalis et al. (2009), en Ibrahim et al. (2008). Deze vergelijkingen baseren zich op de eigenschappen die alle EES bezitten. De meest voorkomende eigenschappen zijn opslagcapaciteit, beschikbaar vermogen, energiedichtheid, ontladtijd, efficiëntie, levensduur, kosten, zelf-ontladingstijd, geografie, en technologische ontwikkeling.² In de meeste artikelen worden de verschillende systemen direct met elkaar vergeleken op basis van deze eigenschappen. Ze worden hierbij met behulp van grafieken tegen elkaar afgewogen.

Het is bekend welke functies³ verschillende EES kunnen uitvoeren, en de karakteristieke eigenschappen die daar voor nodig zijn (Akhil et al., 2013; Chen et al., 2009; U.S. Department of energy, 2013). Er is ook specifiek onderzoek gedaan naar de fluctuaties van duurzame elektriciteitsbronnen en de complicaties die dat met zich mee brengt. Zo kijken Fox et al. (2007) naar de integratie van windenergie in het elektriciteitsnet. Er wordt diep ingegaan op de eigenschappen van windenergie, en hoe vaak en in welke mate fluctuaties voorkomen. Ook worden er modellen gebruikt om het aandeel van fluctuerende bronnen in elektriciteitsmarkten te simuleren (Velthuis, 2012).

Verder wordt gekeken naar economische haalbaarheid door Bradbury, Pratson, & Patiño-Echeverri (2014) en Sigrist, Lobato, & Rouco (2013). Om rendabeler te worden zouden bij mechanische opslag de kapitaalkosten voor vermogenscapaciteit⁴ omlaag moeten, terwijl bij chemische opslag de kapitaalkosten voor energie capaciteit⁵ lager moeten. Daarnaast hebben Cutter, Haley, Hargreaves, & Williams (2014) door middel van een *mixed-integer linear program* laten zien dat de kostprijs van een nieuwe invoer⁶ geen goed beeld geeft van de actuele kosten, wanneer niet alleen overschotten van elektriciteit

² Oorspronkelijke termen: Storage capacity, available power, energy density, discharge time, efficiency, durability, costs, self-discharge time, geography, en technological maturity. Een uitgebreidere beschrijving van deze eigenschappen wordt gegeven in appendix 1.

³ Zie appendix 2 voor een uitgebreide uitleg van de verschillende functies.

⁴ Oorspronkelijke term: Power capacity capital costs.

⁵ Oorspronkelijke term: Energy capacity capital costs.

⁶ Oorspronkelijke term: Cost of new entry.

worden meegenomen, maar ook de benodigde flexibiliteit om het fluctuerende aanbod op te vangen.

Binnen de literatuur bestaat al veel onderzoek naar EES in het algemeen, maar er is nog relatief weinig onderzoek gedaan naar welke EES technologie op basis van meerdere criteria het beste naar voren komt. De verschillende EES zijn in de literatuur al wel gecategoriseerd op basis van verschillende functies, echter zijn het aantal functies dat ze kunnen uitvoeren in de gevonden literatuur niet meegenomen in een directe analyse.

Er is in dit onderzoek gekozen om een multi-criteria analyse te gebruiken om een overzichtelijke vergelijking van de verschillende EES technologieën te maken. Een MCA is een belangrijke methode bij besluitvorming van milieugerichte problemen, omdat bij milieu- en technisch gerichte besluitvorming vaak sprake is van meerdere conflicterende criteria, interesses en doelen. Een MCA vergelijkt opties, welke verschillende eigenschappen hebben die op hun beurt verschillen van aard (technisch, economisch, of sociaal). Het verschil met een kosten-baten analyse is dat er bij een MCA niet geprobeerd wordt om alle criteria in monetaire eenheden te waarderen. Daarentegen worden de waarden voor de verschillende criteria gestandaardiseerd, en worden ze direct tegen elkaar afgewogen. Een MCA past daarom goed bij het onderzoek naar de meest geschikte EES voor Nederland in 2023, omdat hierbij ook economische (kosten), technische (efficiëntie) en sociale (milieueffect) criteria een rol spelen. Door verschillende wegingen aan criteria toe te kennen, kan vanuit verschillende perspectieven worden gekeken naar de beste of meest geprefereerde opties. Echter betekent dit ook dat de resultaten niet absoluut zijn (Berghout, 2014).

In dit onderzoek is de MCA gebaseerd op eigenschappen die al in eerder onderzoek zijn gebruikt, maar ook op de verschillende functies die EES kan vervullen. Deze functies worden meegenomen omdat Cutter et al. (2014) hebben aangetoond dat die belangrijk zijn voor de economische haalbaarheid van EES systemen.

3. Methodes

Om vast te kunnen stellen welke EES techniek het meest geschikt is om te gebruiken in Nederland in 2023, worden een aantal selectieprocessen doorlopen. Allereerst wordt een grove selectie gemaakt op basis van classificatie, kijkend naar het onderscheid tussen *high power* en *high energy*. Vervolgens wordt er geselecteerd op eigenschappen die specifiek op Nederland in 2023 van toepassing zijn; hierbij wordt gelet op geografische kenmerken en het stadium van ontwikkeling. Na deze selecties resteert een beperkt aantal systemen. Van deze systemen zullen de specifieke eigenschappen worden vergeleken in een

MCA. In de MCA wordt gebruik gemaakt van drie verschillende scenario's en bijbehorende verschillende wegen van criteria.

3.1 Selectieproces voor grootschalige elektrische energieopslag in Nederland.

Het eerste selectieproces op basis van classificatie van EES verdeelt de systemen in de categorieën *high power* en *high energy*. *High power* opslagtechnieken zijn goed te gebruiken om de kwaliteit van het net te bewaken en kunnen in korte tijd veel vermogen leveren. Echter, het opvangen van elektriciteitsoverschotten gaat beter met *high energy* opslag. Dit zijn technologieën die voor een langere tijd (variërend van dagen tot maanden) met weinig verlies grote hoeveelheden energie kunnen opslaan (Chen et al., 2009). Om deze reden focust dit onderzoek zich uitsluitend op *high energy* opslag.

Een tweede selectie wordt gebaseerd op twee criteria die van specifiek belang zijn voor EES in Nederland in 2023. Het belangrijkste criterium hier is geografie. Bepaalde EES technieken zijn alleen mogelijk in bepaalde geografische omstandigheden. Door inherente beperkingen van het Nederlandse grondgebied zijn sommige EES technieken niet toepasbaar. Ten tweede is het belangrijk dat de EES techniek zich in een gevorderd stadium van technologische ontwikkeling bevindt. Omdat het systeem moet worden toegepast in 2023 is er geen tijd om een onderontwikkelde techniek te implementeren.

3.2 Eigenschappen voor vergelijking van EES

Na de bovenstaande selectie blijft een gelimiteerd aantal technieken over. Deze zullen worden vergeleken op basis van hun specifieke eigenschappen. Ferreira et al. (2013) benoemen efficiëntie, levensduur, energiedichtheid, betrouwbaarheid en reactietijd als belangrijke eigenschappen. Ibrahim et al. (2008) en Chen et al. (2009) voegen daar opslagcapaciteit, beschikbaar vermogen, ontlaadtijd, zelf-ontladingstijd, kosten, technologische ontwikkeling, geografie, en milieueffect aan toe. In dit onderzoek is ervoor gekozen om de volgende eigenschappen mee te nemen: efficiëntie, energiedichtheid, milieueffect, kosten, levensduur, en het aantal functies. Hieronder staat een uitleg waarom deze zijn gekozen om mee te nemen in de MCA; een uitgebreide uitleg van wat deze eigenschappen precies inhouden wordt gegeven in appendix 1.

3.2.1 Efficiëntie

De efficiëntie is de ratio tussen de opgeslagen energie en de later vrijgegeven energie (Ibrahim et al., 2008). De efficiëntie geeft duidelijk weer wat de effectiviteit van een opslagsysteem is. Bij een hogere efficiëntie gaat er minder energie verloren, en het behouden van de energie is tenslotte het doel van de EES systemen. Ook heeft efficiëntie invloed op de operationele kosten; minder elektriciteit hoeft verbruikt te worden om een bepaald resultaat te krijgen.

3.2.2 Kosten

De investeringskosten per kWh zijn meegenomen omdat geld altijd een cruciale rol speelt. De kosten zijn een grote factor in het bepalen van de terugverdientijd van de EES (Ibrahim et al., 2008). In de MCA wordt alleen de investeringskosten per kWh meegenomen. Van de operationele kosten is weinig tot geen data bekend, waardoor het niet mogelijk is om mee te nemen in de analyse.

3.2.3 Levensduur

Levensduur refereert naar het aantal keer opladen en ontladen, waarna het systeem nog de geplande hoeveelheid energie kan vasthouden. Eén cyclus is een keer opladen en een keer ontladen. De levensduur is van belang omdat het de investeringskosten⁷ en de duurzaamheid beïnvloedt (Chen et al., 2009).

3.2.4 Energiedichtheid

Energiedichtheid vertegenwoordigt de hoeveelheid opgeslagen energie per kilogram (Wh/kg) (Chen et al., 2009). De benodigde ruimte is onder alle omstandigheden een factor die meespeelt in het aanleggen van opslag, juist voor het kleine Nederland. Ideaal gezien was hier de oppervlakte per energie-eenheid meegenomen, echter door ontbrekende data wordt energiedichtheid gebruikt.

3.2.5 Aantal functies

Het aantal functies is belangrijk omdat een systeem met meerdere functies een grotere bijdrage kan leveren aan het elektriciteitsnet. Verder hebben Cutter et al. (2014) aangetoond dat de mogelijkheid tot verschillende functies belangrijk is voor de economische haalbaarheid van EES systemen. Alhoewel misschien niet alle functies evenveel waard zijn, is daar om praktische redenen wel vanuit gegaan in deze analyse. Een uitgebreide uitleg van de verschillende functies is te vinden in appendix 2.

3.2.6 Milieueffect

Het milieueffect verwijst naar de impact van verschillenden EES technieken op het milieu. Dit is belangrijk omdat naarmate er meer aandacht voor milieu is in de samenleving, het belang van dit effect verandert. Deze eigenschap is kwalitatief beoordeeld door Chen et al. (2009) en is meegenomen met verschillende gradaties (aangegeven met --,-,0, +).

Er zijn ook eigenschappen die niet worden meegenomen in de MCA; de opslagcapaciteit, geografie, en technologische ontwikkeling zijn al gebruikt om de mogelijke grootschalige EES technologieën voor Nederland in 2023 te selecteren. Verder zijn de opslagcapaciteit, beschikbaar vermogen en ontladtijd

⁷ Zie appendix 1 voor de uitleg van kosten en de invloed van het aantal cycli op de investering.

eigenschappen die sterk afhankelijk zijn van de grootte van het gebouwde EES systeem en daardoor moeilijk met elkaar te vergelijken. Een Flow batterij bijvoorbeeld kan met meer opslag voor de elektrolyt meer energie opslaan, en met een grotere *cell-stack* kan het vermogen worden verhoogd.⁸ De zelf-ontladingstijd is bij de grootschalige EES allemaal laag, de betrouwbaarheid is onderdeel van de technologische ontwikkeling, en de reactietijd is mede onderdeel van het aantal functies die de EES kunnen uitvoeren.

3.2 Multi-criteria analyse

Door middel van een MCA worden de overgebleven EES technologieën op basis van verschillende eigenschappen geanalyseerd. Er worden 3 verschillende analyses gedaan voor evenveel scenario's. Deze scenario's zijn ontworpen op basis van toekomstscenario's van het Energieonderzoek Centrum Nederland (ECN). De data over de verschillende eigenschappen is verkregen uit de literatuur. De scores van EES op bepaalde eigenschappen zijn vaak gegeven als een reikwijdte, bijvoorbeeld van 30 tot 60. In de MCA zijn van deze reikwijdtes de gemiddelden genomen. De MCA is zelf berekend in Excel.

3.2.1 Standaardisatie

De scores van de verschillende eigenschappen zijn gestandaardiseerd door middel van rijmaximumstandaardisatie en intervalstandaardisatie. Voor eigenschappen waarvan de scores een absoluut nulpunt hebben is er gekozen voor de rijmaximum standaardisatie; bij eigenschappen met een relatieve score voor intervalstandaardisatie. Een effect van intervalstandaardisatie is dat verschillen tussen de EES sterker worden. Rijmaximumstandaardisatie bij een criterium met een absoluut nulpunt en intervalstandaardisatie bij een relatief criterium zijn standaard methoden (Berghout, 2014). De formules voor de twee standaardisatiemethoden zijn hieronder weergegeven.

Rijmaximumstandaardisatie bij voordelig criterium (bijvoorbeeld levensduur):

$$\text{standaardisatie} = \frac{\text{score}}{\text{hoogste score}}$$

Rijmaximumstandaardisatie bij nadelig criterium (bijvoorbeeld kosten):

$$\text{standaardisatie} = -\frac{\text{score}}{\text{hoogste score}} + 1$$

Intervalstandaardisatie voordelig criterium (bijvoorbeeld efficiëntie):

⁸ Zie sectie 4.2.3 flow batterijen

$$\text{standaardisatie} = \frac{\text{score} - \text{laagste score}}{\text{hoogste} - \text{laagste score}}$$

Intervalstandaardisatie nadelig criterium (bijvoorbeeld milieueffect):

$$\text{standaardisatie} = - \frac{\text{score} - \text{laagste score}}{\text{hoogste} - \text{laagste score}} + 1$$

3.2.2 Scenario's en wegen

Binnen de MCA krijgen bepaalde eigenschappen een hogere of lagere weging. In dit onderzoek zijn de wegen gebaseerd op drie verschillende scenario's. De drie scenario's⁹ zijn opgesteld op basis van het rapport 'referentieraming energie en emissies 2010-2020'. De scenario's voorspellen elk een ander aandeel van duurzame elektriciteit voor de toekomst, afhankelijk van verschillende niveaus van duurzaam beleid. Door de verschillende situaties in de scenario's wordt er voor elk scenario een MCA gedaan, waarin andere wegen aan de criteria zijn gegeven. In dit onderzoek worden er gewichten gegeven van 1 tot en met 5.

Scenario 1: Geen schoon en zuinig beleid

In scenario 1 wordt er geen duurzaam beleid gevoerd de komende jaren. Vanaf nu wordt duurzame energie niet meer gestimuleerd en is de interesse voor het milieu laag. In dit scenario spelen door het ontbreken van subsidies voor duurzame energie de kosten het meest mee. De kosten komen terug in twee criteria, de 'kosten' en in de efficiëntie. De efficiëntie is naast het effect op de kosten ook belangrijk voor het doel, namelijk het opslaan en besparen van energie. Daarom hebben in dit scenario de kosten en efficiëntie de hoogste weging van 5. De levensduur beïnvloedt de duurzaamheid en houdbaarheid van een systeem, en heeft invloed op de investeringskosten. Echter, omdat de kosten al zwaar wegen in andere criteria en het hier meer om de houdbaarheid van het systeem draait, krijgt dit criterium een weging van 2. Het milieueffect is in dit scenario van een gering belang, en krijgt hier een weging van 1. Het aantal functies van verschillende systemen wordt eveneens niet zwaar gewogen; door de lage focus op duurzame energie zullen er voornamelijk conventionele centrales gebruikt worden, die dezelfde functies als EES kunnen vervullen. Dit criterium krijgt een weging van 2. De energiedichtheid is in alle scenario's even zwaar gewogen. Een hogere dichtheid is altijd even gewenst omdat er dan minder ruimte nodig is voor het EES systeem. Dit is onafhankelijk van het beleid. Dit criterium krijgt een weging van 2.

⁹ Voor grafieken met de voorspelde hoeveelheden duurzame elektriciteit per scenario, en meer informatie over de verschillende scenario's zie:
<http://monitweb.energie.nl/.aspx/Content/scenarios>

Scenario 2: Vastgesteld schoon en veilig beleid

Het beleid wordt gevoerd op basis van de besluitvorming in 2009. Alle toen vastgestelde duurzame besluiten blijven bestaan en worden uitgevoerd. Er is een redelijke hoeveelheid milieubeleid en de interesse voor milieu is aanzienlijk. In dit scenario zijn de kosten van minder belang, omdat door de hogere subsidies meer wordt vergoed. Echter, dit criterium blijft belangrijk en krijgt een weging van 4. Efficiëntie is eveneens opnieuw belangrijk; het doel van EES is tenslotte het voorkomen van energieverstopping. Tevens zijn de operationele kosten lager als de efficiëntie hoger is. Daarom blijft de weging een 5. Het belang van levensduur is in dit scenario hetzelfde als hiervoor en krijgt een weging van 2. Het milieueffect weegt in dit scenario zwaarder. De overheid besteedt meer aandacht aan het milieu en implementeert meer duurzame regelgeving. Dit maakt het voor bedrijven ook aantrekkelijker om een 'schoon' image te hebben. Milieueffect heeft een weging van 2; door de gegroeide focus op duurzame energie zullen gascentrales op piekmomenten soms vervangen worden door EES systemen. Hierdoor komt een grotere nadruk op het aantal functies van EES, die als vervanging van traditionele centrales kunnen dienen. Daarom krijgt dit criterium een weging van 3.

Scenario 3: Voorgenomen schoon en veilig beleid.

Het beleid wordt gevoerd op basis van het huidige vastgestelde beleid met daarbovenop het extra voorgenomen schoon en veilig beleid. Er wordt hier uitgegaan van een samenleving die positief tegenover duurzame energie staat; er is veel milieubeleid en interesse voor het milieu is groot. Alhoewel de overheid nog meer subsidies geeft, houdt het kosten criterium een weging van 4. Dit komt doordat andere criteria in dit scenario zwaarder gaan wegen, en een 4 hier dus relatief lager is dan een 4 in het scenario hierboven. Efficiëntie daalt enigszins in weging. Er wordt aangenomen dat met de gegroeide focus op duurzame energie er meer en grotere elektriciteitsoverschotten zullen voorkomen. Er kan dus meer energie worden opgeslagen. Daarom is de efficiëntie van minder groot – maar nog substantieel – belang dan wanneer duurzame energie schaarser is, en krijgt het een weging van 4. Levensduur stijgt in weging; door het grotere aanbod duurzame energie zal een EES systeem waarschijnlijk meer cycli moeten maken, en is een langere levensduur van groter belang dan hiervoor. Daarom krijgt dit criterium een weging van 3. Het milieueffect stijgt naarmate de scenario's milieuvriendelijker van aard worden. In dit scenario is er de meeste aandacht voor het milieu, en is de weging van dit criterium 3. In dit scenario is ook de grootste mogelijkheid om traditionele centrales door EES systemen te vervangen. Door het grotere aandeel van fluctuerende energiebronnen kunnen steeds meer gascentrales worden uitgezet. De weging van het aantal functies is daarom in dit scenario 3.

Een overzicht van de gekozen wegingen per scenario is gegeven in tabel 1.

Eigenschap	Weging Scenario 1	Weging Scenario 2	Weging Scenario 3
Efficiëntie	5	5	4
kosten	5	4	4
levensduur	2	2	3
energiedichtheid	2	2	2
Aantal functies	2	3	3
milieueffect	1	2	3

Tabel 1: Overzicht van wegingen per scenario

3.3 Onzekerheidsanalyse

Om de resultaten van de MCA te testen wordt er een onzekerheidsanalyse gedaan. Dit is gedaan door de laagste score te nemen voor de verschillende eigenschappen. Met die scores is twee keer een MCA gedaan, een keer zonder wegingen, en een keer met de wegingen van scenario 3.

4. Elektrische energieopslag

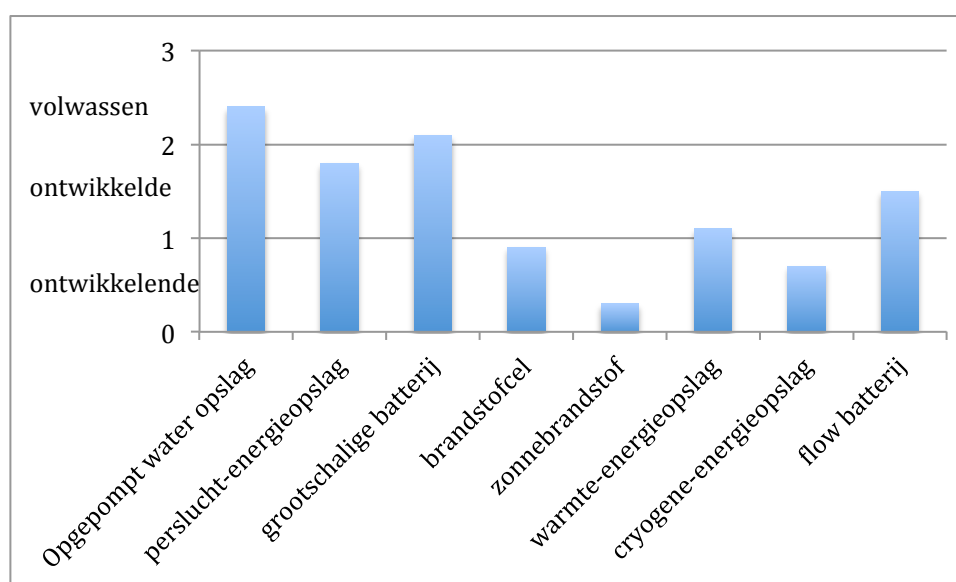
4.1 Resultaten van selectie op basis van classificatie en specifieke eigenschappen

Na de eerste selectie op basis van de classificatie *high power* en *high energy* van Chen et al. (2009) blijven de volgende *high energy* EES systemen over: opgepompt wateropslag, perslucht energieopslag, grootschalige batterij, brandstofcel, zonnebrandstof, warmte-energieopslag, flowbatterij, en cryogene energieopslag.

Voor Nederland is er van de eerder genoemde eigenschappen van EES met name de geografische potentie van de opslagtechniek cruciaal. Bij twee belangrijke EES technologieën zijn er geografische verschijningen nodig om effectief geïmplementeerd te kunnen worden. Opgepompt water opslag (PHS) heeft hoogteverschil nodig om het water weg te pompen en weer terug te laten stromen. Dit is niet mogelijk in Nederland¹⁰, en PHS wordt daarom niet meegenomen in de MCA. Perslucht energieopslag (CAES) heeft grote locaties nodig om lucht in op te kunnen slaan; dit is beperkt mogelijk in Nederland, bijvoorbeeld in oude mijnen en gasvelden. Omdat CAES in principe wel mogelijk is, wordt dit systeem wel meegenomen in de MCA.

¹⁰ Er zijn wel plannen voor een ring in de Noordzee. Uit die ring wordt dan water weggepompt zodat het er weer via een turbine in kan stromen. Deze plannen zijn echter niet erg realistisch en daardoor niet verder meegenomen. (<http://www.dnvkema.com/Images/Large-scale-electricity-storage.pdf>)

Omdat er gekeken wordt naar EES op een korte tijdschaal, namelijk voor 2023, is de technologische ontwikkeling van de EES technologieën ook extra belangrijk. EES technologieën die op dit moment nog niet ver genoeg ontwikkeld zijn, zijn nog te ver weg om mee te nemen in de analyse. In figuur 3 wordt een overzicht gegeven van de technologische ontwikkeling van de verschillende EES technologieën. Uitontwikkeld¹¹ is de laatste fase, en technologieën die zich hier bevinden zijn tot in een ver stadia ontwikkeld. Ontwikkelde¹² technologieën betreffen de EES systemen die al ontwikkeld en commercieel verkrijgbaar zijn, echter zijn ze nog niet wijdverspreid. Nog meer ontwikkeling is nodig om de concurrentiepositie van deze technologieën te verbeteren. Ontwikkeldende¹³ technologieën zijn de EES systemen die nog in ontwikkeling zijn. Commercieel zijn deze nog niet aantrekkelijk, maar er is veel potentie (Chen et al., 2009). Brandstofcel, zonnebrandstof, en cryogene-energieopslag zijn alle drie nog in de ontwikkelende fase, en worden niet meegenomen in de MCA.



Figuur 1: Technologische volwassenheid van high power EES technologieën. Bron: Chen et al. (2009); Ecofys, (2014).

Deze selectieprocessen zijn belangrijk om te bepalen welke systemen het meest geschikt zijn om te implementeren in Nederland in 2023. De selectie op basis van *high energy* en *high power* leidde tot de eerste afvallers. Daarna verkleinde de selectie op basis van eigenschappen van specifiek belang voor Nederland het aantal geschikte EES systemen nog verder. Na deze selecties zijn op dit moment vier opslagtechnologieën voor nadere analyse over: perslucht energieopslag, grootschalige batterij, warmte-energieopslag, en flow batterijen.

¹¹ Oorspronkelijke term: Mature.

¹² Oorspronkelijke term: Developed.

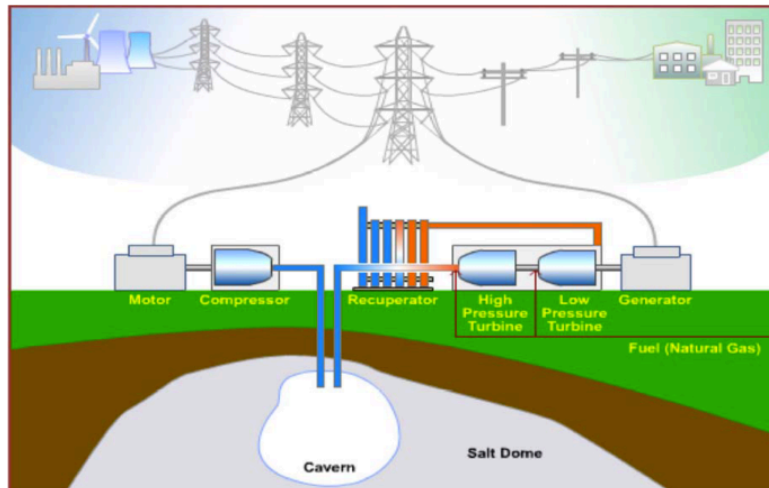
¹³ Oorspronkelijke term: Developing.

4.2 Elektrische energieopslag technologieën

4.2.1 Perslucht energieopslag (CAES)

Bij CAES wordt energie opgeslagen door gebruik te maken van elektromotoren die lucht samen persen tot tussen de 4,0 en 8,0 Mpa (Chen et al., 2009). De energie wordt dan weer omgezet in elektriciteit door de samengeperste lucht aan de inlaat van een gasturbine te voeren. De gasturbine draait op aardgas, maar doordat de samengeperste lucht de arbeid van de turbine verlicht, kan deze tot ongeveer driemaal zoveel energie¹⁴ produceren als een conventionele gasturbine (Ecofys, 2014). CAES systemen zijn ontworpen om op een dagelijkse basis gebruikt te worden, en hoeven niet volledig opgeladen te worden om goed te functioneren. Verder kan er gemakkelijk omgeschakeld worden van energie opslaan, naar opwekken, en terug. Deze eigenschappen maken CAES een geschikte opslag voor een elektriciteitsnet waar veel variaties zijn, en goed voor zowel voor regulering als tijdsverschuiving bij prijsverschillen (Chen et al., 2009). Verdere voordelen van CAES zijn een groot beschikbaar vermogen (5-300 MW, grote opslagcapaciteit (1-24 h+), lage zelf-ontladingstijd, lange levensduur, en daardoor lage kosten gedeeld door de cycli (\$/kWh/cycle). Nadelen zijn echter de afhankelijkheid van geschikte locaties onder de grond om grote hoeveelheden lucht onder hoge druk op te slaan, en het gebruik van aardgas. In Nederland zijn enkele plekken waar lucht onder de grond kan worden opgeslagen, zie Velthuis (2012). Het is ook mogelijk om CAES boven de grond op te slaan in daarvoor gemaakte opslagsilo's, echter verhoogt dit de investeringskosten aanzienlijk. Figuur 4 geeft een schematische weergave van de belangrijkste componenten van een CAES systeem.

¹⁴ Met conventionele elektriciteitscentrales worden centrales op fossiele brandstoffen of kernenergie bedoeld.



Figuur 2: Schematische weergave van een CAES systeem.
Bron: Hadjipaschalis et al., (2009).

4.2.2 Grootschalige batterijen

Conventionele batterijen werken met een anode en kathode, in een afgesloten ruimte en gescheiden doormiddel van een elektrolyt. Tijdens het opladen wordt, door toevoeging van elektriciteit, de elektrolyt geïoniseerd, en bij het ontladen wordt er doormiddel van een redox reactie een elektrische stroom gegenereerd.

Batterijen kunnen heel snel reageren op veranderingen in het energieaanbod en kunnen daarmee voor veel verschillende functies worden ingezet. Verdere voordelen zijn de relatief lage kosten, lage stand-by verliezen en een hoge energie efficiëntie. Een groot nadeel van veel batterijen is dat ze een relatief laag mogelijk aantal cycli, lage energiedichtheid, en hoge onderhoudskosten hebben

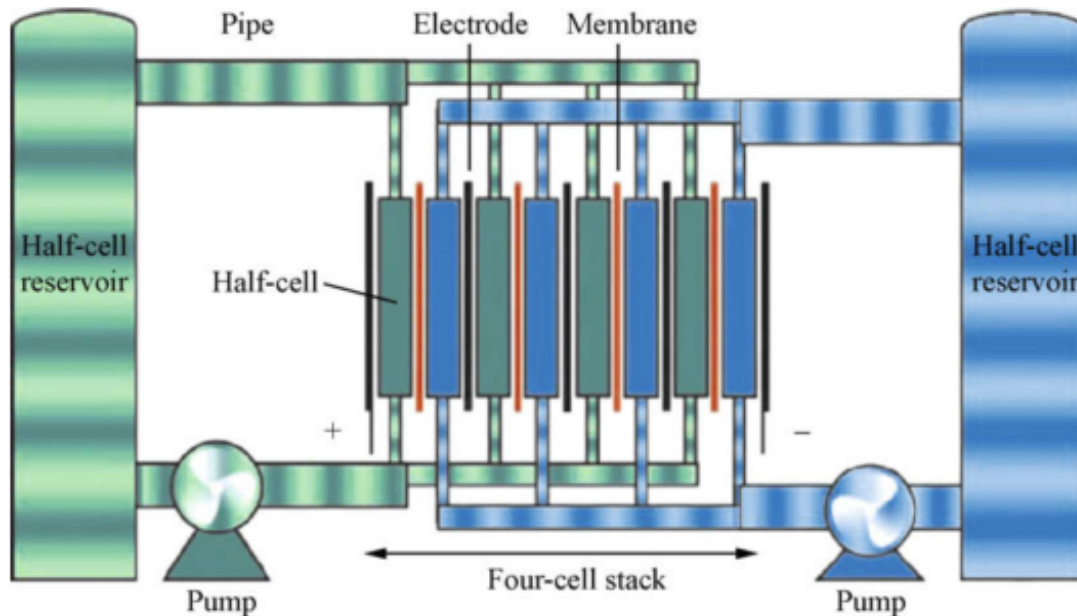
Er zijn meerdere soorten batterijen. Voor EES zijn er drie het meest geschikt, namelijk de loodzuur, nikkelcadmium (NiCd), en lithium ion. Door te hoge kosten is de lithium batterij in dit onderzoek niet meegenomen. De nikkelcadmium batterij is duurder en heeft een lagere efficiëntie dan de loodzuur variant, echter voordelen zijn een hoger aantal cycli en hoger beschikbaar vermogen (Chen et al., 2009; Hadjipaschalis et al., 2009).

4.2.3 Flow-batterijen

Flow-batterijen maken gebruik van dezelfde elektrochemische reacties als conventionele batterijen. Het verschil is dat de elektrolyt extern wordt opgeslagen. De elektrolyt stroomt door een power cell waar de opgeslagen energie wordt omgezet in elektriciteit. Het voordeel van flow-batterijen is dat de power output en de opslagcapaciteit los van elkaar bepaald kunnen worden. Voor een hogere power output worden er meerdere cellen naast elkaar geplaatst. Voor een hogere opslagcapaciteit wordt de opslag voor de elektrolyt vergroot (Chen et al., 2009).

Net als conventionele batterijen kunnen flow-batterijen snel reageren, binnen de milliseconde. Echter een groot voordeel van flow-batterijen tegenover

conventionele batterijen is de langere levensduur. Het grotere aantal cycli maakt flow-batterijen geschikter voor meer verschillende functies ten opzichte van conventionele batterijen. Zo is het als de enige high energy EES systeem ook geschikt om ingezet te worden voor het controleren van de netfrequentie. Verder zijn flow-batterijen geschikt voor functies zoals reguleren, tijdsverschuiving, capaciteitsaanbod¹⁵, en draaiende reserve¹⁶.



Figuur 3: Schematische weergave flow batterij. Bron: Chen et al. (2009).

4.2.4 Warmte-energieopslag (TES)

Warmte-energieopslag kan op meerdere manieren. Een manier die al gebruikt wordt voor het opslaan van warmte van geconcentreerde zonnewarmtecentrales maakt gebruik van gesmolten zouten. De warmte wordt opgeslagen in de zoutoplossing in een geïsoleerde tank. In plaats van zonnewarmte kan er ook warmte gegenereerd worden door middel van een weerstandverwarming. Op deze manier kan er van elektriciteit warmte worden opgeslagen, en wordt die warmte later weer gebruikt worden om stoom te maken voor elektriciteitsproductie.

Voordelen van TES zijn een hoge energiedichtheid, groot vermogen, en hoge duurzaamheid. Nadelen zijn een lage efficiëntie en onzekerheden over kapitaalskosten. Echter wordt er wel verwacht dat het relatief lage kosten zullen zijn (Ecofys, 2014).

¹⁵ Oorspronkelijke term: peak shaving.

¹⁶ oorspronkelijke term: spinning reserve.

4.2.5 Overzicht elektrische energieopslagsystemen

De verschillende functies die de EES technologieën kunnen uitvoeren zijn weergegeven in tabel 2. Voor een uitgebreide van de verschillende functies zie appendix 2. In tabel 3 is een overzicht weergegeven van de eigenschappen van de besproken elektrische energieopslag technologieën en de bijbehorende waarden.

EES systeem	Functies
Perslucht	tijdsverschuiving, opstartenergie, regulering, draaiende reserve.
Loodzuur-batterij	regulering, draaiende reserve, net regulatie, opstartenergie
Flow batterij	regulering, tijdsverschuiving, capaciteitsaanbod, draaiende reserve, net frequentie, opstartenergie.
Warmte-energieopslag	regulering, opstartenergie, draaiende reserve.

Tabel 2: Mogelijke functies per EES technologie. Bron: U.S. Department of Energy (2013).

Eigenschappen	CAES	Loodzuur batterij	Nicd batterij	VRB flow-batterij	ZnBr flow-batterij	Warmte-energieopslag
Efficiëntie	60-70% (b)	75-90% (b)	75-90% (b)	65-75% (b)	60-65% (b)	30% (b)
Kosten (\$/kWh)	2-50	200-400	800-1500	700-2500	150-1000	30-60
Levensduur (cycli)	geen limiet - 30000 (b)	500-1000(a)	2000-2500(a)	12000 + (a)	2000+ (a)	geen limiet - 30000 (b)
Energiedichtheid (Wh/kg)	30-60	30-50	30-50	Oct-30	30-50	80-200
Aantal functies	4	4	4	6	6	3
Milieueffect	---	--	--	--	--	-

Tabel 3: Overzicht van de EES eigenschappen en de bijbehorende score die worden meegenomen in de MCA. Bron: Chen et al. (2009), Beaudin et al (a), (2010), Ecofys (b) (2014).

5. Resultaten van de multi-criteria analyse

De effectentabel die gebruikt is voor de MCA in de drie scenario's is afgeleid uit tabel 3 en is te zien in tabel 4. De gestandaardiseerde scores zijn te zien in tabel 5.

Eigenschappen	Kosten/baten	Eenheid	CAES	Loodzuur	Nicd	VRB	ZnBr	Warmte-energieopslag
Efficiëntie	B	%	65	83	83	70	63	30
Kosten (\$/kWh)	K	\$/kWh	26	300	1150	1600	575	45
Levensduur	B	cycli	30000	750	2250	12000	2000	30000
Energiedichtheid	B	Wh/kg	45	40	40	20	40	140
Aantal functies	B	aantal	4	4	4	6	6	3
Milieu-effect	K	---	3	2	2	2	2	1

Tabel 4: effecten tabel multi-criteria analyse.

Eigenschappen	Kosten/baten	standaardisatie	CAES	Loodzuur	Nicd	VRB	ZnBr	Warmte-energieopslag
Efficiëntie	B	interval	0,66	1,00	1,00	0,75	0,62	0,00
Kosten (\$/kWh)	K	rijmaximum	0,98	0,81	0,28	0,00	0,64	0,97
levensduur	B	rijmaximum	1,00	0,03	0,08	0,40	0,07	1,00
energiedichtheid	B	rijmaximum	0,32	0,29	0,29	0,14	0,29	1,00
aantal functies	B	rijmaximum	0,67	0,67	0,67	1,00	1,00	0,50
milieu-effect	K	interval	0,00	0,50	0,50	0,50	0,50	1,00

Tabel 5: gestandaardiseerde score. Wegingen zijn als x weergegeven omdat die variëren per scenario.

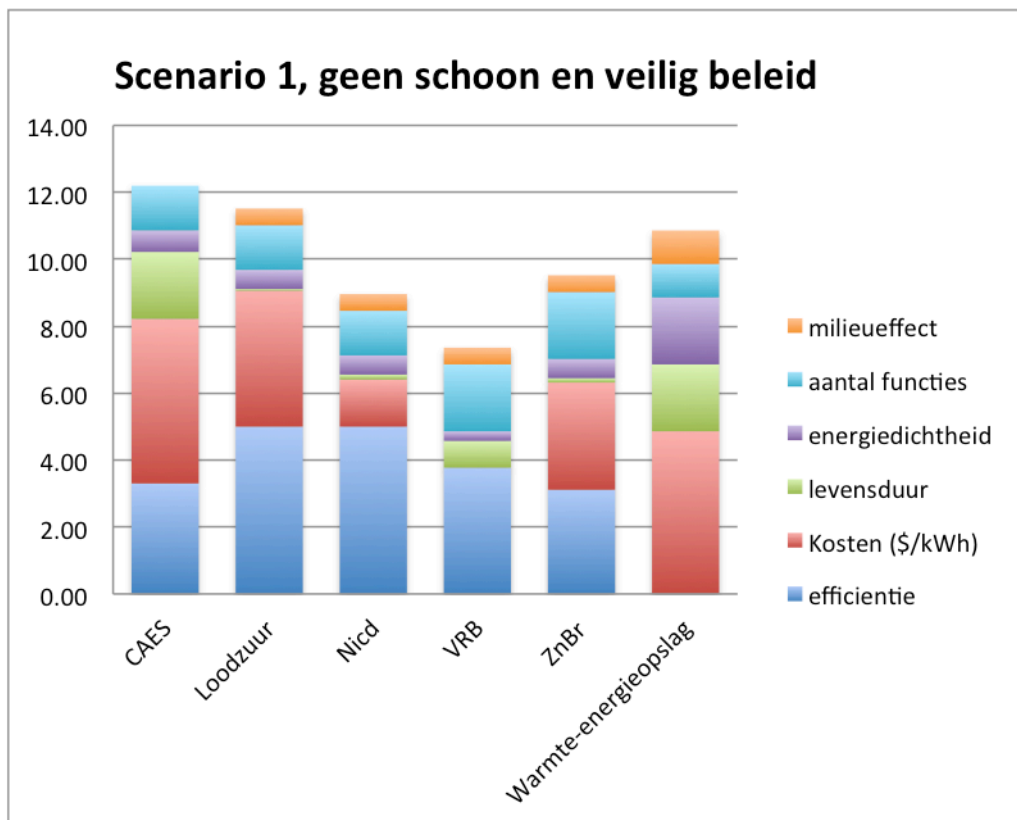
In het eerste scenario is perslucht de beste optie, op de voet gevolgd door loodzuur-batterij en warmte-energieopslag. De grootste winst ten opzichte van de overige batterijen behalen ze op de kosten. Zoals verwacht zijn de kosten hier een erg grote factor; door de hogere kosten vallen NiCd batterij en de flow batterij veel lager uit dan de rest. Opvallend is dat warmte-energieopslag de lage score voor efficiëntie weet te compenseren met de energiedichtheid en levensduur.

In het tweede scenario zijn de kosten iets minder belangrijk, het belang van de efficiëntie weegt even zwaar, en het effect op het milieu en de aantal functies worden van groter belang. Het gevolg hiervan is dat de resultaten wat dichterbij elkaar komen te liggen. Perslucht en loodzuur-batterij staan gelijk, met warmte-energieopslag nog steeds vlak daarachter. Doordat de kosten minder belangrijk worden komen alle scores dichterbij elkaar te liggen.

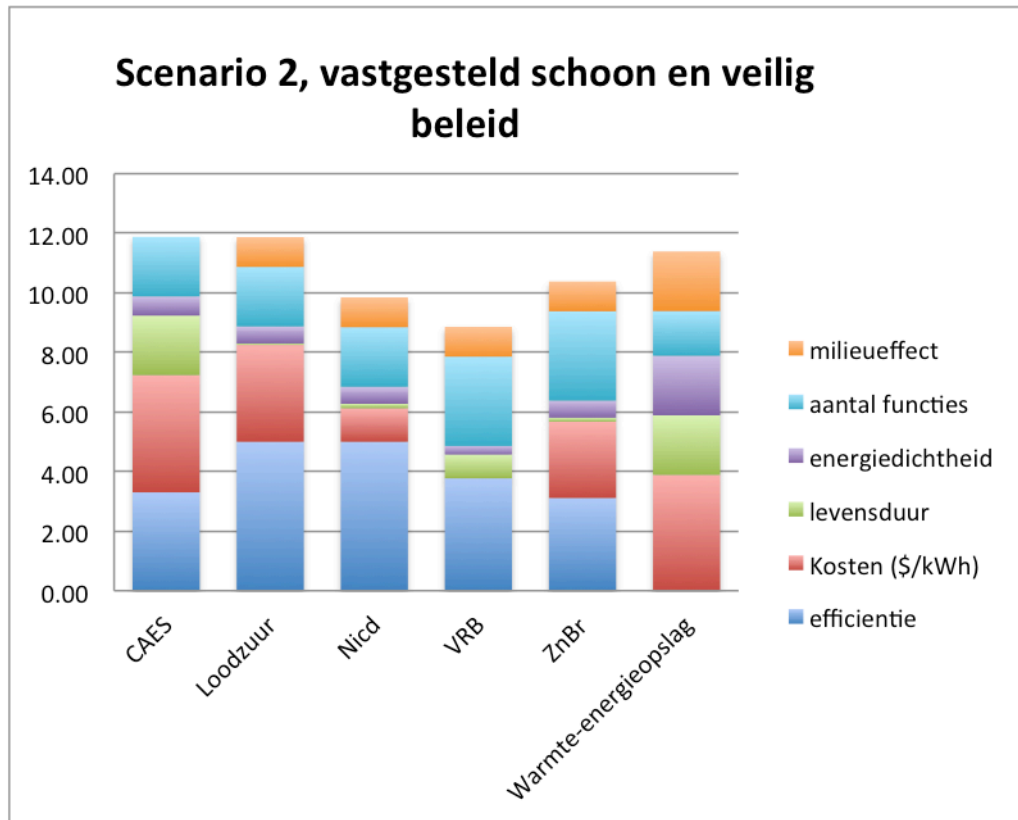
In het derde scenario zijn de kosten en de efficiëntie nog minder belangrijk geworden, omdat de andere eigenschappen wat zwaarder meewegen.

Het effect op het milieu is en de levensduur zijn belangrijker. Dankzij de hoge energiedichtheid en het minste effect op het milieu staat warmteopslag nog steeds bovenaan. Daarachter komen nu CAES en loodzuur-batterij, maar door lage efficiëntie blijft een grote voorsprong op de rest uit. De ZnBr flow-batterij kwam in scenario 2 wat op, echter in scenario 3 is die door het minder belangrijk worden van de efficiëntie en het belangrijker worden van het milieu, weer wat weggezakt.

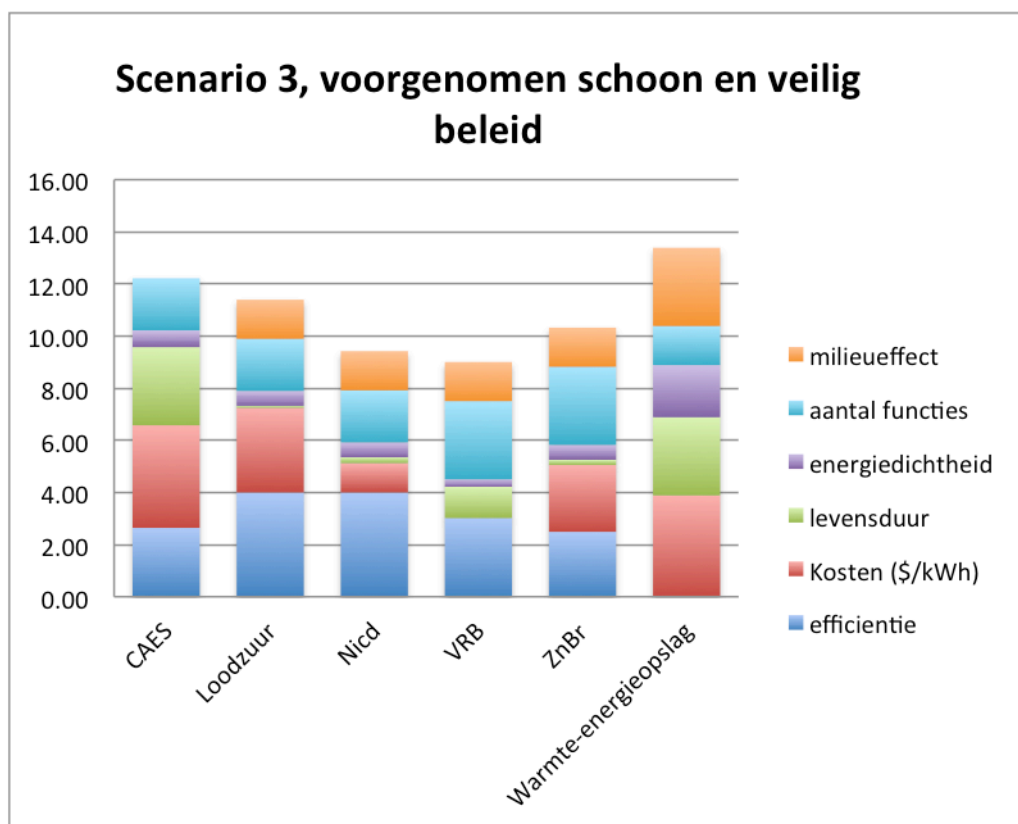
Wanneer de afspraken die gemaakt zijn in het Nationaal Energieakkoord worden nagekomen, komt scenario 3 het meest in de buurt van de realiteit in 2023. Met de huidige staat van ontwikkeling lijkt warmte-energieopslag voor 2023 de meest geschikte optie voor EES in Nederland, en vlak daarna komen perslucht en lood-zuur batterijen. Door de hoge kosten en de lage energiedichtheid blijven de Nicd- en flow-batterijen achter op de rest. De flow-batterij is nog niet zolang in de technologisch ontwikkelde fase, en er is nog veel potentie voor verbetering. Warmte-energieopslag zit nog laag in de ontwikkelde fase van technologische ontwikkeling, maar wanneer het lukt om de efficiëntie te verhogen laat warmte-energieopslag alle concurrenten nog verder achter. Hieronder laten figuren 4, 5, en 6 de uitkomsten van de verschillende scenario's zien.



Figuur 4: Scenario 1, schoon en veilig beleid.



Figuur 5: Scenario 2, vastgesteld schoon en veilig beleid.



Figuur 6: Scenario 3, voorgenomen schoon en veilig beleid.

6. Discussie

In de multi-criteria analyse zitten een aantal onzekerheden. Zo lopen de data voor de eigenschappen van de EES technologieën in de literatuur sterk uiteen. In deze analyse zijn daarvoor gemiddelden gebruikt, echter zijn dat af en toe gemiddelden van hele grote reikwijdtes. Daarbij komt dat de wegenen die zijn gebruikt in de analyse niet vaststaan en afkomstig zijn vanuit eigen redenering op basis van de ECN scenario's. In appendix 3 zijn de resultaten te zien van een onzekerheidsanalyse. In figuur 10 en 11 zijn de resultaten te zien van alle laagste scores van de criteria, in plaats van de gemiddelden. Dit is een keer gedaan met de wegenen van scenario 3 en een keer zonder wegenen. De uitkomsten van beide analyses wijken wat betreft de volgorde van de hoogst scorende EES technologieën niet af van de eerdere analyses. De uitkomst van de MCA is redelijk stabiel. Kleine veranderingen in data en wegenen geven geen drastisch andere uitkomst.

In scenario 3, de scenario wat het meest lijkt op Nederland in 2023, komt warmte-energieopslag als beste optie uit de analyse. Echter door de lage efficiëntie is warmte-energieopslag alleen rendabel als het wordt opgeladen wanneer de andere optie energie dumpen is. Opladen vanuit goedkope base load elektriciteit zal niet snel rendabel zijn. Dit is een groot nadeel van warmte-energieopslag, en om deze vertekening te voorkomen had misschien de efficiëntie en het aantal functies zwaarder moeten wegen. Dit neemt niet weg dat warmte-energieopslag verder erg goed scoort en daardoor de grootste potentie heeft, mocht de efficiëntie zich door verdere technologische ontwikkeling verbeteren.

De multi-criteria analyse die hier is gedaan op basis van de ECN scenario's is een hele algemene analyse, die over het algemeen de meest geschikte systemen voor Nederland in 2023 weergeeft. Scenario 1 en 2 dragen niet heel sterk bij aan het uiteindelijke antwoord op de hoofdvraag, aangezien die scenario's waarschijnlijk niet de toekomst beschrijven. In plaats van op basis van ECN scenario's had wellicht beter gewogen kunnen worden naar vereiste voor bepaalde functies. Een gedetailleerdere analyse van de hier geselecteerde EES technologieën zou dan ook een goed vervolgonderzoek zijn. Er kan dan specifiek naar de beste EES per verschillende functie worden gekeken. Er is bekend aan welke vereiste een EES systeem moet voldoen om een bepaalde functie te kunnen vervullen. Daarmee kan specifiek naar de eigenschappen en wegenen worden gekeken, met waarschijnlijk een betrouwbaarder resultaat als gevolg.

Verder is er in dit onderzoek geen rekening gehouden met de maatschappelijke acceptatie van bepaalde opslagsystemen, zoals bijvoorbeeld perslucht. Het onder hoge druk opslaan van lucht onder de grond kan nog wel eens op tegenwerking rekenen vanuit de samenleving, zoals dat bijvoorbeeld bij CO₂ opslag het geval is.

Wat betreft de functie van dit onderzoek binnen de bestaande literatuur is de voornaamste bijdrage dat er wordt ingegaan op de implementatie van EES binnen een specifieke regio, in dit geval Nederland. Daarbij heeft dit onderzoek gepoogd om verschillende bekende eigenschappen en functies van EES te verzamelen uit de bestaande literatuur, en te verenigen en vergelijken.

7. Conclusie

Grootschalige energieopslag kan in de toekomst overschotten uit het groeiende aandeel van fluctuerende elektriciteitsbronnen opvangen. Wanneer er gekeken wordt naar EES technologieën in Nederland in 2023 zijn er twee criteria specifiek van belang; geografie en technologische ontwikkeling. Op basis van deze twee criteria kan het grote aanbod van grootschalige opslag technologieën gereduceerd worden tot vier systemen. Dit zijn perslucht opslag, grootschalige batterij, flow-batterij en warmte-energieopslag. Welke eigenschappen het beste zijn om EES met elkaar te vergelijken is afhankelijk van het doel. In dit onderzoek was het doel om vanuit het grote aanbod EES technologieën de meest geschikte technologieën te selecteren. Daarvoor zijn de eigenschappen efficiëntie, kosten, levensduur, energiedichtheid, het aantal functies en het milieueffect geselecteerd. Om de overgebleven EES technologieën met elkaar te vergelijken is er gebruik gemaakt van een MCA. Uit de resultaten van de MCA met de wegingen van scenario 3 blijkt dat warmte-energieopslag het meest geschikt is voor Nederland in 2023. Het nadeel van warmte-energieopslag is echter de lage efficiëntie, maar warmte-energieopslag bevindt zich nu nog aan het begin van de ontwikkelde fase, daardoor is er nog veel potentie voor verbeteringen. Perslucht opslag komt als tweede uit de analyse, en heeft overal een goede score, het nadeel is alleen de geografische afhankelijkheid. Daarop volgt de loodzuur batterij. Deze batterij scoort goed op kosten en efficiëntie, maar legt het af tegen de warmte-energieopslag en perslucht door de lage levensduur. De NiCd, VRB en ZnBr batterijen hebben alle drie potentie, echter moeten nog grote stappen maken op het gebied van kosten, levensduur en energiedichtheid. Vooral bij de VRB en ZnBr is er nog veel potentie tot ontwikkeling, aangezien zij nog in het begin van de ontwikkelde fase verkeren.

8. Literatuur

- Akhil, A. A., Huff, G., Currier, A. B., Kaun, B. C., Rastler, D. M., Chen, S. B., ... Gauntlett, W. D. (2013). *DOE / EPRI 2013 Electricity Storage Handbook in Collaboration with NRECA*.
- Beaudin, M., Zareipour, H., Schellenberglobe, A., & Rosehart, W. (2010). Energy storage for mitigating the variability of renewable electricity sources: An updated review. *Energy for Sustainable Development, 14*(4), 302–314. doi:10.1016/j.esd.2010.09.007
- Berghout, Niels. (2014) College MCA, Advanced energy analysis, master Energy Science, Universiteit Utrecht.
- Bradbury, K., Pratson, L., & Patiño-Echeverri, D. (2014). Economic viability of energy storage systems based on price arbitrage potential in real-time U.S. electricity markets. *Applied Energy, 114*, 512–519. doi:10.1016/j.apenergy.2013.10.010
- Chen, H., Cong, T. N., Yang, W., Tan, C., Li, Y., & Ding, Y. (2009). Progress in electrical energy storage system: A critical review. *Progress in Natural Science, 19*(3), 291–312. doi:10.1016/j.pnsc.2008.07.014
- Cutter, E., Haley, B., Hargreaves, J., & Williams, J. (2014). Utility scale energy storage and the need for flexible capacity metrics. *Applied Energy, 124*, 274–282. doi:10.1016/j.apenergy.2014.03.011
- Denholm, P., & Hand, M. (2011). Grid flexibility and storage required to achieve very high penetration of variable renewable electricity. *Energy Policy, 39*(3), 1817–1830. doi:10.1016/j.enpol.2011.01.019
- Draijer, W. (2013). *Energieakkoord voor duurzame groei*. ECN. (2013). *Vier gevolgen van de groei van hernieuwbaar voor het energiesysteem*.
- Ecofys. (2014). *Energy Storage Opportunities and Challenges Energy Storage Opportunities and Challenges*.
- Fox, B., Flynn, D., & Bryans, L. (2007). *Wind Power Integration Wind Power Integration* (p. 258). The Institution of Engineering and Technology.
- Hadjipaschalis, I., Poullikkas, A., & Efthimiou, V. (2009). Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13*(6-7), 1513–1522. doi:10.1016/j.rser.2008.09.028
- Ibrahim, H., Ilinca, a, & Perron, J. (2008). Energy storage systems— Characteristics and comparisons. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 12*(5), 1221–1250. doi:10.1016/j.rser.2007.01.023
- Johnson, J. X., De Kleine, R., & Keoleian, G. a. (2014). Assessment of energy storage for transmission-constrained wind. *Applied Energy, 124*, 377–388. doi:10.1016/j.apenergy.2014.03.006
- Sigrist, L., Lobato, E., & Rouco, L. (2013). Energy storage systems providing primary reserve and peak shaving in small isolated power systems: An

- economic assessment. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 53, 675–683. doi:10.1016/j.ijepes.2013.05.046
- U.S. Department of energy. (2013). *Grid Energy Storage* (p. 67).
- Velthuis, M. (2012). The role of large scale energy storage systems in the electricity grid of the Netherlands in 2050.
- Xu, M., & Zhuan, X. (2013). Optimal planning for wind power capacity in an electric power system. *Renewable Energy*, 53, 280–286. doi:10.1016/j.renene.2012.11.015

9. Appendix 1, opslageigenschappen

Om EES met elkaar te kunnen vergelijken wordt er gekeken naar enkele relevante eigenschappen. Alle EES hebben deze eigenschappen, echter zijn ze niet gelijk. In dit stuk worden de belangrijkste eigenschappen besproken.

Opslagcapaciteit

De hoeveelheid energie die is opgeslagen na volledig opladen is de opslagcapaciteit. Opslagcapaciteit wordt weergegeven in watt uur (Wh). Na verloop van tijd kan de opslagcapaciteit verminderen, bijvoorbeeld bij batterijen (Ibrahim et al., 2008).

Beschikbaar vermogen

De snelheid waarmee de energie wordt opgeslagen en kan worden afgegeven wordt aangeduid met het beschikbaar vermogen. Het wordt weergegeven in MW en is vaak afhankelijk van de grootte van de motor/generator. Vaak wordt een gemiddelde of een piekvermogen weergegeven (Ibrahim et al., 2008).

Energie- en vermogensdichtheid

Energiedichtheid vertegenwoordigt de hoeveelheid opgeslagen energie per eenheid massa of volume van het opgeslagen materiaal. De vermogensdichtheid (W/kg or W/liter) is de vermogensoutput gedeeld door het volume van het opslagsysteem. In het volume van het opslagsysteem is alles meegenomen; het opslagelement, de ondersteunende elementen, en het conversiesysteem (Chen et al., 2009).

Ontlaadtijd

De ontlaadtijd is de tijd die het kost voor het EES systeem om van volledig geladen naar volledig ontladen te gaan. Voor verschillende functies zijn een relatief lange ontladingstijd nodig, zoals bijvoorbeeld bij de functie tijdsverschuiving¹⁷ (Ibrahim et al., 2008).

Efficiëntie

De efficiëntie is de ratio tussen de opgeslagen energie en de later vrijgegeven energie. Voor een hoge efficiëntie is het belangrijk om elke vorm van verliezen zo veel mogelijk te beperken (Ibrahim et al., 2008).

Zelf-ontladingstijd

Dit is het gedeelte van de opgeslagen energie wat naar verloop van tijd uit zichzelf verdwijnt, zonder dat de EES gebruikt wordt (Ibrahim et al., 2008).

¹⁷ Oorspronkelijke term: time-shifting.

Levensduur

De levensduur geeft aan hoelang een EES systeem meegaat. Het refereert naar het aantal keer opladen en ontladen waarna het systeem nog de geplande hoeveelheid energie kan vasthouden. Eén cyclus is een keer opladen en een keer ontladen. Alle systemen hebben last van slijtage en gaan op termijn slechter presteren (Ibrahim et al., 2008). Het verschilt echter sterk per soort EES hoelang ze mee gaan. EES op basis van elektrische systemen (condensator etc.) hebben een zeer hoog aantal cycli. Mechanische en thermische systemen zoals opgepompt wateropslag, perslucht energieopslag, warmte-energieopslag hebben ook een hoog aantal. Bij deze technologieën is het aantal mogelijke cycli afhankelijk van mechanische slijtage van de onderdelen. EES op basis van chemische opslag hebben over het algemeen een stuk lagere levensduur (Chen et al., 2009).

Kosten

Zoals bij elke andere investering is een EES systeem een interessante onderneming wanneer de totale baten de totale kosten overstijgen. De kosten worden onderverdeeld in twee categorieën, de kapitaalskosten¹⁸ en de gebruikskosten¹⁹. Wanneer er naar de kosten gekeken wordt is het belangrijk om naar het gehele leven van het EES systeem te kijken (Ibrahim et al., 2008). De kapitaalskosten worden op 3 verschillende manieren weergegeven: de kosten per kWh, per kW, en per kWh/cycli. De kosten weergegeven in de data tabel zijn gedeeld door de opslagefficiëntie om de kosten per output nuttige energie te verkrijgen. De kosten per eenheid energie gedeeld door het mogelijke aantal cycli is een van de beste manieren om de kosten van energieopslag te evalueren voor een systeem dat regelmatig op- en ontlad, zoals bij de functie regulering²⁰. De kapitaalskosten gedeeld door het mogelijk aantal cycli geeft namelijk een beeld van de uiteindelijke kosten over de gehele levensduur van een EES systeem. Bijvoorbeeld, ondanks de relatief lage kapitaalskosten van loodzuur batterijen zijn ze door hun relatief lage mogelijk aantal cycli nog niet de goedkoopste oplossing (Chen et al., 2009).

Milieu-effect

Deze eigenschap geeft aan wat de invloed is van de EES technologieën op het milieu. Dat is kwalitatief beoordeeld door Chen et al. (2009) en is meegenomen met verschillende gradaties (aangegeven met --,-,0, +).

¹⁸ oorspronkelijke term: capital costs.

¹⁹ oorspronkelijke term: operational costs.

²⁰ oorspronkelijke term: load-leveling.

Funcities

Het aantal nevenfuncties dat een bepaald EES systeem heeft is belangrijk; hoe meer functies een bepaald EES systeem vervult behalve energieopslag, hoe meer economisch rendabel een systeem wordt. Welke functies een EES allemaal tegelijk kan vervullen hangt af van de EES technologie en het elektriciteitsnet waar het in fungeert (Akhil et al., 2013). Als EES naast alleen opslag bij een overschot aan elektriciteit ook meerdere functies kan vervullen, kan het gedeeltelijk het gebruik van conventionele centrales overnemen.²¹

Eigenschappen		CAES	Grootschalige batterijen		Flow batterij		Warmte-energie-opslag
			Pb acid	Ni cd	VRB	ZnBr	
Efficiëntie		60-70% (b)	75-90% (b)	75-90% (b)	65-75% (b)	60-65% (b)	30% (b)
Beschikbaar vermogen		5-300MW	0-20MW	0-40MW	30 kW-3MW	50 kW-2MW	0-60 MW
Ontlaadtijd		1-24 h+	Seconds-hours	Seconds-hours	Seconds-10 h	Seconds-10 h	1-24 h+
Zelf-ontladingstijd (dag) energiedichtheid (Wh/kg)		Small	0,1-0,3%	0,2-0,6%	small	small	0,05-1,0%
Kapitaalkosten	\$/kW	400-800	300-600	500-1500	600-1500	150-1000	N.B.
	\$/kWh	2-50	200-400	800-1500	700-2500	150-1000	30-60
	¢/kWh-Per cycle	2-4	20-100	20-100	5-80	5-80	N.B.
Levenstijd (cycli)		Geen limiet - 30000 (b)	500-1000 cycli (a)	2000-2500 cycli (a)	12.000+ cycli (a)	2000+ cycli (a)	Geen limiet -30000 (b)
Aantal functies		4	4	4	6	6	3
Technologische ontwikkeling		Ontwikkeld - volwassen(b)	volwassen (b)	Ontwikkeld-volwassen (b)	ontwikkeld (b)	ontwikkeld (b)	ontwikkeld (b)
Geografie		beperkt	overall	overall	overall	overall	overall
Milieueffect		---	--	--	--	--	-

Tabel 6: Vergelijking van EES eigenschappen, de in het blauw weergegeven waarden zijn meegenomen in de multi-criteria analyse. Bron: Chen et al. (2009), Beaudin et al., (2010), Ecofys (2014).

²¹ Voor een uitgebreide uitleg over deze functies, zie appendix 2.

10. Appendix 2, functies van elektrische energieopslag.

De functies van EES zijn verdeeld in vijf categorieën: functies voor massa-energie, ondersteunende functies, transmissie-infrastructuur functies, distributie functies, en energieklant- en management functies

Massa-energie functies:

Tijdsverschuiving (time-shift):

Elektrische energie *time-shift* houdt in dat elektriciteit wordt ingekocht wanneer de prijs laag is, om de opslag mee op te laden, om vervolgens verkocht te worden wanneer de prijs hoog is. Een alternatief is het opslaan van een overschot aan elektriciteit uit duurzame bron die anders zou worden weggegooid.

Storage System Size Range: 1 – 500 MW

Target Discharge Duration Range: <1 hour

Minimum Cycles/Year: 250 + Storage

(Akhil et al., 2013).

Capaciteitsaanbod (peak shaving)

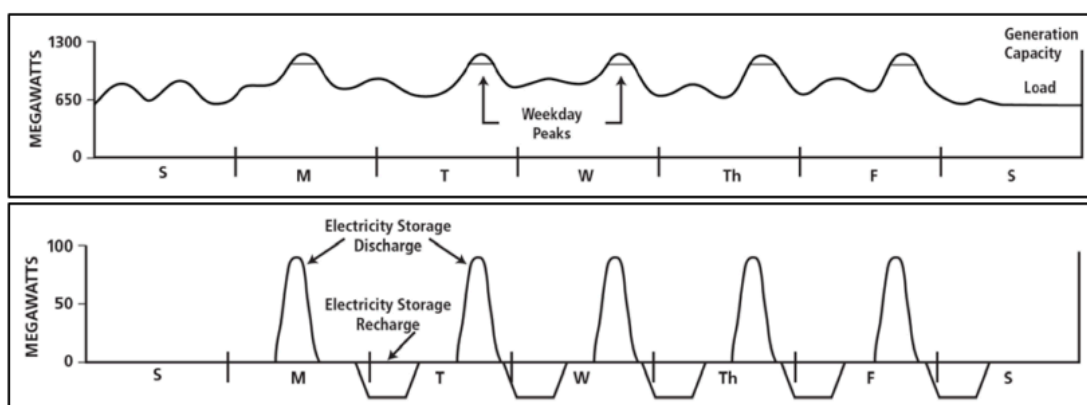
Afhankelijk van de het elektriciteitsnet kan EES ook gebruikt worden als elektrische capaciteitsaanbod voor top momenten in de energie vraag. Ten tijde van een lage vraag om op te laden, en ontladen tijdens piek momenten. Op deze manier kunnen bijvoorbeeld goedkope *base load* centrales de hele nacht op hogere capaciteit doorgaan waardoor ze efficiënter werken. Als in de middag de elektriciteitsvraag op zijn piek is, dan helpt de 's nachts opgeladen EES om in die vraag te voorzien. In figuur 1 is een schematische weergave van laden en ontladen voor het *peak shaving*.

Storage System Size Range: 1 – 500 MW

Target Discharge Duration Range: 2 – 6 hours

Minimum Cycles/Year: 5 – 100

(Akhil et al., 2013)



Figuur 7: Storage for Electric Supply Capacity. Bron: Akhil et al. (2013)

Ondersteunende functies:

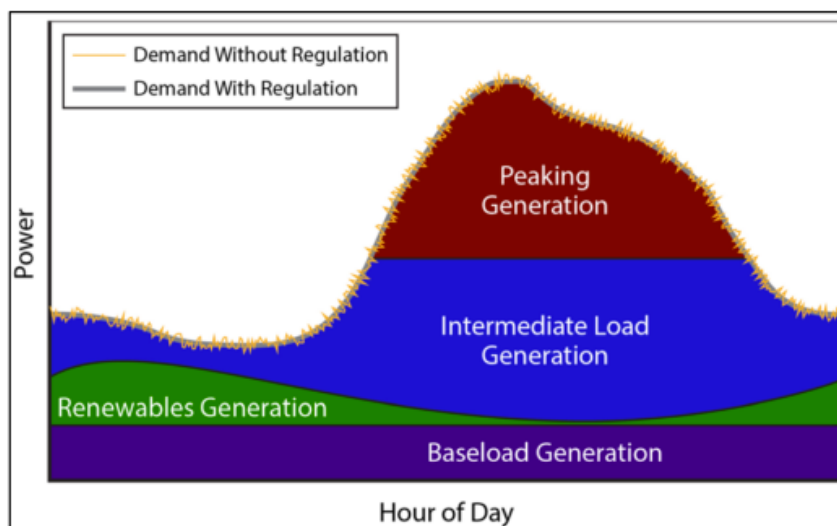
Regulering (*load following*):

Regulering is een functie waar de meeste EES erg geschikt voor zijn. Regulering houdt in dat de constante aanwezig fluctuaties vanuit de elektriciteitsproductie (wind, PV) en de fluctuaties vanuit elektriciteitsvraag worden uitgevlakt. EES kan de fluctuaties accurater volgen, en ontlast op deze manier conventionele²² elektriciteitscentrales en voorkomt zo slijtage. In Figuur X is een voorbeeld van de *system load* met en zonder regulering. EES dat gebruikt wordt voor regulering en *load following* moet betrouwbaar zijn, om een constante elektriciteitsaanbod te kunnen garanderen.

Storage System Size Range: 1 – 100 MW

Target Discharge Duration Range: 15 minutes to 60 minutes

Minimum Cycles/Year: 250 – 10,000 (Akhil et al., 2013)



Figuur 8: System Load Without and With Regulation. Bron: Akhil et al. (2013)

Draaiende reserve:

Om een constante elektriciteitsnet te garanderen is er altijd reserve capaciteit aanwezig, om op te kunnen vangen voor het geval er ergens capaciteit uitvalt. Deze reserve is meestal in de vorm van elektriciteit centrales die niet op 100% draaien, en dus ruimte overhouden om extra elektriciteit te kunnen leveren wanneer dat nodig is. Het nadeel hiervan is dat wanneer een centrale niet op 100% het vaak ook een lagere efficiëntie heeft, met hogere marginale kosten en hogere emissies tot gevolg. EES is in staat om als *spinning reserve* op te treden, het voordeel hiervan is dat elektriciteit centrales op een hogere rendement kunnen draaien.

Storage System Size Range: 10 – 100 MW

Target Discharge

²² Met conventionele elektriciteitscentrales worden centrales op fossiele brandstoffen of kernenergie bedoeld.

Duration Range: 15 minutes – 1 hour Minimum Cycles/Year: 20 – 50
(Akhil et al., 2013)

Opstart energie:

Elektrische energieopslag kan ook dienen als opstart energie voor conventionele centrales. Mocht het elektriciteitsnet falen dan is er in EES nog een reserve aan elektriciteit opgeslagen om de elektriciteitscentrales weer snel aan het draaien te krijgen (Ecofys, 2014).

Storage System Size Range: 5 – 50 MW

Target Discharge Duration Range: 15 minutes – 1 hour

Minimum Cycles/Year: 10 – 20 10

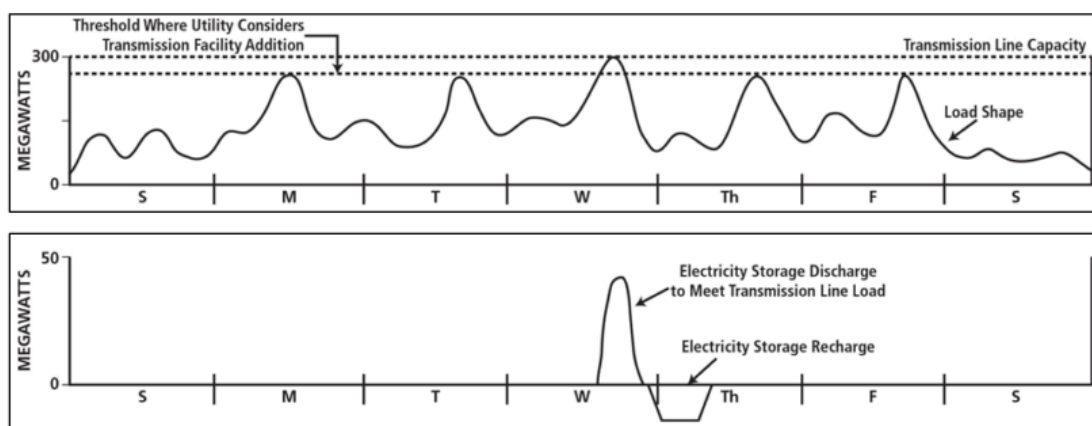
Transmissie-infrastructuur functies:

Wanneer een gedeelte van de transmissie infrastructuur overbelast is, zijn er grote investeringen nodig om de capaciteit te verhogen. Door de opkomst van fluctuerende elektriciteitsbronnen ontstaan er regelmatig enorme pieken waardoor de transmissie infrastructuur slechts tijdelijk overbelast kan raken. Om voor die enkele momenten paar jaar een enorme investering uit te stellen kan er gebruikt gemaakt worden van EES. De EES kan op de momenten dat het netwerk overbelast raakt de overtollige capaciteit opslaan, om vervolgens op een rustiger moment af te staan. Zo kunnen grote investeringen voorkomen of uitgesteld worden. In figuur X is een voorbeeld van dit proces weergegeven.

Storage System Size Range: 10 – 100 MW

Target Discharge Duration Range: 2 – 8 hours

Minimum Cycles/Year: 10 – 50 Energy



Figuur 9: Storage for Transmission and Distribution Deferral Akhil et al. (2013)

Energieklant- en management functies²³:

²³ EES kan ook voor consumenten een belangrijke rol gaan spelen. Wanneer de elektriciteitsprijzen in de toekomst meer gaan fluctueren kan *time-shifting* voor

Onder deze functie vallen de bovengenoemde functies in kleine schaal en wordt daarom niet verder meegenomen in dit onderzoek.

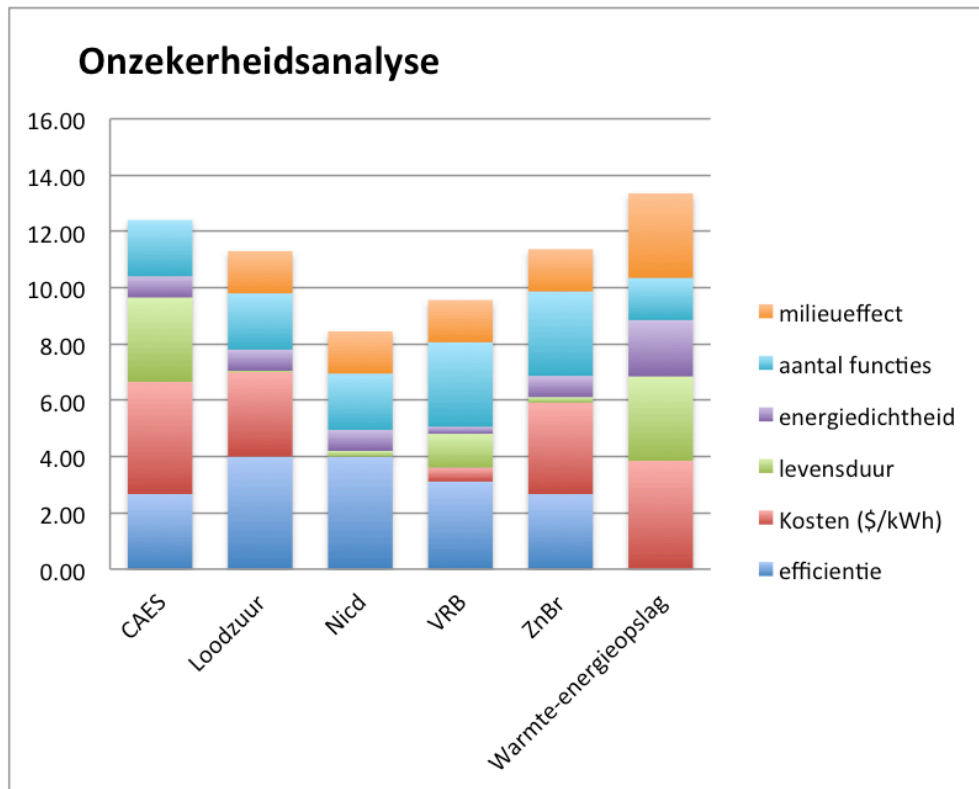
Distributie functies

Net frequentie

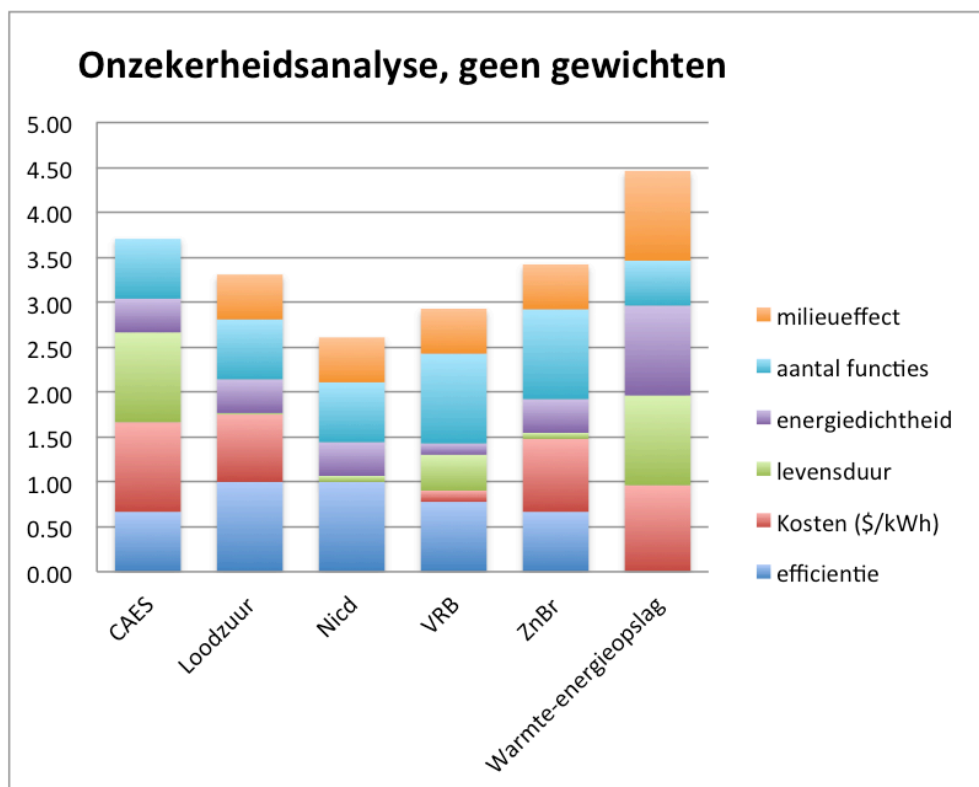
Net frequentie is bijna gelijk aan regulatie. Het verschil is dat bij Net frequentie de reactie op de behoeften van het elektriciteit systeem nog korter is, in tijd periodes van secondes (Akhil et al., 2013).

consumenten interessant worden. Ook kunnen bijvoorbeeld, bedrijven en ziekenhuizen gebruik maken van EES om zichzelf van een constante aanbod te voorzien (Akhil et al., 2013).

11. Appendix 3, onzekerheidsanalyse



Figuur 10: Onzekerheidsanalyse, alle laagste scores met de wegingen van scenario 3.



Figuur 11: onzekerheidsanalyse, alle laagste score met geen gewichten.