

Het toepassen van elektriciteit opslagtechnieken op Ameland

Een vergelijkend onderzoek



Auteur: Bram Commandeur
Student Milieukunde 4^e jaar, VHL
Richting: Energiemanagement & Klimaat
Datum 22-06-2015, eindversie

Het toepassen van elektriciteit opslagtechnieken op Ameland

Een vergelijkend onderzoek

Auteur: Bram Commandeur

Student Milieukunde, energiemangement en klimaat

Studentnummer: 940518003

Opleidingsinstituut: Van Hall Larenstein, Leeuwarden

Afstudeerbegeleiders: dhr. Sietze Bottema en dhr. Wim Hilbrants

Opdrachtgever: gemeente Ameland

Begeleider vanuit de gemeente: dhr. Jacob Dijkstra

Plaats en datum: Steenwijk, 22-06-2015

(foto titelblad: skyline Noordzee Ameland, gemaakt door: Bram Commandeur, 2015)

Voorwoord

Voor u ligt het afstudeeronderzoek zoals dit tot stand is gekomen tijdens de afstudeerperiode van mijn opleiding milieukunde aan Hogeschool Van Hall Larenstein te Leeuwarden. Het onderzoek heeft als doel om elektriciteit opslagtechnieken aan te wijzen die geschikt zouden kunnen zijn voor toepassing op Ameland. Ook is er gekeken naar hoe deze technieken gebruikt zouden kunnen worden op Ameland. Het afstudeeronderzoek heb ik uitgevoerd in opdracht van de gemeente Ameland. Er wordt binnen de gemeente hard gewerkt om Ameland zelfvoorzienend te maken op het gebied van energie. Met dit onderzoek hoop ik een bijdrage te hebben geleverd aan de transitie naar een duurzamere samenleving.

Het onderzoek naar energieopslag was complex en leerzaam. De ontwikkelingen op het gebied van energieopslag gaan snel. Mijn dank gaat uit naar mijn docenten dhr. Sietze Bottema en dhr. Wim Hilbrants die feedback hebben gegeven op het verslag. Verder bedank ik dhr. Michel Saakes, hij heeft als milieu-expert het grootste deel van mijn verslag nagelezen op fouten. Door zijn adviezen is de kwaliteit van mijn rapport verhoogd. Ten slotte gaat mijn dank uit naar dhr. Jacob Dijkstra, hij heeft vanuit de gemeente Ameland de taak van afstudeerbegeleider op zich genomen. Met hem heb ik veel gepraat over energiezaken en hij hielp mij aan contactgegevens van verschillende partijen.

Ik hoop dat het lezen van dit rapport u zal helpen meer inzicht te verkrijgen in de dynamische wereld van de energieopslag. Ik wens u veel plezier met het lezen van dit rapport.

Bram Commandeur
Student Milieukunde, energiemangement en klimaat

Steenwijk, juni 2015

Samenvatting

In dit onderzoek is gekeken naar de verschillende technieken om elektriciteit op te slaan en onderzocht is of deze technieken geschikt zouden kunnen zijn voor toepassing op het Nederlandse Waddeneiland Ameland. Dit is relevant in verband met de energiedoelstelling van de gemeente Ameland (energieneutraal zijn in 2020) en de maximale belasting van het elektriciteitsnet op Ameland. De hoofdvraag van het onderzoek is: welke elektriciteit opslagtechnieken zijn het geschiktst voor gebruik op Ameland en hoe kunnen deze technieken worden toegepast? Een antwoord op deze hoofdvraag wordt verkregen met behulp van de volgende drie onderzoeksvragen. Welke elektriciteit opslagtechnieken zijn er? Welke opslagtechnieken zijn geschikt voor toepassing op Ameland? Hoe kunnen deze opslagtechnieken worden toegepast op Ameland? De indeling van het onderzoeksrapport is gebaseerd op de drie onderzoeksvragen. Er wordt gebruik gemaakt van verschillende dataverzamelmethode, namelijk interview en literatuuronderzoek. Hoofdstuk 2 geeft met een beknopte beschrijving van opslagtechnieken meer inzicht in de technische werking van opslagmethodes. Deze worden ingedeeld in 4 categorieën: chemische, mechanische, elektromagnetische en thermische energieopslag. Er wordt verwezen naar technieken die afvallen in de eerste schifting en naar technieken die mogelijk in de toekomst interessant zijn. Deze worden opgenomen in de bijlagen en worden niet beoordeeld en behandeld. Zestien technieken komen door de eerste schifting. In hoofdstuk 3 worden de zestien technieken beschreven op basis van dertien verschillende criteria. Deze dertien criteria en de relevantie van deze criteria worden beschreven. Uitgesloten criteria passeren de revue. Wat volgt is een beoordeling van de technieken. Bij deze beoordeling wordt gebruik gemaakt van twee Multi Criteria Analyses (MCA's). Uit de MCA's blijkt dat de zeezoutbatterij (Na-Cl batterij) het geschiktst lijkt te zijn voor toepassing op Ameland, gevolgd door CES en het vliegwiel. De geschiktheid van de zeezoutbatterij is niet hard te maken, omdat er erg weinig ervaring mee is en er weinig informatie beschikbaar is. In hoofdstuk 4 worden 3 toepassingsontwerpen met energieopslag weergegeven. Dit zijn twee kleinschalige toepassingsontwerpen (een met Na-Cl batterijen en een met Ni-Fe batterijen) en een grootschalig toepassingsontwerp (met Na-Cl batterijen). Diverse organisatorische en overige aspecten komen aan bod. In de conclusie wordt aangegeven dat er veel technieken zijn waarmee elektriciteit opgeslagen kan worden, maar dat deze vaak ongeschikt zijn voor toepassing op Ameland. De meeste technieken zijn te duur of vallen af door andere criteria. Op basis van de gemaakte MCA's wordt geconcludeerd dat de Na-Cl batterij, CES en het vliegwiel de geschiktste technieken lijken te zijn voor toepassing op Ameland. Ook wordt geconcludeerd dat een MCA alleen niet als basis kan dienen voor een goede keuze van opslagtechniek. In de discussie worden nog enkele zwaktes van het rapport behandeld. Zoals de prijsopbouw van elektriciteit opslagtechnieken en het ontbreken van gegevens over opslagtechnieken. Aanbeveling voor de gemeente Ameland is: zich te oriënteren op een kleinschalige proefopstelling met zeezoutbatterijen, maar voor gebruik eerst meer informatie en ervaringen met de zeezoutbatterijen af te wachten. In de bijlagen volgen nog enkele tabellen met technieken en berekeningen.

Abstract

In this research different methods to store electricity are examined. Considered is if these methods are suitable for use on the Dutch island Ameland. This research is very relevant with respect to the energy targets of the municipality of Ameland (to be energy neutral in 2020) and with respect to the maximum load on the electricity grid of Ameland. The main question of this research is: what electricity storage techniques are best suitable for use on Ameland and how can these techniques be applied? An answer on this main question is obtained by answering the following three research questions. Which electricity storage techniques are there? Which techniques are best suitable for use on Ameland? How could these storage techniques be applied on Ameland?

This research is structured according to these research questions. Different methods for data collection are used: desk research and literature study. In chapter 2 a short description of the energy storage techniques is given. The techniques are classified into four categories: chemical, mechanical, electromagnetic and thermal energy storage. In the first division quite a lot of electricity techniques are either classified as not suitable for use on Ameland or as techniques which might be interesting in future. These techniques are added in the attachments. Sixteen techniques are considered as possibly suitable for use on Ameland and are further reviewed.

In chapter 3 the sixteen techniques are reviewed by using thirteen different criteria.

These thirteen criteria and the relevance of these criteria are described. Excluded criteria are also mentioned. The different techniques are examined using two different Multi Criteria Analyses. From these MCA's it seems that the saltwater battery is best suitable for use on Ameland, followed by the Cryogen Energy Storage and the flywheel. The suitability of the saltwater battery is difficult to prove. This is because there is little experience with the saltwater battery and little information is available. In chapter 4 three application designs are shown. Two small scale application designs (one with Na-Cl batteries and one with Ni-Fe batteries) and one big scale application design (with Na-Cl batteries). Some organizational matters are discussed. Concluded is that there are many techniques wherewith electricity can be stored, but that these techniques are often not suitable for use on Ameland. Most of the techniques are too expensive or can be excluded on base of other criteria. The techniques which seem to be most suitable for use on Ameland are the saltwater battery, followed by the Cryogen Energy Storage and the flywheel. There is also concluded that a MCA cannot serve as the only basis for a good choice for energy storage. In the discussion some weaknesses of this report are reviewed, such as prices of energy storage techniques and missing information about storage techniques. The recommendation for the municipality of Ameland that is given in this report is: to orientate on a small scale pilot project with saltwater batteries on Ameland. But first wait for more information and experiences with the saltwater battery, before use. In the attachments different tables with techniques are displayed and some calculations used in chapter 4.

Inhoudsopgave

Voorwoord	2
Samenvatting	3
Abstract.....	4
Inhoudsopgave	5
1 Inleiding.....	7
2. De verschillende elektriciteit opslagtechnieken	9
2.1 Het onderzoek naar opslagtechnieken	9
2.2 Categorisatie, beschrijving en een eerste schifting van ELOPS.....	9
2.2.1 Categorisatie van de verschillende ELOPS	9
2.2.2 Beknopte beschrijving van de ELOPS naar categorie.....	10
2.2.3 Gekozen elektriciteit opslagtechnieken	11
3 De beoordeling van de verschillende ELOPS.....	13
3.1 De verschillende criteria	13
3.2 Relevantie gekozen criteria en uitgesloten criteria	16
3.2.1 Relevantie gekozen criteria	16
3.2.2 Uitgesloten criteria en overige opmerkingen.....	19
3.3 Gegevenstabellen en Multi Criteria Analyses	20
3.3.1 Gegevenstabellen	20
3.3.2 Multi Criteria Analyses	25
4 Toepassing van elektriciteitsopslag op Ameland	30
4.1 De geschiktste techniek en zijn werking	30
4.2.1 De geschiktste techniek.....	30
4.2.1 Werking van een elektrochemische cel	30
4.2.2 Mogelijkheid tot verhogen van de capaciteit en voltage van batterijen	31
4.2 Smart-grid als conceptueel framework	33
4.3 Toepassings ontwerpen	34
4.3.1 Afwegingen en mogelijkheden bij het kiezen van een energieopslag ontwerp	34
4.3.2 Kleinschalige toepassingsontwerpen Na-Cl en Ni-Fe.....	35

4.3.3 Grootschalig toepassingsontwerp met zeezoutbatterijen	40
4.4 Organisatorische en overige aspecten.....	43
5 Conclusies.....	44
6 Discussie en aanbeveling	45
Bibliografie	47
Bijlagen	51
I Tabel 10 Eerste schifting van elektriciteit opslagtechnieken.....	51
II Tabel 11 Overzicht toekomstige opslagtechnieken.....	54
III Berekeningen.....	55

1 Inleiding

De aanleiding voor het schrijven van dit onderzoeksrapport is te vinden in de ambitie van de gemeente Ameland om in het jaar 2020 energieonafhankelijk te zijn. Bij het realiseren van een energieonafhankelijk eiland komen veel zaken kijken. Naast het realiseren van genoeg duurzame opwek-capaciteit, is één van de belangrijkste zaken de aanwezigheid van energieopslag. De bouw van een nieuw zonnepark van 6 MW zal een enorme boost geven aan de totale duurzame elektriciteitsproductie op Ameland. Daarbij wordt er steeds meer duurzame energie (elektriciteit) opgewekt wordt op het eiland door particulieren en zakelijke verbruikers. Met de bouw van dit zonnepark komt wel de maximale in te voeden hoeveelheid elektriciteit op het net in zicht. Door nieuwe elektriciteitskabels neer te leggen met een verhoogd voltage zou meer elektriciteit kunnen worden geleverd, maar dit is zeer kostbaar. Dit wordt een probleem dat (deels) opgevangen zou kunnen worden door het ‘teveel’ aan geleverde energie aan het net tijdelijk op te slaan doormiddel van energieopslag technieken. Deze energieopslag is echter nog niet aanwezig op het eiland en er is ook nog geen onderzoek naar gedaan. Dit vormde de probleemstelling en de aanleiding van dit onderzoek.

De doelstelling van dit onderzoek is als volgt geformuleerd. *Inzicht te krijgen in verschillende elektriciteit opslagtechnieken en deze kennis gebruiken om de gemeente Ameland te informeren over elektriciteit opslagtechnieken die het geschikt zijn voor toepassing op Ameland. Wanneer dit doel gehaald wordt, zal de gemeente Ameland beter in staat zijn om haar doelstelling te halen: energieonafhankelijkheid op Ameland vóór het jaar 2020. De hoofdvraag van het onderzoek is: welke elektriciteit opslagtechnieken zijn het geschiktst voor gebruik op Ameland en hoe kunnen deze technieken worden toegepast?*

Er wordt voor de beantwoording van de hoofdvraag een antwoord gegeven op drie onderzoeksvragen.

- 1 Welke elektriciteit opslagtechnieken zijn er?
- 2 Welke elektriciteit opslagtechnieken zijn geschikt voor toepassing op Ameland?
- 3 Hoe kunnen deze elektriciteit opslagtechnieken worden toegepast op Ameland?

De antwoorden op deze onderzoeksvragen zijn niet alleen relevant voor de gemeente Ameland, maar ook voor andere gemeenten/overheden. Ook voor andere instanties die bezig zijn met decentrale energieopwekking en energieopslag is dit onderzoek relevant. Daarnaast kan dit onderzoeksproject interessant zijn voor docenten en medestudenten die graag hun kennis over elektriciteit opslag willen vergroten. De indeling van het onderzoeksrapport is gebaseerd op de drie onderzoeksvragen.

In hoofdstuk 2 zal dit onderzoek ingaan op de verschillende soorten elektriciteit opslagtechnieken, deze zullen worden ingedeeld in verschillende categorieën.

In hoofdstuk 3 worden gegevens over opslagtechnieken weergegeven en er wordt een analyse gegeven over de geschiktheid van deze technieken. In hoofdstuk 4 wordt gekeken hoe de geschiktste technieken gebruikt zouden kunnen worden op Ameland.

De dataverzamelmethode van dit onderzoek zijn: interview en literatuuronderzoek. De personen/partijen welke worden geïnterviewd worden zijn netbeheerders, medewerker gemeente Ameland, producenten van elektriciteit opslagtechnieken. Daarnaast wordt er veel gebruik gemaakt van literatuuronderzoek. In dit onderzoek worden verschillende bronnen gebruikt, boeken, wetenschappelijke artikelen, onderzoeksrapporten en analyses, artikelen uit vakbladen, radio/tv documentaires, krantenartikelen en mondelinge bronnen (zoals interviews). Dit om een zo accuraat mogelijk beeld te geven over de mogelijkheden van elektriciteit opslag. De tijd waarbinnen dit onderzoek (inclusief voorafgaand plan van aanpak) is uitgevoerd is achttien weken.

2. De verschillende elektriciteit opslagtechnieken

2.1 Het onderzoek naar opslagtechnieken

Bij het onderzoek naar geschikte elektriciteit opslagtechnieken wordt gebruik gemaakt van de volgende definitie.

Een elektriciteit opslagtechniek (ELOPS) is een techniek die in staat is om van primaire energie (wind/zon/beweging) de naar secundaire omgezette energie (elektriciteit) op te slaan in de vorm van chemische energie, mechanische energie, elektromagnetische energie of thermische energie, zodanig dat de opgeslagen energie op een later tijdstip weer toegepast kan worden.

2.2 Categorijsatie, beschrijving en een eerste schifting van ELOPS

2.2.1 Categorijsatie van de verschillende ELOPS

Om overzicht te bewaren in de verschillende technieken is het praktisch om deze direct te categoriseren. Bij het categoriseren van de verschillende technieken is dankbaar gebruik gemaakt van bestaande categorisaties en indelingen.

De categorieën zijn: chemische, mechanische, elektromagnetische en thermische energieopslag. Voor de chemische opslagtechnieken zijn er de volgende subcategorieën, batterijen, flowbatterijen en brandstofcellen. Voor mechanische en elektromagnetische energieopslag wordt er in dit rapport geen gebruik gemaakt van subcategorieën. Voor de categorie thermische energieopslag zijn er de volgende subcategorieën: lage temperatuur opslag en hoge temperatuur opslag (tabel 1).

Tabel 1 Categorieën en subcategorieën energieopslag

Categorie	Subcategorieën
Chemisch	-Batterijen -Flowbatterijen -Brandstofcellen
Mechanisch	--
Elektromagnetisch	--
Thermisch	-Lage temperatuur opslag -Hoge temperatuur opslag

2.2.2 Beknopte beschrijving van de ELOPS naar categorie

Chemische energieopslag: Batterijen, flow batterijen en brandstofcellen

Door middel van een elektrochemische omzetting wordt elektriciteit omgezet in chemische energie. Deze chemische energie kan in onder andere herlaadbare batterijen opgeslagen worden. Batterijen zijn in staat om de chemische energie door middel van een elektrochemische omzetting weer om te zetten in elektriciteit (Ibrahim, Ilinca, & Perron, 2008). In het geval van flow batterijen functioneren niet de elektroden, maar chemische bestandsdelen van de elektrolytoplossing als opslag (Ouwehand, Papa, Gilijamse, & Geus, 2009). De elektrochemische reactie kan omgekeerd worden uitgevoerd (laden-ontladen). Door grote reservoirs te gebruiken en veel cellen aan elkaar te koppelen, wordt het vermogen van de energieopslag vergroot. De energie kan vervolgens vrijgegeven worden door de elektrolyt oplossing in de reservoirs te pompen (Ibrahim, Ilinca, & Perron, 2008). Voor het gebruik in brandstofcellen zou opgewekte elektriciteit door middel van elektrolyse omgezet kunnen worden in waterstof. De gevormde waterstof kan in een brandstofcel omgezet worden in elektriciteit en water (Ouwehand, Papa, Gilijamse, & Geus, 2009). Het is in principe mogelijk om de gevormde waterstof niet om te zetten in elektriciteit, maar te voeden in het aardgasnetwerk. Hierdoor zou de waterstof door conventionele rendementsketels omgezet worden in warmte.

Mechanische energieopslag

Met behulp van diverse mechanische opslagmethoden, kan elektrische of andere (beweging)energie worden opgeslagen. Voorbeelden van mechanische energieopslag naast het vliegwiel zijn: pompaccumulatie, CAES en het energie-eiland (Ouwehand, Papa, Gilijamse, & Geus, 2009). Een groot voordeel van mechanische energieopslag is dat er vaak niet gewerkt hoeft te worden met veel chemicaliën/zware metalen. Het is een totaal ander principe dan bijvoorbeeld chemische energieopslag

Elektromagnetische energieopslag

Elektriciteit wordt direct opgeslagen (Ouwehand, Papa, Gilijamse, & Geus, 2009).

In het geval van (super)condensatoren wordt de elektriciteit opgeslagen in een elektrische dubbellaag. (Saakes, 2015). In het geval van supergeleidende magnetische energie opslag (SMES), wordt gebruik gemaakt van supergeleiding om energie op te slaan. De energie wordt hiermee in feite opgeslagen als magnetische-veldenergie (Ouwehand, Papa, Gilijamse, & Geus, 2009).

Thermische energieopslag

Bij deze vorm van energieopslag, wordt energie opgeslagen in de vorm van temperatuurverschil. Door koelhuizen bijvoorbeeld extra te koelen bij een stroomoverschot, wordt de elektriciteit gebufferd in koude- energie opslag. Het is daarna niet goed meer mogelijk om deze energie weer om te zetten in elektriciteit. Een andere methode is de cryogene energie opslag (CES) methode. Deze methode maakt gebruik van elektriciteit om cryogene stoffen te produceren (bijvoorbeeld stikstof of vloeibare lucht). Wanneer er veel vraag is naar elektriciteit,

wordt de energie die opgeslagen is in de cryogene stoffen vrijgegeven (Ouweland, Papa, Gilijamse, & Geus, 2009). Er bestaat ook hoge temperatuur energie opslag. Hierbij kun je denken aan gesmolten zouten, beton en fase transformatie materialen (PCM) (Haisheng Chen, 2009). Deze laatst genoemde technologieën worden in dit rapport niet behandeld. Dit omdat de omzetting van elektriciteit naar genoemde opslagmethodes een lage efficiëntie heeft, vanwege veel omzettingstappen. Elke omzetting gaat gepaard met een zekere efficiëntie, dit betekent in de praktijk vaak hoe meer omzettingen hoe lager de uiteindelijke efficiëntie van de techniek.

2.2.3 Gekozen elektriciteit opslagtechnieken

Er zijn zeer veel technieken om elektriciteit mee op te slaan. In dit rapport zullen niet alle technieken behandeld/beoordeeld worden. Redenen daarvoor kunnen zijn dat de techniek bijvoorbeeld veel te grootschalig en te kostbaar is om toegepast te worden op Ameland. Om een bijdrage te kunnen leveren aan de energiedoelstellingen van Ameland, moet de techniek al toegepast kunnen worden op Ameland voor het jaar 2020. Deze of andere redenen vormden de basis voor de eerste schifting van technieken die toegepast zouden kunnen worden op Ameland. De technieken uit deze eerste schifting zijn weergegeven in tabel 10 in de bijlagen. Hier wordt ook nog eens vermeld wat de werking van de techniek is en wat de reden van afvallen is. Een verkorte opsomming van de technieken die afvallen in de eerste schifting: Pomp Accumulatie Centrale (PAC), Compressed Air Energy Storage (CAES), energie eiland, verschillende brandstofcellen (direct methanol, molten carbonate, solid oxide), diverse nikkel batterijen (Ni-Zn en NiH₂), zilver-zink batterij, ijzer-chroom batterij, gesmolten Na-Cl batterij, Natrium-ion batterij, ijzer-chroom flow batterij.

Naast de technieken die bij de eerste schifting uitgesloten werden voor beoordeling is in de bijlagen ook nog een tabel opgenomen met 'toekomstige technieken' (tabel 11). Deze technieken zijn bijvoorbeeld alleen nog maar in het laboratorium getest of bestaan als theoretisch model. Toepassing van deze technieken op Ameland voor 2020 is bij deze technieken vaak niet erg waarschijnlijk. Toch zijn deze technieken in tabel 11 in de bijlagen opgenomen omdat het mogelijk is dat deze technieken in de toekomst interessant worden voor toepassing op Ameland. Ook staan de 'laatste innovaties' van sommige technieken vermeld. Een verkorte opsomming van toekomstige technieken: Edison batterij (Ni-Fe), Zeezout-batterij (Na-Cl), Micro CAES, Nano-super condensatoren, verbeterde vliegwielen, H₂/Br Flow batterij, verbeterde loodzuurbatterij, verbeterde Li-ion, Li-air en anderen, nieuwe concepten (batterijen met nieuwe elementen etc.), solar-freezer, en de zweeftrein (energy train).

In tabel 2 worden de gekozen ELOPS weergegeven. Dit zijn de technieken die op korte termijn (voor 2020) interessant zouden kunnen zijn voor toepassing op Ameland, waaronder sommige 'toekomstige technieken'. Om tot het overzicht van ELOPS te komen is gebruikt gemaakt van meerdere bronnen. De twee belangrijkste hiervan zijn: (Haisheng Chen, 2009) en (Abbas A.

Akhil, 2015). De eerste bron is een wetenschappelijk rapport waarin een kritische beoordeling wordt gegeven over de huidige ELOPS. De tweede bron is een uitgebreide verhandeling over ELOPS, met een beoordeling van deze technieken. Naast deze twee bronnen is gebruik gemaakt van een eerder gemaakt overzicht (F. Pierie, 2015), een boek (Ouwehand, Papa, Gilijamse, & Geus, 2009) en diverse websites (The seasalt battery, 2015), (Nieuwenhuis, 2015).

Tabel 2 Overzicht gekozen opslagtechnieken

Categorie	Subcategorie	Methode	Afkorting en/of triviale naamgeving
1 Chemische energieopslag	Batterijen	1 Lood-zuur batterij	(Pb)
		2 Nikkel-Cadmium en Nikkel-Metaal-Hydride batterij	(Ni-Cd en Ni-MH)
		3 Lithium-Ion batterij	(Li-ion)
		4 Natrium-Chloride batterij	(Na-Cl, zeezoutbatterij)
		5 Nikkel-IJzer batterij	(Ni-Fe, Edison batterij)
		6 Natrium-Zwavel batterij	(Na-S)
		7 Natrium-Nikkel-Chloride batterij	(Na-Ni-Cl ₂ , ZEBRA)
	Flow batterijen	8 Zink-Bromide flow batterij	(Zn-Br)
		9 Vanadium-Redox flow batterij	(VRB)
		10 Polysulphide-Bromide flow Batterij	(PSB, soms genoemd regenesys flow batterij)
	Brandstofcel	11 Metaal-lucht batterij	(Metaal-lucht batterij) ¹
		12 Waterstof	(H ₂)
2 Mechanische energieopslag	(-.-)	13 Vlieg wiel	(vliegwiel)
3 Elektromagnetische energieopslag	(-.-)	14 Supercondensator 15 Supergeleidende magnetische energie opslag	(Supercondensator) (SMES)
4 Thermische energieopslag	Lage temperatuur elektriciteit opslag	16 Cryogene Energie Opslag / (Liquid Air Energy Storage)	(CES, soms genoemd LAES)

¹ De metaal lucht batterij wordt in dit onderzoek ingedeeld onder de subcategorie brandstofcellen, de metaal lucht batterij wordt soms ook ingedeeld bij de subcategorie batterijen.

3 De beoordeling van de verschillende ELOPS

3.1 De verschillende criteria

Voordat de ELOPS beschreven (in de gegevenstabellen) en beoordeeld zullen worden zal eerst een beschrijving gegeven worden van de te criteria waarop de ELOPS beoordeeld zullen gaan worden. Er zijn veel zaken waarop een ELOPS beoordeeld kan worden. Daarom is gekozen om op basis van dertien criteria en enkele meer specifieke criteria te komen tot een conclusie over de toepasbaarheid van de techniek op Ameland. Uit de gegevenstabellen zijn nog andere zaken af te leiden. Zo is een indicatie van de bruikbare opslagcapaciteit te verkrijgen door het maximaal te leveren vermogen te vermenigvuldigen met de ontlaadtijd.

Maximaal te leveren vermogen

Het maximale te leveren vermogen (P_{max}) dat uit de ELOPS onttrokken kan worden (Ibrahim, Ilinca, & Perron, 2008). De eenheid waarin de te leveren vermogen van energie meestal wordt uitgedrukt is W, kW, of MW.

Ontlaadtijd

De ontlaadtijd geeft een indicatie over de hoeveelheid tijd waarop op maximum vermogen energie geleverd kan worden. Hierbij moet rekening gehouden worden met de ontlaadgrens van de techniek. Sommige opslagtechnieken kunnen volledig ontladen worden (zoals het vliegwiel) zonder dat dit ten koste gaat van de opslagtechniek. Andere technieken kunnen beter niet volledig ontladen worden (zoals veel batterijen) omdat dit anders ten koste van de opslagtechniek gaat (Ibrahim, Ilinca, & Perron, 2008).

Efficiëntie (cyclus efficiëntie)

De ratio tussen de energie die het opslagsysteem ingaat en de energie die benut kan worden. De efficiëntie is te berekenen door de hoeveelheid geleverde energie uit de opslag te delen door de totale hoeveelheid opgeslagen energie. Systemen hebben laad, 'no-load' en zelfontlading verliezen, hier moet rekening mee gehouden te worden. De berekening van de efficiëntie van het systeem wordt vaak te simpel voorgesteld (Ibrahim, Ilinca, & Perron, 2008). Zo moet er ook rekening gehouden worden met de ontlaadgrens van sommige technieken (zie ook kopje ontlaadtijd).

Zelfontlading per dag

Het percentage van de energie dat eerst was opgeslagen, maar welke is verdwenen uit de opslag over een gegeven hoeveelheid tijd van niet gebruik (Ibrahim, Ilinca, & Perron, 2008). In dit rapport wordt de zelfontlading uitgedrukt in percentage zelfontlading per dag.

Levensduur in jaren

Het verwachte aantal jaren dat een opslagtechniek energie kan leveren.

Levensduur in cycli

Het aantal keren dat een opslagtechniek energie kan opslaan en weer kan vrijgeven. Dit wordt uitgedrukt in de hoeveelheid cycli (laden/ontladen) die een systeem meegaat (Ibrahim, Ilinca, & Perron, 2008).

Toepassingsgebied van energieopslag

Er zijn verschillende indelingen naar toepassingsgebieden te vinden in diverse rapporten. De indeling naar toepassingsgebied is een indeling naar waar de energieopslag typisch voor gebruikt kan worden. In dit rapport zal een indeling gebruikt worden zoals deze gevonden is in het rapport over karakteristieken van opslagtechnieken (Ibrahim, Ilinca, & Perron, 2008). Deze komt grotendeels overeen met een ander rapport (Haisheng Chen, 2009). Uit dit laatste rapport zijn ook de vermogensseenheden verkregen zoals deze in onderstaande indeling zijn verwerkt.

-Power Quality (PQ)

In dit toepassingsgebied, wordt opgeslagen energie voor maar enkele seconden of minder gebruikt. Dit om te voorzien in een goede kwaliteit energielevering.

Het te leveren vermogen voor dit soort toepassingen is meestal kleiner dan 1MW.

-Bridging Power (BrP)

Buffer en noodopslag. In dit toepassingsgebied, wordt opgeslagen energie voor seconden tot minuten gebruikt. Om de dienstverlening van energielevering te garanderen. Bijvoorbeeld bij een tijdelijke stroomstoring, of een omschakeling van energieaanbod. Een te leveren vermogen van 100kW-10MW is typisch voor dit soort toepassingen.

-Energy management (EM)

In dit toepassingsgebied, wordt de opslag gebruikt om vraag en aanbod van energie beter op elkaar af te stemmen. Bij lage energievraag, kan energie opgeslagen worden, om deze bij een hoge energievraag weer te verkopen. Een te leveren vermogen van 10-100 MW is typisch voor dit soort toepassingen.

Specifieke energie

De specifieke energie wordt uitgedrukt in Wh/kg, de hoeveelheid energie opgeslagen gedeeld door de massa in kg van de energieopslag. In het rapport (Haisheng Chen, 2009) wordt gesproken over de energiedichtheid. In dit onderzoek wordt ervoor gekozen om te spreken over specifieke energie.

Energiedichtheid

De energiedichtheid wordt uitgedrukt in wattuur per liter, Wh/L, de hoeveelheid energie die opgeslagen wordt gedeeld door het inhoudsvolume van de energieopslag.

Prijs per kWh

De hoeveelheid energie die kan worden opgeslagen wordt uitgedrukt in kWh. De systeemkosten voor een kWh opslagcapaciteit zijn uitgedrukt in dollar of euro/kWh (Haisheng Chen, 2009). In dit rapport wordt gebruik gemaakt van dollar/kWh.

Zie ook overige opmerkingen, onder kopje 3.2.2..

Prijs per cyclus

De kosten per kWh gedeeld door de levensduur (aantal cycli) van het opslagsysteem.

De prijs per cyclus is uitgedrukt in eurocent of dollarcent per kWh (Haisheng Chen, 2009).

Zie ook overige opmerkingen, onder kopje 3.2.2.

Technische volwassenheid

De technische volwassenheid van de techniek zegt iets over hoe doorontwikkeld de techniek al is. De technische volwassenheid is in te delen in drie verschillende groepen (Haisheng Chen, 2009).

- Volwassen technieken (de techniek is uitontwikkeld, geen grote innovaties te verwachten)
- Ontwikkelde technieken (de techniek is ontwikkeld, maar verdere doorontwikkeling is goed mogelijk)
- Onvolwassen technieken (de techniek bevindt zich in de kinderschoenen en is volop in ontwikkeling)

Milieuaspecten

Geeft aan wat de milieuscore is van deze opslagtechniek.

Zijn er bepaalde (nadelige) milieuaspecten die te maken hebben met deze techniek?

Worden er zeldzame metalen gebruikt? Hoe zit het met de uitstoot van schadelijke stoffen?

Is er sprake van schadelijke straling? Dit soort kenmerken worden in dit kopje meegenomen. Op basis van dergelijke milieuaspecten volgt een milieukundige beoordeling van de techniek.

S= Slecht O=Onvoldoende, +- = Gemiddeld, + =Bovengemiddeld, ++ =Goed

--	Slecht
-	Onvoldoende
+-	Gemiddeld
+	Bovengemiddeld
++	Goed

Overige specifieke criteria

Uit bovenstaande gegevens zijn veel zaken te concluderen. Om het een en ander nog wat verder af te bakenen, zijn in overleg met gemeente Ameland nog een aantal specifieke criteria vastgesteld die van doorslaggevend belang zijn voor de gemeente Ameland. Deze criteria zullen als laatste in een aparte MCA behandeld worden.

De kosten

- Per kWh opslagcapaciteit mogen niet hoger zijn dan \$250- .
- Per kWh (in cyclus) niet meer bedragen dan \$0,07

De efficiëntie

- Minimaal 75%

Zelfontlading per dag

<10%

Levensduur

10> jaar

Levensduur aantal cycli

>5000

Milieuaspecten

Minimum score +

3.2 Relevantie gekozen criteria en uitgesloten criteria

In dit kopje wordt uitgelegd waarom juist *deze* 12 criteria zijn gekozen om te komen tot een beoordeling. Oftewel: wat is de relevantie van de gekozen criteria? Er zal hierbij niet heel specifiek naar elk van de gekozen criteria gekeken worden, maar er zal een algemeen beeld geschetst worden. Voor de volledigheid zullen ook enkele uitgesloten criteria kort worden weergegeven.

3.2.1 Relevantie gekozen criteria

Opslagtechnieken hebben een bepaald vermogen dat onttrokken kan worden uit de opslagcapaciteit, dit wordt genoemd het *te leveren vermogen*. Wanneer je dit te leveren vermogen combineert met de *ontlaadtijd*, kan iets gezegd worden over de maximale hoeveelheid energie die gedurende een bepaalde periode geleverd kan worden. Dit kan bijvoorbeeld interessant zijn om te weten in het geval dat je de energieopslag als noodvoorziening gebruikt om elektriciteit te leveren of bijvoorbeeld in het geval van een tijdelijk

tekort aan elektriciteit. Hierbij moet wel verteld worden dat de energieopslag een (zeer) snelle reactietijd moet hebben om gebruikt te kunnen worden als noodvoorziening.

De *zelfontlading* per dag geeft onder andere iets aan over de beschikbaarheid van de energie. Wanneer de ELOPS een hoge zelfontlading heeft, betekent dit dat de energie zoals opgeslagen maar een korte tijd beschikbaar is. Een hoge zelfontlading is in sommige gevallen niet zo erg, in het geval van Ameland is een hoge zelfontlading niet praktisch. De gemeente Ameland wil energie-onafhankelijk zijn. Om niet alleen overdag, maar ook s 'avonds elektriciteit geleverd te kunnen krijgen moet energie opgeslagen worden en langere tijd gebruikt kunnen worden.

De *efficiëntie* van een techniek kan iets zeggen over de mate waarin de gemeente Ameland in staat is om haar energiedoelstellingen te bereiken. Een hogere efficiëntie van de ELOPS kan er namelijk voor zorgen dat er minder duurzame productiecapaciteit nodig is. Dit omdat een ELOPS ervoor zorgt dat energie bij pieken in duurzame elektriciteitsproductie opgeslagen wordt en toegepast wordt op een ander tijdstip. Vanuit dit gezichtspunt gezien kan met enige noodzakelijke nuance elke kWh opslagcapaciteit gezien worden als een kW productiecapaciteit. Naast dit interessante gegeven is de efficiëntie van een ELOPS van belang in het kader van duurzaamheid. Vanuit duurzaamheidsoogpunt gezien, is een zo hoog mogelijke efficiëntie gewenst. Een hoge efficiëntie betekent minder energieverlies, een vermindering van energieverlies betekent een besparing op het gebruik van fossiele brandstoffen, dit betekent minder CO2 emissies. Let op: opslagefficiëntie is wel iets anders dan toepassing efficiëntie, dit laatste begrip zou gedefinieerd kunnen worden als het percentage van de opgeslagen energie dat daadwerkelijk is toegepast op Ameland. Wanneer in het geval van een vliegwiel de opslagefficiëntie 90% is, maar de toepassing efficiëntie is 0%, is de totale efficiëntie toch 0%.

De *levensduur* van een techniek is een criterium dat heel belangrijk kan zijn voor beleidsmakers. Beleidsmakers willen namelijk graag een inschatting kunnen maken over hoe lang een techniek ongeveer mee gaat en dit inpassen in beleid. Ook is de levensduur van een techniek van belang om de afschrijving te kunnen berekenen en zegt het iets over de duurzaamheid van de techniek. Hoewel veel opslagtechnieken gerecycled kunnen worden, is een lange levensduur toch gewenst. De verwerking van opslagtechnieken kost energie en de efficiëntie van recycling processen speelt mee. Deze kan hoog liggen, maar zal toch lager liggen dan 100%.

Het *toepassingsgebied* van de ELOPS kan belangrijk zijn in de bepaling van de strategie van de gemeente. Hierbij is een kanttekening wel dat energieopslag maatwerk is. Op basis van de grove indeling naar toepassingsgebied die is gegeven in tabellen 3 en 4, zou nooit de hele opslagstrategie van de gemeente bepaald kunnen worden. Toch geven toepassingsgebieden een grove indicatie over de mogelijke toepassingen van de techniek. Kiest de gemeente bijvoorbeeld voor energieopslag voor power quality, dan is het voornaamste doel van de energieopslag het balanceren van het elektriciteitsnet en niet zozeer energieonafhankelijkheid. Het toepassingsgebied energiemangement lijkt het meest relevant voor de gemeente Ameland in het kader van energieonafhankelijkheid. Hierbij wordt vraag en aanbod van energie beter op

elkaar afgestemd.

Specifieke energie is een belangrijke parameter (Wh/kg) die iets zegt over de hoeveelheid gewicht die er nodig is om een bepaalde hoeveelheid energie op te kunnen slaan. Het weten van de specifieke energie kan van belang zijn in bijvoorbeeld het volgende scenario: toepassing van ELOPS in elektrische auto's. Het gewicht van de opslagtechnologie mag in dit scenario niet te hoog zijn, een hoge specifieke energie van de ELOPS is dan dus gewenst.

Energiedichtheid is een belangrijke parameter die iets zegt over de hoeveelheid ruimte die er nodig is om een bepaalde hoeveelheid energie op te kunnen slaan. Het weten van de waarde van de energiedichtheid kan van belang zijn in het volgende scenario: toepassing van ELOPS in vakantie(huur)woningen. In deze woningen is sprake van beperkte ruimte en is het dus praktisch om energieopslag toe te passen met een hoge energiedichtheid. Er is bewust gekozen om te kijken naar de waarde voor de energiedichtheid (Wh/L) in plaats van bijvoorbeeld de vermogensdichtheid (W/L). De reden hiervoor is dat de hoeveelheid energie die opgeslagen kan worden in het kader van de energiedoelstelling van de gemeente belangrijker is dan het vermogen van deze opslag. Ruimte is schaars op Ameland (ook omdat veel gebieden beschermd worden door natuurwetgeving, regelingen zoals Natura 2000). De hoeveelheid ruimte die de opslag technologie inneemt wordt daarom meteen relevant (zeker in het geval van grootschalige opslag, bij bijvoorbeeld het zonneveld). Ditzelfde gegeven zie je terug in de *prijs* van de energieopslagtechnologie. De prijs van de opslagtechnologie wordt uitgedrukt in dollar per kWh, er had gekozen kunnen worden om de prijs uit te drukken in dollar per kW. Omdat de hoeveelheid energie die opgeslagen kan worden interessanter is in het kader van de energiedoelstellingen, dan het te leveren vermogen van de techniek is hier voor gekozen. De prijs is daarnaast belangrijk omdat de gemeente niet zomaar met geld kan smijten, maar nauwgezet op haar inkomsten en uitgaven moet letten. Een ELOPS moet passen binnen de financiële begroting van de gemeente.

De *technische volwassenheid* is belangrijk in het kader van het behalen van de doelstellingen vóór 2020. Wanneer een techniek technisch nog zeer onvolwassen is, kan dit een mogelijke bedreiging vormen voor het kunnen toepassen van de techniek vóór 2020. Dit hoeft natuurlijk niet altijd een gevaar te zijn, maar het kan het wel zijn. Daarnaast geeft technische volwassenheid iets aan over de mogelijkheid tot doorontwikkeling van de techniek. Wanneer een techniek onvolwassen is, lijkt het logisch dat er doorontwikkeling mogelijk is. Het kan dan (afhankelijk van de doelstellingen van de gemeente) verstandig zijn om te wachten met de implementatie van de techniek, totdat de techniek verder ontwikkeld is.

Hoewel *milieuaspecten* pas als laatste criterium in tabel 4 te vinden is, neemt dit criterium een bijzondere plaats in. Ameland profileert zich als een duurzaam en groen eiland. Het vergeten van de milieuaspecten van een techniek kan funest zijn. Het is niet zozeer een technisch criterium, maar neemt een belangrijke plaats in bij de publieke opinie. Een techniek die efficiënt is, goedkoop, met een lange levensduur, maar funest voor het milieu zal er (zeer) waarschijnlijk

toch niet komen. Dit is dus zeker een criterium waar rekening mee gehouden moet worden.

3.2.2 Uitgesloten criteria en overige opmerkingen

Uitgesloten criteria

Zoals aangegeven zouden de criteria die niet meegenomen zijn nog even kort behandeld worden. De meest relevante criteria zijn in dit rapport meegenomen, sommige van de criteria die niet meegenomen zijn hadden ook opgenomen kunnen worden in de gegevenstabellen (zie ook discussie). Dit is niet gedaan omdat: het anders een te omvangrijk rapport zou worden, niet alle criteria even belangrijk worden geacht en/of er niet genoeg informatie te vinden was over de criteria. De in dit rapport uitgesloten criteria zijn:

- W/kg, W/L (vermogensseenheden)
 - Geschikte opslagduur
 - prijs per kW
 - Onderhoudskosten
 - Operatie-temperatuur (bij welke temperatuur de techniek werkt)
 - Diepte van de ontlading
 - Autonomie (mate van zelfbestuurbaarheid)
 - Betrouwbaarheid
 - Reactietijd (zowel voor laden als ontladen)
- (Xing Luo, 2015), (Haisheng Chen, 2009), (Gonzalez, Llerena, Perez, Iglesias, & Macho, 2015)

Overige opmerkingen

- Met betrekking tot de milieuaspecten is het in de gevallen van de batterijen belangrijk te bedenken, dat recycling essentieel is (Xing Luo, 2015). Veel batterijen kunnen prima gerecycled worden.
- Nikkel-Cadmium en Nikkelmetaalhydride batterijen zijn gebaseerd op ongeveer hetzelfde principe. Een groot verschil is dat cadmium giftig is, daarom wordt steeds meer de overstap gemaakt naar Ni-MH batterijen, zie ook: (Ouweland, Papa, Gilijamse, & Geus, 2009).
- Er is rekening gehouden met de opslag efficiency om te komen tot de juiste kosten in tabel 4 (Haisheng Chen, 2009).
- De dollar naar euro omrekening is niet gemaakt. Bij de zeezoutbatterij is de prijs in euro's weergegeven. Voor de rest van de ELOPS zijn de prijzen uitgedrukt in dollar(cent).
- Wanneer er in dit rapport wordt gesproken over de zeezoutbatterij, wordt er gesproken over de Na-Cl batterij zoals deze is ontwikkeld door innovatiebureau dr. Ten en niet over andere, misschien gelijknamige, zoutwaterbatterijen.

3.3 Gegevenstabellen en Multi Criteria Analyses

3.3.1 Gegevenstabellen

In dit rapport zijn verschillende gegevens tabellen opgenomen (tabel 3 en 4). Deze zijn vergelijkbaar met de tabellen zoals deze te vinden zijn in het rapport van (Haisheng Chen, 2009) en (Xing Luo, 2015). De gegevenstabellen in dit rapport wijken op enkele zaken echter af. Zo is in dit rapport de keuze gemaakt om Ni-Fe batterijen en Na-Cl batterijen op te nemen in de gegevenstabellen. Zijn de milieuaspecten meer uitgewerkt. Is het toepassingsgebied van de ELOPS opgenomen in de tabellen. Daarnaast zijn de Nederlandstalige termen gebruikt in plaats van de Engelstalige termen, dit vergroot de leesbaarheid. De gegevenstabellen konden om praktische redenen niet goed weergegeven worden als een tabel, daarom is gekozen om deze afzonderlijk weer te geven. Niet voor alle gegevens is een waarde gevonden, dit is in de gegevenstabellen weergegeven door gebruik te maken van donkeroranje vlakken.

Tabel 3 gegevens over de technieken (tabel 1 van 2)

	Te leveren vermogen (Pmax) MW	Ontlaad Tijd	Cyclus efficiëntie	Zelfontlading per dag in procenten	Levensd uur (aantal jaren)	Levensd uur (aantal cycli)	Toepassingsgebied
Pb	0-20 (1)	Securen (1)	75-80% (1)	0,1-0,3% (1)	5-15 (1)	500-1000 (1)	BrP, EM (1 en 2)
Ni-Cd en Ni-MH	0-40 (1)	Securen (1)	60-70% (1)	0,2-0,6% (1)	10-20 (1)	2000-2500(1)	BrP, EM (1 en 2)
Li-ion	0-0,1 (1)	Minuren (1)	90-95% (1)	0,1-0,3% (1)	5-15 (1)	1000-10000(1)	BrP (1 en 2)
Na-Cl	Wordt getest. (3)	Minuren (3)	90%(3)	Small tot very small (3)	(>20 (4)) Nog niet bekend	>7000(1)	BrP, EM (1 en 2)
Ni-Fe	0,001-0,01 (2) 0-0,0	Minuren (2)	65-85% (2) 50% (5)	0,32-0,48% (2)	30-100 (2) 10-20 (3)	1000-8500 (3) >1000-3000 (2)	BrP (1 en 2)
Na-S	0,05-8 (1)	Securen (1)	75-90% (1)	+20% (1)	10-15 (1)	2500(1)	BrP (1 en 2)
ZEBRA, Na-Ni-Cl2	0-0,3 (1)	Securen (1)	85-90% (1)	+15% (1)	10-14 (1)	2500+(1)	BrP (1 en 2)
Zn-Br	0,05-2 (1)	Sec-10 uur (1)	65-75% (1)	Small (1)	5-10 (1)	2000+(1)	BrP (1 en 2)
VRB	0,03-3 (1)	Sec-10 uur (1)	75-85% (1)	Small (1)	5-10 (1)	12000+ (1)	BrP (1 en 2)
PSB	1-15 (1)	Sec-10 uur (1)	60-75% (1)	Small (1)	10-15 (1)		BrP, EM (1 en 2)
Metal-air	0-0,01 (1)	Sec-24 uur (1)	<60% (1)	Very small (1)		100-300 (1)	BrP (1 en 2)
H2	0-50 (1)	Sec->24 uur (1)	20-50% (1)	+ 0% (1)	5-15 (1)	1000+ (1)	EM (1 en 2)
Vlieg wiel	0-0,25 (1)	Milisecon-15 min (1)	90-93% (1)	100% (1)	15 (1)	20000+ (1)	PQ (1 en 2)

Super condensator	0-0,3 (1)	Milisec- 60 min (1)	90-97% (1)	20-40% (1)	10-30 (1)	50000+ (1)	PQ, BrP (1 en 2)
SMES	0,1-10 (1)	Milisec- 8 sec (1)	93-95% (1)	10-15% (1)	20+ (1)	100000+ (1)	PQ (1 en 2)
CES	0,01- 300 (1)	1-8 uur (1)	40-50% (1)	0,05-1,0% (1)	20-40 (1)		EM (1 en 2)
Gebruikte bronnen	1 (Haisheng Chen, 2009) 2 (Delft, 2014) 3 (Kortenaar, De zeezout batterij, een interview, 2015)	1 (Haisheng Chen, 2009) 2 (Nickel Iron batteries from BeUtility Free, 2013) 3 (Kortenaar, De zeezout batterij, een interview, 2015)	1 (Haisheng Chen, 2009) 2 (Soutar, 2012) 3 (The seasalt battery, 2015) 4 (Kortenaar, De zeezout batterij, een interview, 2015) 5 (Chakkara varty, Peryasami, Jegannathan, & Vasu, 1991)	1 (Haisheng Chen, 2009) 2 (Soutar, 2012) 3 (Kortenaar, De zeezout batterij, een interview, 2015)	1 (Haisheng Chen, 2009) 2 (Soutar, 2012) 3 (Chakkara varty, Peryasami, Jegannathan, & Vasu, 1991) 4 (Kortenaar, De zeezout batterij, een interview, 2015)	1 (Haisheng Chen, 2009) 2 (Chakkara varty, Peryasami, Jegannathan, & Vasu, 1991) 3 (Sabihuddin, 2015) ²	1 (Haisheng Chen, 2009), 2 (Ibrahim, Ilinca, & Perron, 2008)

² De betrouwbaarheid van de dataset van Sabihud is voor discussie vatbaar. Veel van de gegevens over bijvoorbeeld de Ni-Fe batterij zijn afkomstig van producenten van Ni-Fe batterijen. Vast staat dat hij deze zelfde dataset wel gebruikt als referentie in een eigen gepubliceerd rapport, dit geeft wel aan dat hij zelf vertrouwen heeft in de dataset. Gekozen is om deze bron alleen als aanvulling te gebruiken en niet als enkele bron van een gegeven. Uitzondering hierop vormt de energiedichtheid van de Ni-Fe batterij, deze wordt door mij als aannemelijk gezien.

Tabel 4 gegevens over de verschillende technieken (tabel 2 van 2)

	Specifieke energie Wh/kg	Energie dichtheid Wh/L	\$/ (€) kWh	\$/ (€) kWh per cyclus	Technische volwassenheid	Milieu-aspecten
Pb	30-50 (1)	50-80 (1)	300-600 (1)	0,20-1,00 (1)	Volwassen	- Scoort niet goed op totale energie efficiëntie in LCA (2). Ook worden veel milieugevaarlijke stoffen gebruikt, zoals lood en zwavelzuur.
Ni-Cd en Ni-MH	50-75 (1)	60-150 (1)	500-1500 (1)	0,20-1,00 (1)	Volwassen	-Scoort niet goed (3). Milieugevaarlijke stoffen gebruikt bij Ni-Cd. Ni-MH scoort iets beter +-.
Li-ion	75-200 (1)	200-500 (1)	600-2500 (1)	0,15-1,00 (1)	Ontwikkeld	+/- Scoort iets beter dan Ni-Cd, Ni-Mh en Pb (3). Lithium winning milieu schadelijk (LCA, EPA). Lithium wel goed recyclebaar.
Na-Cl	30-40 (2)	70 (3)	100 (2)	0,01-0,02 (2)	Onvolwassen	++Milieuvriendelijk
Ni-Fe	18-25 (3) 26-82,5 (5)	25-80 (4)	766-916 (4) of +-700 (5)	0,22 ³	Volwassen	++ Milieuvriendelijk
Na-S	150-240 (1)	150-250 (1)	300-500 (1)	0,08-0,20 (1)	Ontwikkeld	+/- Batterij moet op hoge temperatuur gehouden worden (1). Brandgevaar.
ZEBRA,Na-Ni-Cl2	100-120 (1)	150-180 (1)	100-200 (1)	0,05-0,10	Ontwikkeld	+/- Hoge temperatuur.

³ (De waarde van 0,22 is op basis van een prijs per kWh van 700 gedeeld door 3150 cycli.)

				(1)		Milieugevaarlijke stoffen. Scoort beter dan Li-ion (3).
Zn-Br	30-50 (1)	30-60 (1)	150-1000 (1)	0,05-0,80 (1)	Ontwikkeld	+Bevat stoffen die milieugevaarlijk zijn. Bromide is giftig.
VRB	10-30 (1)	16-33 (1)	150-1000 (1)	0,05-0,80 (1)	Ontwikkeld	+Er wordt onderzocht wat de milieu risico's zijn van vanadium(4). Milieuvriendelijker dan lood zuur batterijen (2).
PSB	15-30 (4)	20-30(2)	150-1000 (1)	0,05-0,80 (1)	Ontwikkeld	+ Gebruik van milieugevaarlijke stoffen (1).
Metaal-lucht batterij	150-3000 (1)	500-10.000 (1)	10-60 (1)		Onvolwassen tot Ontwikkeld	+ Milieuvriendelijk. Geen giftige componenten (1).
H2	800-10.000 4 (1)	500-3000 (1)	2-15 (6)	60-20 (1)	Onvolwassen	+Milieuvriendelijk
Vlieg wiel	10-30 (1)	20-80 (1)	1000-5000 (1)	0,03-0,25 (1)	Volwassen	++Milieuvriendelijk (4)
Super condensator	0,05-5 (1)	10-30 (1)	300-2000 (1)	0,02-0,20 (1)	Ontwikkeld	+ Kleine hoeveelheid reststoffen (1).
SMES	0,5-5 (1)	0,2-2,5 (1)	1000-10000 (1)		Ontwikkeld	-Sterke magnetische velden (1).
CES	150-250 (1)	120-200 (1)	3-30 (1)	0,02-0,04 (1)	Onvolwassen	++Milieuvriendelijk Verwijdert (in sommige gevallen) schadelijke stoffen tijdens proces(1).

⁴ In het rapport wordt gesproken over verschillende typen brandstof cellen, waaronder H2 (Haisheng Chen, 2009).

⁵ Prijs per kW ligt veel hoger, in de range van 500-3000 dollar per kW (Xing Luo, 2015).

⁶ De supercondensator mag een kleine specifieke energie hebben, hij heeft wel een heel hoge energieafgifte, zie ook: (Haisheng Chen, 2009).

Gebruikte bronnen	¹ (Haisheng Chen, 2009) ² (The seasalt battery, 2015) ³ (Test results, 2015) ⁴ (Electricity storage technology comparison., 13) ⁵ (Chakkaravarty, Peryasami, Jegannathan, & Vasu, 1991)	¹ (Haisheng Chen, 2009) ² (Electricity storage technology comparison., 13) ³ (Kortenaar, Info seasalt battery may 2015) ⁴ (Sabihuddin, 2015)	¹ (Haisheng Chen, 2009) ² (The seasalt battery, 2015) ³ (Delft, 2014) ⁴ (Customer Price List, 2014) ⁵ (Nickel Iron batteries from BeUtilityFree, 2013) ⁶ (Kaldellis JK, 2007)	¹ (Haisheng Chen, 2009) ² (The seasalt battery, 2015)	¹ (Haisheng Chen, 2009) ² (Rydh, 1998) ³ (Peter Van den Bossche, 2005) ⁴ (Abbas A. Akhil, 2015)
--------------------------	--	---	--	--	--

3.3.2 Multi Criteria Analyses

Op sommige zaken kan geen beoordeling gegeven worden als 'goed', 'slecht'. Dit omdat nog niet bekend is hoe de technieken toegepast zullen gaan worden. De definitie van wat 'goed' is of wat 'slecht' is, verschilt per situatie. Een voorbeeld hiervan is de energiedichtheid (Wh/L). In sommige gevallen is een hoge energiedichtheid niet belangrijk. Bijvoorbeeld in het geval van energieopslag in een ruime kruipruimte. Toch kan in het algemeen gesteld worden dat een hoge energiedichtheid gewenst is omdat ruimte vaak schaars/kostbaar is. Vier van de gevonden criteria zijn niet meegenomen in de MCA, het te leveren vermogen, de ontladtijd, het toepassingsgebied en de specifieke energie. Dit omdat bij de eerste drie criteria het vrijwel onmogelijk is om er een waarde aan toe te kennen. Er wordt geen beoordeling gegeven aan de specifieke energie omdat er al een beoordeling wordt gegeven aan de energiedichtheid. De negen andere criteria zijn wel meegenomen. Hierbij verkrijgen 7 criteria een percentage van 12,5% en twee criteria een weging van 6,25 procent. De criteria die een weegfactor van 6,25% krijgen zijn energiedichtheid en technische volwassenheid. Deze criteria worden minder belangrijk geacht voor de uiteindelijke beslissing van de gemeente dan de andere criteria. In samenspraak met de gemeente zijn in de tweede MCA een aantal (mogelijk) doorslaggevende criteria vastgesteld. Deze worden niet met cijfers, maar kwantitatief beoordeeld. De top 3 technieken zijn in de MCA van tabel 6 groen gearceerd.

Score toekenning

De waarde toekenningen van de verschillende criteria zijn in tabel 5 (tabel 2 van 2) weergegeven. Wanneer gegevens niet bekend zijn, wordt een score toegekend van 0. Er is overwogen om een score van 1 toe te kennen (worst-case scenario), maar dit is niet gedaan. Het toekennen van de waarde 1 lijkt namelijk te impliceren dat de gegevens bekend zijn, dit is niet het geval. Door het toekennen van de waarde 0 is het voor iedereen duidelijk dat de gegevens niet bekend zijn. Bij de tweede MCA is de score toekenning als volgt. Wanneer een techniek voldoet aan een criterium, krijgt hij een duim (score toekenning 100%) of niet voldoet geen duim (score toekenning 0%)

Wanneer er bij een criterium meerdere waardes werden aangetroffen, wordt het gemiddelde genomen van deze waarden. In het geval van de loodzuuraccu (Pb) is de prijs bijvoorbeeld 300-600\$ per kWh. Om een juiste beoordeling te kunnen geven, wordt het gemiddelde genomen $((300+600)/2)$, is 450\$. Op deze manier kan toch een waarde worden toegekend aan de loodzuuraccu. Bij het criterium zelfontlading werden soms met woorden waarden aangegeven. Deze zijn als volgt geïnterpreteerd, zelfontlading small is waarde toekenning 4, zelfontlading very small is waarde toekenning 5.

27

Tabel 5 MCA (2 van 2 met waarde toekenningen)

	efficiëntie	zelfontlading	levensduur (jaren)	levensduur (cycli)	Energiedichtheid (Wh/L)	prijs per kWh	prijs per cyclus	technische volwassenheid	milieuaspecten		
Weging (%)	0,125	0,125	0,125	0,125	0,0625	0,125	0,125	0,0625	0,125	Gewogen gemiddelde	Cijfer techniek
Pb	3	5	3	1	2	2	1	5	2	2,5625	5,1
Ni-Cd	2	5	4	2	3	1	1	5	2	2,625	5,3
en Ni-MH	5	5	3	4	5	1	1	3	3	3,25	6,5
Na-Cl	5	4	0	5	2	5	5	1	5	3,8125	7,6
Ni-Fe	2	5	5	3	2	1	1	5	5	3,1875	6,4
Na-S	4	1	3	2	5	3	3	3	3	2,875	5,8
ZEBRA, Na-Ni-Cl2	4	1	3	2	4	4	4	3	3	3,0625	6,1
Zn-Br	3	4	2	2	1	2	1	3	3	2,375	4,8
VRB	4	4	2	5	1	2	1	3	3	2,875	5,8
PSB	2	4	3	0	1	2	1	3	3	2,125	4,3
Metal-air	1	5	0	1	5	5	0	2	4	2,4375	4,9
H2	1	5	3	1	5	5	1	1	4	2,875	5,8
Vliegwiel	5	1	4	5	2	1	3	5	5	3,4375	6,9
Super condensator	5	1	5	5	1	1	3	3	3	3,125	6,3
SMES	5	5	5	5	1	1	0	3	2	3,125	6,3
CES	1	5	5	0	4	5	5	1	5	3,5625	7,1
Gemiddelden	3,25	3,75	3,125	2,6875	2,75	2,5625	1,9375	3,0625	3,4375		

Top 3	
1: NaCl	7,63
2: CES	7,13
3: Vliegwiel	6,9
Laagste 3	
2: ZnBr	4,75
3: Metal air	4,88

Tabel 6 MCA, kwantitatief, specifieke criteria

	Kosten <\$250 kWh	Kosten cyclus kWh <\$0,07	Efficiëntie >75%	Zelfo ntladi ng per dag <10%	Levensdu ur Aantal cycli >5000	Leven sduur aantal jaar 10>	Milieu- aspecten min. +	Score: aantal duimen	Positie 1=best 7=slechtst
Pb								3	4
Ni-Cd en Ni- MH								2	5
Li-ion								4	3
Na-Cl								6	1
Ni-Fe								3	4
Na-S								1	6
ZEBRA, Na-Ni- Cl2								4	3
Zn-Br								2	5
VRB								4	3
PSB								4	3
metaal- lucht batterij								3	4
H2								4	3
Vliegwi el								5	2
Super conde nsator								4	3
SMES								3	4
AL-TES								4	3
CES								4	3

4 Toepassing van elektriciteitsopslag op Ameland

4.1 De geschiktste techniek en zijn werking

4.2.1 De geschiktste techniek

Wat zijn de geschiktste technieken voor toepassing op Ameland? Op basis van bovenstaande gegevenstabellen en bijbehorende Multi Criteria Analyses lijkt het antwoord gegeven.

De zeezoutbatterij is het geschiktst, gevolgd door CES en het vliegwiel.

Toch is het zo dat niet elke eigenschap op een juiste manier kan worden beoordeeld door toekenning van kwantitatieve of kwalitatieve beoordelingswaardes.

Een goed voorbeeld van dit principe is het vliegwiel. Op basis van de Multi Criteria Analyse lijkt het vliegwiel een (zeer) geschikte optie. Het doel van de gemeente Ameland, energieonafhankelijkheid, wordt met het vliegwiel echter niet gehaald. Hij heeft namelijk een hoge zelfontlading. De techniek CES komt goed uit de test, maar naar eigen inschatting is het uiteindelijk potentieel voor toepassing van CES (in bijvoorbeeld koelhuizen) niet groot op Ameland. Op basis van de MCA lijkt de zeezoutbatterij voor Ameland de geschiktste optie voor toepassing, hier zal dus verder op in gegaan worden. Wel staat de zeezoutbatterij nog echt in de kinderschoenen wat betreft ontwikkeling, er is weinig informatie over beschikbaar, er zijn nog geen wetenschappelijke publicaties over geschreven en er is nog (zeer beperkte) ervaring mee (zie ook discussie, voor een toelichting). De zeezoutbatterij moet nog in de praktijk getest worden en uit deze praktijktesten moet nog blijken of de zeezoutbatterij waar kan maken wat beloofd is in de theorie. Er zal nu nog wat meer achtergrondinformatie worden gegeven over de werking van een elektrochemische cel (zoals de zeezoutbatterij) en de mogelijkheid tot het verhogen van het voltage en de capaciteit.

4.2.2 Werking van een elektrochemische cel

Omdat er geen (precieze) beschrijving te vinden is over de werking van de zeezoutbatterij, is gekozen om de werking van de zeezoutbatterij te verklaren door een algemene beschrijving te geven van een elektrochemische cel. Voor een elektrochemische cel zijn een aantal zaken nodig, een reductor en een oxidator, twee geleidende staven (de elektroden) waar de elektronenoverdracht plaatsvindt en een 'zoutbrug' (de elektrolytoplossing). Bij de negatieve elektrode (de anode) vindt de oxidatie plaats. Bij de positieve elektrode (de kathode) vindt de reductie plaats. De zoutbrug is nodig om een gesloten stroomkring te krijgen (Hurenkamp, 2007). De zeezoutbatterij van dr. Ten bevat de volgende componenten: zeezout, koolstof (grafiet), water, metaal en een additief (The seasalt battery, 2015) In het geval van de batterij van dr. Ten is het waarschijnlijk dat het zeezout, water en het additief zorgen voor de zoutbrug. Het grafiet wordt waarschijnlijk gebruikt als kathode en het metaal als anode.

In een interview van Cogas met dhr. ten Kortenaar van dr. Ten, wordt het volgende gezegd over de werking van de zeezoutbatterij: *“Zeezout, koolstof elektroden en enkele andere mineraal ingrediënten vormen de belangrijkste basis voor deze batterij.” “Het koolstof en het zout reageren op elkaar aan de ene pool. Door water komt er anderszijds een metaallaagje op het koolstof en dan ontstaat er stroom op de elektrodes. En dan gaat het lampje aan”* (zeezoutbatterij: veilig en goedkoop opslaan van duurzame energie, 2014).

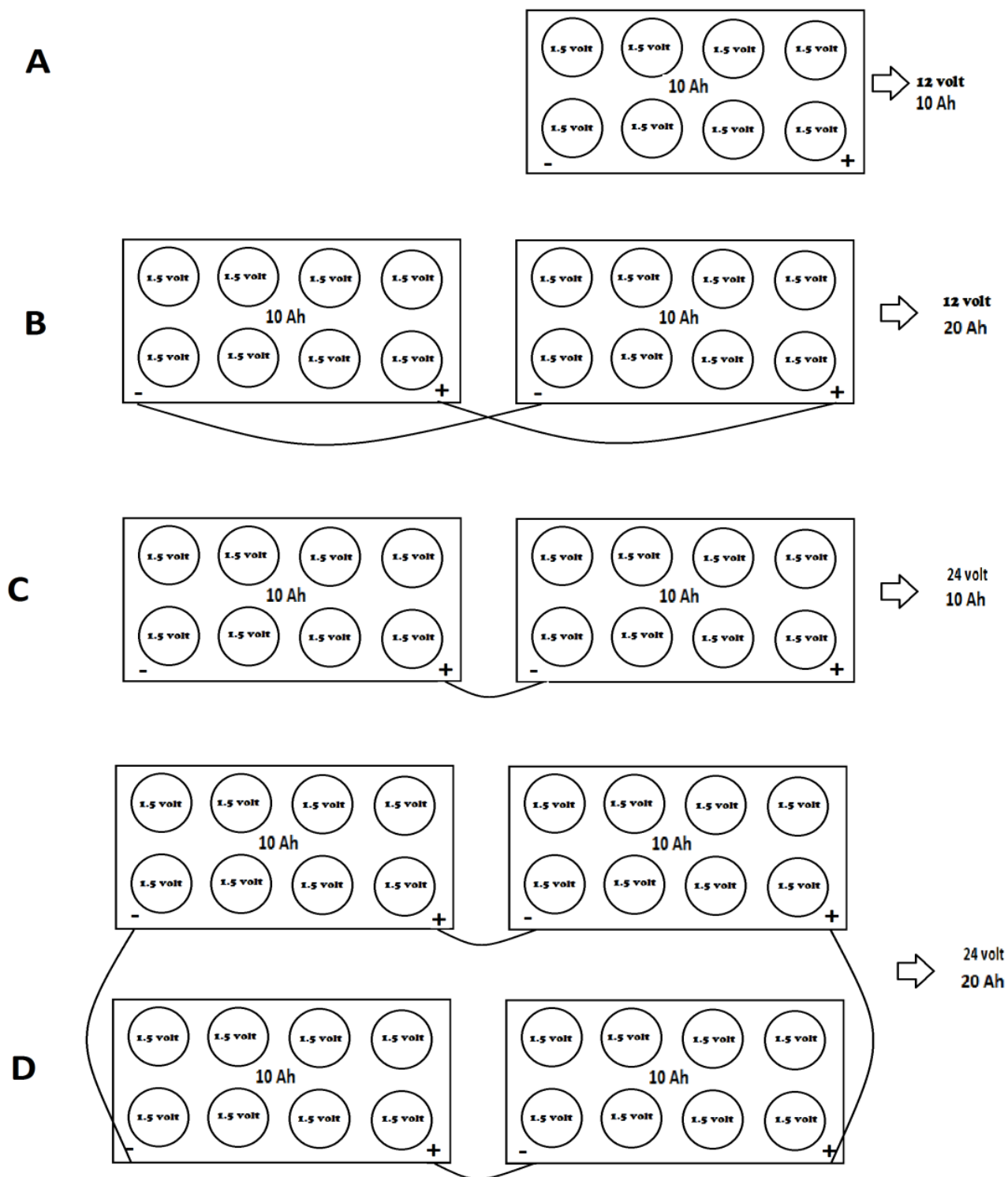
4.2.3 Mogelijkheid tot verhogen van de capaciteit en voltage van batterijen

De mogelijkheid om de capaciteit en het voltage van de energieopslag te verhogen door verschillende batterijen aan elkaar te koppelen is een erg interessante eigenschap. Voor de informatie over de verschillende methodes van schakelen van batterijen is dankbaar gebruik gemaakt van de website van accudienst (accudienst, 2015). De mogelijkheid tot het schakelen (of koppelen) van batterijen wordt uitgelegd aan de hand van het prototype van de zeezoutbatterij zoals ontwikkeld door dr. Marnix ten Kortenaar, van innovatiebureau dr. Ten.

Het prototype van de zeezoutbatterij is als volgt opgebouwd. In een grote plastic bak zijn 8 cilinders bevestigd. In deze cilinders bevinden zich de stoffen die zorgen voor een werkzame elektrochemische cel. Elke cel heeft een voltage van 1.5 volt. Er worden 8 cilinders in serie geschakeld om een totaal voltage te verkrijgen van 12 volt per batterij. De meeste accu's worden met dit voltage geleverd (The seasalt battery, 2015). De hoeveelheid elektrische lading die opgeslagen kan worden is voor een blok van 8 cellen 10 ampère uur (Ah). Om de voltage en de capaciteit van een batterij te vergroten, kunnen meerdere batterijen aan elkaar gekoppeld (geschakeld) worden. De noodzaak om meerdere batterijen aan elkaar te schakelen is aanwezig, omdat je met een enkele batterij vaak niet zo heel veel kunt.

In figuur 1 staan 4 verschillende mogelijkheden van toepassing. Hierbij is de linkerkant van de batterij op eenvoudige wijze weergegeven als de negatieve kant en de rechterkant van de batterij als de positieve kant (accudienst, 2015).

In situatie A is een enkele batterij opgebouwd uit meerdere cellen te zien. Het voltage en de capaciteit zijn beperkt. In situatie B zijn twee batterijen *parallel* geschakeld. Het voltage blijft gelijk, maar de capaciteit is vergroot. In situatie C zijn twee batterijen in serie geschakeld. Het voltage is vergroot, maar de capaciteit blijft gelijk. In situatie D is een combinatie te zien van situatie A en B, een serie-parallel schakeling. Hierbij wordt zowel het voltage als de capaciteit vergroot. De totale energie-inhoud is in situatie D verviervoudigd ten opzichte van situatie A. Afhankelijk van gewenste situatie kan dus gekozen worden om de batterijen *serie, parallel of serie-parallel* te schakelen (figuur 1).



Figuur 1 Verschillende schakelmethodes accu's, gemaakt door: Bram Commandeur, 21-05-2015

4.2 Smart-grid als conceptueel framework

Er zijn tijdens de ontwikkelingsfase van de zeezoutbatterij verschillende partners aangehaakt bij het innovatiebureau van dhr. ten Kortenaar (dr. Ten). Onderzoeksinstellingen (Universiteit van Twente, TU Delft), een ministerie (ministerie van economische zaken), netbeheerders (Alliander, Cogas) netwerkorganisaties (smart city collective) en een technische dienstverlener (Cofely). Een onderzoek naar eerste demoprojecten onder deze partners leverde de volgende informatie op. Cogas werkt aan een proefopstelling met de zeezoutbatterij. Hierbij worden een aantal zeezoutbatterijen in combinatie met micro-turbines een houtkachel en ongeveer 400 zonnepanelen getest in een smart-grid systeem op het terrein van Cogas (Cogas start proeftuin voor eigen energievoorziening, 2014). Meer informatie over de proeftuin is te verwachten tegen augustus 2015. Op dit moment zijn de zeezoutbatterijen nog niet aanwezig op de proeflocatie bij Cogas, dit volgt later dit jaar (Gehrels, 2015). Dit werd duidelijk na een gesprek te hebben gehad met de initiatiefnemer van deze duurzame proeftuin, dhr. Gehrels.

De mogelijkheid om zeezoutbatterijen te hangen aan een smart-grid systeem op Ameland lijkt een goede optie. Het smart-grid systeem is hierbij de kapstok waarbij verschillende technieken slim met elkaar verbonden worden om zo vraag en aanbod op elkaar af te stemmen. Er zijn vele mogelijkheden waarop technieken individueel van elkaar worden ontwikkeld en toegepast kunnen worden, maar door het toe te passen binnen een algemeen concept, zoals smart-grid, wordt gebouwd aan een geraamte.

De diverse toepassingen (zoals zonnepanelen en methaanbrandstofcellen) die nu al op het eiland aanwezig zijn bieden perspectief. Als deze technieken gekoppeld kunnen worden aan het smart-grid systeem, dan kan de zeezoutbatterij dat wellicht ook. Het grootste smart-grid project dat momenteel op Ameland wordt uitgevoerd is het project met methaanbrandstofcellen. Dit is een pilotproject waarbij gebruik wordt gemaakt van 45 methaanbrandstofcellen om warmte en elektriciteit te produceren. Het systeem is opgericht om snel te kunnen voorzien in elektriciteit bij een plotseling sterke daling in aanbod van elektriciteit. In een transitie naar een duurzame energievoorziening zijn technieken die snel (en het liefst energetisch zuinig) energie bij kunnen leveren noodzakelijk. Methaanbrandstofcellen kunnen dan gebruikt worden voor netbalans. Het project met de methaanbrandstofcellen wordt genoemd 'slimme-stroom Ameland' (Slimme Stroom Ameland, 2014). De projectleider van het project Slimme Stroom Ameland geeft aan dat de methaanbrandstofcellen worden aangestuurd door middel van een virtuele energie centrale (VPP). De software die hier achter zit zorgt er als alles goed gaat voor dat op het juiste moment de methaanbrandstofcellen worden ingeschakeld en uitgeschakeld. Met andere woorden, niet de methaanbrandstofcellen zelf zijn slim, maar de aansturende software (Smelis, 2015). Dit is interessant om te weten omdat het dan misschien ook mogelijk is om 'domme technieken', zoals de zeezoutbatterij en de Edison batterij te gebruiken in het smart-grid systeem van Ameland. In dit rapport wordt aangenomen dat dit inderdaad mogelijk is.

4.3 Toepassings ontwerpen

4.3.1 Afwegingen en mogelijkheden bij het kiezen van een energieopslag ontwerp

Bij het bepalen van verschillende toepassingen van energieopslag op Ameland valt er te kiezen uit veel verschillende mogelijkheden. Het is belangrijk om kort inzichtelijk te maken welke afwegingen/mogelijkheden een rol spelen bij het kiezen van de uiteindelijke ontwerpen.

Allereerst: wat is de benodigde *opslagcapaciteit*? Het is zeer zeker relevant te bedenken hoeveel energieopslag je wilt gaan realiseren met het project. Hoeveel energieopslag is er nodig op Ameland, nu en in de toekomst?

Vervolgens is er een afweging die gemaakt moet worden om de energieopslag *kleinschalig* of *grootschalig* toe te passen. Hiermee wordt bedoeld dat er gekozen kan worden om op bijvoorbeeld 50 locaties kleine opslageenheden te plaatsen, of op een locatie (bijvoorbeeld bij de zonneweide) één hele grote opslageenheid. Hoewel de hoeveelheid energie die opgeslagen kan worden misschien hetzelfde zou zijn, is de weg naar realisatie heel verschillend.

Wordt er gekozen voor een *pilot project* of een *definitief project*? Het doel van deze twee projecttypen verschilt. Bij een pilot project kunnen doelen zijn ervaring opdoen over de energieopslag, informatie verkrijgen en negatieve/positieve effecten analyseren. Een pilot project kan voorafgaand aan een definitief project worden ingezet. Het doel van een definitief project met energieopslag op Ameland is Ameland een stap in de goede richting te helpen in zijn ambitie naar energieonafhankelijkheid in 2020.

Wordt er gekozen voor een *opslagtechniek* of *meerdere opslagtechnieken*?

Er is de mogelijkheid om in een pilotproject of definitief project te kiezen uit een of uit meerdere technieken. De uitkomsten van dit rapport kunnen daarbij van dienst zijn. Afhankelijk van de wens van de gemeente Ameland om onderscheidend te zijn in opzet, ervaring op te willen doen met een of meerdere technieken, het project meer of minder complex te maken et cetera, kan deze overweging voor een pilot of een definitief project worden gemaakt.

Toepassingsontwerpen voor pilotprojecten

Omdat de zeezoutbatterij een veelbelovende maar nog onvolwassen techniek is, zou een pilotproject een logische stap zijn. Dit om te testen of de batterij in de praktijk bevalt. Voor de zekerheid is gekozen om ook een alternatief project weer te geven met de Ni-Fe batterij. Er is speciaal gekozen voor een in gebruik volwassen techniek. De Ni-Fe batterij lijkt daarnaast in veel punten op de zeezoutbatterij. Zo is de Ni-Fe batterij milieuvriendelijk, heeft hij een niet al te

hoge energiedichtheid en een niet al te hoge waarde voor specifieke energie.

De Ni-Fe batterij werkt daarnaast ook volgens het principe van een elektrochemische cel.

Wel verschillen de zeezoutbatterij en de Edison batterij hierbij in zaken als de kathode, de anode en de samenstelling van de elektrolytoplossing. Zie voor de exacte samenstelling een recent patent van een verbeterde nikkel ijzer batterij (Randy Ogg, 2014, februari).

Op basis van bovenstaande afwegingen en mogelijkheden is gekozen om te kiezen voor 3 scenario's.

- een kleinschalig toepassingsontwerp met Ni-Fe batterijen,

- een kleinschalig toepassing ontwerp met Na-Cl batterijen.

- een grootschalige toepassing met Na-Cl batterijen.

4.3.2 Kleinschalige toepassingsontwerpen Na-Cl en Ni-Fe

Gunstige omstandigheden voor toepassing energieopslag bij huishoudens

De mogelijkheid om energie op te slaan wordt steeds relevanter voor huishoudens die zelf eigen elektriciteit opwekken met behulp van zonnepanelen. Op dit moment is het nog mogelijk om elektriciteit die niet direct gebruikt wordt in het eigen huishouden terug te leveren aan het net. Hiervoor krijgt de eigenaren van de zonnepanelen een vergoeding. Dit wordt ook wel salderen genoemd. De gunstige salderingsregeling staat echter onder druk. Minister Kamp van economische zaken aangegeven om tegen 2020 te zorgen voor een overgangsregeling van de salderingsregeling. Hierbij is het van belang te bedenken dat de vergoeding zoals die er nu nog is zal veranderen (Salderen blijft tot 2020, 2014). Om toch financieel voordeel te hebben kan de eigen opgewekte stroom kan stroom opgeslagen worden. Dit is een van de mogelijkheden, een andere mogelijkheid is om de vraag naar energie slim aan te sturen, op een zodanige manier dat er alleen elektriciteit wordt gebruikt wanneer er veel elektriciteit geproduceerd wordt. Deze andere mogelijkheid sluit het gebruik van ELOPS niet uit, energieopslag en slimme aansturing kan uitstekend gecombineerd worden.

Een andere reden dat het interessant is om energieopslag toe te passen bij huishoudens is de hoge elektriciteitsprijs die huishoudens moeten betalen. De prijs die huishoudens voor elektriciteit betalen is veel hoger dan de prijs die bijvoorbeeld grootverbruikers voor elektriciteit betalen. Dit heeft te maken met de energiebelasting, deze ligt voor huishoudens relatief hoog (Regulerende Energie Belasting (REB), 2014). Dit betekent wel dat investeringen in energieopslag daarmee sneller worden terugverdiend.

Er wordt in dit document verder niet gekeken naar de businesscase voor huishoudens.

Bepaling van de grootte van energieopslag

Voor de bepaling van de grootte van de energieopslag bij huishoudens met zonnepanelen komt veel kijken. De belangrijkste zaken worden hier genoemd.

- de hoeveelheid elektriciteit die wordt opgewekt met de pv-panelen
- de hoeveelheid elektriciteit die overdag en s' avonds gebruikt wordt
- de fluctuaties van de bovengenoemde eenheden over uren, dagen, maanden en jaren

Een versimpelde weergave van energiegebruiksprofielen, energie opwek, onttrekking uit de batterij en onttrekking uit het net werd gevonden in het rapport 'energieopslag 2030' (Vegte, 2015). In de uit dit rapport afkomstige afbeeldingen is te zien hoe onder andere het opwekken van elektriciteit, de afname van elektriciteit, de hoeveelheid opgeslagen elektriciteit en nog meer zaken met elkaar samenhangen. In figuur 2 zijn enkele van deze afbeeldingen overgenomen. In het rapport wordt uitgelegd met wat voor systemen werd gewerkt en welke aannames werden gemaakt. De belangrijkste gegevens voor dit onderzoek zijn dat er bij een huishouden werd uitgegaan van een opbrengst van de zonnepanelen van 2400 kWh per jaar en een elektriciteitsverbruik van 3600 kWh per jaar (Vegte, 2015).

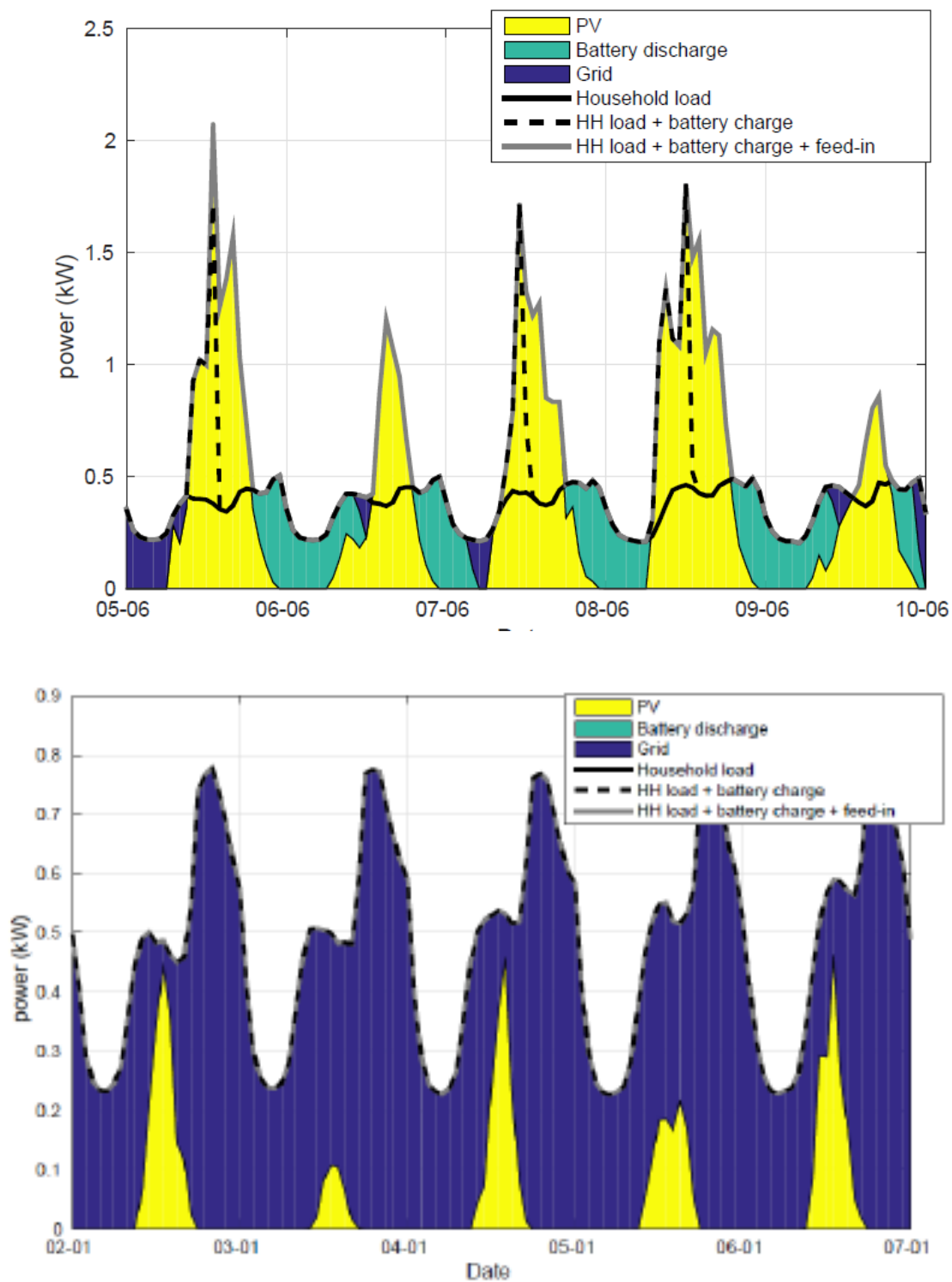
Dit betreft een gemiddelde situatie en er wordt aangenomen dat dit ongeveer representatief is voor een huishouden op Ameland met zonnepanelen.

Uit de afbeeldingen (figuur 2) kunnen veel verschillende zaken worden afgeleid. De belangrijkste bevindingen voor dit rapport zijn:

- de productie van elektriciteit is in de winter zover ondergeschikt aan de vraag, dat er vrijwel geen energie opgeslagen zal worden
- vraag en aanbod van zonne-energie zijn niet goed op elkaar afgestemd
- bij een productie van 2400 kWh per jaar is een 5 kWh opslagsysteem voldoende. De mogelijkheid bestaat anders dat de batterij zijn energie niet meer kwijt kan.

Wanneer de zeezoutbatterij wordt gebruikt, is het belangrijk om de elektriciteitsopslag niet te groot te maken. Dit heeft te maken met het geheugeneffect van de zeezoutbatterij. Daar heeft de batterij in zekere mate mee te maken. Door de batterij volledig te ontladen, is dit geheugeneffect echter verdwenen (Pullido, 2015).

Als minimum vereiste wordt uitgegaan voor een opslagsysteem voor huishoudens wordt uitgegaan van 5kWh aan opslag. Tesla werkt met zijn thuisbatterijen voor het opslaan van elektriciteit met vermogens van 7kWh en 10 kWh (Powerwall, Tesla home batteries, 2015). Dit zijn Lithium-ion batterijen en deze kunnen beter niet volledig ontladen worden omdat dit anders op termijn ten koste van de batterijen zelf. Het is beter om deze batterijen te ontladen tot ongeveer 40%. Dit betekent dat de thuisbatterij met een opslagcapaciteit met 7 kWh in de praktijk ongeveer evenveel bruikbare capaciteit oplevert als een zeezoutbatterij met 4.2 kWh.



Figuur2, een 5 daagse weergave van opwek en opslag in zomer en winter Afkomstig van (Vegte, 2015)

Opstelling met Na-Cl batterijen

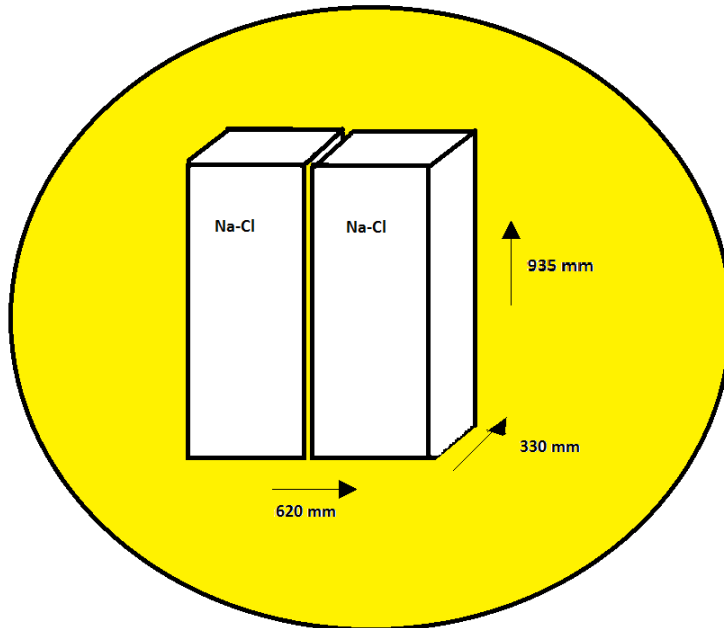
Nu bekend is wat de opslagcapaciteit van de batterijen ongeveer moet zijn, kan gekeken worden naar de toepassing van de zeezoutbatterijen bij huishoudens met zonnepanelen. Een zeezoutbatterij met een voltage van 48 volt een vermogen van 0,5 kW kan ongeveer 2,5 tot 4 kWh energie opslaan (Kortenaar, Info seasalt battery may 2015). Voor de zekerheid wordt uitgegaan van twee zeezoutbatterijen om te komen tot een opslagcapaciteit van 5 kWh per huishouden. De prijs van de zeezoutbatterij is bepaald op €100-120 per kWh (Zeezoutbatterij van Dr. Ten, 2014). Dit is exclusief omvormers en overige installatiekosten. Voor dit rapport wordt uitgegaan van een geschatte gemiddelde prijs van €2500 (excl. btw) voor een complete installatie van 5kWh (zie ook tabel 7 en bijlage 3). De onderhoudskosten zijn niet bekend en worden ook niet meegenomen in dit voorbeeld.

Tabel 7 Geschatte kosten aanschaf zeezoutbatterij, 5kWh

Benodigdheden	Prijs per eenheid in euro	Benodigd aantal	Prijs in euro
Zeezoutbatterijen 2,5-4 kWh	250-400 (lage schatting) 300-480 (hoge schatting)	2	500-800 of 600-960
Omvormer + overige materialen	800 (lage schatting) 1200 (hoge schatting)	1	800 of 1200
Installatiekosten	400 (lage schatting) 600 (hoge schatting)	1	400 of 600
Kosten (excl. btw)			Lage schatting 1700-2000 Hoge schatting 2400-2760

Een enkele batterij heeft de volgende afmetingen 935*330*310 mm (h*b*l) uitgedrukt in millimeters. Dit is een volume van 95,65 liter, een enkele zeezoutbatterij weegt 200 kg (Kortenaar, Info seasalt battery may 2015). De afmetingen (zie ook figuur 3) van een opstelling van een 5 kWh installatie zijn (h*b*l) 935* 330*620 mm. Dit is 191,3 liter en deze installatie weegt ongeveer 400 kg (zonder omvormer). Een geschikte locatie voor een dergelijke opstelling zou kunnen zijn in de kruipruimte van een woning.

In onderstaand voorbeeld zijn de batterijen in serie geschakeld (verhoogd voltage, gelijk aantal ampère uur). Het is onbekend hoe de serie schakeling met zeezoutbatterijen in de praktijk uitpakt. Het betreft dan ook een theoretisch ideale situatie.



Figuur 3 Opstelling met twee zeezoutbatterijen bij huishoudens (gemaakt door Bram Commandeur)

Opstelling met Ni-Fe batterijen

Een kleinschalige opstelling met Ni-Fe batterijen bij huishoudens is ook mogelijk. Hierbij worden voorgaande afwegingen en grootte eisen ook weer meegenomen. Het betreft in dit rapport een opstelling met 10 batterijen van 1,2 volt en 500 ampère uur welke in serie zijn geschakeld. Het totale voltage is dus 12 volt en de hoeveelheid elektriciteit die opgeslagen kan worden is bij benadering 6 kWh. (Er had ook gekozen kunnen worden voor een systeem met 400 ampère uur en 4,8 kWh vermogen, maar de Edison batterij kan beter niet helemaal ontladen worden, tot ongeveer 5%. Ook wordt de capaciteit van de Edison batterij beïnvloed door de temperatuur, daarom is gekozen voor het iets grotere systeem (Edison, System design, 2013).)

De prijs van deze opstelling van 6 kWh (exclusief omvormer en installatie) is 4850 dollar (Customer Price List, 2014). Omgerekend naar euro is dit 4304 euro (4850 dollar / 1,1267 euro) (Dollar euro koers, 2015). De prijs van een omvormer en installatie is enigszins af te leiden van de website van Iron Edison. Voor het vergelijk wordt echter uitgegaan van dezelfde prijzen voor de omvormer en installatie als de zeezoutbatterij.

Tabel 8 Geschatte kosten Ni-Fe batterij opstelling 6 kWh

Benodigdheden	Prijs per eenheid in euro	Benodigd aantal	Prijs in euro
Prijs systeem	4304	1	4304
Omvormer + overige materialen	800 (lage schatting) 1200 (hoge schatting)	1	800 of 1200
Installatiekosten	400 (lage schatting) 600 (hoge schatting)	1	400 of 600
Kosten systeem (excl. btw en transport)			Lage schatting 5500 Hoge schatting 6100

De installatie bestaat uit een rij van 10 batterijen (Edison, Sell size chart, 2013).

Uitgedrukt in centimeters zijn de afmetingen (b* d* h) 244,3*29,1*34.5 cm.

Het gewicht is 723.33 kg. De inhoud is ongeveer 245 liter (zie ook bijlage 3).



Figuur 4 Voorbeeld opstelling met Ni-Fe batterijen Afkomstig van: (Edison, System design, 2013)

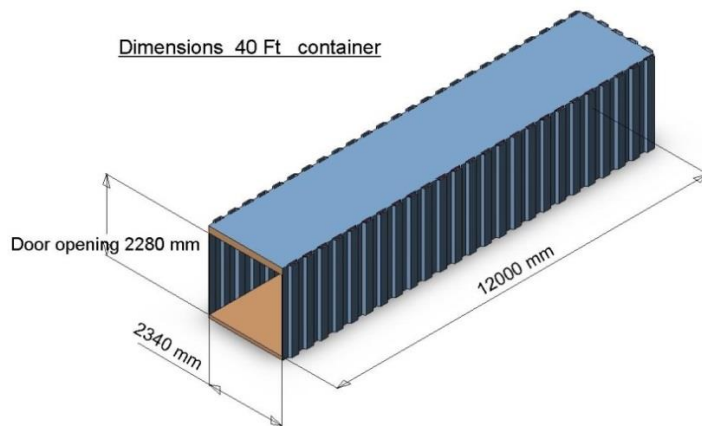
4.3.3 Grootschalig toepassingsontwerp met zeezoutbatterijen

Het voorbeeld met het grootschalige toepassingsontwerp met zeezoutbatterijen is puur theoretisch. In dit rapport wordt een voorbeeld gegeven van een grootschalig pilotproject met 250 zeezoutbatterijen. Deze zeezoutbatterijen worden in dit voorbeeld toegepast direct bij de locatie van het zonnepark. Hier kan de installatie per direct zorgen dat overtollige energie opgeslagen wordt en het net niet overbelast raakt. Een dergelijke grote installatie met zeezoutbatterijen is in de praktijk nog helemaal niet getest. Daarnaast zijn er nog geen meetgegevens beschikbaar over de elektriciteitsproductie van het zonnepark, om de simpele reden dat het zonnepark nog niet is gerealiseerd. Toch is het leuk om een dergelijke opslag

methode te laten zien, omdat het een tegengewicht geeft aan de kleinschalige opslagmethoden. In de theoretische situatie wordt een zeecontainer vol met zeezoutbatterijen opgesteld naast het vliegveld op Ballum. De zeezoutbatterijen moeten niet blootgesteld worden aan alle weersinvloeden en moeten droog opgeslagen worden. Er wordt in de volgende situatie van uitgegaan dat de zeezoutbatterijen in de hoogte niet te stapelen zijn. Alle zeezoutbatterijen bevinden zich op de bodem van de zeecontainer. Er is gekozen voor een groot model zeecontainer van 40 ft (figuur 5), welke werd gevonden op de website van Rolflex (Transport, 2015). Geschatte kosten van deze installatie:

Tabel 9 Geschatte kosten grootschalige opslag meet zeezoutbatterijen

Benodigdheden	Prijs per eenheid in euro	Benodigd aantal	Prijs in euro
Zeezoutbatterijen 2,5-4 kWh	250-400 (lage schatting) 300-480 (hoge schatting)	175	43.750-70.000 of 52.500-84.000
Omvormer + overige materialen	800 (lage schatting) 1200 (hoge schatting)	175	140.000 of 210.000
Installatiekosten	12.500	1	12.500
Zeecontainer	5000	1	5000
Huurprijs grond (10 jaar)	5000	1	5000
Kosten (excl. btw)			Lage schatting 206.250-232.500 Hoge schatting 285.000-316.500



Figuur 5: 40 ft zeecontainer, afkomstig van (Transport, 2015)

Er kunnen vijf rijen van 35 zeezoutbatterijen geplaatst worden in een zeecontainer van 40ft, dit zijn in totaal 175 zeezoutbatterijen (zie bijlage 3 voor berekening). De hoeveelheid energie die in een cyclus met deze batterijen opgeslagen zou kunnen worden ligt ongeveer tussen de 437 en 700 kWh. (175 zeezoutbatterijen * 2,5 kWh of * 4kWh).

Rendabele businesscase?

In dit rapport worden geen uitgebreide berekeningen gemaakt van de terugverdientijden. Op basis van genoemde economische aspecten en de geschatte kosten in dit rapport, is het gunstiger om de energie op te slaan bij huishoudens. Dit vanwege de hogere elektriciteitsprijs die huishoudens moeten betalen. Dhr. Dijkstra, ambtenaar bij de gemeente Ameland en mede initiatiefnemer van het zonnepark op Ameland zei over de prijsontwikkeling van zeezoutbatterijen het volgende.

“Voor de toepassing van deze techniek is de prijsontwikkeling interessant. Het lijkt waarschijnlijk dat de prijs van de Na-Cl batterij een neerwaartse trend gaat vertonen. Dit omdat de Na-Cl batterij een zekere ontwikkeling door zal maken, van prototype naar massaproductie. De toepassing is mede afhankelijk van de terugverdientijd. De terugverdientijd is in het begin van de ontwikkeling het laagst bij particulieren (lees huishoudens). Dit omdat particulieren een hogere prijs moeten betalen voor hun elektriciteit (energie) dan zakelijke gebruikers. Wanneer de techniek wat meer ontwikkeld is en de massaproductie op volle gang gekomen is, wordt de zeezoutbatterij waarschijnlijk interessanter voor de zakelijke gebruiker. In dit kader gezien lijkt het logisch om eerst te kijken naar mogelijke toepassingen voor de particuliere gebruiker. (Dijkstra J. , 2015)”

Het is onbekend wat de businesscase is voor toepassing van energieopslag op Ameland. Daar wordt in dit rapport geen uitspraak over gedaan. Zo zijn de volgende zaken nog onduidelijk. Het is onbekend wat de vermeden kosten in netverzwaring zijn bij het toepassen van energieopslag op Ameland.

Het is onbekend hoeveel vollasturen de (kleinschalige en grootschalige) energieopslag per jaar toegepast zou kunnen worden.

Het is onbekend hoeveel de daadwerkelijke kosten afwijken van bovenstaande theoretische kosten.

4.4 Organisatorische en overige aspecten

Bij de organisatie van een duurzaam project moet aan veel zaken gedacht worden. Het is vaak complex om een goede afweging te maken tussen verschillende belangen van verschillende actoren. Bij de uitvoering van een project met duurzame energieopslag op Ameland moet gekeken worden naar de organisatie voor het project. Bij deze organisatie kunnen de volgende aspecten van belang zijn.

De markt van batterijen ontwikkelt zich snel.

Het is belangrijk om ook andere spelers (naast het innovatie bureau van Marnix ten Kortenaar, dr. Ten) in de gaten te houden die zich bezighouden met energieopslag. Een van de spelers op de markt heeft recent een Na-ion (sodium-ion) batterij geïntroduceerd (Aquion energie). Deze batterijen zijn nu nog niet leverbaar in Nederland en ze zijn nog duur, maar dit kan in de toekomst wellicht gaan veranderen.

Leverbaarheid van de batterijen

De zeezoutbatterij wordt op het moment van schrijven nog niet (grootschalig) geproduceerd. Alleen eerste proefmodellen zijn beschikbaar. De vraag naar deze proefmodellen is groot en het aanbod is klein. Het is moeilijk om toegang te krijgen tot deze batterijen. De massaproductie van de zeezoutbatterij zal naar verwachting nog vóór 2020 op gang komen. Dit zal zorgen voor een (veel) groter aanbod aan zeezoutbatterijen. Afhankelijk van de vraag naar deze batterijen, is de mogelijkheid dan groter om zeezoutbatterijen aan te schaffen.

Participatie bewoners Ameland essentieel

Bij de organisatie van projecten met energieopslag is de participatie van de bewoners van Ameland essentieel. Zonder de medewerking van de burgers van Ameland is elk kleinschalig project bij huishoudens gedoemd te mislukken. Een vroege deelname van de burgers in het proces, bijvoorbeeld bij het kiezen van een geschikte techniek, is sterk aan te bevelen. Deze 'softe' kant van een project mag bij de organisatie niet vergeten worden.

Niet alle zaken zijn nog bekend over de technieken. Dit moet voor de toepassing uitgezocht worden. Een voorbeeld hiervan is de reactie van de batterij op een hoge luchtvochtigheid. Dit soort gegevens kunnen cruciaal zijn bij de succesvolle implementatie van wat voor soort opslagtechniek dan ook.

5 Conclusies

Op basis van de gegevens uit dit rapport kunnen een aantal zaken geconcludeerd worden.

Welke elektriciteit opslagtechnieken zijn er?

Een van de eerste zaken waarover een conclusie getrokken kan worden is het aantal ELOPS dat op dit moment beschikbaar is. In de eerste schifting vielen er al diverse technieken af. Toch bleven er nog veel technieken over. Dit betekent dat geconcludeerd kan worden dat kiezen van een ELOPS ingewikkeld is omdat er zoveel keuze is. Het inlezen in de verschillende ELOPS of het maken van een (Multi-criteria) analyse van de technieken is noodzakelijk om te kunnen komen tot een goede afweging.

Welke elektriciteit opslagtechnieken zijn geschikt voor toepassing op Ameland?

Op basis van de gemaakte Multi Criteria Analyses kan geconcludeerd worden dat er veel elektriciteit opslag technieken zijn die niet geschikt zijn voor toepassing op Ameland.

Veel technieken zijn te duur, hebben een lage efficiëntie, zijn niet milieuvriendelijk, kunnen niet gebruikt worden in het juiste toepassingsgebied, hebben een te ene een te hoge zelfontlading en een te korte levensduur. De methodes die op basis van de gemaakte Multi Criteria Analyses het geschiktst lijken te zijn voor toepassing op Ameland zijn de zeezoutbatterij (Na-Cl), CES en het vliegwiel. Hoewel het vliegwiel goed scoort in de MCA's is de bruikbaarheid van de techniek voor het halen van de energiedoelstellingen gering. Zo is de techniek alleen geschikt voor power quality (PQ), zijn de kosten hoog en heeft de techniek een erg hoge zelfontlading. Conclusie die hieruit getrokken kan worden is dat de MCA's een mooi hulpmiddel zijn, maar dat het gezonde verstand niet uitgeschakeld moet worden bij het kiezen van de juiste ELOPS.

Van de technieken die beoordeeld zijn met de MCA, scoort de zeezoutbatterij het best.

De zeezoutbatterij staat nog wel echt in de kinderschoenen wat betreft ontwikkeling, er is weinig informatie beschikbaar en er is nog (zeer beperkte) ervaring mee. De zeezoutbatterij moet dus eigenlijk nog in de praktijk getest worden. Uit deze praktijktesten moet nog blijken of hij waar kan maken wat is beloofd in de theorie. Dit zou gedaan kunnen worden door de gemeente Ameland in een pilotproject op Ameland.

Hoe kunnen deze elektriciteit opslagtechnieken worden toegepast op Ameland?

Een totaalanalyse van alle mogelijkheden is in dit rapport niet gegeven.

Wel kan geconcludeerd worden dat de technieken op verschillende manieren kunnen worden toegepast. Zo zijn er 3 voorbeeldprojecten weergegeven hoe energieopslag toegepast zou kunnen worden. Er zijn veel afwegingen te maken en mogelijkheden om uit te kiezen bij het bepalen van de toepassing van energieopslag. De uitkomsten van deze afwegingen en gewenste mogelijkheden zullen medebepalend zijn voor de uiteindelijke toepassing van energieopslag op Ameland.

6 Discussie en aanbeveling

De hoeveelheid criteria waarop een ELOPS beoordeeld is erg groot. Het is daarom belangrijk om het doel van de opslagtechniek in het oog te blijven houden. Het is gemakkelijk om te verzanden in details. Om dit te voorkomen is het instellen van een limiet op het aantal criteria waarop beoordeeld wordt een eerste vereiste. In dit onderzoek is gekozen om 13 criteria te behandelen. Mede ook om het rapport niet te omvangrijk te maken. Hierbij is de kans aanwezig dat er voorbijgegaan is aan mogelijk relevante criteria. In dit kader is het denkbaar dat in een vervolgonderzoek deze criteria wel meegenomen worden.

Eén van de aannames in dit rapport is de aanname van de prijsopbouw van de ELOPS. In het rapport waar de meeste informatie over de verschillende prijzen vandaan komen, wordt gesproken over een voorlopige prijsopbouw. Het rapport is gemaakt in 2008 en uitgegeven in 2009. Veel prijzen van ELOPS dalen als het gevolg van technische ontwikkelingen. De vergelijking van enkele technieken waarbij modernere bronnen zijn gebruikt en technieken waarbij de bron het rapport uit 2009 is, kan een scheef beeld geven. Hier valt tegenin te brengen dat er verscheidende wetenschappelijke rapporten zijn uitgekomen in 2015 die dezelfde bron uit 2009 aanhalen, zoals het rapport van Xing Luo uit 2015, overview of current development in electrical energy storage technologies. Het gegeven dat dergelijke wetenschappelijke rapporten dezelfde bronnen gebruiken geeft een sterke indruk dat er niet veel veranderd is.

Waarschijnlijk zijn niet alle ELOPS gevonden. Bedrijven en onderzoeksinstituten ontwikkelen ELOPS en maken deze nog niet altijd openbaar. Het is daarnaast ook goed mogelijk dat er technieken zijn die in het buitenland gebruikt worden die niet bekend zijn in Europa. Daarnaast is een diepte analyse van elk soort opslagtechnieken niet gegeven. Dit was ook niet mogelijk binnen de beperkte termijn waarbinnen het onderzoek uitgevoerd moest worden.

In de MCA zijn niet alle technieken op alle parameters beoordeeld. Dit vanwege het ontbreken van (betrouwbare) informatie. Het ontbreken van enkele gegevens zou beperkte invloed kunnen hebben op de uitkomsten van het onderzoek. Echter, van verreweg de meeste parameters zijn de waarden wel gevonden, dus de invloed zou beperkt zijn.

Het gebruik van clusterbegrippen. In het rapport wordt gesproken over de Lithium ion batterij. De definitie van een Lithium ion batterij is breed hanteerbaar. Er zijn vele soorten 'Lithium ion batterijen' met afwijkende eigenschappen. Dit heeft geen grote nadelige invloed gehad op mijn onderzoek, want voor dit onderzoek voldeed de algemene definitie 'lithium-ion' uitstekend.

Tijdens een verdiepend literatuuronderzoek naar zeezoutbatterijen vond ik de zoutwaterbatterij (Na-ion batterij) van de producent Aquion (zie ook hoofdstuk 4.4). Deze techniek lijkt wel wat op de zeezoutbatterij van het innovatiebureau Dr. Ten zoals behandeld in dit rapport. Een vergelijkingsonderzoek tussen deze batterij van Aquion en de batterij van innovatiebureau dr. Ten is niet uitgevoerd. Hier was ook geen directe aanleiding voor, dit omdat de batterij van Aquion nu nog niet worden geleverd in Europa.

Er zijn geen technische ontwerpen gevonden over de zeezoutbatterij. Er zijn geen patenten gevonden van de zeezoutbatterij die op naam staan van dr. Ten. Er zijn geen kritische reviews of verdere (diepgaande) publicaties gevonden over de zeezoutbatterij. Voor de informatie over de zeezoutbatterij is afgegaan op de informatie zoals te vinden is op de website van dr. Ten en welke mondeling of via de mail van dhr. ten Kortenaar verkregen is. Er is geprobeerd om meer informatie te verkrijgen over de zeezoutbatterij, zo is er contact opgenomen met dhr. Gehrels van netbeheerbedrijf Cogas. Zij willen de zeezoutbatterij gaan testen in een smart-grid proefopstelling. Dhr. Gehrels geeft aan de zeezoutbatterij nog niet te hebben. Verwacht wordt dat er meer informatie beschikbaar over de zeezoutbatterij en de proefopstelling rond augustus 2015. Tegen die tijd zou de gemeente Ameland kunnen overwegen contact op te nemen met dhr. Gehrels van Cogas.

Aanbeveling

Een oriëntatie van de gemeente op een proefproject met kleinschalige toepassing van zeezoutbatterijen bij huishoudens is aan te bevelen. Vooraf moeten nog wel meer inlichtingen over deze zeezoutbatterij worden ingewonnen. Het is verstandig om eerst de ervaringen van enkele proefprojecten af te wachten (bijvoorbeeld van Cogas), voordat een eigen proefproject wordt opgestart.

Bibliografie

1. *Customer Price List*. (2014). Retrieved from lean Energy Storage for a New Generation: <http://ironedison.com/images/products/Iron%20Edison/Import%20Customer%20Price%20List%20-%20Iron%20Edison%202014.pdf>
2. Abbas A. Akhil, G. H. (2015). *DOE/EPRI Electricity Storage Handbook in Collaboration with NRECA*. United States: Sandia Report.
3. accudienst. (2015, 05 22). *Hoe schakel je accu's (parallel, in serie of serie/parallel)?* Retrieved from accudienst: <http://www.accudienst.nl/h/354-hoe-schakel-je-accus-parallel-in-serie-of-serie-parallel.html>
4. Chakkaravarty, C., Peryasami, P., Jegannathan, S., & Vasu, K. I. (1991). *The Nickel/Iron battery*. India: Journal of power sources.
5. *Cogas start proeftuin voor eigen energievoorziening*. (2014, 11 01). Retrieved from Cogas: <http://www.cogas.nl/cogas-start-proeftuin-voor-eigen-energievoorziening/>
6. Delft, T. (2014, 11 05). *Edison (NiFe) battery*. Retrieved from Enipedia: http://enipedia.tudelft.nl/wiki/Edison_%28NiFe%29_battery
7. Dijkstra, J. (2012). *Zonnecollectief Ameland, Duurzame Waddeneilanden*. Ameland.
8. Dijkstra, J. (2015, mei 19). *Energieopslag op Ameland*. (B. Commandeur, Interviewer)
9. Dijkstra, J. (2015, februari). *Zonnevermogen, elektriciteitsnet*. (B. Commandeur, Interviewer)
10. *Dollar euro koers*. (2015, 06 09). Retrieved from Wisselkoers.nl: <http://www.wisselkoers.nl/dollar-euro>
11. ECN. (2015, 05 13). *Zweeftrein van 2000 km/u slaat 10 procent Nederlandse elektriciteit op*. Retrieved from ECN your energy, our passion: <https://www.ecn.nl/nl/nieuws/item/zweeftrein-van-2000-kmu-slaat-10-procent-nederlandse-elektriciteit-op/>
12. Edison, I. (2013). *Sell size chart*. Retrieved from Iron edison: <https://ironedison.com/images/products/Iron%20Edison/Cell%20Size%20-%20Updated%202013%20v2.pdf>
13. Edison, I. (2013). *System design*. Retrieved from Clean energy storage for a new generation: <http://ironedison.com/systems-sizing-and-design>

14. *Electricity storage technology comparison*. (13, 11 22). Retrieved from Electricity Storage Association (ESA) n.d.: <http://www.electricitystorage.org/technology/>
15. F. Pierie, C. v. (2015). *Energieopslaglabel: Een methode voor het vergelijken van het volledige spectrum van opslagsystemen*. Groningen, Nederland: Hanze, University of applied sciences.
16. Gehrels, d. (2015, mei 11). Up to date informatie proefopstelling Cogas. (B. Commandeur, Interviewer)
17. Gonzalez, E. L., Llerena, F. I., Perez, M. S., Iglesias, F. R., & Macho, J. G. (2015). *Energy evaluation of a solar hydrogen storage facility: Comparison with other electrical energy storage technologies*. Spain: International Journal of Hydrogen Energy (Elsevier, science direct).
18. Haisheng Chen, T. N. (2009). *Progress in electrical energy storage system: A critical review*. UK and China: Published by Elsevier Limited and Science in China Press.
19. Hurenkamp, G. (2007). *Elektrochemie voor vwo, sk 1,2*. Retrieved from Marnix College Ede:
http://sites.marnixcollege.nl//scheikunde/files%20klassen/v456/vwo5_sk12_elektrochemie_deel_I.pdf
20. Ibrahim, H., Ilinca, A., & Perron, J. (2008). *Energy storage systems- characteristics and comparisons*. Canada: Elsevier Ltd.
21. Kaldellis JK, Z. D. (2007). *Optimum energy storage techniques for the improvement of renewable energy sources based electricity generation economic efficiency*. 32:2295–305. Energy.
22. KIM, Y. M. (2012). *Novel concepts of compressed air energy storage and thermo electric storage*. Suisse: Ecole polytechnique federale de lausanne.
23. Kortenaar, M. t. (2015, 4 14). De zeezout batterij, een interview. (B. Commandeur, Interviewer)
24. Kortenaar, M. t. Info seasalt battery may 2015. *seasalt battery vs aquion*. Dr. Ten, Netherlands.
25. *Nickel Iron batteries from BeUtilityFree*. (2013). Retrieved from BeUtilityFree:
<http://www.beutilityfree.com/images/NiFeFlyer.pdf>

26. Nieuwenhuis, E. (2015, 01 27). *E-Stone Batteries: 100% groene stroom dankzij antieke accu's*. Retrieved from One world, be part of it: <http://www.oneworld.nl/groen/e-stone-batteries-100-groene-stroom-dankzij-antieke-accus>
27. O-PAC. (2015, 03 10). Retrieved from O-PAC: <http://www.o-pac.nl/opac.html>
28. Ouwehand, J., Papa, T., Gilijamse, W., & Geus, J. d. (2009). *Toegepaste energietechniek, deel 2 duurzame energie*. Den Haag: Sdu Uitgevers bv.
29. Peter Van den Bossche, F. V. (2005). *SUBAT: An assessment of sustainable battery technology*. Belgium: Science direct, journal of power sources.
30. *Powerwall, Tesla home batteries*. (2015, 06). Retrieved from Tesla motors: <http://www.teslamotors.com/powerwall>
31. Pullido, D. Q. (2015, Mei). Vragen over de zeezoutbatterij. (B. Commandeur, Interviewer)
32. Randy Ogg, N. F. (2014, februari). *Patent No. 14/174,327*. Encell Technology, Inc., Alachua, FL.
33. *Regulerende Energie Belasting (REB)*. (2014, 12 08). Retrieved from de energiegids: <http://www.deenergiegids.nl/Regulerende-Energie-Belasting.aspx>
34. Rydh, C. J. (1998). *Environmental assessment of vanadium redox and lead-acid batteries for stationary energy storage*. Sweden: Elsevier; Journal of Power Sources 80.
35. Saakes, M. (2015, 05 8). Expert view, afstudeeropdracht. (B. Commandeur, Interviewer)
36. Sabihuddin, S. (2015, 06 03). *A numerical and graphical review of energy storage and energy production technologies (dataset)*. Retrieved from http://figshare.com/articles/A_Numerical_and_Graphical_Review_of_Energy_Storage_and_Energy_Production_Technologies/1096289
37. *Salderen blijft tot 2020*. (2014, 07 19). Retrieved from HD solar, specialist in zonne energie: <http://www.hdsolar.nl/zonnepanelen/salderen-blijft-tot-2020/>
38. Simons, W. (2014, 07 07). *Nederland krijgt fabriek voor zeezoutbatterijen*. Retrieved from Energie business: <http://www.energiebusiness.nl/2014/07/07/nederland-krijgt-een-fabriek-voor-zeezoutbatterijen/>
39. *Slimme Stroom Ameland*. (2014). Retrieved from Slimme Stroom Ameland: <http://www.slimmestroomameland.nl/>

40. Smelis, P. (2015, 04 22). Vragen over Slimme Stroom Ameland. (B. Commandeur, Interviewer)
41. Soutar, I. (2012, 08 24). *Lasting Energy Storage for solar, wind and micro-hydro*. Retrieved from Renewable Energy Storage : <http://www.nickel-iron-battery.com/>
42. *Test results*. (2015, 03 19). Retrieved from Clean energy storage for a new generation: <https://ironedison.com/technical-info>
43. *The seasalt battery*. (2015, 03 17). Retrieved from Dr. Ten innovatie en prestatie: <http://www.drten.nl/zeezout-batterij/>
44. *Transport*. (2015, 06 10). Retrieved from Rolflex producent van de compactdeur: <https://www.rolflex.com/nl/deuren/transport/>
45. Vegte, H. v. (2015). *Routekaart energieopslag 2030*. Den Haag: Kema Nederland Bv. Topsector Energie, in opdracht van Ministerie van Economische Zaken .
46. Wolters, F., & Wolters, R. (2015, 03 17). *Hoe werkt de solar freezer*. Retrieved from solar freezer: <http://www.solarfreezer.nl/>
47. Xing Luo, J. W. (2015). *Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation*. UK: Elsevier; science direct.
48. *Zeezoutbatterij van Dr. Ten*. (2014, 06 15). Retrieved from youtube NL: <https://www.youtube.com/watch?v=hMUCwBe3fEE>
49. *zeezoutbatterij: veilig en goedkoop opslaan van duurzame energie*. (2014, 03 11). Retrieved from Cogas: <http://www.cogas.nl/zeezoutbatterij-veilig-en-goedkoop-opslaan-van-duurzame-energie/>

Bijlagen

I Tabel 10 Eerste schifting van elektriciteit opslagtechnieken

Techniek	Werking	Reden van afvallen
Pompaccumulatie centrale (PAC)	Bij overproductie van elektriciteit wordt water naar een hoger gelegen reservoir gepompt. Op het moment dat er veel vraag is naar elektriciteit, valt het water via waterturbines naar lageregelegen terrein. Hierbij wordt elektriciteit opgewekt. Je hebt een aantal keren rendementsverlies, bij het pompen, bij het verblijf van het water in het reservoir (verdamping) en bij de conversie naar elektriciteit. Het rendement van PAC is ongeveer 75%. Er is ook een zogenoemde ondergrondse pomp-accumulatiecentrale. Deze centrale kan worden toegepast op plaatsen waar geen natuurlijke hoogteverschillen zijn (Ouwehand, Papa, Gilijamse, & Geus, 2009). De OPAC (ondergrondse pomp accumulatie centrale) wordt misschien toegepast in Limburg om energie op te slaan (O-PAC, 2015). Mechanische opslagtechniek.	Voor PAC (pomp accumulatie centrale) ontbreekt het hoogteverschil. Voor OPAC (ondergrondse pomp accumulatie centrale) is Ameland ook niet geschikt, dit zou een grootschalig project zijn een miljardeninvestering voor nodig is (O-PAC, 2015).
Compressed air energy storage (CAES)	Mechanische opslagtechniek. Lucht wordt tot hoge druk samengeperst. De samengeperste lucht wordt onder de grond opgeslagen. Deze samengeperste lucht kan door een gasturbine weer omgezet worden in elektriciteit wanneer daar vraag naar is (Ouwehand, Papa, Gilijamse, & Geus, 2009). Het is mogelijk dat er in de toekomst micro CAES systemen op de markt komen (KIM, 2012).	Voor de opslag onder de grond moeten veilige luchtdichte geologische structuren aanwezig zijn. Bijvoorbeeld zoutkoepels, of aquifers (Ouwehand, Papa, Gilijamse, & Geus, 2009). Daarnaast zijn er erg grote investeringen

		nodig.
Energie eiland	Een groot eiland dat gebouwd kan worden in open water. Bij een overschot van energie wordt water van het meer op het eiland naar open water gepompt. Wanneer er elektriciteit nodig is, stroomt het meer weer vol. Tijdens het vollopen van het meer wordt elektriciteit met behulp van generatoren opgewekt. Volgens een bedacht concept kan 20GWh aan elektriciteit worden opgeslagen en 1200 MWe worden geleverd. Er is ook een concept dat nog anderhalf keer zo groot is (Ouwehand, Papa, Gilijamse, & Geus, 2009). Mechanische energieopslag	Dit concept is veel te grootschalig voor de gemeente Ameland alleen. Wanneer er ooit een dergelijk project wordt gerealiseerd zou de gemeente Ameland kunnen beslissen te participeren in het project.
De volgende brandstofcellen zijn niet meegenomen: direct-methanol brandstofcel, molten carbonate brandstofcel, solid oxide brandstofcel.	Chemische energieopslag	Er zijn veel verschillende brandstofcellen. Deze worden geclusterd onder de brandstofcel technologie H2.
Diverse Nikkel batterijen (zoals: Ni-Zn en NiH2)	Chemische energieopslag	Vanwege de grote hoeveelheid verschillende Ni-batterijen, is de keuze gemaakt om alleen de bekendste Ni batterijen, Ni-Cd, Ni-Fe & Ni-Mh te behandelen. Ni-Zn heeft een kleine levensduur (in cycli).
Ag-Zn batterij	Chemische energieopslag	Gebruik van de batterij voor zeer specifieke toepassingen en gebruik van zilver, dus waarschijnlijk

		niet geschikt voor grootschalige toepassingen.
Fe-Cr flow batterij,	Chemische energieopslag	Te weinig informatie over gevonden.
Gesmolten Na-Cl batterij	Chemische energieopslag	Thermische energie benodigd.
Natrium-ion batterij	Chemische energieopslag	Te laat in het onderzoek gevonden. Engelse zoekterm: sodium-ion battery.
Fe-Cr flow batterij	Ontwikkeld. Te weinig betrouwbare informatie over te vinden om op te nemen in beoordeling. Chemische energieopslag.	(..)

II Tabel 11 Overzicht toekomstige opslagtechnieken

Opslagmethode	Status/innovatie	Geschatte ontwikkelingstijd
Edison batterij (Ni-Fe)	Verbeteren van de techniek. Snellere laadtijd, voorkomen vorming van waterstof etc.	Juli 2015, go/no go voor prototype. Daarna nog verder ontwikkelen en opschalen (Nieuwenhuis, 2015).
Zeezout batterij (Na-Cl)	Prototypes ontwikkeld. Opschalen van de techniek. Toewerken naar massa productie en toepassing in reële situaties (The seasalt battery, 2015).	Het doel is om binnen 6 jaar (voor 2020) 500.000 batterijen in massaproductie te produceren (Simons, 2014).
Micro CAES	In ontwikkeling. (KIM, 2012)	(..)
Nano-supercondensatoren	Ontwikkeling op vermogen en energiedichtheid, lage kosten.	2013-2015 (Abbas A. Akhil, 2015)
Verbeterde vliegwielen	Systeem studies, hogere energiedichtheid.	In ontwikkeling: 2015. (Abbas A. Akhil, 2015)
H2/Br Flow batterij	Lage kosten opslag	2013-2014, pilot demo (Abbas A. Akhil, 2015)
Verbeterde loodzuur batterij	Lage kosten, grotere levensduur.	2013-2015 vroege veldtesten. (Abbas A. Akhil, 2015)
Verbeterde Li-ion, Li-air en anderen	Laboratorium schaal. Lage kosten, hoge energiedichtheid.	2015-2020 (Abbas A. Akhil, 2015)
Nieuwe concepten (batterijen met nieuwe elementen etc.)	Verlaging van kosten, hogere energiedichtheid etc.	2015-2020 (Abbas A. Akhil, 2015)
Solar freezer Beschrijving: buffert thermische energie in een grote waterzak en laat deze op gewenste tijd afkoelen. Bij het afkoelen komt bruikbare warmte vrij.	Eerste systeem is getest. Resultaten positief. Nog eens tien systemen worden getest. (Let op: Solar freezer voldoet niet aan de definitie van een ELOPS)	De testresultaten van de tien systemen worden in 2015 bekend. Wanneer deze resultaten positief zijn, worden er meer gemaakt. (Wolters & Wolters, 2015).
Zweeftrein of Energy train Beschrijving: elektriciteit wordt gebruikt om een zweeftrein in een ondergrondse vacuümbuis in beweging te zetten. De kinetische energie kan bij vraag weer omgezet worden in elektriciteit. (ECN, 2015).	ECN is bezig met het zoeken van partners voor de verdere ontwikkeling.	

III Berekeningen

Berekeningen met Na-Cl batterijen

De prijs van de zeezoutbatterij is bepaald op €100-120 per kWh (Zeezoutbatterij van Dr. Ten, 2014). Afhankelijk van de aannames van de capaciteit van de batterij, kost elke batterij €250-400 per batterij (gunstigste inschatting) of €300-480. Er zijn 2 van deze batterijen nodig, dit brengt de aanschafprijs van de zeezoutbatterijen tussen de 500 en 960 euro. Dit is puur de aanschafprijs van de batterijen, hier komt ook nog een omvormer bij en installatiekosten. De prijs van de omvormer wordt geschat op ongeveer 800-1200 euro. De installatiekosten worden geschat tussen 400 en 600 euro. De verwachte aanschafkosten van een zeezoutbatterij van 5kWh komen daarmee te liggen op ongeveer € 1700-2760. Dit is een echte schatting.

Berekeningen met de Ni-Fe batterijen

De installatie met Ni-Fe batterijen bestaat uit een rij van 10 batterijen. De afmetingen van deze installatie staan weergegeven op de website (Edison, Sell size chart, 2013) De breedte is 96,2 inch, de diepte is 11,45 inch en de hoogte is 13,58 inch. Uitgedrukt in centimeters is dit ($b \cdot d \cdot h$) $244,3 \cdot 29,1 \cdot 34,5$ cm. Dit geeft een inhoud van ongeveer 245 liter. Het gewicht staat ook op de website en is per batterij 80,5 pound. Een Amerikaanse pound heeft een massa van 0,453 kilogram. Dit brengt het totale gewicht van de installatie op $20 \cdot 80,5 \cdot 0,453$ (aantal batterijen * volume per batterij in pounds * omrekeningsfactor in kg) = 729,33 kg.

Berekeningen met zeecontainer zeezoutbatterijen

Het aantal batterijen dat opgesteld kan worden in een zeecontainer van 40 ft opstelling wordt nu berekend. Een enkele zeezoutbatterij heeft zoals gezegd de volgende afmetingen $935 \cdot 330 \cdot 310$ mm ($h \cdot b \cdot l$). Door meerdere batterijen aan elkaar te koppelen verandert alleen de lengte van de opstelling. Er wordt nu gekeken hoeveel batterijen aan elkaar gekoppeld kunnen worden. De lengte van de zeezoutcontainer is 12000 mm. Voor de zekerheid wordt voor de lengte van de zeezoutbatterij uitgegaan van 341 mm (310 mm + 10% veiligheidsmarge). Dit betekent dat er in de lengte 35 zeezoutbatterijen in een rij geplaatst kunnen worden ($12000\text{mm}/341\text{mm}=35,14\text{mm}$). Nu bekend is hoeveel batterijen er in een rij passen, wordt gekeken hoeveel van deze rijen er in een zeecontainer passen. De breedte van een zeecontainer is 2340 mm, een rij zeezoutbatterijen heeft een breedte van 330 mm, voor de zekerheid wordt uitgegaan van een breedte van 363 mm (330 mm +10% veiligheidsmarge). Er wordt ook uitgegaan van 1 looppad van 500 mm. Dit geeft de volgende berekening ($2340\text{mm}-500\text{mm}=1840\text{mm}$), ($1840\text{ mm}/363\text{ mm}= 5,0$). Dit betekent dat er vijf rijen van 35 zeezoutbatterijen geplaatst kunnen worden in een zeecontainer, dit zijn in totaal 175 zeezoutbatterijen.