

Energieneutrale Sluis van de Toekomst

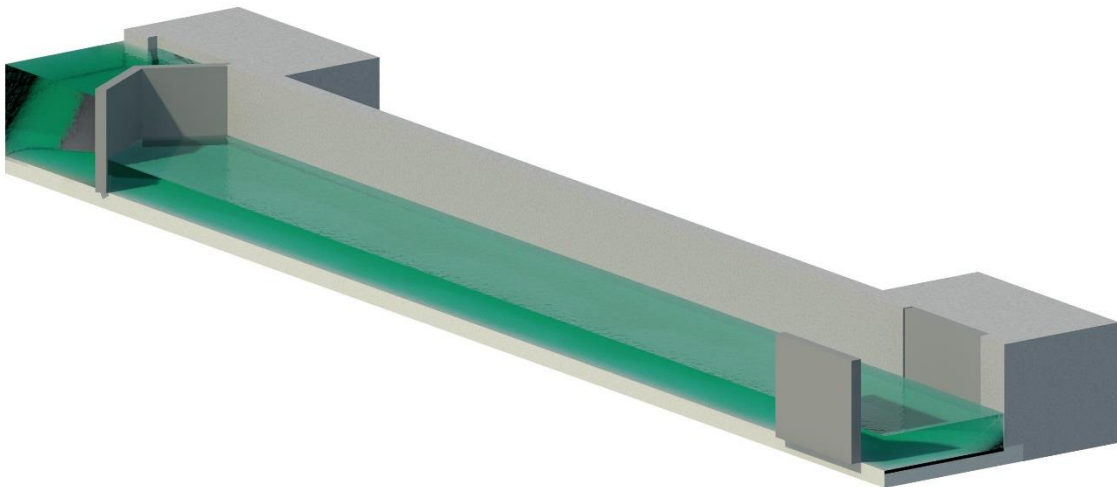
Hoofdrapport

Afstudeeronderzoek energieneutrale Sluis van de Toekomst

Jeroen Julicher en Douwe Willems

Hogeschool van Arnhem en Nijmegen

30-05-2017



Verantwoording

Titel

Auteurs

Studentnummer

Revisie

Datum

Hoofdrapport

Jeroen Julicher en Douwe Willems

530744/521833

Definitief

30 mei 2017

Sweco Nederland B.V.

Hogeschool van Arnhem en Nijmegen

Hogeschool van Arnhem en Nijmegen

Ing. Didier Adriaansens

Ir. Casper van der Giessen

Ir. Thomas Beuker



Voorwoord

Dit rapport bevat de bachelor thesis “Energie neutrale Sluis van de Toekomst”. Een energieneutrale schutsluis verkregen door puur en alleen het schutproces zelf, is een nieuw concept. Dit afstudeeronderzoek is gedaan voor de specialisaties Waterbouwkunde en Constructie die deel uitmaken van de bachelor Civiele Techniek van de Hogeschool van Arnhem en Nijmegen.

Het onderwerp is opgesteld door de afstudeerders en samen met Sweco Nederland B.V. verder ontwikkeld tot een onderzoek. Dit afstudeeronderzoek is tevens begeleid door Sweco en Hogeschool van Arnhem en Nijmegen.

We willen op deze manier graag een aantal mensen bedanken voor hun betrokkenheid bij dit afstudeeronderzoek. Begeleiders Casper van der Giessen en Thomas Beuker van de Hogeschool van Arnhem en Nijmegen, en Didier Adriaansens van Sweco Nederland B.V.. Verder worden de collega’s vanuit Sweco bedankt, die ons tijdens dit afstudeeronderzoek hebben ondersteund met hun expertise.

Bij deze wordt aangestipt dat figuren en afbeeldingen zonder bronvermelding voortkomen uit eigen werk.

De Bilt, mei 2017
Jeroen Julicher en Douwe Willems

Samenvatting

In dit rapport is onderzoek gedaan naar het creëren van een energieneutrale sluis. Aanleiding hiervoor is dat Rijkswaterstaat zich de doelstelling heeft gesteld om in 2020 een energieneutrale sluis te creëren. Daar komt bij dat een groot deel van het areaal aan schutsluizen van Rijkswaterstaat in de komende decennia einde levensduur bereikt. Dit is een goede mogelijkheid om een ontwerp te ontwikkelen dat beide probleemstellingen aanhaalt.

In dit onderzoek wordt voornamelijk ingegaan op het onderdeel energie. Het economisch aspect en het duurzaam aspect komen echter ook aan bod. Verder worden de behandelde ideeën op een constructief en waterbouwkundig wijze onderbouwd.

Voor het onderzoek wordt een sluisontwerp gecreëerd dat in het vervolg “Sluis van de Toekomst” wordt genoemd. Op basis van de dimensies en uitgangspunten uit deze Sluis van de Toekomst, wordt het verdere onderzoek gebaseerd.

Een van de belangrijkste onderdelen van het onderzoek is het bepalen van de uitgangspositie op het gebied van energie. Uit een inventarisatie waarbij een aantal sluizen met dezelfde aspecten als de Sluis van de Toekomst zijn onderzocht, is het gemiddelde energieverbruik bepaald. Dit is vervolgens vertaald naar de Sluis van de Toekomst, waarbij besparingen door middel van betere apparatuur zijn meegenomen.

Het uiteindelijke doel is het neutraliseren van dit energieverbruik. In dit onderzoek wordt puur en alleen door de functie van de schutsluis, daarmee wordt het schutproces bedoeld, het doel bereikt. Dit neutraliseren is op twee manieren te bereiken.

1. Het energieverbruik van de Sluis van de Toekomst wordt in eerste instantie verminderd door middel van het vervangen van enkele onderdelen van de schutsluis en het introduceren van nieuwe technieken. Zo worden voornamelijk de constante verbruikers vervangen door nieuwe verbeterde producten en zal de bediening van een keten schutsluizen op één centrale plek uitgevoerd worden. Een groot deel van het resterende energieverbruik wordt bespaard door het bewegingsmechanisme, dat tijdens het schutproces in werking treedt, minder energie te laten verbruiken. In dit onderzoek is bepaald wat het effect is van het toepassen van een alternatieve lichtere materiaalsoort voor het te bewegen onderdeel, op het totale energieverbruik van de schutsluis.
2. Tijdens het schutproces wordt een grote watermassa van het hoger gelegen pand naar het lager gelegen pand verplaatst. In dit proces zit winbare potentiële energie. Deze energie wordt in de Sluis van de Toekomst gewonnen, door het toepassen van een waterkrachtturbine in het omloopriool.

De Sluis van de Toekomst bevat sluisdeuren en afsluiters van composiet, om zo energie te kunnen besparen tijdens het bewegen van de keermiddelen. Om energie op te wekken worden waterkrachtturbines in de omloopriolen toegepast. Dit alles resulteert in een energiepositieve schutsluis.

Het toepassen van de Sluis van de Toekomst vraagt echter om een financiële bijdrage, ten opzichte van de kosten van de huidige sluis zoals ze nu gebouwd worden. Een overweging kan zijn om enkel onderdelen van de Sluis van de Toekomst toe te passen, wat het geheel op economisch gebied tevens rendabel maakt.

Summary

In this report, research has been undertaken to create an energy neutral navigation lock. Motivation for this is that Rijkswaterstaat (Dutch ministry of infrastructure and environment) has set a goal to create an energy neutral navigation lock by 2020. This in addition to the fact that a large part of Rijkswaterstaat's navigation locks are going to reach the end of their lifespan. This opens up an opportunity to create a design that addresses both problems.

The main emphasis of the research will be the energy consumption. However the economic aspect and the sustainability aspect will also be addressed.

Furthermore, the developed idea's will be substantiated on a constructive and hydraulic aspect.

For the research a navigation lock design has been created which, as of now, will be called "Sluis van de Toekomst". Based on the dimensions and the fundamentals of this Sluis van de Toekomst, further research will be executed.

One of the most important components of the research is to determine the starting amount of energy consumption. From an inventory, where a certain amount of navigation locks with the same aspects as the Sluis van de Toekomst have been examined, the average energy consumption is determined. This has then been translated to the Sluis van de Toekomst.

The final goal is to neutralize this energy consumption. Within this research the goal will be reached solely by using the function of the navigation lock itself, which is the levelling of the water masses. This neutralization can be achieved in two ways.

1. The energy consumption of the Sluis van de Toekomst, will initially be reduced by replacing certain parts of the navigation lock and introducing new techniques. The parts which will be replaced, are mainly the components with a constant usage of energy. These will be replaced by new and better products and the operating of a chain of navigation locks will be centralized. A large amount of the remaining energy consumption will be reduced by making the mechanisms which induce movement only during the levelling process, consume less energy. Within this research it has been determined what the effect of using an alternative, lighter material for the movable parts will be on the total energy consumption of the navigation lock.
2. During the levelling process, a big mass of water will be shifted from the higher segment to the lower segment. In this process there is a lot of potential energy present. That energy will be utilized in the Sluis van de Toekomst, by applying a hydropower turbine in the bypasses.

The Sluis van de Toekomst contains valves and lock gates made from composite, to reduce the amount of energy used during the movement of these water repelling structures. To generate energy, hydropower turbines are placed in the bypasses. Everything combined results in an energy positive navigation lock.

Developing the Sluis van de Toekomst will require a higher financial contribution, compared to the costs of a navigation lock currently being constructed. A consideration could be to apply only certain parts of the Sluis van de Toekomst which will make the concept economically profitable as well as more energy efficient.

Inhoudsopgave

1	Inleiding.....	1
1.1	Aanleiding	1
1.2	Introductie sluis	2
1.3	Probleemanalyse	3
1.3.1	Hoofdvraag	3
1.3.2	Doelstelling	3
1.3.3	Hypothese.....	3
2	Uitgangspunten.....	4
2.1	Sluis van de Toekomst.....	4
2.2	Energieverbruik sluis.....	6
3	Energiebesparing	10
3.1	Alternatievenstudie.....	10
3.1.1	Aanpak.....	10
3.1.2	Invloed massa sluisdeur op energieverbruik bewegingsmechanisme	11
3.1.3	Vergelijk massa van de alternatieve sluisdeurconstructies	12
3.1.4	Vergelijk massa van de alternatieve afsluiters	13
3.1.5	Invloed massa afsluiter op energieverbruik bewegingsmechanisme	14
3.2	Voorkeursalternatief	15
3.2.1	Vergelijk energieverbruik alternatieven	15
3.2.2	Voorkeursalternatief energie besparende methoden	16
3.3	Resultaten	17
4	Energiewinning.....	19
4.1	Alternatievenstudie.....	19
4.1.1	Bepaling locatie van de turbine.....	19
4.1.2	Bepaling type turbine	20
4.2	Toepassing.....	21
4.2.1	Energieopbrengst	22
4.2.2	Kosten en levensduur	24
4.2.3	Invloed op het schutproces.....	24
4.2.4	Omvorming	25
4.2.5	Vissen en vuil	25

5	Life Cycle Costs	27
5.1	<i>Sluisdeuren</i>	27
5.2	<i>Turbines</i>	28
5.3	<i>Resultaten</i>	28
6	Conclusie	30
6.1	<i>Conclusie</i>	30
6.2	<i>Discussie</i>	30
6.3	<i>Aanbevelingen</i>	31
7	Bibliografie.....	32
7.1	<i>Figuren en tabellen</i>	32
7.2	<i>Literatuur</i>	33

Bijlagen

Lijst van inhoudsopgave van de bijlage

A – Bepaling uitgangspunten

B – Onderbouwing energieverbruik

C – Toelichting bepaling verbruik bewegingswerk

D – Onderbouwing MCA's

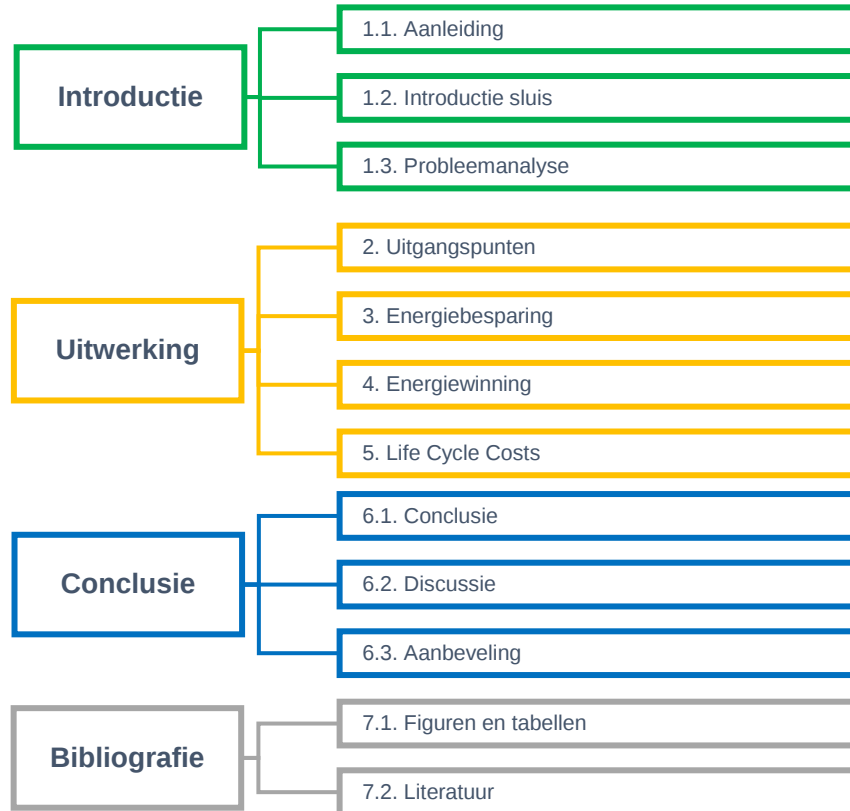
E – Bepaling energieopbrengst

F – Life Cycle Costs

Symbolen, Afkortingen en benamingen

MWW	MultiWaterWerk (programma vanuit Rijkswaterstaat)
CEMT	Conférence Européenne des Ministres de Transport,
MCA	Multi Criteria Analyse
VVK	Vezel Versterkte Kunststof
HSB	Hoge Sterkte Beton
LCC	Life Cycle Costs, totale kosten van een constructie gedurende de gehele levensduur
LCA	Levenscyclusanalyse, totale milieubelasting van een constructie gedurende de gehele levensduur
Sluis	Schutsluis, om schepen van hoog naar laag en vice versa te transporteren
Huidige sluis(ontwerp)	Sluis, zoals ze vandaag de dag gebouwd worden en functioneren
Sluis van de Toekomst	Sluis die als uitgangssituatie dient, bepaald aan de hand van onder andere MWW
Grontmij	Sinds 2016 Sweco Nederland B.V.

Leeswijzer



Per hoofdstuk uit bovenstaand organogram wordt het volgende uitgewerkt:

- 1.1 Waarom is dit afstudeeronderzoek opgezet?
- 1.2 Korte toelichting over de werking en onderdelen van de sluis.
- 1.3 Onderzoeksvraag, doel en hypothese.
2. De samenstelling van de Sluis van de Toekomst en overige omstandigheden.
3. Alternatievenstudie en resultaten van energiebesparende methoden.
4. Alternatievenstudie en resultaten van energiewinnende methoden.
5. Totale kosten van de Sluis van de Toekomst vergeleken met een huidige sluis.
- 6.1 Wat kan er geconcludeerd worden uit de gevonden resultaten?
- 6.2 Waarom zijn bepaalde keuzes gemaakt, wat kan er verbeterd worden, en wat zijn de vervolgstappen?
- 6.3 Hoe kunnen de gevonden resultaten worden toegepast?
- 7.1. Verwijzing van toegepaste figuren en tabellen in het rapport.
- 7.2. Verwijzing naar de gebruikte literatuur waaronder referenties vanaf het internet.

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Rijkswaterstaat is namens het ministerie van Infrastructuur en Milieu, verantwoordelijk voor het beheer van de hoofdvaarwegen in Nederland [17]. Hieronder vallen ook kunstwerken, zoals sluizen. Een groot aantal van deze sluizen zijn rond de jaren '30 van vorige eeuw gebouwd en bereiken in de komende decennia het einde van hun levensduur. Het vervangen en renoveren van deze sluizen is een enorme klus, doordat in een relatief kort tijdsbestek veel sluizen aangepakt moeten worden. Om dit goed te organiseren heeft Rijkswaterstaat het project MultiWaterWerk (MWW) in het leven geroepen [10] [23].

Rijkswaterstaat is bezig om mede voor dit project een “slimme” standaard sluis te ontwikkelen. Met slim wordt bedoeld dat één sluisontwerp op meerdere locaties toepasbaar kan zijn. Door het opstellen van verschillen bouwblokken moet het ontwerp- en uitvoeringsproces worden vereenvoudigd.

Doordat iedere sluis op een andere locatie is gesitueerd, zijn er verschillende omgeving gerelateerde uitgangspunten van toepassing. Deze uitgangspunten zijn variabel, maar het ontwerp van de sluis kan hetzelfde blijven. Men beperkt zich dus tot het standaardiseren van de onderdelen van de sluis die niet omgevingsafhankelijk zijn. Hierdoor ontstaat meer eenheid tussen de sluizen.

Dit is tevens voordelig voor de beheer en onderhoudsfase. Wanneer de sluizen bestaan uit dezelfde componenten zal dit proces worden vergemakkelijkt. Ook moet het mogelijk worden om onderdelen onderling uit te wisselen. Zo hoeft niet iedere sluis zijn eigen reserve onderdelen op voorraad te hebben, maar is het mogelijk om bijvoorbeeld een set reservedeuren voor een aantal verschillende sluizen te gebruiken. Dit alles heeft een impact op de totale levensduur kosten, Life Cycle Costs (LCC) van de schutsluizen.

Met dit afstudeeronderzoek wordt het ontwerp van deze standaard sluis verder ontwikkeld op het gebied van energie. Rijkswaterstaat streeft naar een energieneutrale sluis in 2020 en een volledig energie neutraal areaal in 2030. Men spreekt van een energieneutraal object wanneer het op jaarbasis geen netto toevoer van energie behoeft. Zo ontstaat een energieverbruik van nul.

“Het energieneutraal functioneren van Rijkswaterstaat in 2030, zodat het netto energiegebruik nul is” (Schultz van Haegen-Maas Geesteranus, 2016, Nieuwe ambitie, par. 2) [21].

Deze doelen geven aanleiding tot het combineren van de energiedoelen en de vervangingsopgave vanuit MWW.

Het project MWW is dus een kans om ervoor te zorgen dat de sluizen die worden gerenoveerd, ook direct een bijdrage leveren aan de energiedoelen van Rijkswaterstaat. Dit kan door energie te besparen en/of door energie op te wekken. Beide zullen in dit onderzoek aan bod komen.

Voor energiewinning wordt er gekeken naar processen die horen bij een sluis en zijn functie. Voor de energiebesparing wordt onderzoek gedaan naar de bestaande processen in een sluis. Hier ligt namelijk de oorsprong van het energieverbruik.

1.2 Introductie sluis

Schutsluizen zijn over de hele wereld te vinden, maar in Nederland staan veruit de meeste schutsluizen per vierkante kilometer. Dit komt doordat Nederland in een delta is gelegen, waardoor waterhuishouding altijd al een van de belangrijkste taken voor de Nederlanders is geweest.

De schutsluizen zorgen voor het overbruggen van het hoogteverschil. Dit kan voorkomen in kustgebieden, waar eb en vloed aanwezig zijn. Verschil in waterhoogte ontstaat ook in de rivieren. Stuwen zijn hier veelal de oorzaak van. Een derde mogelijkheid is een verbinding tussen twee rivieren. Een schutsluis is dan nodig om scheepvaart mogelijk te maken.

De doelgroep en intensiteit van de schutsluis is sterk afhankelijk van de locatie en de omgevingsfactoren. De dimensies van een schutsluis, gelegen in het binnenland, worden afgestemd op de CEMT-klasse. Deze is opgesteld door de Conférence Européenne des Ministres de Transport [14], waar CEMT-klasse zijn naam aan heeft te danken. De CEMT-klasse is bedoeld om een onderverdeling te maken in de afmetingen van de schepen, om hier de vaarwegen op af te stemmen.

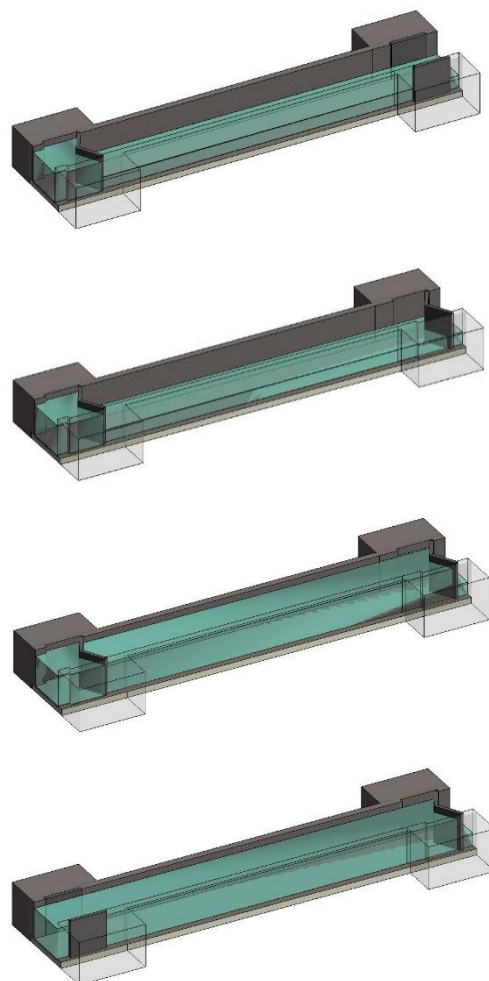
De dimensies en de omstandigheden voor iedere bestaande schutsluis zijn anders. Door de ontwikkelingen binnen het ontwerpen van schutsluizen, wordt iedere sluis apart ontworpen waardoor een grote verscheidenheid in schutsluizen terug te vinden is in Nederland.

Het hoogteverschil tussen de twee waterpanden wordt overbrugd door middel van het schutproces. Tijdens dit proces worden beweegbare onderdelen, meestal in de vorm van schuiven, verplaatst. Hierdoor ontstaat een verbinding tussen het hoger- en lageregelegen pand. De meest voorkomende van deze vul- en ledigsystemen zijn omloopriolen en openingen in de sluisdeuren.

Door middel van de wet van communicerende vaten wordt het waterniveau van de twee panden gelijkgetrokken. Wanneer het kerende object, in dit geval de sluisdeuren, vervolgens geopend wordt, kan het schip naar het volgende waterpand varen. Dit principe is in het naast geplaatste figuur weergegeven.

Het vullen en ledigen van de schutsluis is een natuurlijk proces, enkel bij het in gang zetten van het proces wordt energie verbruikt.

Tijdens dit schutproces vindt er een waterstroom plaats van het hoger gelegen pand naar het lager gelegen pand. In deze stroming bevindt zich potentiële energie. Het is mogelijk om deze energie om te zetten in elektriciteit. Het blijft echter belangrijk om de functie van de schutsluis, de doorvaart van de scheepvaart, te kunnen blijven garanderen.



Figuur 1 Schutproces

1.3 Probleemanalyse

1.3.1 Hoofdvraag

Op basis van het project MWW is het idee ontstaan om onderzoek te doen naar de energiehuishouding van een schutsluis. Hierbij wordt gestreefd naar het energieneutraal maken van de schutsluis, door middel van energiebesparing en energieopwekking. Hieruit volgt de volgende hoofdvraag voor het afstudeeronderzoek:

“Wat zijn de mogelijkheden van energieopwekking en energiebesparing in de Sluis van de Toekomst?”

Voor deze vraag wordt onderzoek gedaan naar de energiehuishouding van de sluis. Er wordt hierbij enkel gekeken naar de processen die te maken hebben met de functie van de schutsluis zelf. Nevenconstructies als bruggen en gemalen, worden niet meegenomen in dit afstudeeronderzoek.

Het energieverbruik in het bouw- en sloopproces valt buiten de scope.

1.3.2 Doelstelling

Het doel van dit afstudeeronderzoek is het opstellen van een sluismodel, waarbij rekening gehouden is met verbeteringen, ten opzichte van huidige sluizen, op het gebied van energie. Hierbij kunnen een aantal producten worden verwacht:

- Opzet energieneutrale sluis
- Overzicht op het gebied van energiewinst/verbruik
- Overzicht op het gebied van kosten ten opzichte van een huidige sluis

1.3.3 Hypothese

De oudste sluizen uit het programma MWW bestaan al bijna 100 jaar. In die tijd heeft de wereld en Nederland vele veranderingen doorstaan. Met name op het gebied van technologie.

Aangezien er bij een sluis altijd potentiële energie aanwezig is, in de vorm van water met een hoogteverschil, moet het mogelijk zijn om energie op te kunnen wekken. Het is nog wel de vraag of energieopwekking economisch verantwoord is.

Voor de energiebesparing zijn er ook mogelijkheden. In de loop der jaren zijn er nieuwe materialen ontwikkeld die lichter en sterker zijn dan de conventionele materialen. Door het toepassen van deze materialen en andere energiebesparende methodes/producten moet het mogelijk zijn om het energieverbruik al een stuk te reduceren.

Een combinatie van bovenstaande methodes zou het mogelijk moeten maken om een sluis energieneutraal te kunnen laten functioneren, zodat deze dus “zelfvoorzienend” wordt.

2 Uitgangspunten

2.1 Sluis van de Toekomst

Voor dit afstudeeronderzoek wordt door de afstudeerders een sluis samengesteld die dient als uitgangssituatie, genaamd Sluis van de Toekomst. Hierbij wordt het project MWW als basis aangehouden. Voor het project MWW heeft Sweco, in opdracht van Rijkswaterstaat, een sluizenboekje opgesteld. Hierin zijn alle sluizen die vallen onder MWW geïnventariseerd op verschillende onderdelen die betrekking hebben op de eigenschappen van de sluis. De resultaten hiervan zijn gebundeld in dit boek.

Voor de Sluis van de Toekomst is onderzocht wat de meest voorkomende CEMT-klasse is binnen MWW. Vervolgens zijn de sluizen met deze CEMT-klasse verder onder de loep genomen om te achterhalen wat de bijbehorende eigenschappen zijn. Hieruit zijn gemiddeldes genomen om zo een goede referentie te krijgen van de sluizen uit MWW. Niet alle onderdelen zijn bepaald aan de hand van de sluizen van MWW. Er moet ook naar de richtlijnen¹ worden gekeken, zodat de Sluis van de Toekomst hieraan voldoet. In onderstaande tabel is een overzicht te vinden waarin de uitgangspunten zijn opgesomd.

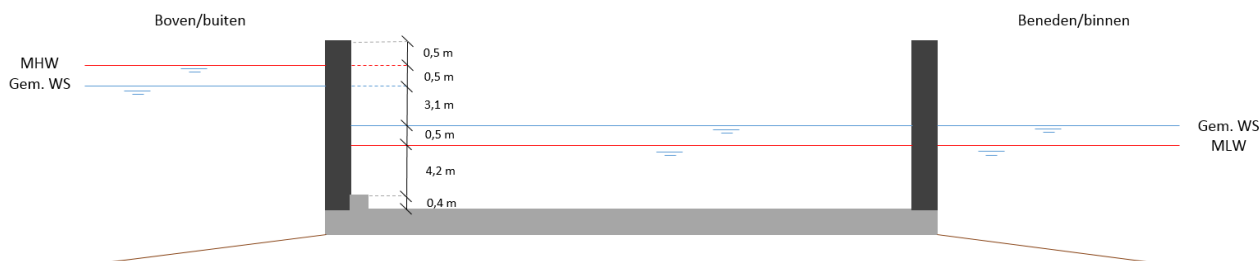
Tabel 1 Overzicht van uitgangspunten voor de Sluis van de Toekomst

Onderdeel	Waarde	Eenheid
<u>Algemeen</u>		
<i>Sluistype</i>	Binnenvaartssluis	
<i>CEMT-klasse</i>	Va	
<i>Deur type</i>	Puntdeuren	
<i>Kolklengte</i>	125	meter
<i>Doorvaarbreedte</i>	12,5	meter
<i>Verval</i>	3,1	meter
<i>Inhoud schutwater</i>	4.850	m ³
<i>Openingsuren</i>	8.760	uur per jaar
<i>Aantal schuttingen</i>	13.465	schuttingen per jaar
<u>Sluisdeuren</u>		
<i>Hoogte sluisdeur</i>	9,2	meter
<i>Breedte sluisdeur</i>	7,2	meter
<u>Schutproces</u>		
<i>Duur sluisdeur openen/sluiten</i>	1	minuut
<i>Duur nivelleren</i>	8-10	minuten

¹ Richtlijn Vaarwegen 2011 [3] en Ontwerp van schutsluizen [1]

Verder wordt in de Sluis van de Toekomst een gladde kolk van staal of beton toegepast. De sluishoofden en de vloer van de schutsluis bestaan tevens uit beton.

Voor het bepalen van de waterstanden is er uitgegaan van het gemiddelde verval van de sluizen met CEMT-klasse Va uit het Sluizenboekje. Om de overige hoogtes van de Sluis van de Toekomst te bepalen is rekening gehouden met de geldende richtlijnen².



Figuur 2 Overzicht van waterstanden in de Sluis van de Toekomst

Er wordt voor dit afstudeeronderzoek uitgegaan van een binnenvaartssluis van CEMT-klasse Va. Deze zal het gehele jaar open zijn en zal ongeveer 13.500 schuttingen per jaar uitvoeren. Het onderzoek richt zich op de schutsluis en zijn hoofdactiviteit, nivelleren. Nevenconstructies, zoals bruggen en gemalen, vallen buiten de scope. Voor het besparen en opwekken van energie wordt gekeken naar de processen die te maken hebben met het schutproces.

Het schutproces duurt ongeveer 10 minuten en zal gemiddeld 1,5x per uur plaats vinden. In deze tijd zal er bijna 5.000 m³ water in beweging zijn en is een mogelijkheid voor energieopwekking. Dit is namelijk het enige moment dat het water in beweging is. Voor energiebesparing, worden ook nog processen buiten het nivelleren onderzocht.

Voor een gedetailleerdere uitwerking van de uitgangspunten, wordt verwezen naar Bijlage A.

² Richtlijn Vaarwegen 2011 [3] en Ontwerp van schutsluizen [1]

2.2 Energieverbruik sluis

Om te bepalen of een sluis energieneutraal te maken is, wordt eerst gekeken naar wat een sluis nu eigenlijk verbruikt. In 2010 is er door Sweco onderzoek gedaan naar het energieverbruik van kunstwerken, waaronder sluizen. Per kunstwerk is er een zogenoemde energiescan gemaakt [15]. Hierin is alle apparatuur opgenomen die energie, gas, diesel en elektriciteit verbruiken en het daarbij horende energieverbruik. Van het mechanisme om de sluisdeuren te openen en sluiten, tot het koffiezetapparaat van de sluiswachter. Voor dit afstudeeronderzoek zijn deze gegevens geanalyseerd en verwerkt om zo het energieverbruik van de huidige sluis en de Sluis van de Toekomst te kunnen bepalen.

Om tot het energieverbruik van de Sluis van de Toekomst te komen, wordt eerst het energieverbruik van een huidige sluis bepaald. Zo kan bepaald worden wat het energieverbruik vandaag de dag is en hoe het energieverbruik verdeeld is.

De energieverbruiken zijn onder te verdelen in 8 categorieën:

1. *Aandrijving en omvorming*: onderdelen die betrekking hebben op de aandrijving van iets in de sluis, o.a. bewegingswerken van sluisdeuren en deurschuiven, (olie)pompen en slagbomen.
2. *Bediening/PC*: onderdelen die betrekking hebben op de bediening van de sluis, zoals marifoon, computer, beeldschermen en printers.
3. *Diverse*: onderdelen die buiten de ander categorieën vallen, zoals koelkast, koffiezetapparaat en kastventilatie.
4. *Klimaatbeheersing*: onderdelen die betrekking hebben op klimaatbeheersing, zoals airconditioning en verwarming van het bedieningsgebouw.
5. *Noodstroomvoorziening*: onderdelen die nodig zijn om een stroomuitval onopgemerkt te laten plaatsvinden, zoals een no-break installatie om een soepele overgang te creëren tussen stroom van het net en een UPS (accu of aggregaat).
6. *Signalering en beveiliging*: onderdelen die betrekking hebben op de signalering en beveiliging, zodat alles veilig kan verlopen, zoals CCTV, meetsensoren en seinlampen.
7. *Stand-by en conditionering*: onderdelen die te maken hebben met zaken rondom stand-by zaken, zoals PLC's, een soort kleine programmeerbare computer die zorgt voor de aansturing van een ander proces.
8. *Verlichting*: Hieronder valt alles met betrekking tot verlichting, zoals terreinverlichting en kolkverlichting.

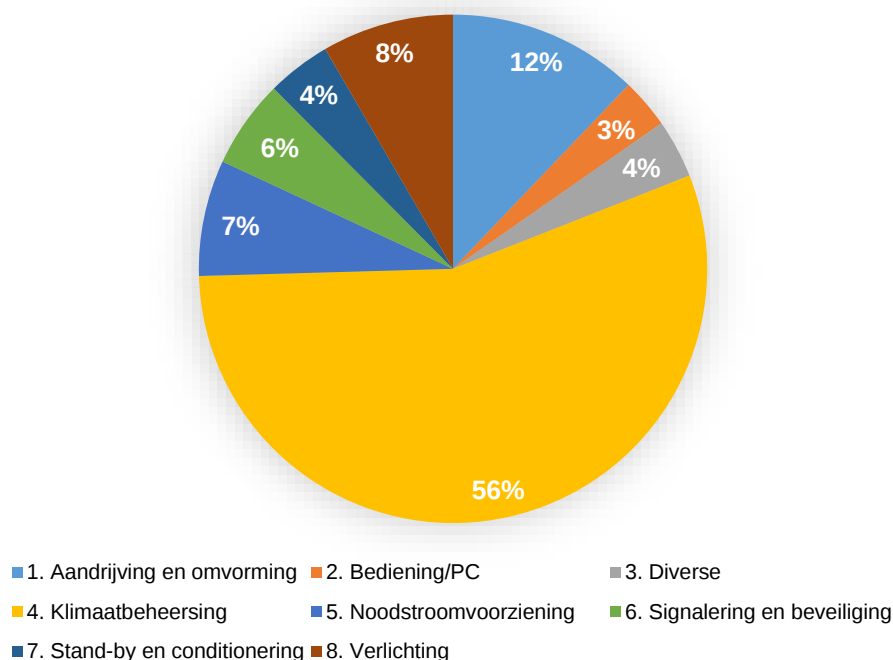
De energieverbruiken van de huidige sluis en de Sluis van de Toekomst zijn bepaald aan de hand van 9 verschillende sluizen in Nederland. 4 van deze sluizen representeren het energieverbruik, exclusief de Aandrijving en omvorming, van een sluis met CEMT-klasse Va. Voor de Aandrijving en omvorming zijn 5 sluizen geanalyseerd om het energieverbruik van onder andere de puntdeuren te kunnen bepalen.

De energiescans bevatten meer informatie dan nodig. Daarom zijn de energiescans geanalyseerd om te bepalen welke gegevens bruikbaar zijn voor dit onderzoek. Aangezien dit onderzoek zich richt op het verbruik van de schutsluis zelf, worden nevenactiviteiten als gemalen en bruggen, die vaak op een sluiscomplex gelegen zijn, buiten beschouwing gelaten.

De energieverbruiken in de energiescans staan voor elektrische apparatuur vermeld in kilowattuur. Voor apparaten die gebruik maken van gas of diesel, wordt het energieverbruik vermeld in kubieke meters en liters. Omdat er verschillende eenheden zijn gebruikt zijn alle verbruiken omgerekend naar Joules, de standaard eenheid voor energie. Vervolgens zijn de energieverbruiken nog een keer terug gerekend naar kilowattuur omdat dit een meer gebruikelijkere eenheid is voor apparatuur.

Door het uitmiddelen en optellen van de energieverbruiken per categorie, is een energieverbruik nagebootst dat de huidige sluis representeert. In onderstaand cirkeldiagram is de verdeling van het gemiddelde energieverbruik van een huidige sluis weergegeven.

Verdeling gemiddeld energieverbruik huidige sluis



Figuur 3 Verdeling gemiddeld energieverbruik huidige sluis

Het totale gemiddelde energieverbruik voor een huidige sluis komt neer op 140.000 kWh per jaar. Dit staat gelijk aan het energieverbruik van ongeveer 9 gemiddelde huishoudens in Nederland.

In Figuur 3 is te zien dat Klimaatbeheersing zorgt voor meer dan de helft, 56%, van het totale energieverbruik van een huidige sluis. Dit vormt dus een belangrijke factor in het energieverbruik. Aandrijving en omvorming is met 12% de een na grootste energieverbruiker. Het grootste verbruik van Klimaatbeheersing in grotendeels te verklaren door het feit dat de energiebron gas is. Gas heeft een omrekenfactor, om van m³ naar Joules te gaan, die bijna 10x groter is als die van elektrische energie, kWh.

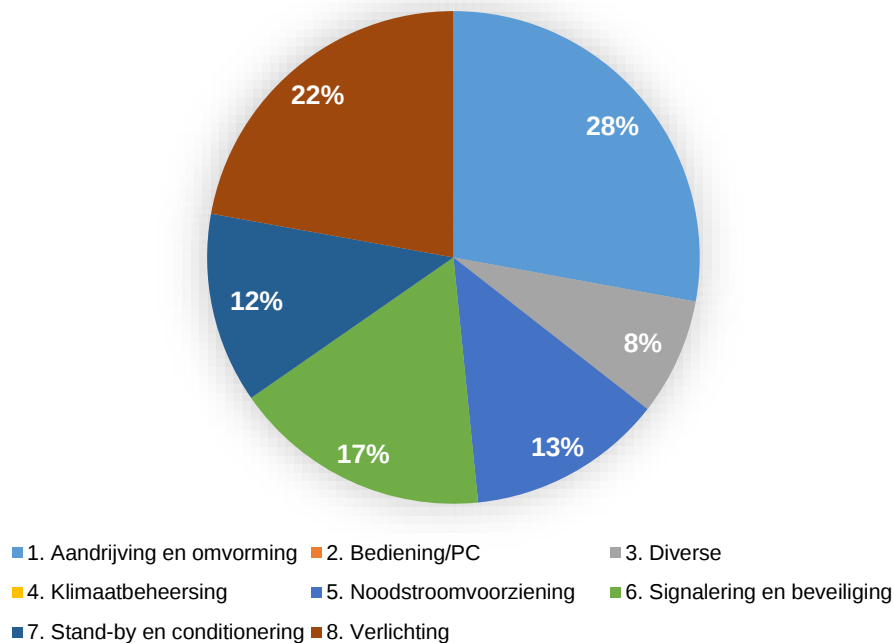
De naam Sluis van de Toekomst zegt het al een beetje, het is een sluis die die nog niet bestaat. Hiermee moet rekening gehouden worden, wanneer het energieverbruik wordt bepaald. Nieuwe sluisen zullen gebruik gaan maken van de nieuwste technologieën en ontwikkelingen. Het energieverbruik van de Sluis van de Toekomst ten opzichte van de huidige sluis zal hierdoor worden gereduceerd. Er kan namelijk op een aantal onderdelen energie bespaard worden, bijvoorbeeld door het toepassen van energiezuinigere apparatuur, zoals het vervangen van gloeilampen door spaarlampen, of door het optimaliseren van kastverwarming door betere isolatie. Zulke besparingen, die voortkomen uit nieuwe ontwikkelingen, zijn ook onderzocht in de energiescans. Hierdoor wordt de eerste besparing slag gemaakt, waardoor het verbruik van de Sluis van de Toekomst in zicht komt.

Buiten deze besparingen kan ook nog breder gekeken worden naar de toepassing van enkele onderdelen van de sluis. Rijkswaterstaat kijkt ook naar de toekomst en probeert daarbij zo efficiënt mogelijk te gaan werken. Een strategie van Rijkswaterstaat die vanaf heden vaker zal worden toegepast, is het aansturen van bruggen en sluisen vanuit één bedieningscentrale. Dit zorgt ervoor dat enkele onderdelen van de sluis overbodig zullen worden en dus geen energie meer gaan gebruiken. Alle sluiswachters van een bepaalde regio, zullen vanuit één centraal bedieningsgebouw, de sluisen aansturen. Hierdoor komt het energieverbruik dat verbonden is aan het lokale bedieningsgebouw te vervallen. Dit heeft grote gevolgen voor het energieverbruik. Zo hoeft het bedieningsgebouw niet meer verwarmt te worden en kan Klimaatbeheersing worden weggelaten uit het verbruik. Ook hoeven er geen computers en andere aansturing, categorie Bediening en PC, aan te staan. De besturing gebeurt immers op afstand in de bedieningscentrale. Onder de categorie Diverse valt ook nog enkele apparatuur die hoort bij het bedieningsgebouw en de sluiswachter, zoals een koelkast en koffiezetapparaat. Deze categorie wordt met 40% gereduceerd.

Om het energieverbruik van de Sluis van de Toekomst te bepalen zijn alle bovenstaande besparingen en toekomstplannen meegenomen. Ook is er rekening gehouden met de eigenschappen van de Sluis van de Toekomst die invloed hebben op het verbruik. Het aantal schuttingen die jaarlijks worden uitgevoerd zijn een belangrijke factor voor het energieverbruik van Aandrijving en omvorming. Voor de overige 7 categorieën zijn de uren dat de sluis geopend is een belangrijke factor. Daarom is het energieverbruik van deze categorieën hiermee verrekend. In onderstaand diagram en tabel zijn de resultaten voor het energieverbruik van de Sluis van de Toekomst te vinden.

Voor de gedetailleerde bepaling van het energieverbruik wordt verwezen naar Bijlage B.

Verdeling energieverbruik Sluis van de Toekomst inclusief besparingen



Figuur 4 Verdeling energieverbruik van de Sluis van de Toekomst

Tabel 2 Waardes energieverbruik Sluis van de Toekomst

Energieverbruik Sluis van de Toekomst			Verbruik	
1. Aandrijving en omvorming	28	%	10.883	kWh/j
2. Bediening/PC	0	%	-	kWh/j
3. Diverse	8	%	2.999	kWh/j
4. Klimaatbeheersing	0	%	-	kWh/j
5. Noodstroomvoorziening	13	%	5.017	kWh/j
6. Signalering en beveiliging	17	%	6.613	kWh/j
7. Stand-by en conditionering	12	%	4.882	kWh/j
8. Verlichting	22	%	8.652	kWh/j
Totaal energieverbruik	100	%	39.046	kWh/j

Na het verrekenen van alle besparingen die gedaan kunnen worden, komt het energieverbruik voor de Sluis van de Toekomst per jaar neer op bijna 40.000 kWh. Deze waarde zal als uitgangspunt gelden voor dit afstudeeronderzoek. Dit energieverbruik zal aan de hand van verdere besparingen en energiewinning moeten worden teruggebracht, zodat een energieneutrale situatie ontstaat.

3 Energiebesparing

Zoals eerder vermeld kan het energieneutraal maken van de Sluis van de Toekomst op twee manieren bereikt worden. Enerzijds kan er energie bespaard worden door bijvoorbeeld bewegingsmechanismen, die zorgen voor het functioneren van het schutproces, minder energie te laten verbruiken. Anderzijds is het toepassen van energie winnende methoden in de schutsluis een optie. Deze twee manieren kunnen samen in één ontwerp worden toegepast. Door deze opties verder uit te werken zal blijken wat de beste mogelijkheden zijn, en hoe rendabel deze zijn.

In dit hoofdstuk komt het energiebesparende deel aan bod. De energiebesparing zal worden bereikt door tijdens het schutproces minder energie te verbruiken, en door producten met een hoger rendement toe te passen. Dit laatste is in hoofdstuk 2.2 behandeld.

3.1 Alternatievenstudie

Wanneer het energieverbruik van een schutsluis tijdens het schutproces wordt bestudeerd, zoals in Figuur 4 is weergegeven, valt op te merken dat het enige onderdeel dat enkel energie verbruikt tijdens het functioneren van het schutproces zelf, de aandrijving en omvorming is.

Om het bewegingsmechanisme minder energie te laten verbruiken, kan het te bewegen onderdeel lichter worden gemaakt. Het bewegingsmechanisme drijft in dit geval de sluisdeuren en de afsluiters aan.

Om het doel, energiebesparing, te bereiken zal de massa van deze onderdelen dus verminderd moeten worden. Dit wordt behaald door het toepassen van een alternatieve materiaalsoort of door aanpassingen aan de opbouw van de constructie.

Als uitgangspunt wordt een conventionele constructie van staal genomen. Dit conventionele ontwerp wordt vergeleken met een ontwerp van composiet (Vezel Versterkte Kunststof) en Hogesterkte Beton (HSB). Naar verwachting zullen deze opties een lichtere constructie moeten opleveren.

Het materiaal “hout” is buiten beschouwing gelaten. Dit materiaal is geen reële optie vanwege de grote overspanningen die overbrugd moeten worden. Houten puntdeuren kunnen moeilijk grote plaatselijke krachten opnemen, waardoor extra maatregelen genomen moeten worden om deze krachten op te vangen. Dit resulteert in een buitenproportionele constructie³. Hout werd vroeger overigens vaak toegepast. De schutsluizen, en dus de sluisdeuren, waren in die tijd over het algemeen van kleiner formaat.

3.1.1 Aanpak

Ten eerste worden in dit afstudeeronderzoek voor de Sluis van de Toekomst drie alternatieve sluisdeur- en afsluiter constructies gedimensioneerd. Het gaat om constructies bestaande uit de materialen staal, composiet en HSB.

³ Pagina 7-15 en 7-16, Ontwerp van schutsluizen [1]

Vervolgens moet worden bepaald wat het effect van de massa van de constructie is op het energieverbruik van het bewegingsmechanisme. Door bijvoorbeeld het bewegen van de sluisdeur in water moet namelijk niet alleen de massa van de sluisdeur verplaatst worden, maar ook de aanhangende watermassa. Het is zaak om te bepalen wat de invloed van de massa van de sluisdeur is op het energieverbruik van het bewegingsmechanisme.

Wanneer dit voldoende groot blijkt, kan het verschil van de totale energieverbruiken van de alternatieven worden bepaald. Deze aanpak is in Figuur 5 schematisch weergegeven. Voor de afsluiters wordt dezelfde aanpak aangehouden. Deze afsluiters bewegen echter verticaal en hoeven daardoor geen watermassa te verplaatsen. Dit betekent dat het verminderen van de massa van de afsluiter veel invloed zal hebben op het energieverbruik van het bewegingsmechanisme.



Figuur 5 Stappenplan energieverbruik bewegingsmechanisme alternatieve sluisdeuren

Voor verdere toelichting met betrekking tot de uitwerkingen van de in Figuur 5 genoemde stappen wordt verwezen naar Bijlage C.

Eerst zal de invloed van de sluisdeur worden uitgewerkt, met daarop volgend de invloed van de afsluiter. Deze zullen uiteindelijk gecombineerd worden tot een totale besparing.

3.1.2 Invloed massa sluisdeur op energieverbruik bewegingsmechanisme

Tijdens een doorsnee bewegingsproces zijn er een aantal belastingen die een grote invloed op het energieverbruik van het bewegingsmechanisme hebben. Deze belastingen zijn te verdelen in twee groepen. Te noemen: “hydraulisch” en “massa sluisdeur afhankelijk”.

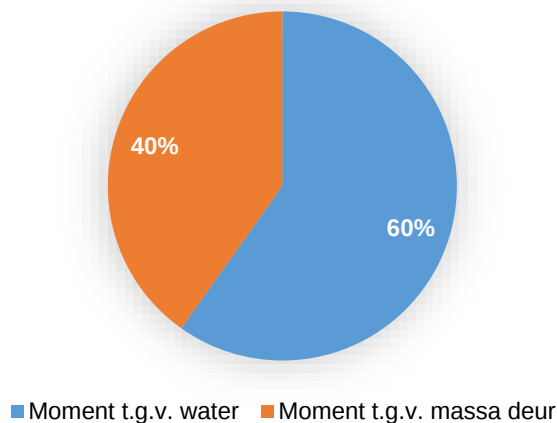
Hierdoor ontstaat de volgende tweedeling:

Groep	Optredende Belastingen
Hydraulisch	- Massatraagheid water door versnelde deurbeweging - Stromingsweerstand in vrij water - Golfweerstand - Kasweerstand - Windbelasting
Massa sluisdeur afhankelijk	- Massatraagheidskrachten sluisdeur (natte massa sluisdeur) - Wrijving op de draaipunten

Tabel 3 Optredende belastingen bij een doorsnee bewegingsproces sluisdeuren

Allereerst wordt het normaalverbruik van het bewegingsmechanisme bepaald, wanneer een conventionele stalen sluisdeur wordt toegepast. Uit dit normaalverbruik is vervolgens af te leiden wat de invloed is van de massa van de sluisdeur, en welk deel veroorzaakt wordt door hydraulische belastingen. In Figuur 6 is deze verdeling weergegeven.

Verdeling belastingen bewegingswerk



Figuur 6 Invloed massa conventionele sluisdeur op totaal koppelmoment bewegingswerk

Het blijkt dat de massa van de sluisdeur een aandeel van 40% heeft over de capaciteit van het bewegingswerk. Uit paragraaf “Energieverbruik sluis” blijkt dat ongeveer 30% van het totaal aan energieverbruik wordt veroorzaakt door de aandrijving en omvorming van het bewegingsmechanisme. Onder de categorie aandrijving en omvorming valt onder andere het aandrijven van de sluisdeuren en de afsluiters. Uit de inventarisatie energieverbruik van de schutsluis blijkt dat het aandrijven van de sluisdeuren, binnen deze categorie “aandrijving en omvorming”, verantwoordelijk is voor 55% van het energieverbruik. Dit gezegd hebbende kan geconcludeerd worden dat theoretisch gezien de massa van de sluisdeur de volgende impact heeft op het totale verbruik van de sluis:

$$40\% \times 30\% \times 55\% = 6,6\%$$

Wanneer een lichter materiaal voor de sluisdeuren wordt toegepast, kan een bepaald deel van bovenstaand percentage bespaard worden. Het is zaak om uit te zoeken hoe groot dit deel kan worden.

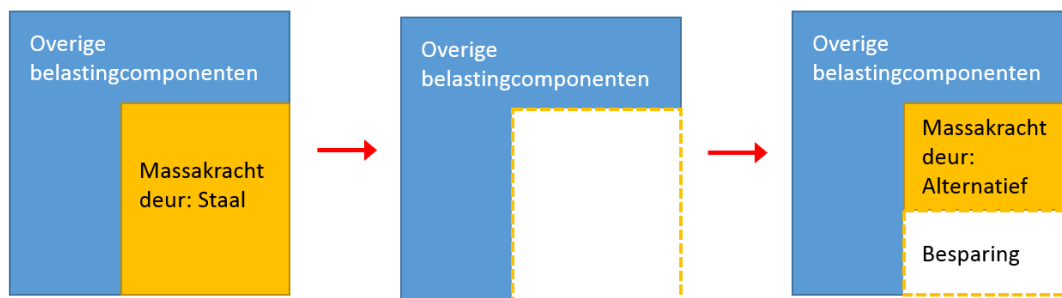
3.1.3 Vergelijk massa van de alternatieve sluisdeurconstructies

Met ieder alternatief materiaal wordt een sluisdeurconstructie ontworpen. Voor de ontwerpen van deze sluisdeurconstructies wordt verwezen naar Bijlage C.

De volgende stap is dan meteen het bepalen van de massa van de alternatieve sluisdeurconstructies op basis van de zojuist genoemde ontwerpen. Zoals bekend, wordt in dit afstudeeronderzoek een alternatievenanalyse gedaan naar de sluisdeurconstructies:

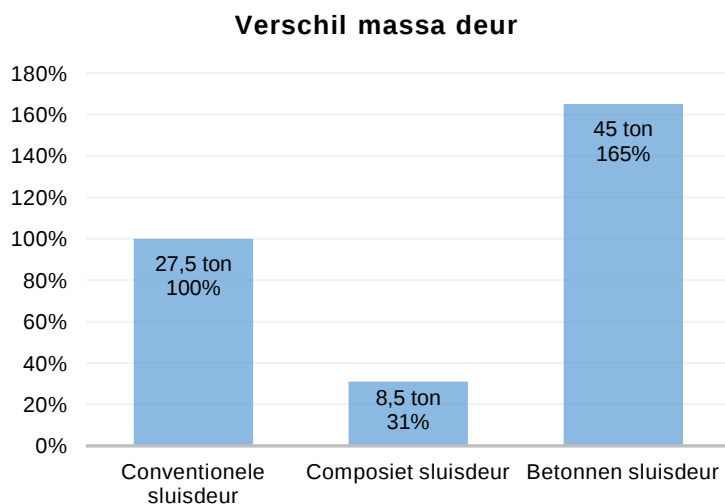
- Conventioneel (staal)
- Composiet
- Hogesterkte Beton

Omdat de verdeling, zie Figuur 6, van het normaalverbruik uit de vorige paragraaf bekend is, kan het deel dat veroorzaakt wordt door de massa van de conventionele sluisdeur vervangen worden door de massa van de alternatieve sluisdeuren. Dit principe wordt in Figuur 7 schematisch weergegeven.



Figuur 7 Schematische weergave aanpak bepaling gemiddelde capaciteit bewegingsmechanisme

Wanneer de massa's van de alternatieve sluisdeuren worden bepaald, wordt tot de resultaten, die in Figuur 8 zijn weergegeven, gekomen. De resultaten geven de massa en onderlinge verhoudingen van de sluisdeur in den droge weer. Het conventionele alternatief is als 100% aangehouden, waaraan de massa van de overige alternatieven mee vergeleken is.

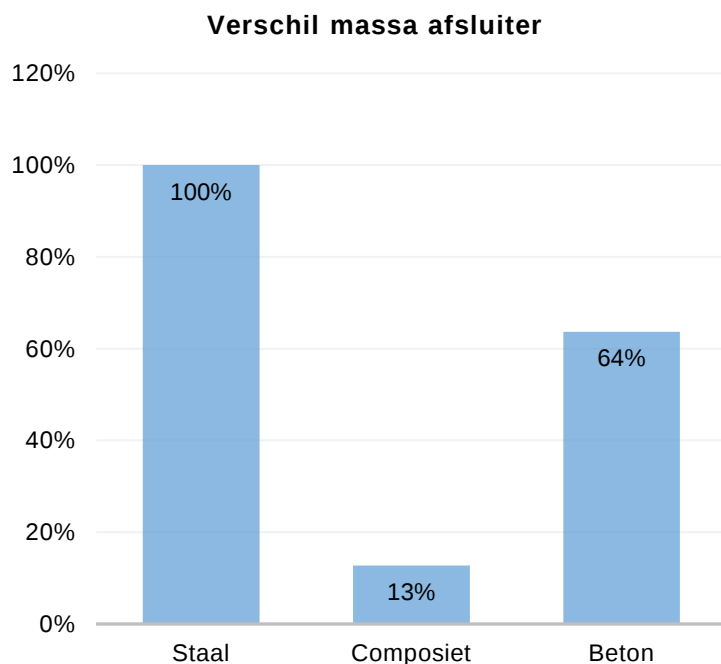


Figuur 8 Verschil massa sluisdeur alternatieven

Dit wil zeggen dat een sluisdeur van composiet gecompenseerd nog maar 30% van het oorspronkelijke alternatief weegt. De constructie van hogesterktebeton blijkt niet lichter dan de conventionele constructie. Het toepassen van vezel versterkt ultrahoge sterkte beton is echter nog een mogelijkheid voor verder onderzoek.

3.1.4 Vergelijk massa van de alternatieve afsluiters

De afsluiters bewegen in verticale richting waardoor verwacht wordt dat de massa van de schuif veel invloed heeft op het energieverbruik van het bewegingsmechanisme. Wanneer een vergelijk wordt gemaakt met betrekking tot de massa van de schuiven van verschillende materialen wordt tot de waarden in Figuur 9 gekomen. De conventionele stalen afsluiter wordt als referentieontwerp aangehouden en krijgt daardoor een waarde van 100%.



Figuur 9 Verschil massa afsluiter

De massa van de composieten variant is 13% van het gewicht van de conventionele uitgangspositie. Dit laat zien dat er een heel stuk verbeterd kan worden op het gebied van energieverbruik. Voor het betonnen alternatief is een dubbele dikte aangehouden in verband met het toepassen van wapening. Deze blijkt echter 36% lichter dan het stalen ontwerp.

3.1.5 Invloed massa afsluiter op energieverbruik bewegingsmechanisme

Bij het bepalen van het energieverbruik van de bewegingsmechanismen, die verantwoordelijk zijn voor het bewegen van de afsluiters is bepaald dat 95% van het totaal wordt verbruikt voor het heffen van de massa van de schuif. De resterende 5% is benodigd voor het overwinnen van de wrijving die ontstaat door de waterdruk tegen de afsluiter. Voor de uitwerking van deze waarden wordt verwezen naar Bijlage C.

Onder de categorie aandrijving en omvorming valt onder andere het aandrijven van de sluisdeuren en de afsluiters. Uit de inventarisatie energieverbruik van de schutsluis blijkt dat het aandrijven van de afsluiters, binnen deze categorie “aandrijving en omvorming”, verantwoordelijk is voor 30% van het energieverbruik. Met dit gegeven en het feit dat 30% van het gehele energieverbruik van de schutsluis wordt veroorzaakt door het aandrijven van beweegbare onderdelen, kan geconcludeerd worden dat de maximale invloed van de massa van de afsluiter als volgt bepaald wordt:

$$30\% \times 30\% \times 95\% \approx 8,5\%$$

De conclusie is dat de massa van de afsluiter zorgt voor 8,5% van het totale energieverbruik van de schutsluis ten gevolgen van het bewegen van de afsluiter. Van deze 8,5% zal een gedeelte bespaart worden door het toepassen van een ander lichter materiaal.

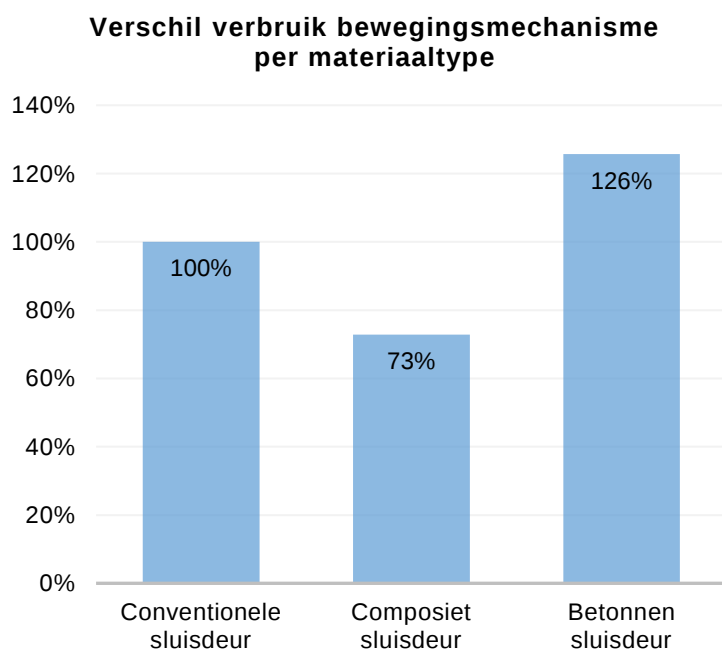
3.2 Voorkeursalternatief

Uiteindelijk wordt van alle alternatieven bepaald welk alternatief het gunstigste is om toe te passen in de Sluis van de Toekomst. Aan de hand van een Multi Criteria Analyse (MCA) worden de alternatieven aan elkaar gemeten. Het voorkeursalternatief zal worden uitgewerkt op het gebied van kosten en energieopbrengst.

3.2.1 Vergelijk energieverbruik alternatieven

Sluisdeuren

In hoofdstuk 3.1.2 zijn de massa's van de sluisdeuren bepaald en met elkaar vergeleken. Wanneer deze massa's worden toegepast in het model zoals in Figuur 7 is weergegeven, kan een besparing van het totale energieverbruik van het bewegingsmechanisme worden bepaald. Deze besparing wordt tevens onderling vergeleken. De conventionele sluisdeur wordt gezien als 100%, waaraan de verhouding van de alternatieven bepaald wordt.

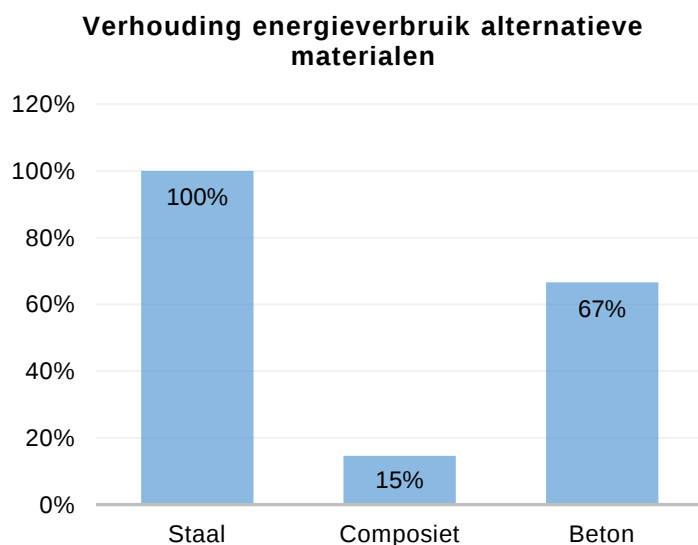


Figuur 10 Energieverbruik bewegingsmechanisme per sluisdeur-alternatief vergeleken met het conventionele ontwerp

Uit bovenstaande figuur blijkt dat de composieten sluisdeur, met 27% reductie van het energieverbruik ten opzichte van de conventionele sluisdeur, gezien kan worden als het energiezuinigst. Wanneer sluisdeuren van HSB worden toegepast, zal het bewegingsmechanisme juist meer energie verbruiken dan het conventionele ontwerp. Dit laatste is de reden dat beton op het gebied van energieverbruik afgeschreven wordt.

Afsluiter

Een andere belastingcomponent, die de benodigde hefkracht van de afsluiter zal doen laten toenemen, is de wrijving van de schuiven op de schuifgeleidingen door waterdruk. Deze optredende wrijving is bepaald aan de hand van de horizontale kracht vermenigvuldigd met de wrijvingscoëfficiënt van de schuif op de schuifgeleidingen. Voor verdere toelichting met betrekking tot deze factor, wordt verwezen naar Bijlage C. In de grafiek uit Figuur 11 worden de opgestelde alternatieven op basis van procenten vergeleken met het conventionele ontwerp, waarbij het conventionele ontwerp als 100% is aangehouden.



Figuur 11 Energieverbruik bewegingsmechanisme afsluiter-alternatief vergeleken met het conventionele ontwerp

Uit bovenstaande figuur wordt helder dat het toepassen van een ander materiaal een energiebesparing tot wel 85% kan opleveren. De betonnen variant behaalt ondanks de grotere constructie, een energiereductie van 30% ten opzichte van de stalen variant. Het toepassen van een afsluiter van composiet wordt dan ook gezien als het energiezuinigst.

3.2.2 Voorkeursalternatief energie besparende methoden

Aan de hand van een MCA zijn de verschillende alternatieven tegen elkaar afgewogen. De criteria die hierbij meegenomen zijn, zijn als volgt:

- *Energieverbruik*: van het bewegingsmechanisme
- *Life Cycle Costs (LCC)*: de totale levensduurkosten van de constructie. Hieronder valt de investering, onderhoud en einde levensduur.
- *Life Cycle Analysis (LCA)*: een analyse met betrekking tot milieu impact tijdens de totale levensduur van de constructie.

Nadere toelichting over deze criteria is te vinden in Bijlage D.

De onderstaande matrix geeft in de onderste regel weer welk alternatief het gunstigst uitvalt. Voor de verdere uitwerking en toelichting van deze analyse wordt verwezen naar Bijlage D.

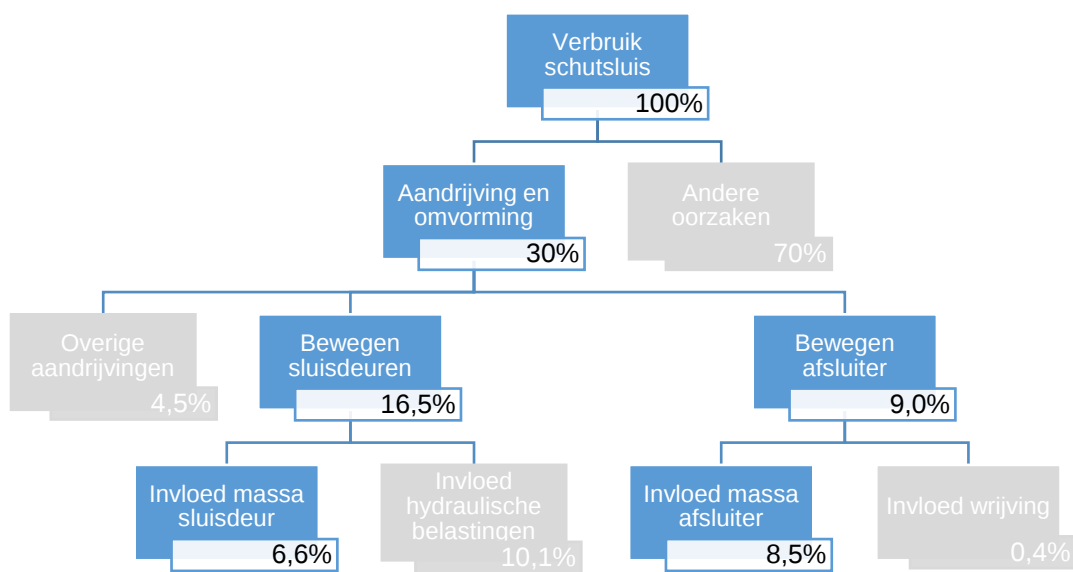
Tabel 4 MCA materialen beweegbare onderdelen

	<i>Wegingsfactor</i>	<i>Conventioneel staal</i>	<i>Hogesterktebeton</i>	<i>Composiet</i>
<i>Energieverbruik bewegingswerk</i>	6	5	6	8
<i>LCC</i>	2	5	8	8
<i>LCA</i>	2	5	6	6
<i>Totaal</i>		50	64	76

Uit deze MCA wordt geconcludeerd dat het composieten alternatief het meest voordeligst zal zijn. Vanwege het feit dat het veranderen van het materiaal geen effect heeft op het verdere functioneren van de schutsluis of impact heeft op overige toegepaste energieopwekkende of energiebesparende methoden, wordt het alternatief “composiet sluisdeur” toegepast in de Sluis van de Toekomst.

3.3 Resultaten

Uit de vorige hoofdstukken en Bijlage C zijn de aandelen, van de onderdelen die te vervangen zijn door alternatieve materialen, bepaald. Deze aandelen zijn overzichtelijk weergegeven in Figuur 12. Ieder percentage slaat terug op het 100%-verbruik van de Sluis van de Toekomst.



Figuur 12 Procentueel aandeel van onderdelen, op het totale energieverbruik van de schutsluis

Uiteindelijk kan, door het toepassen van composiet voor de beweegbare onderdelen, het totale energieverbruik van de Sluis van de Toekomst maximaal met $6,6\% \times 25\% + 8,5\% \times 85\% \approx 8,9\%$ gereduceerd worden. Dit komt neer op een maximale theoretische besparing van $8,9\% \times 40.000 \text{ kWh} \approx 3.500 \text{ kWh}$ per jaar. De beweegbare delen zijn in dit afstudeeronderzoek, sluisdeuren en afsluiters in de omloopriolen.

Door deze besparing neemt het verbruik van de Sluis van de Toekomst verder af. Het verbruikt zal neerkomen op: $40.000 \text{ kWh} - 3.500 \text{ kWh} = 36.500 \text{ kWh}$ per jaar.

4 Energiewinning

Naast energie besparing, kan energie opwekken ook bijdragen aan een energieneutrale sluis. Dit afstudeeronderzoek richt zich puur en alleen op de schutsluis. Om die reden is onderzocht wat de mogelijkheden zijn voor het winnen van energie binnen het sluiscomplex. Het nivelleren komt hierbij naar voren als zijnde het meest rendabele energie houdende proces. Tijdens het nivelleren wordt er gebruik gemaakt van de zwaartekracht waardoor het water in beweging wordt gebracht. Dit is een natuurlijk proces. De energie die hiermee gepaard gaat wordt tegenwoordig nog niet of nauwelijks benut. Om deze reden wordt er onderzocht of het mogelijk is om deze energie uit het water te onttrekken en te gebruiken in de schutsluis.

4.1 Alternatievenstudie

Net zoals er bij windturbines verschillende varianten zijn, zijn er voor waterkrachtturbines ook verschillende mogelijkheden. Turbines komen op vele manieren voor. Producenten blijven bezig met het ontwikkelen van nieuwe, innovatieve, turbines om zo optimaal mogelijk de energie uit het water te halen, en een zo hoog mogelijk rendement te behalen. Om de meest geschikte turbine voor de Sluis van Toekomst te kunnen selecteren, is gekeken naar alle mogelijkheden die de markt vandaag de dag te bieden heeft.

4.1.1 Bepaling locatie van de turbine

Als eerste moet worden onderzocht waar in de sluis de turbine het beste geplaatst kan worden. Hierbij is gekeken naar de huidige nivelleersystemen in sluizen. Hier komen namelijk grote hoeveelheden water door een relatief klein oppervlak. De meest voorkomende locaties in Nederland zijn, uitgaande van de eigenschappen van de Sluis van de Toekomst:

- In de sluisdeuren, door middel van deurschuiven.
- Door de omloopriolen in de sluishoofden.

Er is overwogen om ook spaarbekkens mee te nemen als locatie. Deze worden echter maar zelden toegepast bij schutsluizen, enkel als waterbesparing een belangrijk uitgangspunt is en er genoeg ruimte aanwezig is. Hierdoor blijven de meest gangbare locaties, sluisdeuren en omloopriolen, over als mogelijkheden. Om uit deze twee mogelijkheden een keuze te kunnen maken, is er gekeken naar twee criteria, namelijk:

- *Energieverbruik*: dit afstudeeronderzoek richt zich op energieverbruik, daarom wordt er gekeken of de locatie hier invloed op heeft.
- *Functioneren sluis*: de sluis moet zo weinig mogelijk hinder ondervinden van nevenactiviteiten, zoals energieopwekking. Dit geldt voor het functioneren van de turbine, alsmede werkzaamheden bij onderhoud en storingen.

Tabel 5 MCA keuze locatie turbine

<i>Criteria</i>	<i>Sluisdeur</i>	<i>Omloopriool</i>
<i>Energieverbruik</i>	-	+
<i>Functioneren sluis</i>	-	+

Uit de resultaten blijkt dat het omloopriool de beste locatie is voor het opwekken van energie uit water. Dit komt met name doordat een sluisdeur zwaarder wordt door de turbine zelf, alsmede de extra ondersteunende constructie. Hierdoor wordt het energieverbruik van de sluisdeuren benadeeld. Ook is het omloopriool geschikter voor het blijven functioneren van de sluis. Dit komt doordat het omloopriool parallel ligt aan de sluis. Ten tijden van onderhoud of storing kunnen werkzaamheden, aan de turbine, buiten het vaarprofiel plaatsvinden en kunnen de sluisdeuren blijven functioneren.

4.1.2 Bepaling type turbine

Nu de keuze voor de locatie bekend is, kan de keuze voor de turbine gemaakt worden. Hiervoor is gezocht naar apparaten die op welke manier dan ook energie kunnen halen uit de stroming van water. Hierbij is er ook gekeken naar voorgaande onderzoeken om de werking van de turbines te beoordelen en verder te onderzoeken.

Uit de analyse is een lijst samengesteld van 24 soorten turbines. Van traditionele ontwerpen tot nieuwe innovatieve ideeën komen hierin aan bod. Om een keuze te kunnen maken uit dit aantal, is er eerst een voorselectie gemaakt. Bij de voorselectie wordt er gelet op de volgende criteria:

- *Functioneren*: hiervoor wordt onderzocht wat de turbine nodig heeft om te kunnen functioneren. Komt dit overeen met de uitgangspunten?
- *Vergelijkbare turbines/ principe werking*: hiervoor wordt onderzocht of er turbines zijn die op een vergelijkbare wijze werken of werken op basis van het zelfde principe.
- *Mate van ontwikkeling*: hiervoor wordt de mate van ontwikkeling onderzocht. Wordt de turbine al toegepast of staat het nog in de startblokken?
- *Produceerbaarheid*: hiervoor wordt onderzocht hoe en of de turbine is te produceren.

Door een voorselectie te maken zijn er nog drie turbines over, de bulb turbine, de Very Low Head en de Oryon Watermill. Deze zouden in principe allemaal kunnen worden toegepast, en leveren minimaal de gewenste hoeveelheid energie. Om verder onderscheid te maken tussen de turbines is er nog specifiek onderzoek gedaan naar de volgende criteria:

- *Kosten*: wat zijn de kosten per kWh vermogen van de turbine?
- *Robuustheid*: hoe robuust is de turbine? Is er vaak storing of zijn er veel beweegbare onderdelen?
- *Visvriendelijkheid*: hoe gaat de turbine om met vissen?
- *Vuilgevoeligheid*: hoe gaat de turbine om met vuil? Zorgt dit voor problemen?

Deze criteria zijn verwerkt in een MCA om een zo grondig mogelijke keuze te kunnen maken. Als referentie is de bulb-turbine genomen. Hiermee worden de Very Low Head en de Oryon Watermill mee vergeleken. Verder toelichting over de gemaakte keuzes is te vinden in Bijlage D.

Tabel 6 MCA keuze turbine

<i>Criteria</i>	<i>Wegingsfactor</i>	<i>Bulb</i>	<i>Very low head</i>	<i>Oryon Watermill</i>
<i>Kosten</i>	4	5	3	2
<i>Robuustheid</i>	4	5	3	2
<i>Visvriendelijk</i>	1	5	10	10
<i>Vuilgevoelig</i>	1	5	7	7
<i>Totaal</i>		50	41	33

Uit de MCA kan geconcludeerd worden dat de Bulb-turbine het beste zal functioneren in de Sluis van de Toekomst. Dit komt met name door de lage kosten en robuustheid ten opzichte van de andere twee turbines. De Very Low Head en Oryon Watermill, hebben een complexer ontwerp met meer bewegende onderdelen. Hierdoor worden het duurdere turbines en is het risico op falen groter. Deze turbines kunnen echter door de complexiteit, en algemeen ontwerp beter omgaan met vissen en vuil.

4.2 Toepassing

Om de toepassing van de turbine, in de Sluis van de Toekomst, verder uit te kunnen werken, wordt er uitgegaan van het model StreamDiver van het merk Voith. Dit model is ervoor gemaakt om met kleinere vervallen om te gaan van enkele meters. Dit in tegenstelling tot turbines bij stuwmeren, die vaak met enkele 10-tallen meters om moeten gaan. De StreamDiver heeft een ingebouwde generator, met een directe overbrenging tussen de turbinebladen en de generator, en een rendement van 85%. Tevens heeft de StreamDiver watergesmeerde lagers. Hierdoor is er geen olie nodig, dat de kans op watervervuiling wegneemt.



Figuur 13 Voith StreamDiver [24]

4.2.1 Energieopbrengst

Om de energieopbrengst van de turbines te bepalen is eerst onderzocht of het nivelleersysteem, exclusief turbines, van de Sluis van de Toekomst wel voldoet aan de geldende normen en richtlijnen. Aan de hand van LOCKFILL is de Sluis van de Toekomst doorgerekend. Dit programma is ontwikkeld door Deltares, en daarmee kan berekend worden hoe het water zich gedraagt tijdens het nivelleren, en wat het effect is op schepen die in de kolk liggen. Een samenvatting van de resultaten en geldende richtlijnen is in onderstaande tabel weergegeven. In Bijlage E is een gedetailleerde uitwerking van LOCKFILL, en de energieopbrengst te vinden.

Tabel 7 Samenvatting en toetsing van resultaten LOCKFILL

<i>Onderdeel</i>	<u>Resultaat</u>		<u>Richtlijn</u>		<i>Voldoet</i>
	<i>Waarde</i>	<i>Eenheid</i>	<i>Waarde</i>	<i>Eenheid</i>	
<i>Totale nivelleertijd</i>	548	s			
	9,13	min	8-10 ⁴	min	V
<i>Nivelleertijd tot restverval 0,1m</i>	472	s			
	7,87	min	8-10 ⁴	min	V
<i>Maximale verticale snelheid</i>	0,009	m/s			
	0,54	m/min	2,0 ⁵	m/min	V
<i>Maximaal debiet voor 2 omloopriolen</i>	14,6	m ³ /s	-	-	-
<i>Maximaal debiet voor 1 omloopriool</i>	7,3	m ³ /s	-	-	-
<i>Maximale relatieve kracht</i>	0,29	‰	0,85 ⁶	‰	V
<i>Maximale kracht</i>	10	kN	-	-	-

Uit de bovenstaande tabel blijkt dat het nivelleersysteem voldoet aan de normen en richtlijnen. Tevens zijn de snelheden en debieten in de omloopriolen bepaald. Deze waarden zijn van belang voor het bepalen van de te winnen energie.

Er is gekozen om de turbine te plaatsen in één van de twee omloopriolen per sluishoofd. De reden hiervoor is dat de kosten van een turbine vrij hoog zijn. Belangrijker nog is dat de sluis moet blijven functioneren. Nu blijft een omloopriool vrij van apparatuur. Mocht de turbine een keer buiten gebruik genomen worden, door storing of onderhoud, dan de sluis nog steeds nivelleren door het andere omloopriool. De totale nivelleertijd zal echter wel langer worden.

⁴ Pagina 6-8, Hankboek Ontwerp schutsluizen [1]

⁵ Pagina 75, Richtlijnen Vaarwegen 2011 [3]

⁶ Pagina 6-11, Handboek Ontwerp schutsluizen [1]

Nu het nivelleersysteem voldoet kan ook onderzocht worden wat de StreamDiver aan energie kan gaan leveren. De eigenschappen van de StreamDiver SD7.90 zijn:

Tabel 8 eigenschappen StreamDiver SD7.90

<i>Eigenschappen</i>	<i>Waarde</i>	<i>Eenheid</i>
<i>Vermogen</i>	45	kW
<i>Rendement van de turbine⁷</i>	100	%
<i>Rendement na omvorming</i>	98	%
<i>Minimale verval</i>	1,30	m
<i>Minimaal debiet</i>	2	m ³ /s
<i>Diameter turbine blad</i>	790	mm
<i>Hoogte totale turbine</i>	1380	mm

De StreamDiver functioneert normaal bij een debiet van de 2.75 m³/s. Echter kan de StreamDiver door het toepassen van een frequency converter een debiet aan dat varieert tussen 2 tot 3 m³/s. Tijdens het nivelleren loopt het debiet op tot over de 7 m³/s. Er stroomt dus meer water door de omloopriolen dan de StreamDiver aan kan. Dit zal zorgen voor opstuwung van het water in de omloopriolen. De turbine heeft nu een kleinere oppervlakte dan het omloopriool heeft. Een te veel aan water kan dus over de turbine stromen. De ruimte die te veel is zal echter te weinig zijn. Er is namelijk gerekend met een omloopriool zonder turbine. Er zijn momenteel nog geen waarde die het effect van de turbine beschrijven, waardoor het niet mogelijk is om de Sluis van de Toekomst na te rekenen, met LOCKFILL, inclusief turbine. Verondersteld wordt dat het omloopriool met turbine groter gemaakt moet worden om zo het effect van de opstuwung tegen te gaan. Het zou ook mogelijk zijn om het omloopriool aan de andere zijde hierop af te stemmen.

Aan de hand van de verkregen gegevens uit LOCKFILL is de tijd dat de turbine op vol vermogen kan draaien bepaald. Na 1 minuut is het gewenste debiet bereikt, waarbij de StreamDiver energie levert. Vervolgens kan de turbine 4 minuten op volle toeren draaien en energie opwekken. Na deze 4 minuten is het verschil in waterpeil te klein geworden en zal de turbine stoppen met energie opwekken.

De hoeveel energie die opgewekt kan worden tijdens één schutting is bepaald door het vermogen, tijd, rendement van de turbine en het rendement van omvormen en transporteren.

$$E [kWh] = P[kW] \times T[uur] \times \eta[\%] \times \eta[\%]$$

Voor de StreamDiver geldt:

$$E = 45kW \times 0,07 \text{ uur} \times 100\% \times 98\%$$

⁷ Hierin is al een rendement van 85% verwerkt. De 45 kW is het netto vermogen.

De energie die de StreamDiver SD 7.90 opwekt komt neer 3,0 kWh per schutting. Per jaar bedraagt de opbrengst bijna 39.500 kWh aan wisselstroom. Hierbij is rekening gehouden met verliezen die optreden wanneer de energie getransporteerd wordt.

Aangezien er per uur 1,5 schutting plaatsvindt, met een totale duur van 6 minuten per uur, komt de productiefactor neer op 10%.

Mocht de turbine in de toekomst de mogelijkheid krijgen om continu te draaien, dus een productiefactor van 100%, kan een opbrengst gehaald worden van:

$$E = 45kW \times 1 \text{ uur} \times 100\% \times 98\%$$

De energie bedraagt in een dergelijke situatie 45 kWh per uur. Per jaar bedraagt de opbrengst ruim 394.000 kWh.

4.2.2 Kosten en levensduur

De investeringskosten zijn voor een turbine met een vermogen van 45 kW ongeveer €135.000,- voor een levensduur van 25 jaar, mits er goed onderhoud plaatsvindt. Kosten voor onderhoud komen neer op ongeveer €10.000,- per jaar. Verder diepgang in de kosten worden behandeld in Hoofdstuk 5.

De turbine kan op twee manieren geld opbrengen. Dit kan ten eerste door middel van de opgeleverde energie, maar ook door middel van subsidies voor duurzame energie. Dit laatste is alleen van toepassing wanneer een niet-overheidsinstantie de turbine gaat exploiteren.

Om de turbine te kunnen toepassen in een sluis, dient de constructie van de sluishoofden te worden aangepast. Er zal een soort kelder moeten worden gebouwd in de sluishoofden. Zo blijven de turbines goed bereikbaar. Aangezien er een gedeelte uit het sluishoofd wordt gehaald, dient de constructie te worden gecontroleerd of de stabiliteit nog voldoet. Door in de ontwerpfase hier rekening mee te houden, kunnen de gevolgen beperkt blijven.

4.2.3 Invloed op het schutproces

Zoals de turbine nu wordt toegepast in de Sluis van de Toekomst, blijft de sluis voldoen aan de huidige normen. Door het toepassen van turbines zal er echter extra weerstand ontstaan in de omloopriolen. Het effect van de turbine is theoretisch lastig te bepalen, omdat er geen waarden bekend zijn van de weerstand die de turbine levert. Praktijkproeven kunnen hierbij een uitkomst bieden.

Wel is bekend dat het water zich gaat opstuwen voor de turbine. Als hiervoor niks wordt aangepast zal het langer gaan duren voordat het nivelleren is voltooid. Om toch te blijven voldoen aan de richtlijnen, kan omloopriool waar de turbine in is gelegen groter worden gemaakt. Een andere mogelijkheid is om het omloopriool dat geen turbine bevat, af te stemmen op het effect van de turbine. Hierdoor zal dit omloopriool groter worden. Een bijkomend voordeel hiervan is dat wanneer er werkzaamheden aan de turbine zijn, dit omloopriool een grotere capaciteit heeft, en er sneller gesloten kan worden.

Omdat de kosten van een turbine relatief hoog zijn en er aan energiekosten weinig verdiend kan worden, wordt er gekozen om maar één turbine per sluishoofd te plaatsen. Zo stroomt de helft van de hoeveelheid water, dat benodigd is voor het nivelleren, door een turbine. Omdat er maar één turbine wordt toegepast in het bovenhoofd en één in het benedenhoofd, is het omloopriool aan de andere zijde normaal. Dit omloopriool is nodig om de gewenste schut tijd die Rijkswaterstaat stelt, te halen.

4.2.4 Omvorming

De stroom die de StreamDiver levert is wisselstroom. Om tot het gewenste spanningsniveau te komen moet de elektriciteit nog worden aangepast zodat de gewenste eigenschappen ontstaan. Bij dit omvormen ontstaat nog een verlies van 2%. Deze zijn ook al meegenomen in de berekening van de energieopbrengst.

De voorkeur gaat uit naar het terug leveren van de opgewekte energie. De reden hiervoor is dat de Sluis van de Toekomst net als de huidige sluis aangesloten blijft op het elektriciteitsnet. Hierdoor komt het energieverbruik los te staan van de energieopbrengst en ontstaat een degelijkere stroomvoorziening. Per saldo wordt de sluis energieneutraal. Je kan nu namelijk altijd terugvallen op het net, mocht het nodig zijn. Echter dient hiervoor nog een extra apparatuur om het terug leveren van energie mogelijk te maken. Mocht de opgewekte elektriciteit in de nabijheid van de sluis worden gebruikt, dan zal de hoeveelheid stroom enigszins gelijk blijven. Moet de elektriciteit een stuk verder getransporteerd worden, dan zal een gedeelte van de elektriciteit verloren gaan.

Een andere optie is het gebruiken van accu's om de opgewekte energie in op te slaan. Zo kan de Sluis van de Toekomst helemaal zelfvoorzienend gemaakt worden, en is het niet meer afhankelijk van derden. Dit behoeft, net als terug leveren aan het net, extra apparatuur. Als noodstroomvoorziening dient er direct terug gevallen te worden op het aggregaat. Dit maakt de stroomvoorziening minder zeker.

4.2.5 Vissen en vuil

De natuur in en om de sluis moet niet vergeten worden. Met name de natuur in het water. Deze bevat namelijk levende organismen als ook levenloze objecten. Met levende organisme wordt er gedoeld op vissen. De ecosystemen die op de locatie aanwezig zijn, moeten zo veel mogelijk in tact blijven. Vissen zijn relatief grote organisme die in het water aanwezig zijn. Een sluis is een blokkade in het water, en kan de leefomgeving van de vis verstoren. Er zijn namelijk veel vissen die door de rivieren trekken op zoek naar gewenste leefomgeving. Hierbij kunnen ze sluizen passeren via, de stuw indien die aanwezig is en/of door de sluis zelf, als de sluisdeuren zijn geopend of tijdens het nivelleren. De sluis wordt nu ook nog met een turbine uitgevoerd. Een dergelijk type turbine is niet visvriendelijk en er zal dus een oplossing moeten komen om vismortaliteit tegen te gaan. Een milieueffectrapportage (MER) zal uitwijzen wat de gevolgen zijn van een sluis met turbines op de vis(mortaliteit)⁸. De MER is locatie specifiek, en ook wettelijk verplicht om uit te voeren.

⁸ Piet Riemersma, Senior adviseur Natuur en Water, Sweco Nederland B.V.

Met levenloze objecten wordt vuil en andere objecten die in het water drijven bedoeld. Deze objecten zorgen vandaag de dag ook al voor verstoringen in de schutsluis. Een tak van een boom kan tussen twee sluitende sluisdeuren komen, waardoor de sluisdeuren niet goed op elkaar aansluiten. Dan moet de sluisdeur weer even geopend worden om te zorgen dat de tak weg kan drijven. Als dergelijk objecten in een turbine komt kan dat schade aan de turbine veroorzaken. Kleine objecten zoals een plastic zak, zullen de turbine niet schaden. Grote objecten als een tak van een boom kan er voor zorgen dat de turbine vast loopt of schade maakt aan de turbinebladen. Om te voorkomen dat schadelijke objecten de turbine kunnen bereiken, zal er een krooshek voor de ingang van de omloopriolen moeten worden geplaatst. Zo blijven de objecten in de kolk of buiten de sluis, en kunnen wegdrijven wanneer het nivelleren is gestopt en de sluisdeuren geopend zijn. Om het krooshek schoon te houden, kan er gebruik worden gemaakt van een automatische krooshekreiniger. Het is ook mogelijk om het krooshek periodiek handmatig schoon te maken. Beide zijn relatief dure of arbeidsintensieve oplossingen. De praktijk zal uitwijzen of het nodig is om de krooshekken schoon te maken.

5 Life Cycle Costs

Voor een opdrachtgever is de hoogte van de totale kosten een belangrijk argument voor het gunnen van een project. Met deze redenering in het achterhoofd wordt onderzocht of het economisch rendabel is om een energieneutrale sluis in de praktijk te creëren.

De methoden, onderzocht in de vorige hoofdstukken, worden toegepast in de Sluis van de Toekomst. Dit ontwerp wordt vergeleken met een sluisontwerp met dezelfde dimensies en uitgangspunten zoals deze in menig huidig project ontworpen zal worden.

De Sluis van de Toekomst bevat onder andere de volgende toepassingen:

- Sluisdeuren van composiet en
- Waterkrachtturbines

In de LCC analyse worden deze componenten vergeleken met de originele componenten uit een huidig sluisontwerp.

De som van de totale kosten van de toegepaste methoden, met de geschatte kosten van de overige componenten van de schutsluis, levert een compleet overzicht op economisch gebied. Wanneer dit bedrag vergeleken wordt met dat van de huidige sluis, wordt een verschil in totale kosten gegenereerd.

Voor een verdere uitwerking van de uitgangspunten wordt verwezen naar Bijlage F.

5.1 Sluisdeuren

De kosten voor de levensduur van een sluisdeur zijn te verdelen in investeringskosten, onderhoudskosten en einde levensduur kosten. Per sluisdeur resulteert dit in de volgende waarden:

Tabel 9 Kosten alternatief sluisdeur

<i>Deuren</i>	<i>Composiet</i>	<i>Staal</i>
<i>Investeringskosten</i>	€ 154.000	€ 144.700
<i>Onderhoudskosten</i>	€ 21.396	€ 369.333
<i>Kosten bewegingswerk</i>	€ 126.000	€ 140.000
<i>Levensduur</i>	100 jaar	100 jaar
<i>Einde levensduur</i>	€ 10.000	€ -1.300
<i>Totaal per sluisdeur</i>	€ 815.400	€ 1.210.000
<i>Totaal per sluiscomplex</i>	€ 2.270.000	€ 2.630.000

Het toepassen van een composieten sluisdeur in vergelijking met een stalen sluisdeur levert over een periode van 100 jaar op economisch gebied een besparing op. Er wordt in dit afstudeeronderzoek uitgegaan van zes sluisdeuren per sluiskolk, waarvan één set sluisdeuren als reserve wordt opgesteld. Het bewegingswerk heeft een levensduur van 20 jaar. Dit is verrekend in de bovenstaande opsomming.

In het programma MWW wordt onderzocht of het mogelijk is om onder andere sluisdeuren te standaardiseren om zo reserve-deuren tussen sluiscomplexen uit te wisselen. Dit zal voor een nog gunstiger kostenplaatje zorgen.

5.2 Turbines

De kosten van turbines zijn tevens onder te verdelen in investeringskosten, onderhoudskosten en sloopkosten. Voor een turbine resulteert dit in de volgende waarden:

Tabel 10 Overzicht vergelijking kosten/opbrengst van een turbine

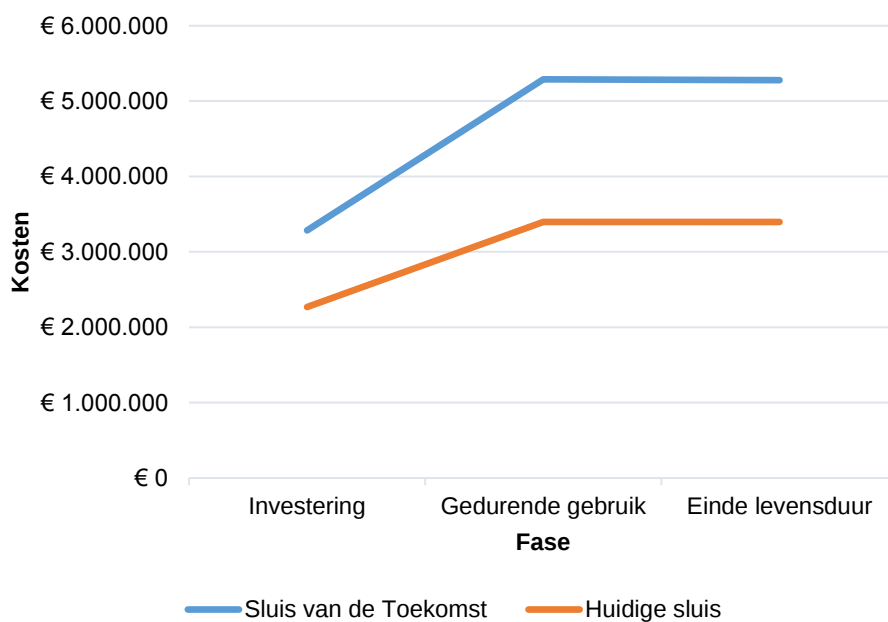
<i>Kosten/opbrengst</i>	<i>Turbines</i>	<i>Geen turbines</i>
<i>Investeringskosten</i>	€ 1.096.000	€ -
<i>Opbrengst gedurende gebruik</i>	- € 17.500	€ -
<i>Energiekosten gedurende gebruik</i>	€ -	€ 760.000
<i>Subsidie gedurende gebruik</i>	€ -	€ -
<i>Levensduur</i>	25 jaar	100 jaar
<i>Onderhoud</i>	€ 2.000.000	€ -
<i>Kabels en leidingen</i>	€ 5.000	€ -
<i>Einde levensduur</i>	€ 2.400	€ -
<i>Totaal per 100 jaar</i>	€ 3.080.000	€ 760.000

De turbines hebben een levensduur van 25 jaar. De kosten per turbine betrekken dus $\frac{1}{4}$ van het totaal over 100 jaar.

In de toekomst zullen er turbines ontwikkeld worden die een hogere energieopbrengst genereren en wellicht goedkoper geproduceerd kunnen worden. In dit afstudeeronderzoek is met deze potentie geen rekening gehouden.

5.3 Resultaten

Om een compleet beeld te schetsen wordt bepaald wat de totale kosten zijn van de Sluis van de Toekomst en een huidige sluis over een periode van 100 jaar. In Figuur 14 Totale kosten over 100 jaar cumulatief weergegeven. Figuur 14 is weergegeven wat de kosten zijn van de twee sluisontwerpen, cumulatief over de tijd.



Figuur 14 Totale kosten over 100 jaar cumulatief weergegeven

De bijbehorende waarden zijn in onderstaande tabel weergegeven.

Tabel 11 Totale kosten verdeeld over de levensduurfases van een schutsluis

Fase	Sluis van de Toekomst	Huidige sluis
Investering	€ 3.285.000	€ 2.268.000
Gedurende gebruik	€ 2.004.000	€ 1.129.000
Einde levensduur	- € 12.400	- € 1.000
Totaal	€ 5.277.000	€ 3.396.000

Door de hoge onderhoudskosten van de turbines blijkt de toepassing in een schutsluis met de uitgangspunten van de Sluis van de Toekomst op dit moment niet rendabel. De turbine maakt te weinig winst uit de opgewekte energie om de onderhoudskosten te compenseren. Daar komt bij dat de investeringskosten van de turbines en de composieten sluisdeuren in de Sluis van de Toekomst op dit moment veel hoger zijn dan de investeringskosten van de conventionele varianten.

Het bekostigen van een energieneutrale Sluis van de Toekomst vraagt om een extra investering van $€5.277.000 - €3.396.000 = €1.881.000$ over een periode van 100 jaar. Dit is een geschatte 3% bovenop de kosten van het maken van een schutsluis, zoals die vandaag de dag gebouwd zal worden.

6 Conclusie

6.1 Conclusie

In dit afstudeeronderzoek is onderzocht wat de mogelijkheden zijn van energiebesparing en energiewinning voor de Sluis van de Toekomst.

Als naar de resultaten wordt gekeken, blijkt dat de grootste besparing op het energieverbruik voorkomt uit het centraliseren van de aansturing van sluizen. Hierdoor komt het energieverbruik van Klimaatbeheersing, dat 56% van het totale verbruik van een huidige sluis inneemt, te vervallen. Daarbij kan ook nog 3.500 kWh aan energie worden bespaard door het gebruik van composiet sluisdeuren en afsluiters.

Op het gebied van energiewinning is het mogelijk om, door gebruik te maken van een turbine, bijna 40.000 kWh aan elektriciteit op te wekken

Voor het kostenaspect van de energiewinning en besparing is gebleken dat het toepassen van composiet sluisdeuren erg gunstig is. De kosten die ermee bespaard worden over de gehele levensduur van de sluis kunnen de kosten van de turbines enigszins compenseren.

Uit dit afstudeeronderzoek is te concluderen dat er vele manieren zijn om energie te besparen en dat het mogelijk is energie op te wekken door middel van het schutproces. Het behalen van een energieneutrale schutsluis is hierdoor mogelijk. Het is zelfs mogelijk om meer energie op te wekken dan dat er verbruikt wordt. Dit kan bereikt worden door een combinatie van composiet sluisdeuren, het toepassen van turbines in de omloopriolen en door het toepassen van de nieuwste ontwikkelingen op het gebied van energiezuinige apparatuur. Tevens zal de toekomst uitwijzen welke processen van de schutsluis nog van belang zijn en welke niet.

Vergeleken met een huidige sluis behoeft het mogelijk maken van een energieneutrale schutsluis enige extra financiële steun. De verwachting is echter dat door de ontwikkelingen van nieuwe installaties die toegepast kunnen worden in de sluis, het economisch nadeel bij zal trekken.

6.2 Discussie

De resultaten die gevonden zijn gelden voor de Sluis van de Toekomst en dus ook voor de daarbij horende eigenschappen. Voor sluizen met andere eigenschappen, zoals verval of het aantal schutting per jaar, zal specifiek gekeken moeten worden wat de mogelijkheden voor energiebesparing en energiewinning zijn.

De hoeveelheid energie die gewonnen kan worden, wordt gunstiger naar mate het verval en de inhoud groter wordt of wanneer er meer schuttingen per jaar plaatsvinden. Sluizen met kleinere afmetingen of minder schuttingen per jaar zullen onderzocht moeten worden om te zien wat de mogelijkheden zijn.

Als gekeken wordt naar de resultaten van dit afstudeeronderzoek blijkt dat het toepassen van een turbine noodzakelijk is voor het energieneutraal krijgen van de sluis. Dit gaat echter gepaard met een flinke investering. Deze wordt ten opzichte van de kosten van een huidige sluis wel gecompenseerd door het toepassen van composiet sluisdeuren, waardoor het op financieel vlak aantrekkelijker wordt. De oorzaak van de hoge kosten voor de turbines zitten met name in het feit dat de turbines alleen maar functioneren wanneer er gesluisd wordt, en doordat de kosten van energie erg laag liggen. Het is mogelijk om het onderdeel energiewinning te optimaliseren. Zo kan het totaal plaatje van energie besparen en winnen nog efficiënter vorm gegeven worden. Het is aan de beheerder de taak om te bepalen of het energieneutraal functioneren van een sluis de financiële investering waard is.

Verder kan vervolgonderzoek gedaan worden naar:

- Het effect van een turbine op de werking van een sluis is tot op heden onbekend. Praktijkproeven kunnen hierbij uitkomst bieden om het effect van de turbines beter in te kunnen schatten en in kaart te brengen.
- De LCA van het toepassen van composiet (sluisdeuren) in schutsluizen.
- Toekomst van de schutsluis. Wat is de functie van de sluis over 100 jaar?

6.3 Aanbevelingen

Uit het afstudeeronderzoek is gebleken dat het mogelijk is om een energieneutrale sluis te creëren, door middel van het schutproces, mits de omstandigheden het toelaten. Hierbij wordt echter niet optimaal gebruik gemaakt van de toepassingen. Het is aan te raden om de energiewinning anders aan te pakken. Door het toepassen van een turbine, in bijvoorbeeld een stuw waar een constante waterstroom is, kan een veel hoger rendement gehaald worden. Bij vele schutsluizen is er in de nabijheid een stuw gelegen, dus maakt het een reële oplossing om hier de optimalisatie te zoeken.

Het is ook aan te bevelen om goed te kijken naar de mogelijkheden van energiebesparing. Deze zijn niet alleen op nieuwe sluizen toepasbaar, maar kunnen ook relatief eenvoudig worden aangepast in bestaande sluizen. Zo kan er ook op sluizen die niet onder MWW vallen, energie bespaard worden.

De ontwikkelingen in zowel de energiebesparing als energiewinning, gaan in een razend tempo. Daarom wordt aanbevolen om deze ontwikkelingen te blijven volgen en toe te passen waar mogelijk.

7 Bibliografie

7.1 Figuren en tabellen

Figuren

Figuur 1 Schutproces	2
Figuur 2 Overzicht van waterstanden in de Sluis van de Toekomst	5
Figuur 3 Verdeling gemiddeld energieverbruik huidige sluis.....	7
Figuur 4 Verdeling energieverbruik van de Sluis van de Toekomst.....	9
Figuur 5 Stappenplan energieverbruik bewegingsmechanisme alternatieve sluisdeuren	11
Figuur 6 Invloed massa conventionele sluisdeur op totaal koppelmoment bewegingswerk.	12
Figuur 7 Schematische weergave aanpak bepaling gemiddelde capaciteit bewegingsmechanisme	13
Figuur 8 Verschil massa sluisdeur alternatieven.....	13
Figuur 9 Verschil massa afsluiter	14
Figuur 10 Energieverbruik bewegingsmechanisme per sluisdeur-alternatief vergeleken met het conventionele ontwerp.....	15
Figuur 11 Energieverbruik bewegingsmechanisme afsluiter-alternatief vergeleken met het conventionele ontwerp.....	16
Figuur 12 Procentueel aandeel van onderdelen, op het totale energieverbruik van de schutsluis	17
Figuur 13 Voith StreamDiver [24]	21
Figuur 14 Totale kosten over 100 jaar cumulatief weergegeven	29

Tabellen

Tabel 1 Overzicht van uitgangspunten voor de Sluis van de Toekomst	4
Tabel 2 Waardes energieverbruik Sluis van de Toekomst.....	9
Tabel 3 Optredende belastingen bij een doorsnee bewegingsproces sluisdeuren.....	11
Tabel 4 MCA materialen beweegbare onderdelen.....	17
Tabel 5 MCA keuze locatie turbine	20
Tabel 6 MCA keuze turbine	21
Tabel 7 Samenvatting en toetsing van resultaten LOCKFILL	22
Tabel 8 eigenschappen StreamDiver SD7.90	23
Tabel 9 Kosten alternatief sluisdeur	27
Tabel 10 Overzicht vergelijking kosten/opbrengst van een turbine	28
Tabel 11 Totale kosten verdeeld over de levensduurfases van een schutsluis	29

7.2 Literatuur

Normen en leidraden

- [1] Bouwdienst Rijkswaterstaat. (2000). *Ontwerp van schutsluizen*. Emmeloord, Nederland: Feiko Stevens.
- [2] CUR-commissie. (2003). *CUR-96 Vezelversterkte kunststoffen in civiele draagconstructies*. Geraadpleegd van <http://www.cur-aanbevelingen.nl/>
- [3] Dienst Verkeer en Scheepvaart Rijkswaterstaat. (2011). *Richtlijnen Vaarwegen 2011*. Delft, Nederland: Rijkswaterstaat.
- [4] NEN. (2011). *NEN-EN 1993-1-1*. Geraadpleegd van <https://www.nen.nl/>
- [5] NEN. (2016). *NEN-EN 1992-1-1*. Geraadpleegd van <https://www.nen.nl/>
- [6] Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen. (2013). *Leidraad Kunstwerken*. Delft, Nederland: Nivo.

Rapporten en websites

- [7] Broesterhuizen, E. (2011, 14 juli). Studie duurzame deuren. Geraadpleegd op 13 april, 2017, van Intranet Sweco Nederland B.V.
- [8] CEMT-klasse. (2017, 24 oktober). Geraadpleegd op 20 februari, 2017, van <http://www.sluispedia.nl/CEMT-klasse>
- [9] Clevering, I. R. P. G. M., Kamermans, I. R. J., & Horstman, I. R. J. (2009). *Inventarisatie energieverbruik waterwerken (I&M-1007258-PC/jj)*. Geraadpleegd van [http://www.innoverenmetwater.nl/upload/documents/Inventarisatie%20energieverbruik%20waterwerken%20\(rapport\).pdf](http://www.innoverenmetwater.nl/upload/documents/Inventarisatie%20energieverbruik%20waterwerken%20(rapport).pdf)
- [10] De Bouwcampus. (z.j.). MultiWaterWerk (MWW). Geraadpleegd op 07 februari, 2017, van <http://debouwcampus.nl/co-creatie-lab/vernieuwingsopgaven/cocreatie-lab/vernieuwingsopgaven/multiwaterwerk>
- [11] De Energieconsultant. (z.j.). Omrekening kWh naar MJ. Geraadpleegd op 12 april, 2017, van <http://www.energieconsultant.nl/energiemarkt/energie-berekeningen-uit-de-praktijk/omrekening-kwh-naar-mj/>
- [12] Energiesite. (z.j.). Wat is het gemiddeld energieverbruik. Geraadpleegd op 12 mei, 2017, van <http://www.energiesite.nl/veelgestelde-vragen/wat-is-een-gemiddeld-energieverbruik/>
- [13] Erp, I. R. T. M. J. van, & Corven, I. R. T. A. W. van. (2017). *Sluizenboekje*. De Bilt, Nederland: Sweco.
- [14] Expertise- en InnovatieCentrum Binnenvaart. (z.j.). Vaarwegklassen (CEMT). Geraadpleegd op 23 april, 2017, van <https://informatie.binnenvaart.nl/algemeen/de-binnenvaart/50-vaarwegklassen-cemt>
- [15] Geist, M., & Hoek, L. van der. (2010). Energiescans. Geraadpleegd op 13 maart, 2017, van Intranet Sweco Nederland B.V.

- [16] Noortgaete, T. van den. (2016). *Onderzoek naar energie uit waterkracht in Provincie Gelderland* (IEMR001D01). Geraadpleegd van http://www.geldersenergieakkoord.nl/images/uploads/RHDHV_-_Waterkracht_provincie_Gelderland_-_20161227_def.pdf
- [17] Rijkswaterstaat. (z.j.). Onze organisatie. Geraadpleegd op 23 april, 2017, van <https://www.rijkswaterstaat.nl/over-ons/onze-organisatie>
- [18] Rijkswaterstaat. (z.j.). 3D model. Geraadpleegd op 20 februari, 2017, van <http://sluisberekening.nl/3d.php?template=Va>
- [19] Rijkswaterstaat. (z.j.). Modernisering en onderhoud Bediening op afstand. Geraadpleegd op 22 maart, 2017, van <https://www.rijkswaterstaat.nl/water/projectenoverzicht/modernisering-bediening-op-afstand/index.aspx>
- [20] Rijkswaterstaat. (z.j.). Waterhoogte (t.o.v. NAP). Geraadpleegd op 22 februari, 2017, van <https://waterinfo.rws.nl/#!/kaart/waterhoogte-t-o-v-nap/>
- [21] Schultz van Haegen-Maas Geesteranus, M. H. (2016, 05 juni). Duurzame ontwikkeling en beleid. Geraadpleegd op 10 april, 2017, van <https://zoek.officielebekendmakingen.nl/dossier/21501-33/kst-30196-459.html>
- [22] SenterNovem. (2007). *Kompas Energiebewust wonen en werken, Cijfers en Tabellen 2007*. Geraadpleegd van <http://www.freitas.nl/Downloads/Cijfers%20en%20tabellen%202007.pdf>
- [23] TenderNed. (2016, 14 april). Vooraankondiging. Geraadpleegd op 08 februari, 2017, van <https://www.tenderned.nl/tenderned-web/aankondiging/detail/documenten/akid/373bd5bb12c2df24f044dce0bcd4a1b2/pageld/D909B/huidigemenu/aankondigingen/da/false/cid/1794222/cvp/join>
- [24] Voith. (z.j.). Insights. Geraadpleegd op 04 mei, 2017, van <http://voith.com/en/insights-22418.html>