

Vraagsturing middels warmte en koude in utiliteitsgebouwen

Haalbaarheidsstudie om de opwekking van warmte en koude in de utiliteitsbouw los te koppelen van de vraag



TOPSECTOR ENERGIE
Empowering the new economy





Datum 30 januari 2018
Referentie 66272/RK/20180130
Betreft Vraagsturing middels warmte en koude in utiliteitsgebouwen
Behandeld door de heer F.W.J. Niewold (IF Technology)
de heer T. Geurink (DNV GL)
Gecontroleerd door de heer J.H. Kleinlugtenbelt (IF Technology)
de heer K. Broess (DNV GL)
Versienummer Definitief

OPDRACHTGEVER

Rijksdienst voor Ondernemend Nederland
Anita Nout
Croeslaan 15
3521 BJ UTRECHT
Postbus 8242
3503 RE UTRECHT
T 088 042 42 42
E e-innovatie@rvo.nl

“Het project is uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken, Nationale regelingen EZ-subsidies, Topsector Energie uitgevoerd door Rijksdienst voor Ondernemend Nederland.”



Samenvatting

Utiliteitsgebouwen zoals kantoren, ziekenhuizen en universiteiten hebben veelal omvangrijke koel- en verwarmingsinstallaties, die kunnen worden ingezet voor vraagsturing. Vraagsturing betekent dat de vraag naar warmte en koude losgekoppeld kan worden van het moment van aanbod. In dit werk is de focus gelegd op warmte. Het doel is om de technische, energetische, financiële en organisatorische haalbaarheid te onderzoeken wanneer de opwekking van warmte losgekoppeld wordt van de vraag naar warmte in de utiliteitsbouw.

In de huidige studie zijn een aantal systeemconcepten gemodelleerd om de haalbaarheid te toetsen ten opzichte van een referentiesysteem. Bij het referentiesysteem wordt de basislast opgevangen met een WKO systeem en de pieklast met een gasketel. Door een buffervat in te zetten kan enerzijds de pieklast vanuit het buffervat geleverd worden. Anderzijds kan het buffervat functioneren als opslagsysteem op momenten dat er geen warmtevraag is. Daarnaast kan de installatie onafhankelijk van de vraag worden geschakeld en is het mogelijk om te speculeren op de onbalansmarkt voor elektriciteit. De flexibiliteit van het utiliteitsgebouw kan worden ingezet op de verschillende elektriciteitsmarkten. Dit kan direct, ofwel via een leverancier of aggregator. De elektriciteitsmarkt met het grootste potentieel is de onbalansmarkt. Daarmee kan (in theorie) geld verdiend worden door de eigenaar van de installatie door elektriciteit af te nemen op momenten van lage prijzen en minder elektriciteit te verbruiken op momenten van hoge prijzen. De elektriciteit wordt gebruikt voor thermische opslag in het buffervat. Verder kan de installatie nuttig gebruikt worden om het elektriciteitsnetwerk te stabiliseren. Het theoretisch potentieel aan flexibel elektrisch vermogen bij WKO's in Nederland bedraagt ca 4.500 MWe (500 MWe aan reeds opgestelde warmtepompen en 4.000 MWe aan nog op te stellen elektrische pompelaars).

Aanvullend is een koppeling met gebouweigenaren/beheerders, warmtepompleveranciers en relevante adviesbureaus gemaakt door de haalbaarheid te onderzoeken van systeemconcept bij een werkelijk gebouw en een workshop te organiseren om knelpunten, oplossingen en nieuwe inzichten te benoemen.

Tijdens de studie is een financiële analyse gemaakt van de verschillende systeemconcepten. Alle concepten zijn doorgerekend zonder subsidie om inzichtelijk te maken wat de werkelijke kosten en opbrengsten zijn. Het referentieconcept is een WKO systeem met een gasketel. Het concept waarbij de gasketel wordt vervangen door een buffervat heeft een terugverdiëntijd van -32 jaar. Het concept waarbij een pompelaar/weerstandsverwarming wordt toegevoegd aan het buffervat heeft een terugverdiëntijd van -31 jaar. De omvang van het buffervat kan sterk worden gereduceerd. De weerstandsverwarming wordt ingeschakeld op momenten dat de warmtevraag hoog is en het buffervat leeg raakt. Het concept waarbij de gasketel wordt vervangen door een buffervat en pompelaar en de pompelaar wordt ingezet om op de onbalansmarkt te speculeren heeft een terugverdiëntijd van -16 jaar. De gasketel wordt vervangen door een algoritme die kan schakelen met de warmtepomp. De warmtepomp levert meer warmte of minder warmte bij lage of hoge elektriciteitsprijzen. De terugverdiëntijd voor dit concept is -9 jaar.

Er kan worden geconcludeerd op basis van de huidige studie dat er mogelijkheden liggen voor vraagsturing in de utiliteitsbouw door te handelen op de onbalansmarkt. Er is echter nog veel te



onderzoeken. Installatietechnisch zullen de systeem complexer worden. Organisatorisch zijn er verschillende mogelijkheden. Dit kan direct, ofwel via een leverancier of aggregator.

Een grote uitdaging van de haalbaarheid van vraagsturing middels warmte en koude met handel op de onbalansmarkt is de organisatie van alle betrokken actoren en het bepalen van de juridische knelpunten. Voor handel in elektriciteit en acteren op de onbalans zal gekeken moeten worden waar de verantwoordelijkheid moet komen te liggen. Enerzijds is het mogelijk de gebouweigenaar elektriciteit te laten inkopen als programmaverantwoordelijke partij. Dit vergt veel kennis van de gebouweigenaar en grote organisatorische veranderingen, maar de eigenaar houdt volledig controle over het systeem. Anderzijds kan een aggregator of programmaverantwoordelijke partij mogelijkheid krijgen om tegen vergoeding met bepaalde parameters, zoals de dompelaar, te spelen in het systeem. De mate van invloed zal de vergoeding bepalen. Dit maakt dat een gebouweigenaar weinig hoeft te doen maar wel enige controle van het systeem moet afgeven. Door toenemende vraag naar flexibiliteit zullen dit soort initiatieven gaan toenemen.

Het vervolgtraject kan een uitgebreide business case zijn waarin een complete financiële analyse wordt gemaakt van de kosten en de baten van de investeringen, waarbij rekening wordt gehouden met de risico's. Dit zou in combinatie met een pilot project kunnen worden uitgevoerd. Daarnaast kan een daadwerkelijke inpassing van een dergelijk concept bij een utiliteitsgebouw een vervolg zijn.

INHOUDSOPGAVE

Samenvatting	4
1 Inleiding	8
1.1 Achtergrond en motivatie	8
1.2 Samenwerkende partijen	9
1.3 Doelstellingen	9
1.4 werkwijze	10
1.5 Leeswijzer	11
2 Theoretische achtergrond	12
2.1 Elektriciteitsmarkt	12
2.1.1 De Day-Ahead markt (EPEX)	13
2.1.2 Onbalansmarkt	14
2.1.3 Systeemdiensten	16
2.1.4 Andere mogelijke diensten	17
3 Energetische analyse	19
3.1 Randvoorwaarden en uitgangspunten	19
3.2 Systeemconcepten	21
3.2.1 WKO met warmtepomp en gasketel	21
3.2.2 Buffervat vervangt de gasketel	23
3.2.3 Buffervat met dompelaar vervangt de gasketel	25
3.2.4 Buffervat met dompelaar met handel op de onbalansmarkt vervangt de gasketel	27
3.2.5 Schakelen met de warmtepomp en handel op de onbalansmarkt vervangt de gasketel	30
3.3 Duurzaamheid	31
3.4 Potentieel voor Nederland	32
4 Financiële analyse	33
4.1 WKO met warmtepomp en gasketel	33
4.2 Buffervat vervangt de gasketel	33
4.3 Buffervat met dompelaar vervangt de gasketel	34
4.4 Buffervat met dompelaar met handel op de onbalansmarkt vervangt de gasketel	34
4.5 Schakelen met de warmtepomp en handel op de onbalansmarkt vervangt de gasketel	35
4.6 Terugverdientijd systeemconcepten	35
5 Case: FED gebouw HAN	37
5.1 Systeemconcept	37
5.2 Financiële analyse	40
6 Resultaten workshop	42
6.1 Deelnemers	42
6.2 Voor- en nadelen vraagsturing middels warmte in utiliteitsgebouwen	43
7 Conclusies en aanbevelingen	45
7.1 Conclusies	45
7.2 Aanbevelingen	46



7.2.1 Beschrijving vervolgproject	46
7.2.2 Kennisoverdracht	47
8 Afkortingen	48



1 Inleiding

1.1 ACHTERGROND EN MOTIVATIE

Warmte en koude wordt in de utiliteitsbouw veelal opgewekt met elektriciteit (warmtepompen). Omdat thermische energie goed kan worden opgeslagen, zijn deze gebouwen in staat om aan elektrische vraagsturing te doen. De vraag is of dat in de praktijk ook voldoende voordeel oplevert voor een gebouweigenaar om een dergelijk systeem te implementeren.

Utiliteitsgebouwen zoals kantoren, ziekenhuizen en universiteiten hebben veelal omvangrijke koel- en verwarmingsinstallaties. De meeste van deze installaties zijn tegenwoordig uitgerust met een WKO. IF Technology en DNV GL hebben bestudeerd of het mogelijk is om een dergelijke installatie in te zetten voor vraagsturing. Vraagsturing betekent dat de vraag naar warmte en koude losgekoppeld kan worden van het moment van aanbod. De installatie moet wel op een aantal punten worden aangepast. Hierbij gaat het met name om het inbouwen van buffervaten (conventionele bovengrondse thermisch gelaagde vaten) voor dag/nacht opslag en het aanpassen van de regeltechniek. Dit lijkt vooral zinvol bij vraagsturing met warmte, omdat de warmtepomp ingeschakeld kan worden om water met een hogere temperatuur op te slaan in een buffervat. Dit kan dan op een ander tijdstip gebruikt worden voor ruimteverwarming of de bereiding van warm tapwater. Vandaar dat deze studie zich voornamelijk richt op de vraagsturing middels warmte in de utiliteitsbouw.

Er is gebruik gemaakt van intern beschikbare data om inzicht te krijgen in de mogelijke besparingen in energie en geld die hiermee te behalen zijn. Door de installatie onafhankelijk van de vraag te kunnen schakelen is het mogelijk om te speculeren op de onbalansmarkt voor elektriciteit en daarmee kan (in theorie) geld verdiend worden door de eigenaar van de installatie. Verder kan de installatie nuttig gebruikt worden om het elektriciteitsnetwerk te stabiliseren. Het totaal aan koude- en warmtevraag in de utiliteitsbouw is aanzienlijk, en het aandeel warmtepompen in de opwekking van warmte zal in de toekomst waarschijnlijk gaan toenemen. Volgens Mulder (2014)¹ is opslag van energie in warmte vooralsnog een van de goedkoopste vormen van opslag. Mulder (2014) zegt daar het volgende over:

“...both short term daily and long term seasonal storage is required on scales that will only be feasible for few storage options. Important scalable options for short term storage are heat storage (high temperature storage for CSP, low temperature heat) and batteries (sun-PV, wind)”.

Warmteopslag kan dus bijdragen aan een betaalbare vorm van stabilisatie van het elektriciteitsnet, en daarmee aan een snelle groei van duurzame elektriciteit. Bij een juiste inpassing van het systeem kunnen extra inkomsten gegenereerd worden door middel van in- en verkoop van elektriciteit op de onbalansmarkt. Daarnaast kan warmteopslag voordelen bieden wanneer het de utiliteitsbouw gaat voorzien in de piekvraag. In veel gevallen zal de piekvoorziening op basis van verbranding van aardgas vervangen kunnen worden door piekvoorziening vanuit warmteopslag, dit heeft een vermindering in CO₂-uitstoot tot gevolg. Vaak kan een gebouw dan volledig onafhankelijk

¹ Mulder, F. M. (2014). Implications of diurnal and seasonal variations in renewable energy generation for large scale energy storage. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 6(3), 033105



van aardgas worden. De transitie naar aardgasloos kan in grote mate bijdragen aan het verduurzamen van de warmtevoorziening.

Een belangrijke vraag is: *hoe kan worden georganiseerd dat de installatie-eigenaren inderdaad gebruik willen gaan maken van deze kans?* Veel eigenaren zitten niet te wachten op risico's die gepaard gaan met in- en verkoop op de onbalansmarkt, en willen ook niet dat de installatie op momenten van vraag niet beschikbaar is voor warmtelevering, omdat het buffervat leeg is. Ondanks dat de piekvoorziening kan worden geleverd vanuit een buffervat, zal dit ook gepaard gaan met thermische verliezen als het buffervat gevuld is. Ook is de ruimtelijke inpassing van een buffervat niet overal mogelijk. Dit kan worden veroorzaakt door ruimtegebrek of een moeilijk bereikbaar locatie om een buffervat in te passen. De systeem- en regeltechniek voor een installatie waarbij warmtepomp, buffervat en de elektriciteitsmarkt zorgt voor een complexer systeem. Kortom, technisch gezien lijkt er veel te winnen, maar praktisch gezien is het niet eenvoudig.

1.2 **SAMENWERKENDE PARTIJEN**

Het huidige onderzoek is uitgevoerd door twee partijen: IF Technology en DNV GL.

IF Technology

IF Technology adviseert gebouweigenaren en ontwikkelaars over duurzame warmte en koude. Het flexibiliseren van de warmteproductie kan voor de klanten veel voordelen opleveren. Binnen de huidige studie heeft IF Technology gezocht naar oplossingen voor bestaande barrières om zijn klanten van zinvol advies te kunnen voorzien. Voor het consortium brengt IF Technology kennis en ervaring in over duurzame warmte- en koudetechniek, regeltechniek en wetgeving. Concreet heeft IF Technology gewerkt aan de aanpassingen in de systemen die flexibele operatie mogelijk maken. Ook heeft IF Technology zijn kennis ingebracht over de businessmodellen waarbinnen dit zal moeten gebeuren.

DNV GL

DNV GL levert test, certificering en advies services voor de gehele energie waardeketen inclusief hernieuwbare energiebronnen en energie efficiëntie over de hele wereld. Elektrische energieopslag is een van de onderwerpen waarin veel expertise is bij DNV GL, vanuit dit project is de kennis met opslag van elektriciteit in de vorm van warmte uitgebreid. Verder is het doel van DNV GL om haar services op het vlak van de warmtevoorziening voor de gebouwde omgeving verder uit te breiden. Voor het consortium brengt DNV GL uitgebreide kennis mee over de werking van de elektriciteitsmarkt in Nederland. De bijdrage van DNV GL aan het project heeft zich vooral gericht op elektriciteitsmarkt, vanuit de geschiedenis en vele lopende projecten heeft DNV GL kennis ingebracht op dit onderwerp.

1.3 **DOELSTELLINGEN**

Het doel van dit project is om te onderzoeken of het haalbaar is om de opwekking van warmte in de utiliteitsbouw los te koppelen van de vraag. De hoofdvraag luidt:

Wat is de technische, energetische, financiële en organisatorische haalbaarheid wanneer de opwekking van warmte losgekoppeld wordt van de vraag naar warmte in de utiliteitsbouw?

Dit heeft als doel om extra warmte te produceren en op te slaan tijdens momenten van lage elektriciteitsprijzen (overschotten) en warmte uit de opslag te leveren aan het gebouw tijdens



hoge elektriciteitsprijzen (tekorten). Er liggen nog veel vragen die beantwoord moeten worden voordat een klant (gebouweigenaar) mogelijk bereid gevonden kan worden hierin mee te gaan. De volgende onderzoeksvragen staan centraal:

- 1 Hoe moet de inzet van de installatie en het buffervat geregeld worden zodat de opslagcapaciteit maximaal is zonder dat de gebouweigenaar daar iets van merkt in de beschikbaarheid van warmte? Wat is de rol van dimensionering en voorspellende regelingen?
- 2 Hoe kan de waarde die wordt gecreëerd omgezet worden in financiële baten bij de eigenaar? (De huidige verschillen in EPEX-prijzen zijn niet zodanig dat daar veel mee verdiend kan worden). Een aparte meter? Een deal met een elektriciteitsbedrijf? Koppelen aan duurzame opwekking?
- 3 Hoe kunnen de risico's voor de eindgebruiker worden beheerst? Handelen op de onbalansmarkt voor elektriciteit kan ook grote kosten met zich meebrengen als verkeerde keuzes worden gemaakt.
- 4 Wat is de beste marktform voor deze vorm van opslag? In hoeverre kan een ESCo (Energy Service Company) hierin meerwaarde bieden? Bij een ESCo besteedt een eigenaar/gebruiker van een gebouw de energievoorziening en het management daarvan uit aan een externe partij. Het doel daarvan is kosten besparing, realisatie van meer kwaliteit, minder vermogensbeslag te hebben en de eigen organisatie te ontlasten. Heeft het zin om veel projecten samen te voegen in een pool? Willen gebouweigenaren hier wel in mee? Zo ja, onder welke condities?

Bijdrage aan de doelstellingen van het programma

Dit concept draagt direct bij aan de doelstelling van het programma systeemintegratie in de zin dat het de barrières onderzoekt voor het loskoppelen van vraag en productie van warmte in de utiliteitsbouw. Door vraag en productie van warmte in een gebouw los te koppelen en volledig te voorzien met elektriciteit (warmtepompen met behulp van buffervat) biedt dit de mogelijkheid voor vraagsturing van elektriciteit vanuit het elektriciteitsnet gezien. Elektrische opwekking uit duurzame bronnen en verbruik van warmte kunnen zo aan elkaar gekoppeld en op elkaar afgestemd worden. Door vraagsturing van elektriciteit per gebouw kan de druk op de elektrische infrastructuur verlaagd worden en het faciliteert de inpassing van duurzame opwekking.

Dit onderzoek richt zich alleen op vraag- en aanbodsturing van warmte met warmtepompen, buffervaten en elektrische pompelaars in de utiliteitsbouw. Maar de resultaten kunnen ook in andere toepassingsgebieden gebruikt worden aangezien veel van de knelpunten inherent zijn aan vraagsturing met warmte en koude opwekkers in het algemeen.

1.4 WERKWIJZE

De huidige studie kan globaal verdeeld worden in 9 fases. Deze 9 fases bevatten alle onderdelen die uiteindelijk in het huidige rapport zijn beschreven. Het uitgangspunt bij de uitvoering van deze haalbaarheidsstudie was zo snel mogelijk een eindgebruiker te betrekken bij het onderzoek. Knelpunten zitten met name in de praktische uitwerking van vraagsturing middels warmte. De technische haalbaarheid van de verschillende concepten moet passen in de utiliteitsbouw. Daarnaast was het doel om de haalbaarheid van vraagsturing middels warmte te toetsen aan de hand van een bestaande case om zo eventuele knelpunten bloot te leggen van het concept en eventueel de mogelijkheid te creëren om een pilotproject uit te voeren bij de eindgebruiker.



Fases

- 1 Fase 1
 - Formulering van randvoorwaarden waarbinnen het onderzoek plaats heeft gevonden.
 - Benadering van eindgebruiker in de utiliteitsbouw met een potentieel interessant profiel.
 - Start van data monitoring van het warmteverbruik van het gebouw.
- 2 Fase 2
 - Ontwikkeling concepten voor warmte opslag en toetsing met eindgebruiker op praktische haalbaarheid.
 - Keuze van 4 definitieve concepten onderzocht in de huidige studie.
- 3 Fase 3
 - Bepaling installatietechnische, elektrische en regeltechnische aspecten van de concepten.
- 4 Fase 4
 - Modelleren van de concepten om de energetische haalbaarheid te toetsen.
 - Optimaliseren van modellen en parameters.
 - Gebruik van een model utiliteitsgebouw uit intern beschikbare data met bekende warmtevraag, aandeel gasketel en WKO als functie van de tijd.
 - Vertaling naar andere utiliteitsbouw met intern en publiekelijk beschikbare data.
- 5 Fase 5
 - Financiële analyse van de concepten en vergelijking met een referentieconcept.
- 6 Fase 6
 - Dataverzameling en verwerking van de gemonitorde warmtevraag bij de eindgebruiker die in fase 1 is benaderd.
- 7 Fase 7
 - Energetische en financiële haalbaarheid getoetst voor het utiliteitsgebouw van de eindgebruiker uit fase 1 met de modellen uit fase 2.
- 8 Fase 8
 - Organisatie workshop voor energiecoördinatoren en/of gebouwbeheerders van installaties in de utiliteitsbouw, warmtepompleveranciers en andere adviesbureaus met als doel om de resultaten van het onderzoek te presenteren en een discussie op gang te brengen over vraagsturing middels warmte in te utiliteitsbouw.
- 9 Fase 9
 - Evaluatieonderzoek om te kijken of de systeemconcepten ver genoeg zijn gebracht om een plan van aanpak te kunnen schrijven voor een entree in de markt.

1.5 LEESWIJZER

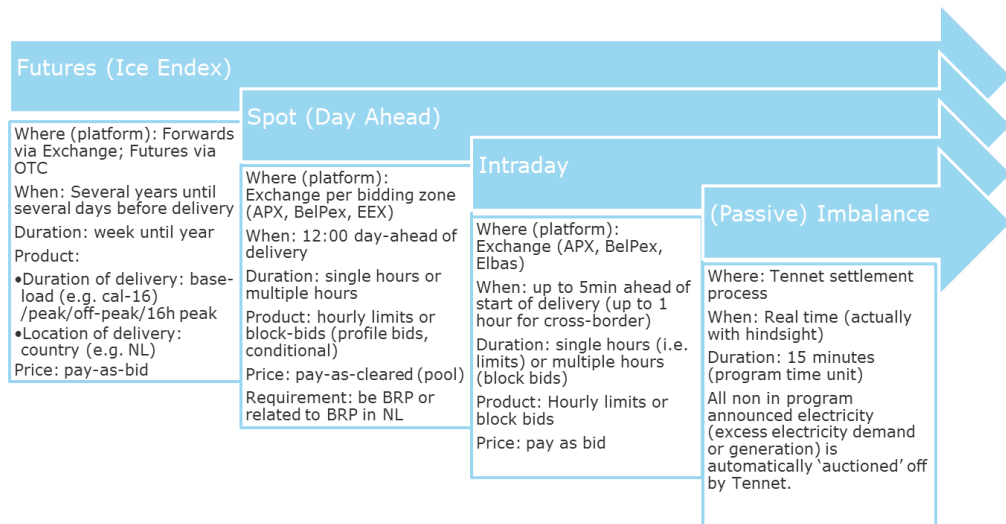
In hoofdstuk 2 is de theoretische achtergrond van het onderzoek te lezen. Vervolgens zijn in hoofdstuk 3 en 4 de energetische en financiële analyse beschreven. Waarbij in paragraaf 3.1, 3.2 en 3.3 de randvoorwaarden, systeemconcepten en duurzaamheid voor een modelgebouw zijn bediscussieerd. In hoofdstuk 5 zijn de resultaten van een voorbeeldproject in combinatie met het meest interessante systeemconcept te zien. De uitkomsten van de workshop, die in de afsluitende fase van het onderzoek is georganiseerd, staat in hoofdstuk 6. In hoofdstuk 7 worden conclusies getrokken en aanbevelingen gegeven op basis van de uitkomst van het onderzoek.

2 Theoretische achtergrond

2.1 ELEKTRICITEITSMARKT

Elektriciteit wordt op verschillende plaatsen verhandeld. Naast bilaterale afspraken tussen een leverancier/producent en een afnemer, zijn er verschillende beurzen waar elektriciteit wordt verhandeld. Deze beurzen worden vaak gebruikt als referentie van elektriciteitsprijzen, zowel in studies als in de praktijk door energieleveranciers.

De flexibiliteit van het utiliteitsgebouw kan worden ingezet op de verschillende elektriciteitsmarkten. Dit kan direct, ofwel via een leverancier of aggregator. Een overzicht van deze markten is weergegeven in Figuur 2.1. Het komt erop neer om elektriciteit in de buffer op te slaan op momenten dat deze goedkoop is en de buffer te gebruiken op momenten dat de elektriciteit duur is.



Figuur 2.1 | Overzicht van de belangrijkste markten (exchanges) waar elektriciteit wordt verhandeld voor Nederland. Onbalans ('Imbalance') werkt als een 'real time'/'ex-post' markt doordat alle niet door de programmaverantwoordelijke in het programma bij TenneT aangemelde vraag/aanbod van elektriciteit per kwartier wordt "geveild".

Welke markt het geschiktste is om de flexibiliteit op in te zetten hangt af van de volatiliteit (de frequentie van pieken en dalen); de prijsverschillen tussen pieken en dalen en de voorspelbaarheid (en daarmee het risico) van deze markten in combinatie met de relatieve grootte van de buffer t.o.v. de benodigde elektriciteit voor het verwarmen van het gebouw (met andere woorden de grootte van de buffer uitgedrukt in tijd).

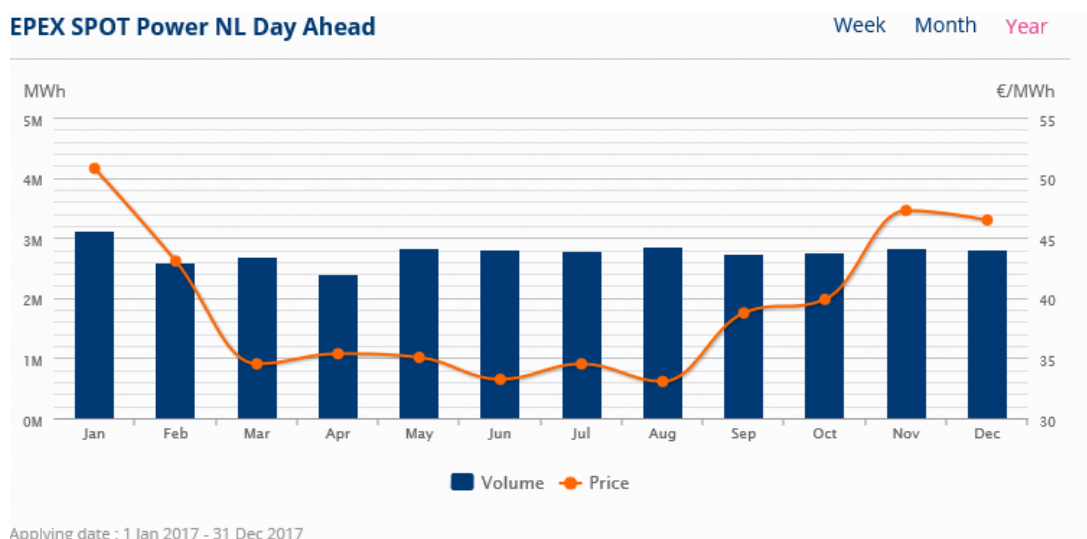
Omdat de buffergrootte in de orde van één of enkele uren zal liggen, komt de Futures markt (Ice Index) niet in aanmerking. Op deze markt worden blokken van minimaal 4 uur verhandeld. Om de flexibiliteit gegenereerd door het buffervat in de gebouwen te gebruiken om te besparen op de inkoop van elektriciteit komen alleen de Day-Ahead markt (de EPEX) en de onbalansmarkt in aanmerking. De Intraday markt in Nederland is relatief onderontwikkeld, mede door het bestaan van de onbalansmarkt.

2.1.1 De Day-Ahead markt (EPEX)

Op de 'Day-Ahead' markt (ook wel spotmarkt genoemd) wordt elektriciteit in blokken van één uur verhandeld. Partijen bieden een dag van tevoren voor elk uur van de volgende dag een bieding in voor welke prijs ze elektriciteit willen kopen of verkopen. De markt is relatief goed te voorspellen en het prijsprofiel verschilt weinig per dag, al is het wel afhankelijk van de hoeveelheid zonne- en windenergie.

Mogelijk wordt het prijsverschil in de toekomst groter indien er meer wind- en zonne-energie wordt geïntegreerd en meer kolencentrales worden gesloten, maar het is onwaarschijnlijk dat de prijsverschillen de komende jaren veel groter zullen worden dan op dit moment. Incidenteel kunnen de prijzen en daarmee prijsverschillen tussen piek- en dalprijzen hoger zijn. Vaak is dat een gevolg van een tijdelijk gebrek aan productiecapaciteit met een specifieke reden. Relatief kleine verbruikers met een laag- of middenspanningsaansluiting, zoals veel utiliteitsgebouwen, zullen niet direct handelen op de Day-Ahead markt, maar zullen gebruik moeten maken van aggregatoren of energieleveranciers. Figuur 2.2 laat de gemiddelde EPEX-prijzen zien in 2017 per maand en Figuur 2.3 laat de prijzen per uur zien op 30 januari 2018. De prijzen lijken een redelijke spreiding te hebben maar ~25€/MWh per cyclus waarvan er één per dag gemaakt kan worden is lang niet voldoende om een opslagsysteem van dergelijke grootte terug te verdienen.

EPEX SPOT Power NL Day Ahead



Figuur 2.2 | Voorbeeld van prijzen en volumes verhandeld in 2017 op de EPEX, de Nederlandse Day-Ahead markt.



EPEX SPOT Power NL Hourly

Day Week Month

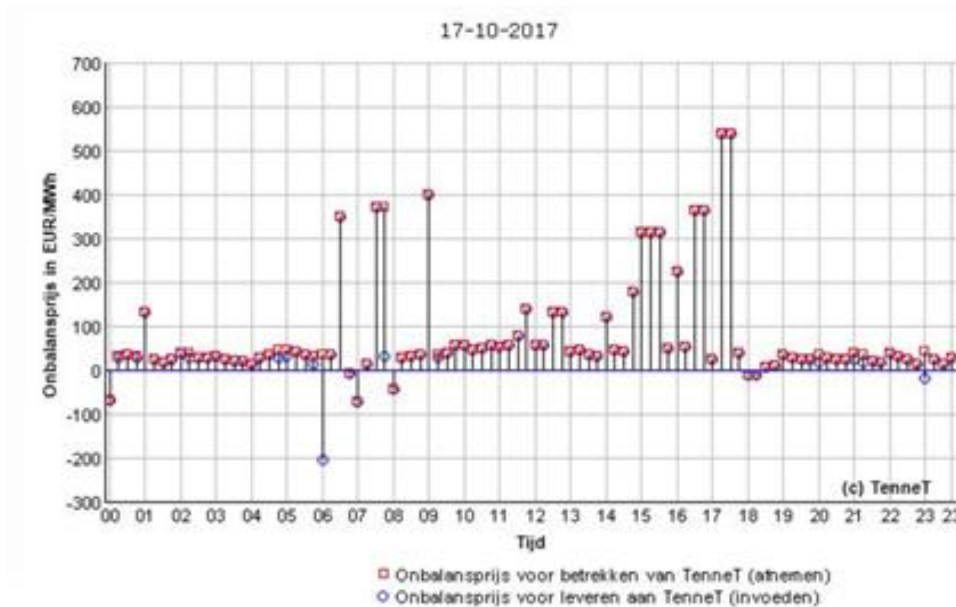


Figuur 2.3 | Voorbeeld van prijzen en volumes verhandeld op 30 januari 2018 op de EPEX, de Nederlandse Day-Ahead markt.

2.1.2

Onbalansmarkt

Elke partij die elektriciteit inkoopt of verkoopt en transporteert over het openbare elektriciteitsnet moet aan de TSO (de transmissiesysteem operator, in Nederland is dat TenneT) van tevoren aangeven hoeveel elektriciteit hij per kwartier (de programma-tijdeenheid of PTE) wil transporteren (d.w.z. invoeden op en afnemen van het elektriciteitsnet). Dit gebeurt via programmaverantwoordelijke partijen. TenneT heeft zo van tevoren een overzicht van hoeveel energie elke PTE (elk kwartier) moet worden ingevoerd en afgenomen. Als tijdens de looptijd van een kwartier een verschil wordt geconstateerd (er wordt meer afgenomen of geproduceerd dan verwacht) roept TenneT regelvermogen af, FRR (Frequency Restoration Reserve), bij hiervoor gecontracteerde partijen en publiceert tegelijkertijd de prijs per kWh die het hiervoor moet betalen. Alle partijen (dat wil zeggen de programmaverantwoordelijke partijen) die afwijken van hun programma, 'kopen of verkopen' het verschil in energie tussen het programma en de daadwerkelijk gemeten hoeveelheid elektriciteit aan TenneT. De prijzen van de onbalansmarkt zijn een afgeleide van de FRR-systeemdienst. De onbalansprijs voor betrekken en leveren aan TenneT zijn gebaseerd op de minima en maxima van de afgeroepen FRR-biedingen in het afgelopen PTE. In feite komt de onbalansmarkt neer op een soort realtime markt waarop alle niet van tevoren ingekochte/verkochte energie per kwartier wordt verhandeld. In Figuur 2.4 zijn de prijzen op de onbalansmarkt van woensdag 17 oktober 2017 te zien. De spreiding tussen de laagste en hoogste prijs kan relatief groot zijn t.o.v. de gemiddelde prijs.



Figuur 2.4 | Prijzen op de onbalansmarkt van woensdag 17 oktober 2017, gepubliceerd door TenneT

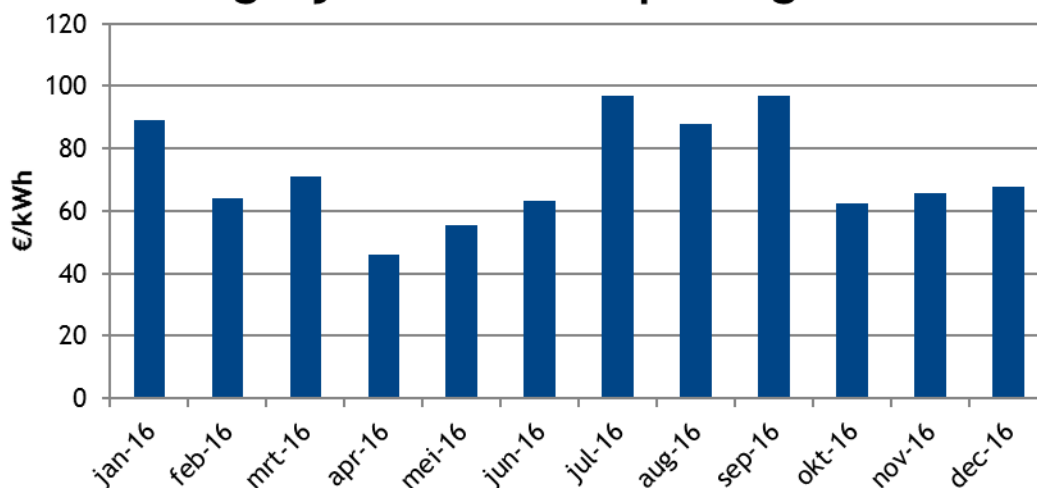
(http://www.tenneT.org/bedrijfsvoering/Systeemgegevens_afhandeling/verrekenprijzen/). Omdat alle afwijkingen in de energieprogramma's op de onbalans realtime wordt 'verhandeld' op kwartierbasis, is deze markt volatiel. De hoeveelheid energie die via de onbalansmarkt van de ene naar de andere programma verantwoordelijke partij wordt verkocht is echter relatief klein (ongeveer 300 tot 400 MW).

De maximale waarde van één kWh opslag ingezet op de onbalansmarkt in 2016 ligt gemiddeld rond de €72,16 per maand (Op basis van historische waarden, zie Figuur 2.5). Het ideale systeem om op de onbalansmarkt te handelen heeft een vermogen/energie ratio van 4. Je kan dan het volledige systeem gebruiken om elk kwartier compleet te laden of te ontladen.

Figuur 2.5 gaat uit van een perfecte voorspelling van de onbalansmarkt. In de praktijk zal dit echter significant lager zijn afhankelijk van het gebruikte algoritme. Daarnaast zal je soms moeten wachten met je opslagsysteem omdat de prijs nauwelijks veranderd in opeenvolgende PTE's. Je wil alleen handelen als de prijs tussen de PTE's omhoog of omlaag gaat. Een heel simpel algoritme kijkt bijvoorbeeld alleen of de hele markt "long" of "short" is. Met andere woorden een simpel algoritme kijkt of er een tekort of overschot op de totale energiemarkt wordt verwacht en gaat op basis daarvan handelen. De verwachte inkomsten met een simpel algoritme is ongeveer 30% van de potentiële waarde in Figuur 2.5. Een sophisticated algoritme werkt bijvoorbeeld op basis van patroonherkenning. Met een sophisticated algoritme kan zeker 40% van de potentiële waarde in Figuur 2.5 worden verdiend en mogelijk nog meer.



Mogelijke onbalans opbrengsten



Figuur 2.5 | Maandelijke potentiële waarde van 1 kWh op de onbalansmarkt in de periode januari 2016 tot en met december 2016.

2.1.3 Systeemdiensten

Voor de handhaving van de balans binnen een PTE is TenneT verantwoordelijk. Hiervoor koopt TenneT diensten in bij energieproducenten en in toenemende mate bij energie afnemers. Globaal zijn er twee producten die TenneT inkoop:

- FCR: Frequency Containment Reserve (frequentieregeling of primair regelvermogen)
- FRR: Frequency Restoration Reserve (regel- en noodvermogen).
 - aFRR (automatic frequency restoration reserve = regelvermogen)
 - mFRRda (manual frequency restoration reserve directly activated = noodvermogen)

In de volgende tabellen zijn beide producten die TenneT inkoop weergegeven. De eisen die gesteld worden aan het leveren van systeemdiensten, zoals de minimale beschikbaarheid en de grootte van het minimaal te leveren volume passen echter niet goed bij de karakteristieken van de flexibiliteit in de utiliteit (zie Tabel 2.1, Tabel 2.2 en Tabel 2.3). Wel is het mogelijk om via een aggregator deze diensten aan te bieden, de aggregator doet dit dan via een poule van verschillende bronnen van flexibiliteit, voorbeeld hiervan is het aanbieden van primaire reserve via slimme systemen in huishoudelijke boilers². De opbrengsten voor een gebouw eigenaar zijn lastig in te schatten wanneer deze in een poule met verschillende typen flexibiliteit zit, hierdoor worden deze in de resultaten niet verder uitgewerkt.

² <http://energeia.nl/login/?target=http%3A%2F%2Fenergeia.nl%2Fnieuws%2F737429-1710%2Fnederlandse-interesse-in-aankoop-restore-s-aggregatorplatform>



Tabel 2.1 | Frequency Containment Reserve (FCR) oftewel frequentie regeling is bedoeld om de frequentie van het net te handhaven.

FCR	Omschrijving
Synoniemen	Primaire reserve, Primary control, Frequency control
Markt grootte	96 MW in Nederland
Aanbieden via	Wekelijkse biedingen (via www.regelleistung.net)
Systeem eisen	<ul style="list-style-type: none">- Minimum 1MW op en af regelen- 100% vermogen na 30 seconden- Automatische frequentieregeling- 100% beschikbaarheid (gedurende de week)

Tabel 2.2 | Automatic Frequency Restoration Reserve (aFRR) is bedoeld om de frequentie van het net terug te brengen naar 50HZ.

aFRR	Omschrijving
Synoniemen	Actieve onbalans, Secondary reserve
Markt grootte	340 MW in 2016
Aanbieden via	50% gecontracteerd op jaarbasis 50% gecontracteerd op kwartaal basis
Systeem eisen	<ul style="list-style-type: none">- Minimaal 4 MW biedingen- Automatische frequentieregeling- 100% beschikbaarheid voor gecontracteerde periode

Tabel 2.3 | Manual Frequency Restoration Reserve (mFRR) of noodvermogen is bedoeld om voldoende vermogen achter de hand te hebben voor grote verstoringen.

mFRRda	Omschrijving
Synoniemen	Noodvermogen
Markt grootte	700 MW (op regelen) in 2016
Aanbieden via	350 MW TSO-TSO 350 MW via tenders in NL (50%jaarlijks, 50% per kwartaal)
Activatie	Via telefoon
Systeem eisen	<ul style="list-style-type: none">- Minimaal 20 MW (individueel of gepoold)- Minimaal 97% availability (100% telefonische bereikbaarheid)

2.1.4 **Andere mogelijke diensten**

Verder zijn er nog een aantal andere mogelijke diensten die een gebouw zou kunnen vervullen met de gerealiseerde vraagsturing. Deze zijn alleen mogelijk onder bepaalde voorwaarden.

Congestie

Congestie treedt op in het transmissie- en/of distributienet wanneer componenten zoals kabels en transformatoren tegen hun maximale capaciteit aanlopen. Opslagssystemen zouden congestie lokaal kunnen voorkomen door op juiste momenten energie te leveren of op te slaan. Om met het energieverbruik van gebouwen te kunnen bijdragen aan het oplossen van congestie moet het gebouw wel op de plek in het net aangesloten zitten waar deze problemen zich (gaan) voordoen.



Portfolio Optimalisatie/Onbalans Reductie

Bij portfolio optimalisatie wordt een opslagsysteem gebruikt om het verschil tussen de voorspelling en output van duurzame energiebronnen te verkleinen, waardoor ook de hoeveelheid ontstane onbalans verminderd wordt. Hiervoor is duurzame productie op de locatie nodig. Met deze facetten is het dan mogelijk om de vraag en aanbod van het gebouw zeer goed voorspelbaar te maken, waardoor onbalans wordt voorkomen. Op dit moment zal het meer voorkomen bij grote wind of zon parken, maar het kan mogelijkheden bieden voor kleinere gebruikers of producenten in de toekomst.

Vergroting netaansluiting voorkomen

Een opslagsysteem kan gebruikt worden om de netaansluiting gelijk te houden wanneer de volledige warmtevoorziening elektrisch wordt ingevuld, hierdoor kunnen kosten voorkomen worden. Door een warmtebuffer in de nacht te laden, in plaats van warmteproductie op het moment dat het gebruik van andere systemen in het gebouw ook het grootst is, kan voorkomen worden dat een grotere aansluiting nodig is.



3 Energetische analyse

In dit hoofdstuk worden de resultaten gepresenteerd van het onderzoek. De resultaten zijn op hoofdlijnen in de volgorde beschreven van de 9 fases van het project die in paragraaf 1.4 zijn opgesomd. Echter de verschillende fases kunnen overlappend zijn en deze zijn niet altijd in chronologische volgorde uitgevoerd/beschreven. Aan de resultaten van de concepten liggen uitgebreide rekenkundige modellen ten grondslag.

3.1 RANDVOORWAARDEN EN UITGANGSPUNTEN

Het doel van het project is om de haalbaarheid te onderzoeken om de opwekking van warmte en koude in de utiliteitsbouw los te koppelen van de vraag. Het is belangrijk om een duidelijke afbakening te maken in het onderzoeksgebied, zodat het onderzoek te plaatsen is in een bepaald kader. In die zin is een duidelijk onderscheid gemaakt in het speelveld waarin de toepassing een rol zou kunnen spelen. De utiliteitsbouw heeft vaak omvangrijke koel- en verwarmingsinstallaties, waarin warmteopslag en vraagsturing een belangrijke rol kunnen spelen. Woningbouw valt buiten deze scope, dit betekent echter niet dat deze toepassing daar niet haalbaar is.

In het huidige onderzoek is alleen vraagsturing middels warmte onderzocht. De vraagsturing middels warmte lijkt het meest interessant, omdat een elektrisch gedreven warmtepomp en/of een elektrische pompelaar kan worden gebruikt om water uit de warme bron van de WKO op te warmen en een buffervat te vullen. Op deze manier kan de vraag losgekoppeld worden van het aanbod. Dit kan betekenen dat de capaciteit van het systeem vergroot wordt bij pieklevering, maar daarnaast kan er ook een koppeling met de elektriciteit onbalansmarkt gemaakt worden omdat de warmteopwekking volledig elektrisch gebeurt. Het betekent dat een gasketel wordt vervangen door een warmteopslagsysteem en dat er met een warmtepomp geschakeld kan worden om te handelen op de onbalansmarkt. Er zou een parallel naar vraagsturing middels koude gemaakt kunnen worden. Echter de opslag van koude en een koppeling met de onbalansmarkt lijkt minder zinvol, omdat koudelevering in de meeste gevallen direct gebeurt. Dit betekent dat er niet altijd koelmachines nodig zijn om koeling te leveren. Bij passieve koeling kan minder gebruik worden gemaakt van de onbalansmarkt, omdat het elektriciteitsverbruik doorgaans lager is.

De warmte moet volledig aardgasloos opgewekt worden. De inpassing van een opslagmethode maakt het onder andere mogelijk om een warmtepiek op te vangen. Daarnaast kan handel op de onbalansmarkt er ook voor zorgen dat extra warmte wordt geleverd op momenten dat de elektriciteitsprijs laag is en dat minder of geen warmte wordt geleverd op momenten dat elektriciteitsprijs laag is. In deze haalbaarheidsstudie is vooral onderzocht of het energetisch en financieel mogelijk zou zijn om een utiliteitsgebouw op deze manier van warmte te voorzien. Het kan erop neerkomen dat de warmte aan een gebouw wordt geleverd op een moment dat dit niet noodzakelijk is of er geen warmte wordt geleverd in geval van een grote warmtevraag. Het is belangrijk dat dit binnen het energiesysteem van een gebouw past. De thermische traagheid van een gebouw speelt hierin een belangrijke rol. In het huidige onderzoek is er nog geen rekening gehouden met deze thermische traagheid.

De meest voorkomende WKO maakt gebruik van een warmtepomp en een gasketel voor verwarming en warm tapwater en levert directe koeling. Warmte wordt in basis geleverd door de WKO in



combinatie met een warmtepomp. De gasketel levert piekwarmte. Koeling wordt volledig direct geleverd, zonder koelmachine. Omdat dit WKO systeem als meeste voorkomt, is dit systeem als referentie genomen waartegen de verschillende systeemconcepten worden gewogen. In alle concepten is het uitgangspunt dat de gasketel wordt vervangen door een aardgasloze oplossing. Daarvoor is beschikbare data van de warmtevraag van een utiliteitsgebouw gebruikt die overéénkomt met de referentie om als input te dienen voor de energetische en financiële rekenmodellen. Het gebouw blijft anoniem in deze studie en zal als referentiegebouw worden aangeduid. Het referentieconcept is ook beschreven in paragraaf 3.2.1.

Het buffervat dient ten allen tijden van die grootte te zijn dat het op elk moment kan voldoen aan de warmtevraag. Het kan zo zijn dat er gedurende een langere periode een piekvraag aan warmte is. Op dat moment zal het WKO systeem niet voldoende vermogen leveren om de warmtevraag op te vangen, waardoor het buffervat de extra warmte moet leveren. Het buffervat moet voldoende capaciteit hebben, zodat deze niet leeg kan raken. In het geval van handel op de onbalansmarkt mogen de capaciteit van het buffervat en dure elektriciteitsprijzen geen beperkende rol in de warmtevraag spelen.

Andere uitgangspunten zijn:

- ΔT van buffervat is 25 K;
Dit heeft te maken met de aanvoer- en retourtemperatuur van de centrale verwarming om de energiehoeveelheid en het volume van het buffervat te bepalen. Een aanvoertemperatuur van $-55 - 60$ °C komt ongeveer overeen met een COP van 4 voor de warmtepomp. Voor bestaande bouw is dit nog altijd een bruikbaar niveau voor warmtelevering³.
- Thermische verlies buffervat is 0,1 %/h;
Het thermische verlies hangt erg af van de mate van isolatie en de grootte van het buffervat. Ingeschat is dat buffervaten met een volume tussen $-50-300$ m³ een thermisch verlies van $-0,1\%/h$ hebben.
- Warmtepomp heeft een gemiddelde COP van 4
Dit is gebaseerd op een warmtepomp die de warmte uit de warme bron van een WKO systeem haalt. Het water van de koudebron wordt doorgaans afgekoeld tot -8 °C. De aanvoertemperatuur is $-55 - 60$ °C.
- De grootte van de elektriciteitsaansluiting verandert niet in de verschillende concepten.
Er wordt rekening gehouden in de rekenkundige modellen dat warmte alleen geleverd kan worden als er nog capaciteit beschikbaar is op de aansluiting.
- Traagheid van het systeem wordt niet meegerekend;
De onbalansmarkt werkt met verrekenprijzen die elke 15 minuten veranderen. In het gehele systeem zit een traagheid die moeilijk is te voorspellen in dit stadium. Daarom wordt deze niet meegerekend.

³ <https://www.rvo.nl/sites/default/files/2017/07/RVO.nl%20-%20Factsheet%20WKO%20en%20warmtepompen.pdf>

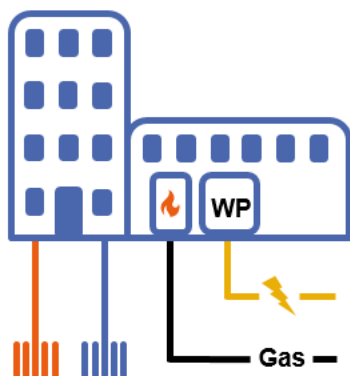
3.2 SYSTEEMCONCEPTEN

In deze paragraaf worden 5 systeemconcepten beschreven. Deze concepten zijn vervolgens gemodelleerd om de energetische en financiële haalbaarheid te toetsen. De concepten zijn:

- WKO met warmtepomp en gasketel (referentieconcept);
- buffer vervangt gasketel;
- buffervat met dompelaar vervangt gasketel;
- buffervat met dompelaar met handel op de onbalansmarkt vervangt de gasketel;
- schakelen met de warmtepomp en handel op de onbalansmarkt vervangt de gasketel.

3.2.1 WKO met warmtepomp en gasketel

Dit concept dient als referentiemodel voor de andere concepten om de energetische en financiële haalbaarheid te onderzoeken. In Figuur 3.1 is een schematische tekening van het concept weergegeven.

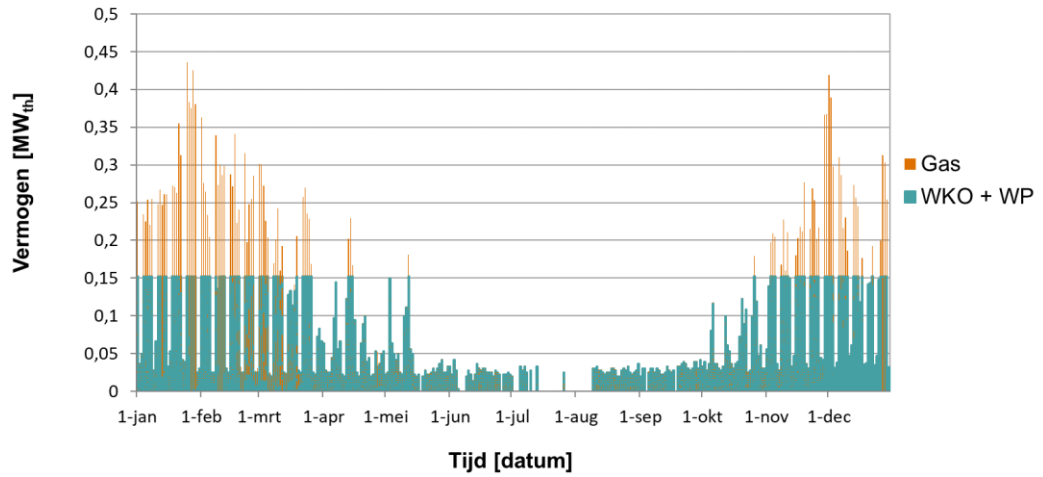


Figuur 3.1 | WKO met warmtepomp aangesloten op elektriciteitsnet en gasketel aangesloten op gasnet (bivalent systeem).

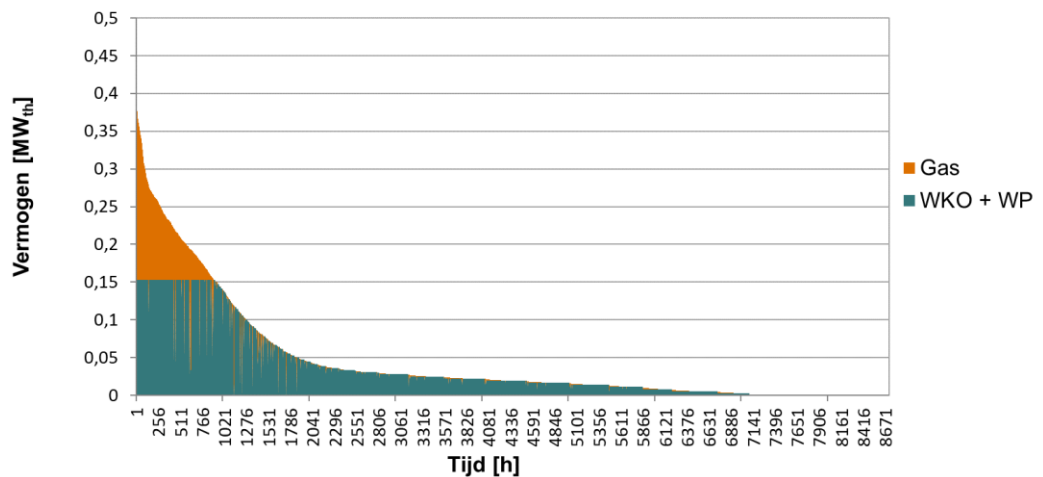
In Tabel 3.1 is de totale warmtevraag van het referentiesysteem gepresenteerd. In Figuur 3.2 is de jaarverdeling van de warmtevraag van het referentiegebouw te zien. De WKO levert een maximaal vermogen van 0,55 GJ_{th}/h. Dit komt ongeveer overeen met ~153 kW_{th}. In Figuur 3.3 is de jaarbelastingduurcurve gepresenteerd van dezelfde warmtevraag.

Tabel 3.1 | Warmtevraag referentiegebouw met WKO met warmtepomp en gasketel.

Energiestromen systeem	Waarde
WKO + warmtepomp	1.138 GJ _{th} /a
Gasketel	298 GJ _{th} /a
Totaal warmtevraag	1.437 GJ_{th}/a
Duurzaamheid	
CO ₂ emissie	59.400 [kg/a]



Figuur 3.2 | Jaarverdeling van de warmtevraag van het referentiegebouw. WKO + WP staat voor een open bodemenergiesysteem met een warmtepomp. De horizontale as loopt van 1 januari t/m 31 december. De capaciteit van het WKO + WP systeem is 0,55 GJ_{th} per uur, de overige warmtevraag wordt door de gasketel geleverd.



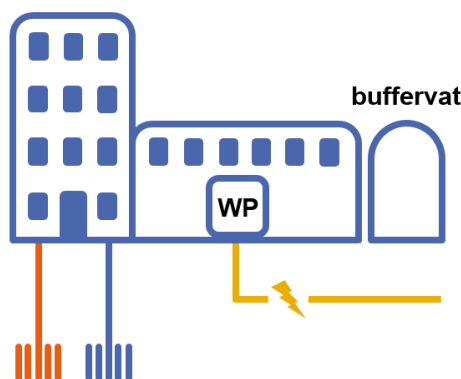
Figuur 3.3 | Jaarbelastingduurcurve van de warmtevraag van het referentiegebouw. WKO + WP staat voor een open bodemenergiesysteem met een warmtepomp. De capaciteit van het WKO + WP systeem is 0,55 GJ_{th} per uur, de overige warmtevraag wordt door de gasketel geleverd.

In de volgende paragrafen wordt deze warmtevraag als uitgangspunt gebruikt om bij de verschillende concepten de energiestromen te bepalen.

3.2.2 Buffervat vervangt de gasketel

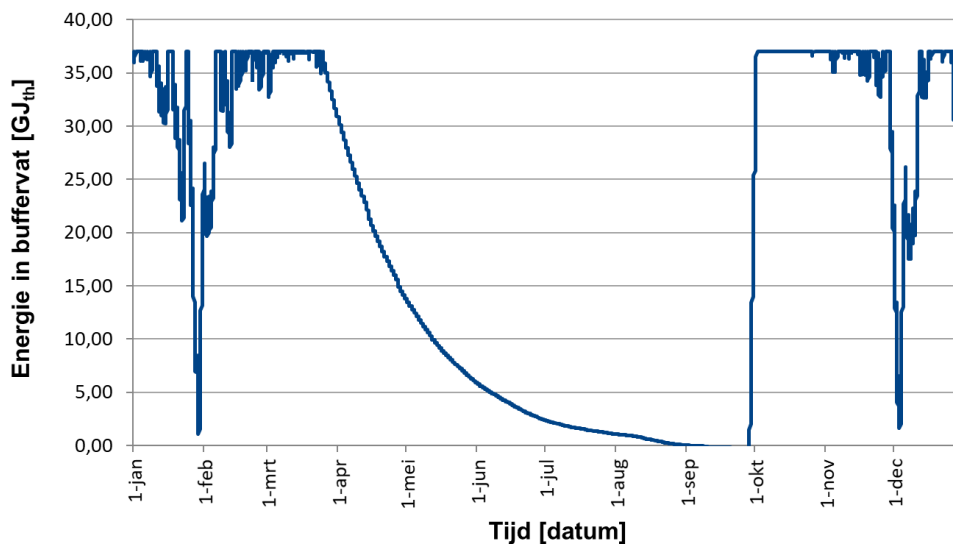
In dit concept wordt de gasketel vervangen door een buffervat. Het buffervat dient in dit specifieke concept als opslag van warmte, zodat deze gebruikt kan worden als de warmtevraag groter is dan de capaciteit van het WKO systeem. Het laden van het buffervat moet juist gebeuren op momenten dat de WKO een overcapaciteit heeft. Het schematische concept is weergegeven in Figuur 3.4.

Het doel is om het systeem energetisch en financieel optimaal in te richten. Dit betekent onder andere dat het buffervat zo weinig mogelijk overcapaciteit moet hebben, omdat dit extra investeringskosten veroorzaakt. Daarnaast is het onnodig om het buffervat in de zomer volledig gevuld te hebben, omdat dit grotere thermische warmteverliezen met zich meebrengt en daaruit volgend hogere exploitatiekosten. In Figuur 3.5 is de opgeslagen energie in het buffervat te zien als functie van de tijd. Het is te zien dat het buffervat een minimale capaciteit van 37 GJ_{th} nodig heeft om het referentiegebouw van warmte te kunnen voorzien. Het is ook te zien dat de capaciteit bepaald wordt door de twee dalen aan het begin en het eind van het jaar. Deze dalen komen overeen met de pieken in Figuur 3.2. De energie wordt uit het buffervat getrokken als de warmtevraag hoog is. In de zomer wordt het buffervat uitgeschakeld, omdat de warmtevraag met de WKO en WP geleverd kan worden. De trend van de energie wordt veroorzaakt door het thermisch verlies van het buffervat.



Figuur 3.4 | Concept: buffervat vervangt gasketel. WKO met warmtepomp aangesloten op elektriciteitsnet en buffervat.

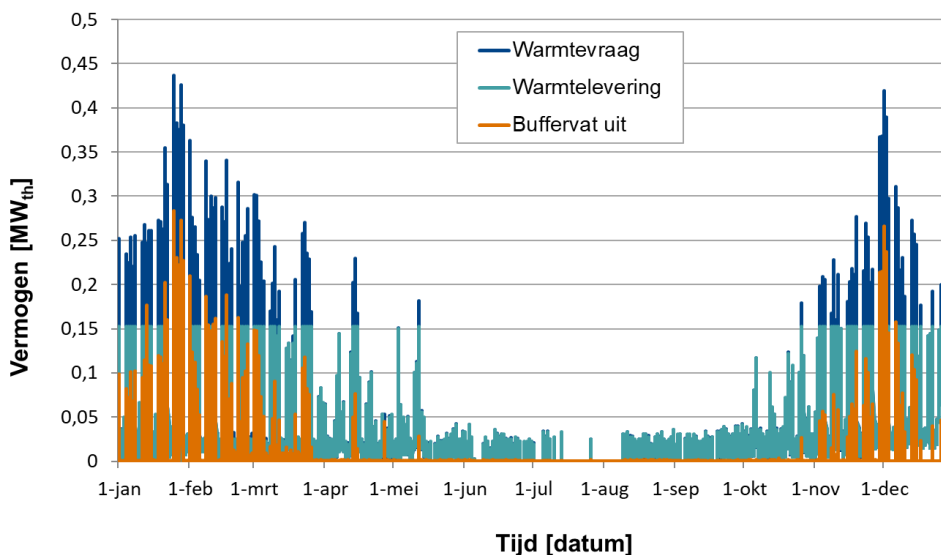
In Figuur 3.6 is de totale warmtevraag, warmtelevering WKO en warmtelevering uit het buffervat als functie van de tijd te zien. De totale warmtevraag komt overeen met Figuur 3.2. Het is goed te zien in Figuur 3.6 dat de buffervat gaat leveren als de totale warmtevraag boven de capaciteit van de WKO komt. In Tabel 3.2 zijn de energiestromen van het concept “buffervat vervangt gasketel” en de eigenschappen van het buffervat gepresenteerd. Het is te zien dat de WKO + warmtepomp nu meer energie moeten leveren dan het concept met de gasketel. Dit komt omdat het thermisch verlies van het buffervat opgevangen moet worden.



Figuur 3.5 | Opgeslagen energie in buffervat als functie van de tijd bij concept buffervat vervangt gasketel. De horizontale as loopt van 1 januari t/m 31 december. In de zomer wordt het buffervat niet aangevuld vanuit de WKO.

Tabel 3.2 | Warmtevraag referentiegebouw bij concept buffervat vervangt gasketel en eigenschappen buffervat.

Energiestromen systeem	Waarde
WKO + warmtepomp direct	1.179 GJ _{th} /a
WKO + warmtepomp buffervat laden	428 GJ _{th} /a
Totaal WKO + warmtepomp	1.607 GJ_{th}/a
Buffervat uit	258 GJ _{th} /a
Thermisch verlies buffervat	170 GJ _{th} /a
Totaal warmtevraag	1.437 GJ_{th}/a
Eigenschappen buffervat	
Volume	354 m ³
Duurzaamheid	
CO ₂ emissie (groen - grijs)	0 - 58.700 [kg/a]

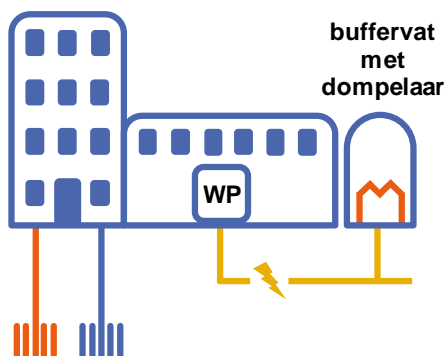


Figuur 3.6 | Opgeslagen energie in buffervat als functie van de tijd. De horizontale as loopt van 1 januari t/m 31 december. In de zomer wordt het buffervat niet aangevuld vanuit de WKO.

3.2.3

Buffervat met pompelaar vervangt de gasketel

In dit concept wordt de gasketel vervangen door een buffervat met een pompelaar. Het buffervat dient in dit specifieke concept als opslag van warmte, zodat deze gebruikt kan worden als de warmtevraag groter is dan de capaciteit van het WKO systeem. Het laden van het buffervat moet juist gebeuren op momenten dat de WKO een overcapaciteit heeft. Het schematische concept is weergegeven in Figuur 3.7. De pompelaar of elektrische weerstand kan extra warmte afgeven aan het water in het buffervat.



Figuur 3.7 | Concept: buffervat met pompelaar vervangt gasketel. WKO met warmtepomp en een pompelaar aangesloten op elektriciteitsnet.

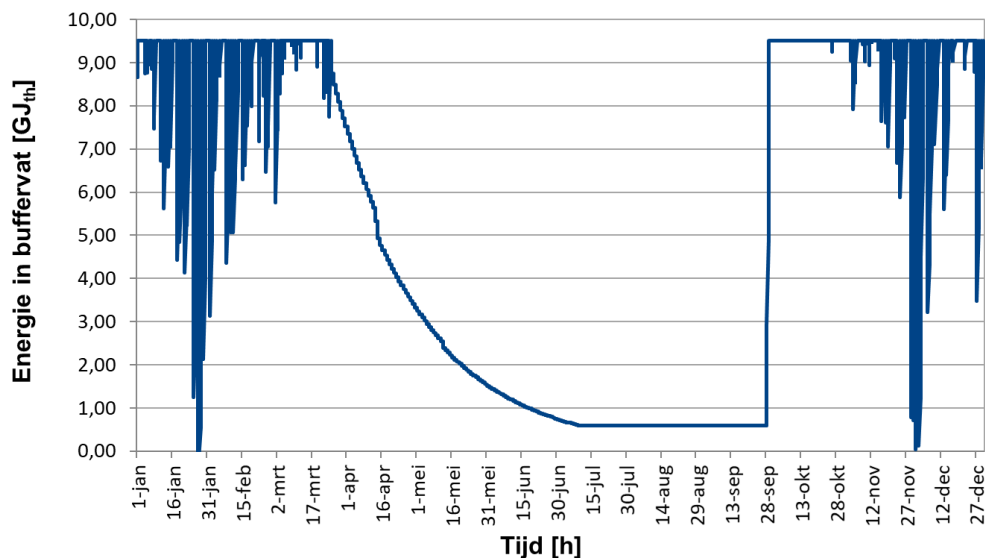
Belangrijke aannamen in dit concept zijn weergegeven in Tabel 3.3. Deze aannamen hebben betrekking op de capaciteit van elektriciteitsaansluiting. Het wordt aangenomen dat gedurende de dag de beschikbare capaciteit lager is dan in de nacht. De aannamen in paragraaf 3.1 voor het buffervat gelden in dit concept ook.

Tabel 3.3 | Aannamen concept buffervat met pompelaar vervangt gasketel.

Aannamen	Waarde
Geïnstalleerd vermogen pompelaar	320 kW
Beschikbaar vermogen pompelaar tussen 07:00 - 23:00	60%
Beschikbaar vermogen pompelaar tussen 23:00 - 07:00	100%

Het voordeel van een pompelaar in het buffervat is dat de pompelaar kan zorgen voor een piekverwarming zonder dat daar gas voor nodig is. In dat geval is het buffervat in combinatie met de pompelaar in staat om de twee momenten van grote warmtevraag in januari en november op te vangen. Daardoor kan de benodigde capaciteit van het buffervat kleiner worden, en dus dalen de investeringskosten van het buffervat. De pompelaar treedt altijd in werking als de warmtevraag groter is dan de capaciteit van de WKO. In dat geval zal de warmte direct uit het buffervat geleverd worden, vervolgens zorgt de pompelaar ervoor dat het niveau in het buffervat hersteld wordt. De pompelaar zorgt er ook voor het thermisch verlies direct wordt gecompenseerd, zodat het buffervat gevuld blijft.

De opgeslagen energie in het buffervat gedurende het jaar is terug te zien in Figuur 3.8. Het is te zien dat de capaciteit van het buffervat verkleind kan worden van 37 GJ_{th}, (buffervat vervangt gasketel), naar 9,5 GJ_{th} voor het concept buffervat met pompelaar vervangt gasketel.



Figuur 3.8 | Opgeslagen energie in buffervat als functie van de tijd bij concept buffervat met pompelaar vervangt gasketel. De horizontale as loopt van 1 januari t/m 31 december. In de zomer wordt het buffervat niet aangevuld vanuit de WKO.

In Tabel 3.4 zijn de energiestromen van het concept buffervat met pompelaar vervangt gasketel en de eigenschappen van het buffervat gepresenteerd. Het is te zien dat de WKO + warmtepomp nu minder energie hoeft te leveren dan het concept met alleen het buffervat, dit komt omdat het thermisch verlies van het buffervat lager is doordat het systeem een kleiner verliesoppervlak heeft.

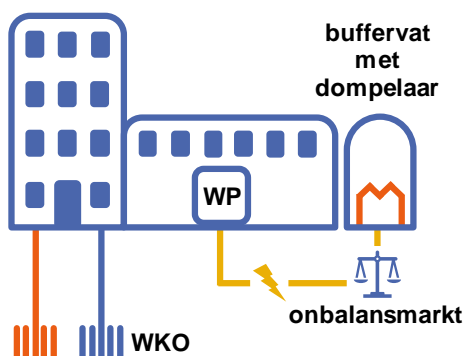
Hierdoor hoeft de WKO + warmtepomp minder energie te leveren om het niveau in het buffervat te herstellen. Het is ook te zien dat de pompelaar circa 10% van de warmtevraag levert.

Tabel 3.4 | Warmtevraag referentiegebouw bij concept buffervat met pompelaar vervangt gasketel en eigenschappen buffervat.

Energiestromen systeem	Waarde
WKO + warmtepomp direct	1.180 GJ _{th} /a
WKO + warmtepomp buffervat laden	147 GJ _{th} /a
Totaal WKO + warmtepomp	1.326 GJ_{th}/a
Buffervat uit	250 GJ _{th} /a
Thermisch verlies buffervat	47 GJ _{th} /a
Pompelaar	150 GJ _{th} /a
Totaal warmtevraag	1.430 GJ_{th}/a
Eigenschappen buffervat	
Volume	91 m ³
Duurzaamheid	
CO ₂ emissie (groen - grijs)	0 - 70.400 [kg/a]

3.2.4 Buffervat met pompelaar met handel op de onbalansmarkt vervangt de gasketel

In dit concept wordt de gasketel vervangen door een buffervat met een pompelaar. Daarnaast wordt het systeem geregeld op basis van voorspelde onbalansprijzen. De onbalansmarkt is in dit geval een extra onafhankelijke variabele. De warmtepomp en de pompelaar zijn namelijk aangesloten op het elektriciteitsnet en kunnen aan- of uitgeschakeld worden als de prijs van elektriciteit respectievelijk laag of hoog is. Het schematische concept is weergegeven in Figuur 3.9. Het buffervat dient in dit specifieke concept als opslag van warmte, zodat deze gebruikt kan worden als de warmtevraag groter is dan de capaciteit van het WKO systeem. Het laden van het buffervat moet juist gebeuren op momenten dat de WKO een overcapaciteit heeft. De pompelaar kan extra warmte afgeven aan het water in het buffervat.



Figuur 3.9 | Concept: buffervat met pompelaar met handel op de onbalansmarkt vervangt gasketel. WKO met warmtepomp en pompelaar in buffervat aangesloten op elektriciteitsnet via onbalansmarkt.

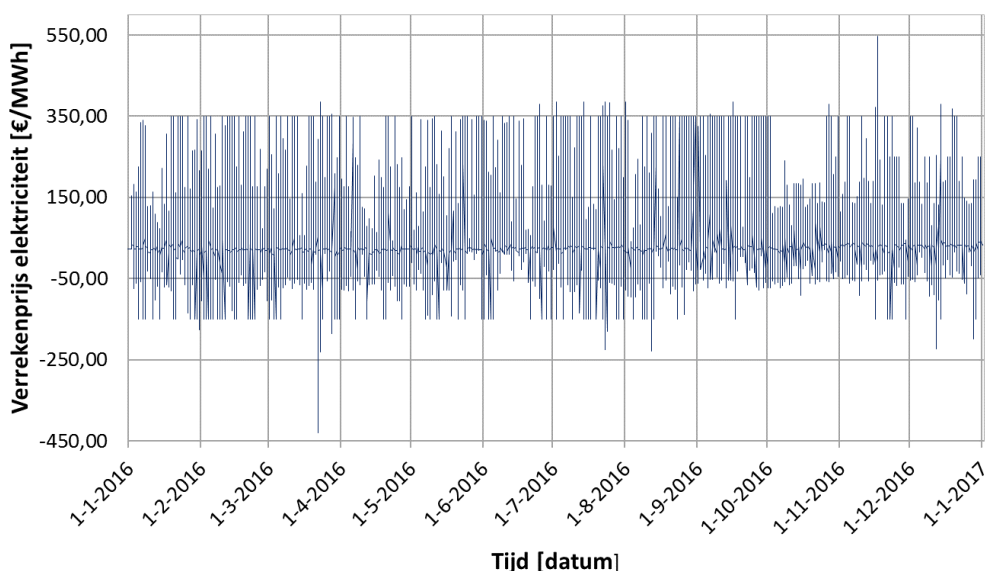
De winst in dit concept ten opzichte van het concept “buffervat met pompelaar vervangt de gasketel” is met name het tegen lage of negatieve prijzen kunnen opladen van het buffervat. Belangrijke aannamen in dit concept zijn weergegeven in Tabel 3.5. Er wordt aangenomen dat

gedurende de dag de beschikbare capaciteit lager is dan in de nacht. De aannamen in paragraaf 3.1 voor het buffervat gelden in dit concept ook. Extra voorwaarde aan het aan- en uitschakelen van het systeem is:

- De verrekenprijzen van 2016 van TenneT zijn gebruikt (bron: <http://www.tennet.org/>). Het verloop is te zien in Figuur 3.10.
- De pompelaar kan alleen aangeschakeld worden als het buffervat niet aan zijn volledige capaciteit zit.
- Het systeem kan alleen volledig uitgeschakeld worden als het buffervat voldoende capaciteit heeft om aan de warmtevraag te voldoen. Het kan dus voorkomen dat het systeem ingeschakeld is, terwijl de verrekenprijs > 100 €/MWh is.
- Het theoretisch maximum van de onbalansmarkt betekent een 100% juiste voorspelling.
- De verwachte inkomsten bij een voorspellend algoritme zijn 30% van het theoretisch maximum.

Tabel 3.5 | Aannamen concept buffervat met pompelaar met handel op de onbalansmarkt vervangt gasketel.

Aannamen	Waarde
Geïnstalleerd vermogen pompelaar	320 kW
Beschikbaar vermogen pompelaar tussen 07:00 - 23:00	60%
Beschikbaar vermogen pompelaar tussen 23:00 - 07:00	100%
Verrekenprijs uitschakelen WKO + warmtepomp en pompelaar	> 100 €/MWh
Verrekenprijs aanschakelen pompelaar	< -20 €/MWh

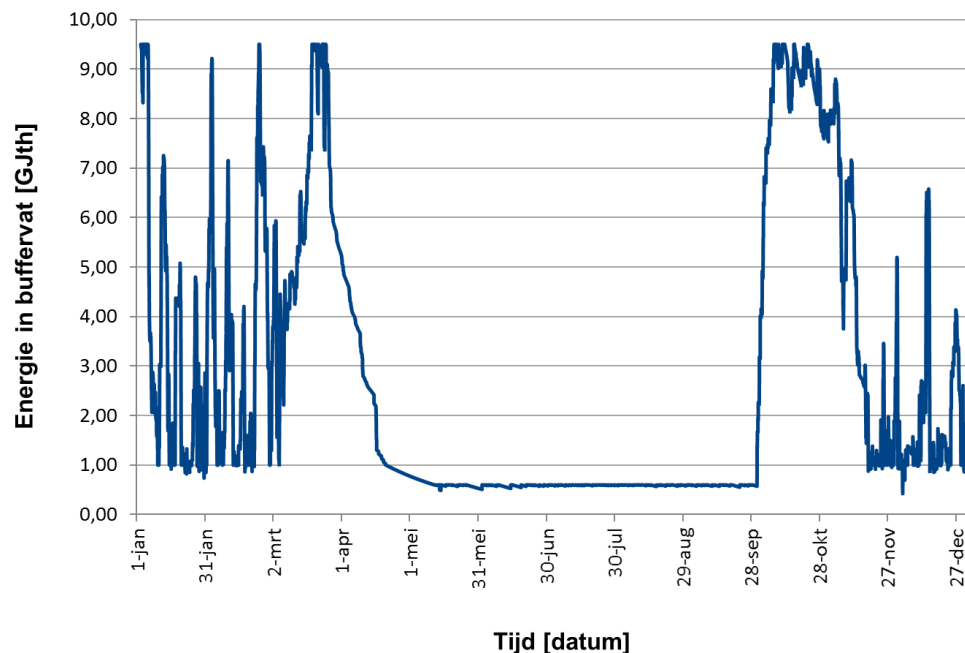


Figuur 3.10 | Verrekenprijzen elektriciteit TenneT van 2016 (bron: <http://www.tennet.org/>).

De opgeslagen energie in het buffervat gedurende het jaar is terug te zien in Figuur 3.11. Het is te zien dat de capaciteit van het buffervat gelijk is aan het concept “buffervat met pompelaar vervangt gasketel”. Dit komt omdat het systeem nog steeds gedimensioneerd is op de warmtepieken en het maximale vermogen van de pompelaar. Het is ook duidelijk te zien dat het gedrag van het systeem verschilt van het gedrag van het concept buffervat met pompelaar. Dit

verschil wordt veroorzaakt door het feit dat het buffervat bij het concept buffervat met pompelaar altijd wordt aangevuld als de warmtevraag lager is dan de som van het geïnstalleerd vermogen van de WKO + warmtepomp en de pompelaar. In het concept “buffervat met pompelaar met handel op de onbalansmarkt” wordt het buffervat alleen geladen als de verrekentprijs gunstig is of als het buffervat leeg is. Hierdoor is het buffervat minder vaak volledig gevuld. Dit komt doordat bij een warmtevraag groter dan de capaciteit van de WKO + warmtepomp, het buffervat de pieklevering verzorgt. Zo lang de verrekentprijs niet $< -20 \text{ €/MWh}$ is, zal het buffervat niet geladen worden.

In Tabel 3.6 zijn de energiestromen van het concept buffervat met pompelaar met handel op de onbalansmarkt vervangt gasketel en de eigenschappen van het buffervat gepresenteerd. Het is te zien dat de WKO + warmtepomp nu minder energie hoeft te leveren dan het concept met alleen het buffervat, dit komt omdat het thermisch verlies van het buffervat significant lager is doordat het buffervat minder vaak volledig gevuld is.



Figuur 3.11 | Opgeslagen energie in buffervat als functie van de tijd bij concept buffervat met pompelaar met handel op de onbalansmarkt vervangt gasketel. De horizontale as loopt van 1 januari t/m 31 december. In de zomer wordt het buffervat niet aangevuld vanuit de WKO.

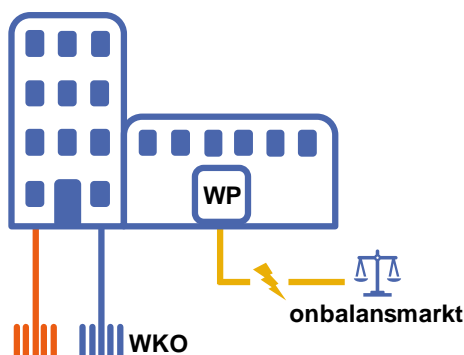
Tabel 3.6 | Warmtevraag referentiegebouw bij concept buffervat met pompelaar met handel op de onbalansmarkt vervangt gasketel en eigenschappen buffervat.

Energiestromen systeem	Waarde
WKO + warmtepomp direct	1.119 GJ _{th} /a
WKO + warmtepomp buffervat laden	6 GJ _{th} /a
Totaal WKO + warmtepomp	1.125 GJ_{th}/a
Buffervat uit	311 GJ _{th} /a
Thermisch verlies buffervat	16 GJ _{th} /a
Dompelaar	321 GJ _{th} /a
Totaal warmtevraag	1.430 GJ_{th}/a
Eigenschappen buffervat	
Volume	91 m ³
Duurzaamheid	
CO ₂ emissie (groen - grijs)	0 - 87.800 [kg/a]

Het is te zien dat de pompelaar nu een groter aandeel in de warmtelevering heeft, omdat het een deel van de energielevering nu verplaatst is van de WKO + warmtepomp met overcapaciteit naar de pompelaar op het moment van lage verrekennprijzen. De pompelaar neemt een groter deel van de warmtelevering voor zijn rekening (~20%).

3.2.5 Schakelen met de warmtepomp en handel op de onbalansmarkt vervangt de gasketel

In dit concept wordt de gasketel volledig vervangen door de warmtepomp. In dit systeem wordt de warmtepomp geregeld afhankelijk van de elektriciteit onbalansmarkt. De onbalansmarkt is in dit geval een extra onafhankelijke variabele. In dit specifieke concept wordt geen gebruik gemaakt van een opslagsysteem. Daarentegen wordt het gebouw gezien als een vorm van warmteopslag. Dit betekent dat de warmte niet per definitie wordt geleverd op het moment van de warmtevraag. De warmtepomp is namelijk aangesloten op het elektriciteitsnet en kan op- of afgetoerd worden als de prijs van elektriciteit respectievelijk laag of hoog is. Het schematische concept is weergegeven in Figuur 3.12. In dit concept zijn er geen investeringen voor een buffervat vereist.



Figuur 3.12 | Concept: schakelen met de warmtepomp en handel op de onbalansmarkt vervangt gasketel. WKO met warmtepomp aangesloten op elektriciteitsnet via onbalansmarkt.

Aannamen in dit concept zijn weergegeven in Tabel 3.7. Het geïnstalleerd vermogen van de warmtepomp is opgehoogd naar de maximale warmtevraag van het referentiegebouw. Daarnaast is een belangrijke vraag of de capaciteit van de WKO voldoende is. Er is voor nu vanuit gegaan dat de

zomersituatie leidend is voor het WKO ontwerp en dat er in de winter voldoende debiet over is om dit vermogen te kunnen leveren. Daarnaast zijn de volgende aannamen gemaakt:

- De verrekenprijzen van 2016 van TenneT zijn gebruikt (bron: <http://www.tennet.org/>). Het verloop is te zien in Figuur 3.10.
- Er kan maximaal 1x op- of afgetoerd worden in een uur, zodat de warmtevraag op een bepaald tijdstip niet te veel varieert.
- De warmtevraag wordt gecorrigeerd binnen de limieten van het systeem in de tijd na het op- en aftoeren. Er kan alleen opgetoerd worden als de warmtepomp op minder dan 80% van zijn maximale vermogen functioneert. En er kan alleen afgetoerd worden als de warmtepomp op meer dan 20% van zijn vermogen functioneert. Dit zijn tegelijk ook de limieten van het op- en aftoeren om te voorkomen dat de warmtepomp volledig opnieuw moet opstarten.
- De totale warmtelevering moet gelijk zijn aan de totale warmtevraag van het concept gebouw. Er kan dus niet ongelimiteerd opgetoerd en afgetoerd worden. Om dit te bewerkstelligen wordt de verrekenprijs van het optoeren geïtereerd naar een energiebalans. Dit is te zien in Tabel 3.7, er wordt opgetoerd bij een verrekenprijs onder -70 €/MWh.
- Het theoretisch maximum van de onbalansmarkt betekent een 100% juiste voorspelling.
- De verwachte inkomsten bij een voorspellend algoritme zijn 30% van het theoretisch maximum.

Tabel 3.7 | Aannamen concept schakelen met de warmtepomp en handel op de onbalansmarkt vervangt gasketel.

Aannamen	Waarde
Geïnstalleerd vermogen warmtepomp	440 kW
Warmtepomp capaciteit aftoeren	20%
Warmtepomp capaciteit optoeren	80%
Verrekenprijs aftoeren WKO + warmtepomp	> 100 €/MWh
Verrekenprijs optoeren WKO + warmtepomp	< -70 €/MWh

Tabel 3.8 | Warmtevraag referentiegebouw bij concept schakelen met de warmtepomp en handel op de onbalansmarkt vervangt gasketel.

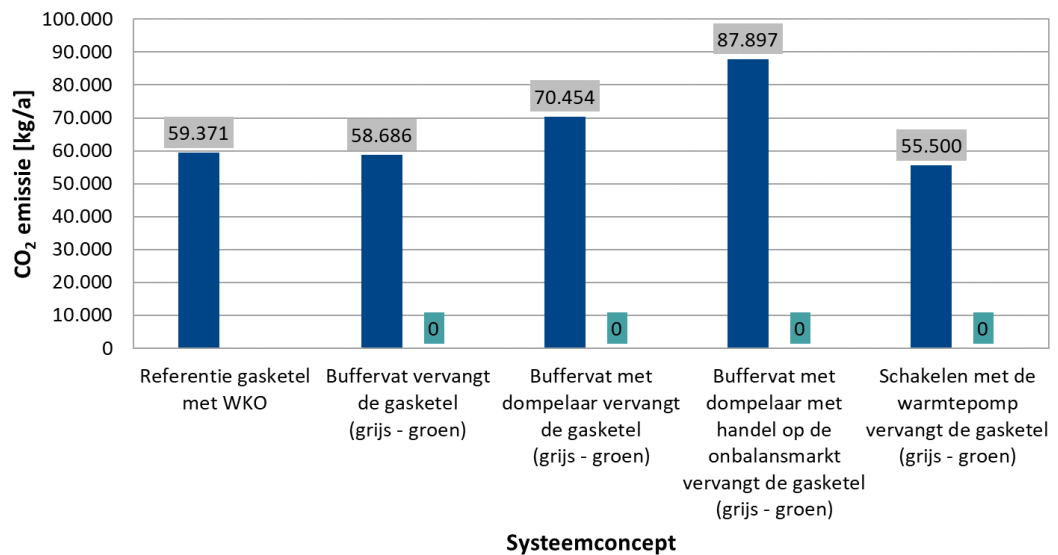
Energiestromen systeem	Waarde
WKO + warmtepomp regulier	1.320 GJ _{th} /a
WKO + warmtepomp optoeren	140 GJ _{th} /a
WKO + warmtepomp aftoeren	-30 GJ _{th} /a
Totaal warmtevraag	1.430 GJ_{th}/a
Duurzaamheid	
CO ₂ emissie (groen - grijs)	0 - 55.500 [kg/a]

3.3

DUURZAAMHEID

De CO₂ emissies van de verschillende concepten zijn in Figuur 3.13 samengevat. Het is te zien dat bij volledig grijs opgewekte stroom de aardgasloze systemen niet per definitie duurzamer zijn op het gebied van CO₂ emissie. De CO₂ emissie voor het systeemconcept “buffervat met dompelaar vervangt de gasketel” en het concept “buffervat met dompelaar met handel op de onbalansmarkt vervangt de gasketel” is hoger dan de CO₂ emissie van het referentiesysteem waarbij de gasketel de pieklevering verzorgt bij gebruik van grijze stroom. De oorzaak is enerzijds de extra energielevering om het thermisch verlies van het buffervat op te vangen. Anderzijds is de oorzaak de dompelaar die wordt ingezet om warmte te leveren. De dompelaar heeft in tegenstelling tot een warmtepomp een lager rendement.

In het geval de elektriciteitsopwekking volledig groen plaatsvindt, kan de CO₂ emissie met 100% vermindert worden tot 0 kg/a.



Figuur 3.13 | CO₂ emissies systeemconcepten voor een modelutiliteitsgebouw met een warmtevraag gegeven in paragraaf 3.1. Grijs staat voor grijze stroom, groen staat voor een duurzame opwekking (bijv. wind, water, zon).

3.4 POTENTIEEL VOOR NEDERLAND

In deze studie is één referentiesysteem geanalyseerd. De impact van één systeem zal beperkt zijn. In Nederland zijn momenteel echter 2.225 WKO systemen⁴. Wanneer meerdere systemen flexibel geschakeld worden, kan de impact aanzienlijk toenemen.

In 2016 heeft IF een analyse uitgevoerd naar de werking van 125 WKO-systemen⁵. Uit intern beschikbare data volgt dat circa 85% van alle geanalyseerde systemen worden toegepast in de utiliteit met een warmtepomp. Ingeschat wordt dat er in Nederland circa 1.900 WKO systemen met een warmtepomp zijn in de utiliteit. Een gemiddeld systeem heeft een ingeschat thermisch warmtepompvermogen van 1.000 kWt en een elektrisch vermogen van 250 kWe. In heel Nederland staat dus een potentieel van 475 MWe (1.900 * 250) aan schakelbaar elektrisch warmtepompvermogen.

Aanvullend zouden elektrische pompelaars kunnen worden geplaatst. In de doorgerekende referentiecasi is het elektrisch vermogen van de pompelaar 320 kWe (zie Tabel 3.5), bij een opgesteld thermisch warmtepompvermogen van 150 kWt (zie Figuur 3.2) met een COP van 4. Wanneer deze verhouding representatief wordt verondersteld, kan in Nederland nog eens 4.000 MWe aan schakelbaar elektrisch pompelaarvermogen worden gerealiseerd.

Het totale potentieel schakelvermogen in Nederland bedraagt in totaal ca 4.500 MWe.

⁴ klimaatmonitor.databank.nl/

⁵ Rapportage bodemenergiesystemen in Nederland, Analyse van 125 projecten, IF Technology, 18 mei 2016

4 Financiële analyse

In deze paragraaf worden de verschillende concepten, die in paragraaf 3.2 zijn beschreven, financieel geanalyseerd. Hierbij is de warmtevraag van het modelgebouw als uitgangspunt genomen. Voor alle concepten wordt de terugverdientijd berekend ten opzichte van het referentieconcept, WKO met warmtepomp en gasketel. Inflatie en indexeringen zijn niet meegenomen in deze studie. In de berekening van de terugverdientijd zijn de kasstromen niet netto contant gemaakt naar de huidige waarde.

De volgende kosten worden meegenomen in de berekening van de terugverdientijd:

- investering buffervat (CAPEX);
- investering gasketel (CAPEX);
- vaste en variabele kosten gas (OPEX);
- vaste en variabele kosten elektriciteit van warmtepomp(OPEX);
- opbrengsten handel op de onbalansmarkt (OPEX).

Eventuele subsidies zijn niet meegenomen in de financiële analyse.

4.1 WKO MET WARMTEPOMP EN GASKETEL

In Tabel 4.1 zijn de investeringskosten en exploitatiekosten van het referentieconcept WKO met warmtepomp en gasketel te zien. Hierbij zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- gasprijs (inclusief belastingen en exclusief BTW) is 0,50 €/m³;
- elektriciteitsprijs (inclusief belastingen en exclusief BTW) is 0,09 €/kWh;
- de technische levensduur van een gasketel is -15 jaar.

Tabel 4.1 | Investerings- en exploitatiekosten referentieconcept WKO met warmtepomp en gasketel.

Investeringskosten en exploitatiekosten	
CAPEX	
Gasketel [€]	28.000
OPEX	
Vaste en variabele kosten aardgas [€/a]	5.700
Vaste en variabele kosten elektriciteit [€/a]	7.100
Totaal [€/a]	12.800

4.2 BUFFERVAT VERVANGT DE GASKETEL

In Tabel 4.2 zijn de investeringskosten en exploitatiekosten van het concept buffervat vervangt de gasketel te zien. Hierbij zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- elektriciteitsprijs (inclusief belasting en exclusief BTW) is 0,09 €/kWh;
- de technische levensduur van een buffervat is -50 jaar.
- De kosten van een buffervat zijn gebaseerd op een relatie op basis van grootte⁶.

⁶ <http://www.solites.de/download/literatur/AB-SUN%20VI%20FKZ%200329607L.pdf>



De investeringskosten ten opzichte van het referentiesysteem stijgen met 144.000 €, terwijl de besparing in exploitatiekosten 2.800 €/a is. Dit betekent met de herinvesteringskosten meegenomen een terugverdientijd van 32 jaar.

Tabel 4.2 | Investerings- en exploitatiekosten concept buffervat vervangt gasketel.

Investeringskosten en exploitatiekosten	
CAPEX	
Buffervat [€]	172.000
OPEX	
Vaste en variabele kosten elektriciteit [€/a]	10.000

4.3 BUFFERVAT MET DOMPELAAR VERVANGT DE GASKETEL

In Tabel 4.3 zijn de investeringskosten en exploitatiekosten van het concept “buffervat met dompelaar vervangt de gasketel” te zien. Hierbij zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- elektriciteitsprijs (inclusief belastingen en exclusief BTW) 0,09 €/kWh.
- de technische levensduur van een buffervat is ~50 jaar.

De investeringskosten ten opzichte van het referentiesysteem stijgen met 53.500 €, terwijl de besparing in exploitatiekosten 800 €/a is. Dit komt vooral doordat de dompelaar vaker wordt ingezet om warmte te leveren in plaats van de WKO en warmtepomp. De terugverdientijd met de herinvesteringskosten meegenomen is ~31 jaar.

Tabel 4.3 | Investerings- en exploitatiekosten concept buffervat met dompelaar vervangt gasketel.

Investeringskosten en exploitatiekosten	
CAPEX	
Buffervat [€]	75.000
Dompelaar [€]	6.500
OPEX	
Vaste en variabele kosten elektriciteit [€/a]	12.000

4.4 BUFFERVAT MET DOMPELAAR MET HANDEL OP DE ONBALANSMARKT VERVANGT DE GASKETEL

In Tabel 4.4 zijn de investeringskosten en exploitatiekosten van het concept “buffervat met dompelaar met handel op de onbalansmarkt vervangt de gasketel” te zien. Hierbij zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- elektriciteitsprijs is afhankelijk van de elektriciteitsprijs op de onbalansmarkt via de verrekenprijzen van TenneT in 2016 als de verrekenprijs < -20 €/MWh en > 100 €/MWh (APX prijs). De APX prijs wordt verhoogd met de energiebelasting en opslag duurzame energie. Als de verrekenprijs tussen -20 en 100 €/kWh is, wordt de reguliere elektriciteitsprijs van 90 €/MWh (inclusief energiebelasting en opslag duurzame energie) gerekend. Dit is vergelijkbaar met de elektriciteitsprijs van de andere concepten.
- de technische levensduur van een buffervat is ~50 jaar.

De investeringskosten ten opzichte van het referentiesysteem stijgen met 53.500 €, terwijl de besparing in exploitatiekosten 4.600 €/a is. Dit betekent met de herinvesteringskosten meegenomen een terugverdientijd van ~11 jaar.

Tabel 4.4 | Investerings- en exploitatiekosten concept buffervat met dompelaar met handel op de onbalansmarkt vervangt gasketel.

Investeringskosten en exploitatiekosten	
CAPEX	
Buffervat [€]	75.000
Dompelaar [€]	6.500
OPEX	
Vaste en variabele kosten elektriciteit [€/a]	8.200

4.5 SCHAKELEN MET DE WARMTEPOMP EN HANDEL OP DE ONBALANSMARKT VERVANGT DE GASKETEL

In Tabel 4.5 zijn de investeringskosten en exploitatiekosten van het concept schakelen met de warmtepomp en handel op de onbalansmarkt vervangt de gasketel te zien. Hierbij zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- elektriciteitsprijs is afhankelijk van de elektriciteitsprijs op de onbalansmarkt via de verrekenprijzen van TenneT in 2016 als de verrekenprijs < -63 €/MWh en > 100 €/MWh (APX prijs). De APX prijs wordt verhoogd met de energiebelasting en opslag duurzame energie. Als de verrekenprijs tussen -63 en 100 €/kWh is, wordt de reguliere elektriciteitsprijs van 90 €/MWh gerekend (inclusief energiebelasting en opslag duurzame energie). Dit is vergelijkbaar met de elektriciteitsprijs van de andere concepten.
- de technische levensduur van een warmtepomp is ~15 jaar.

De investeringskosten ten opzichte van het referentiesysteem stijgen met 36.000 €, terwijl de besparing in exploitatiekosten 4.300 €/a is. Dit betekent met de herinvesteringskosten meegenomen een terugverdientijd van ~7 jaar. Zoals eerder geschetst in paragraaf 3.2.5, wordt ervan uitgegaan dat de WKO niet hoeft te worden aangepast.

Tabel 4.5 | Investerings- en exploitatiekosten concept buffervat met dompelaar met handel op de onbalansmarkt vervangt gasketel.

Investeringskosten en exploitatiekosten	
CAPEX	
Investering warmtepomp [€]	64.000
OPEX	
Vaste en variabele kosten elektriciteit [€/a]	8.500

4.6 TERUGVERDIENTIJD SYSTEEMCONCEPTEN

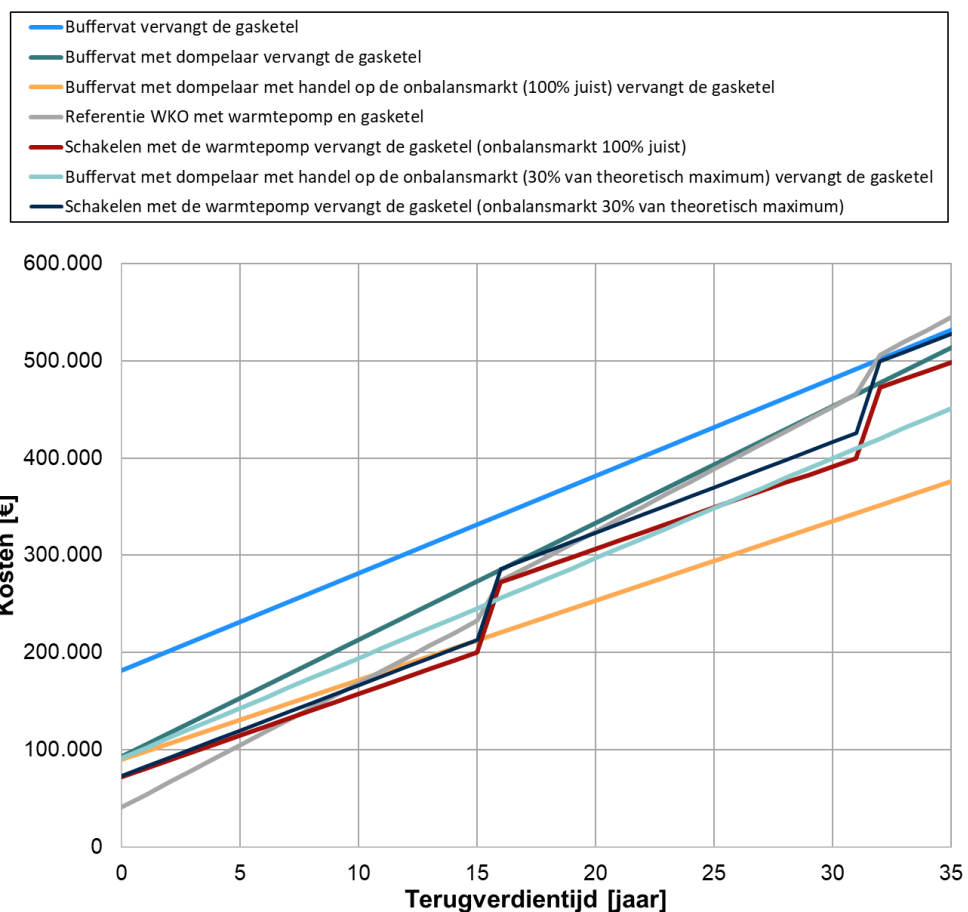
In Tabel 4.6 zijn de terugverdientijden ten opzichte van het referentiesysteem te zien. In Figuur 4.1 zijn de kosten van de systeemconcepten die zijn beschreven in paragraaf 3.2 als functie van de tijd gepresenteerd. Hieruit volgt de terugverdientijd voor elk systeemconcept ten opzichte van het referentieconcept (grijze lijn). Uit Figuur 4.1 zijn ook de terugverdientijden van de verschillende systeemconcepten ten opzichte van elkaar te herleiden.

Voor de systeemconcepten met handel op de onbalansmarkt zijn twee terugverdientijden gepresenteerd. Dit is een terugverdientijd met een 100% juiste voorspelling, oftewel het theoretische maximum. Daarnaast is de terugverdientijd waarbij 30% van de inkomsten van het

theoretisch maximum berekend. Dit zijn de verwachte inkomsten met een simpel algoritme. Het wordt verwacht dat het speelveld hiertussen ligt. Het is te zien dat de terugverdientijden toenemen, omdat er minder inkomsten gegenereerd of kosten vermeden worden.

Tabel 4.6 | Terugverdientijden systeemconcepten ten opzichte van het referentieconcept WKO en warmtepomp met gasketel

Terugverdientijd systeemconcepten	
Buffervat vervangt de gasketel [jaar]	32
Buffervat met dompelaar vervangt de gasketel [jaar]	31
Buffervat met dompelaar met handel op de onbalansmarkt vervangt de gasketel bij 100% juiste voorspelling (theoretisch maximum) [jaar]	11
Buffervat met dompelaar met handel op de onbalansmarkt vervangt de gasketel bij 30% opbrengst van theoretisch maximum [jaar]	16
Schakelen met de warmtepomp vervangt de gasketel bij 100% juiste voorspelling (theoretisch maximum) [jaar]	7
Buffervat met dompelaar met handel op de onbalansmarkt vervangt de gasketel bij 30% opbrengst van theoretisch maximum [jaar]	9



Figuur 4.1 | Terugverdientijden systeemconcepten: investeringskosten + exploitatiekosten als functie van tijd.



5 Case: FED gebouw HAN

In fase 1 is een werkelijke eindgebruiker in de utiliteitsbouw met een potentieel interessant profiel betrokken bij het onderzoek. Gedurende het onderzoek werd data verzameld van de warmtevraag van het faculteit educatie (FED) gebouw van de HAN in Nijmegen. Het onderwijsgebouw van de HAN wordt al volledig aardgasloos verwarmd door middel van een WKO systeem met een warmtepomp. In dit specifieke geval is het dus niet interessant om de systeemconcepten met hetzelfde referentieconcept WKO met warmtepomp en gasketel als in paragraaf 3.2.1 te vergelijken. Daarom wordt in het voorbeeld project vooral naar de kosten en opbrengsten van handelen op de onbalansmarkt gekeken. De referentie is in dit geval WKO met warmtepomp. Deze wordt vervolgens vergeleken met het volgende concept:

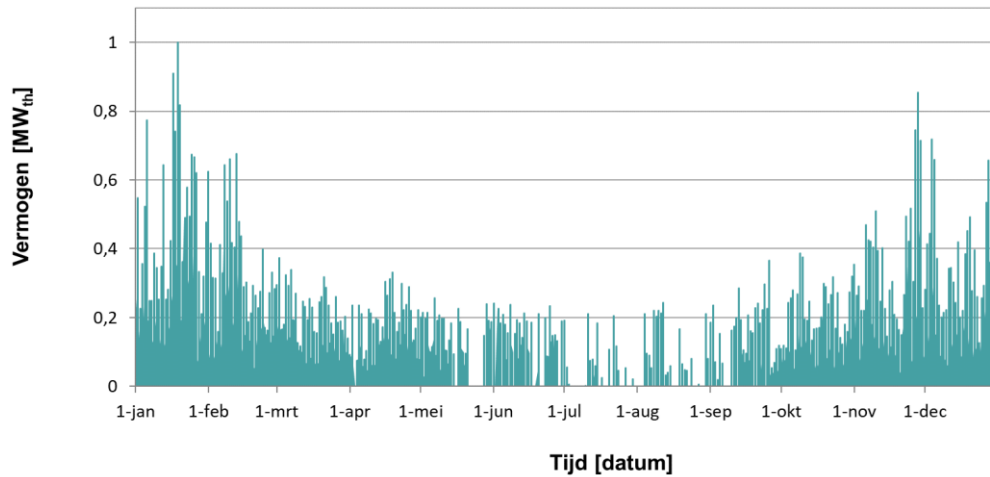
- toevoeging van buffervat met dompelaar met handel op de onbalansmarkt;

5.1 SYSTEEMCONCEPT

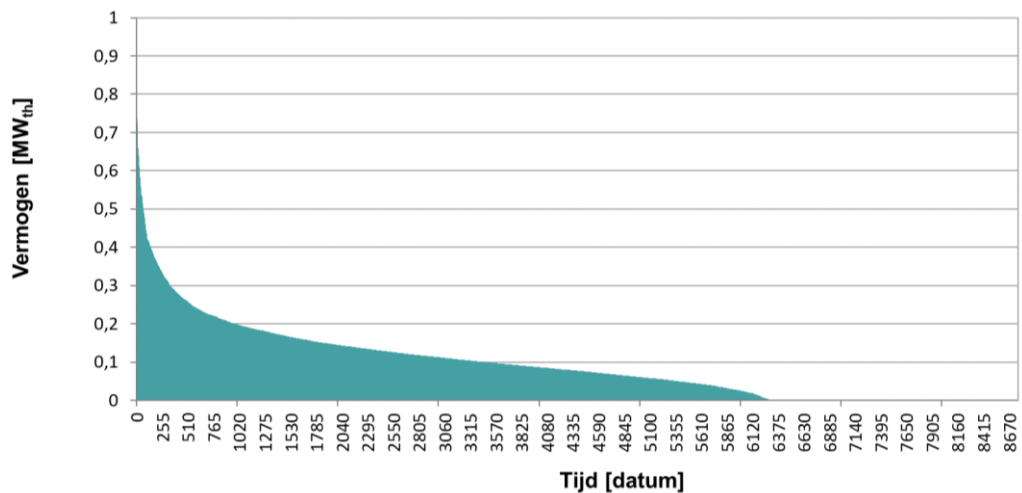
De warmtevraag van het FED gebouw is gemonitord van februari 2017 t/m september 2017. Om een compleet beeld van de warmtevraag over het gehele jaar te krijgen is de warmtevraag per uur geëxtrapoleerd van januari 2017 naar december 2017. Het viel op dat de warmtepiek in de week vooral op maandag en vrijdag lag. In het weekend werd aanzienlijk minder energie verbruikt. De warmtepiek op de dag ligt tussen 06:00 uur in de ochtend en 10:00 uur in de ochtend. Verder was er een lichte piek te zien aan het eind van de dag. Om een reëel warmteprofiel te berekenen is in de extrapolatie van de warmtevraag daarom rekening gehouden met de volgende variabelen:

- dag van de week;
- uur van de dag;
- buitenluchttemperatuur van september 2016 t/m september 2017;
 - deze periode is gekozen omdat de data van de warmtelevering dan gekoppeld kan worden aan de werkelijke buitenluchttemperatuur in die periode.

In Figuur 5.1 is de jaarverdeling van de warmtevraag van het FED gebouw van de HAN te zien. De pieken aan het begin van het jaar vallen samen met koude buitenluchttemperaturen en ochtenden tijdens werkdagen. In Figuur 5.2 is de bijbehorende jaarbelastingduurcurve te zien.



Figuur 5.1 | Jaarverdeling van de warmtevraag van het FED gebouw van de HAN in Nijmegen. De horizontale as loopt van 1 januari t/m 31 december. De warmtevraag tussen uur 1.000 en uur 6.500 is de werkelijke warmtevraag van het gebouw. De warmtevraag in de resterende periode is geëxtrapolerd.



Figuur 5.2 | Jaarbelastingduurcurve van de warmtevraag van het FED gebouw van de HAN in Nijmegen.

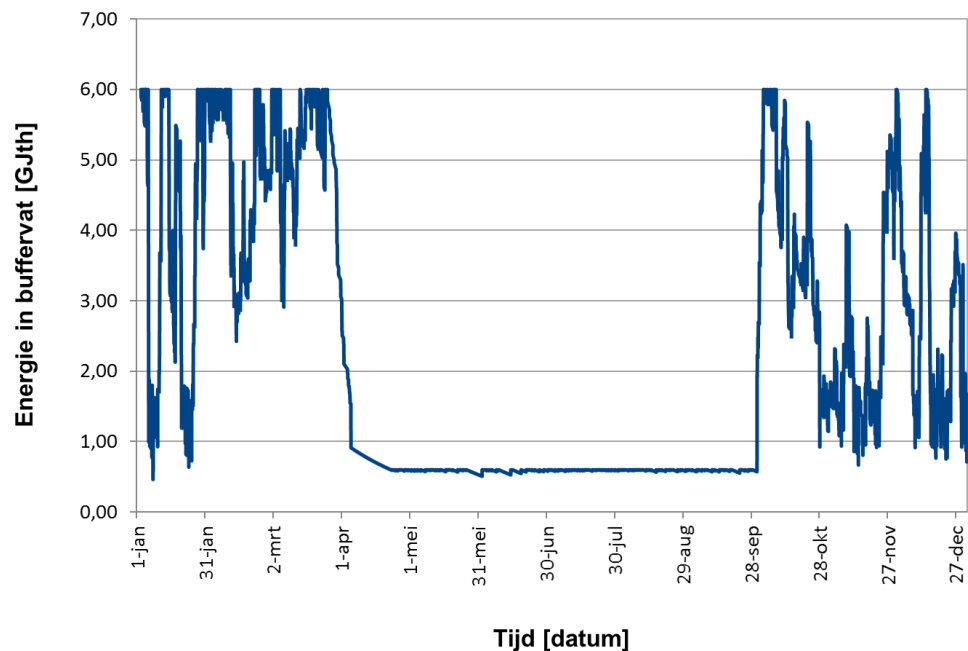
In Tabel 5.2 zijn de energiestromen van het FED gebouw te zien voor het concept met WKO en warmtepomp, en het concept “toevoeging buffervat met dompelaar met handel op de onbalansmarkt”, respectievelijk. Het buffervat en de energie opgeslagen in het buffervat als functie van de tijd behorende bij het tweede concept is te zien in Figuur 5.3.

Tabel 5.1 | Warmtevraag FED gebouw HAN Nijmegen met WKO met warmtepomp (referentie).

Energiestromen systeem	Waarde
WKO + warmtepomp	2.951 GJ _{th} /a

Tabel 5.2 | Warmtevraag FED gebouw HAN Nijmegen bij concept toevoeging buffervat met dompelaar met handel op de onbalansmarkt.

Energiestromen systeem	Waarde
WKO + warmtepomp direct	2.766 GJ _{th} /a
WKO + warmtepomp buffervat laden	44 GJ _{th} /a
Totaal WKO + warmtepomp	2.810 GJ_{th}/a
Buffervat uit	185 GJ _{th} /a
Thermisch verlies buffervat	37 GJ _{th} /a
Dompelaar	178 GJ _{th} /a
Totaal warmtevraag	2.951 GJ_{th}/a
Eigenschappen buffervat	
Volume	57 m ³



Figuur 5.3 | Opgeslagen energie in buffervat als functie van de tijd bij concept toevoeging buffervat met dompelaar met handel op de onbalansmarkt voor FED gebouw HAN Nijmegen. In de zomer wordt het buffervat niet aangevuld vanuit de WKO.

De volgende aannamen en de aannamen in Tabel 5.3 gelden in de modelberekeningen voor het FED gebouw:

- elektriciteitsprijs is afhankelijk van de elektriciteitsprijs op de onbalansmarkt via de verrekenprijzen van TenneT in 2016 als de verrekenprijs < -20 €/MWh en > 100 €/MWh (APX prijs). De APX prijs wordt verhoogd met de energiebelasting en opslag duurzame energie.. Als de verrekenprijs tussen -20 en 100 €/kWh is, wordt de reguliere elektriciteitsprijs van 90 €/MWh gerekend (inclusief energiebelasting en opslag duurzame energie). Dit is vergelijkbaar met de elektriciteitsprijs van de andere concepten. De pompelaar kan alleen aangeschakeld kan worden als het buffervat niet aan zijn volledige capaciteit zit;
- het systeem kan alleen volledig uitgeschakeld worden als het buffervat voldoende capaciteit heeft om aan de warmtevraag te voldoen. Het kan dus voorkomen dat het systeem ingeschakeld is, terwijl de verrekenprijs > 100 €/MWh is.
- Het theoretisch maximum van de onbalansmarkt betekent een 100% juiste voorspelling.
- De verwachte inkomsten bij een voorspellend algoritme zijn 30% van het theoretisch maximum.

Tabel 5.3 | Aannamen concept toevoeging buffervat met pompelaar met handel op de onbalansmarkt voor FED gebouw HAN Nijmegen.

Aannamen	Waarde
Buffervat	
ΔT buffervat	25 °C
Thermische verlies buffervat	0,1 %/h
Minimale capaciteit buffervat	0,6 GJ _{th}
Technische levensduur buffervat	50 jaar
Dompelaar	
Geïnstalleerd vermogen pompelaar	400 kW
Beschikbaar vermogen pompelaar tussen 07:00 - 23:00	50%
Beschikbaar vermogen pompelaar tussen 23:00 - 07:00	80%
Warmtepomp	
Gemiddelde COP	4
Elektriciteit en onbalansmarkt	
Reguliere elektriciteitsprijs (inclusief belastingen en exclusief BTW)	0,09 €/kWh
Verrekenprijs uitschakelen WKO + warmtepomp en pompelaar	> 100 €/MWh
Verrekenprijs aanschakelen pompelaar	< -20 €/MWh

5.2 FINANCIËLE ANALYSE

De investeringskosten ten opzichte van het referentiesysteem (WKO en warmtepomp) stijgen met 63.500 €, terwijl de besparing in exploitatiekosten bij een 100% juist voorspelling van de onbalansmarkt 3.000 €/a is. Dit betekent met de herinvesteringskosten meegenomen een terugverdientijd van ~21 jaar.

In het geval dat 30% van de inkomsten van het theoretisch maximum worden beschouwd is de besparing in exploitatiekosten ~800 €/a. Dit levert een terugverdientijd van ~79 jaar op.

Tabel 5.4 | Investerings- en exploitatiekosten concept WKO + warmtepomp en concept toevoeging buffervat met pomp met handel op de onbalansmarkt voor FED gebouw HAN Nijmegen.

Investeringskosten en exploitatiekosten	
CAPEX	
Concept toevoeging buffervat met pomp met handel op de onbalansmarkt	
Buffervat [€]	57.000
Pomp [€]	6.500
OPEX	
Concept WKO en warmtepomp (referentie)	
Vaste en variabele kosten elektriciteit [€/a]	18.400
Concept toevoeging buffervat met pomp met handel op de onbalansmarkt	
Vaste en variabele kosten elektriciteit [€/a]	15.400

6 Resultaten workshop

In dit hoofdstuk zijn de resultaten van de workshop beschreven. Het doel van de workshop was om bewustwording te creëren bij een breder publiek van de mogelijkheden van vraagsturing middels warmte en om terugkoppeling te vergaren vanuit de markt. Hierbij is een inzicht gegeven van de huidige elektriciteitsmarkt en op welke manier dit gekoppeld zou kunnen worden aan WKO. Verder zijn de systeemconcepten en resultaten uit hoofdstuk 3 en 4 van het onderzoek besproken. Aan de hand van deze concepten is er een discussie gevoerd door de verschillende voor- en nadelen te benoemen.



6.1 DEELNEMERS

In Tabel 6.1 zijn de deelnemers van de workshop weergegeven. Er is gestreefd om een mix van gebouwbeheerders/energie coördinatoren, leveranciers van warmtepompen en adviesbureaus in de bodemenergie en de energiesector bij elkaar te brengen.

Tabel 6.1 | Deelnemers workshop: WKO #vangaslos.

Organisatie	Omschrijving
IF Technology	Adviesbureau
DNV GL	Adviesbureau
HAN Nijmegen	Hogeschool/gebouwbeheerder/energie coördinator
Universiteit Utrecht	Universiteit/gebouwbeheerder/energie coördinator
Rijksuniversiteit Groningen	Universiteit/gebouwbeheerder/energie coördinator
KWA	Adviesbureau
Carrier	Warmtepomp leverancier
Trane	Warmtepomp leverancier



6.2 VOOR- EN NADELEN VRAAGSTURING MIDDELS WARMTE IN UTILITEITSGEBOUWEN

De voor- en nadelen die tijdens de workshop zijn benoemd zijn hieronder weergegeven. Daarnaast zijn de voor- en nadelen aangevuld met input en feedback van de deelnemers. Aanvullend zijn specifieke voor- en nadelen die de deelnemers benoemden toegevoegd.

Voordelen

- verminderen CO₂ uitstoot;
 - De WTW (well-to-wheel) CO₂ emissie bij de verbranding van aardgas is ~1,89 kg/Nm³. De WTW CO₂ emissie van grijze stroom is ~0,526 kg/kWh en van groene stroom ~0 kg/kWh. Dit betekent dat bij elke vermeden Nm³ aardgas die wordt gebruikt voor warmtelevering de CO₂ emissie met 40% - 100% kan worden verminderd in het voordeel van een WKO met een warmtepomp (COP = 4). In het geval er een buffervat wordt toegevoegd, zal het elektriciteitsverbruik omhoog gaan omdat er thermische verliezen moeten worden gecompenseerd. Aanvullend als er een pompelaar wordt gebruikt voor warmtelevering zal dit voordeel minder worden als er uitgegaan wordt van grijze stroom. In het slechtste geval is de CO₂ uitstoot zelfs hoger dan met een gasketel. In het geval van groene stroom kan ervan uitgegaan worden dat de CO₂ reductie 100% is.
- volledige onafhankelijkheid van aardgas;
 - Er wordt geen weerstand verwacht van het gebruik van een pompelaar, hoewel daarbij elektrische energie direct wordt omgezet in warmte. Dit komt vooral omdat het financieel aantrekkelijk is, niet storingsgevoelig en kan bijdragen aan een reductie van de onbalans.
- bijdragen aan de balans op de elektriciteitsmarkt;
 - De onbalans op de elektriciteitsmarkt verdubbelt bij toename van duurzame energie. Door opslag van warmte kunnen vraag en aanbod grotendeels worden losgekoppeld. Dit heeft een positief effect op de onbalans (wordt kleiner).
- extra inkomsten;
- efficiënter gebruik van de ondergrond doordat WKO systemen meer vollasturen gaan draaien;
- risico verlagend en flexibeler in de warmtelevering;
 - Het onderzoek is kostprijsgericht uitgevoerd. Voor sommige gebouwen is een zo hoog leveringszekerheid van warmte van belang. Dit kan evenwel belangrijk zijn als de kosten-baten analyse van het systeem en zou daarom ook meegenomen worden in deze analyse. In dat opzicht kan opslag van warmte het systeem flexibeler maken. Schakelen met de warmtepomp is in die zin minder interessant, omdat hier de warmtelevering verdeeld wordt over een periode wanneer de onbalansmarkt gunstig is. Hierdoor zal de warmte niet altijd exact geleverd worden op het moment dat het nodig is.
- groter bereik warmtelevering;
 - opslag en schakelen met de warmtepomp kan er voor zorgen dat er meer warmte beschikbaar is dan de vraag. Dit maakt het mogelijk om meerdere gebouwen aan te sluiten op de WKO, zonder daarbij de WKO aan te hoeven passen.

Nadelen

- meer warmteverlies;
 - Warmteverlies speelt een belangrijke rol in het energievraagstuk. De hoeveelheid geproduceerde warmte benodigd om opslag in de vorm van een buffervat toe te kunnen passen is groter dan bij directe energielevering vanwege het thermisch verlies van het buffervat.
- ruimtelijke inpassing buffer;
 - In het geval van het referentiegebouw zijn buffers nodig met een volume van 100 - 300 m³ in het beste en slechte geval. Dit zijn aanzienlijke buffers met hoge investeringskosten, maar daarnaast moet er ook ruimte zijn in de omgeving van het gebouw om een buffervat met een dergelijk volume te plaatsen.
- complexere systemen;
 - De systeem- en regeltechniek moet aangepast worden. De complexere systemen brengen investeringskosten met zich mee en vormen daarnaast een risico bij handelen op de onbalansmarkt.
- financieel risico handel op de onbalansmarkt;
 - De voorspelbaarheid van de onbalansmarkt is niet doorzichtig. Goede afspraken en kennis op het gebied van de onbalansmarkt zijn noodzakelijk.
- investeren in kennis;
 - De vraag is of de markt zit te wachten op dergelijke constructies en systemen.
- traagheid in systemen;
 - De onbalansmarkt werkt met verrekenprijzen die elke 15 minuten veranderen. In het gehele systeem zit een traagheid die moeilijk is te voorspellen in dit stadium. Als het systeem traag reageert kan dit veel effect hebben op de opbrengsten en kosten van het handelen op de onbalansmarkt. De WKO kan niet van het ene op het andere moment uitgeschakeld worden. Dit geldt ook voor de warmtepomp, die afgetoerd of opgetoerd moet worden.
- uit handen geven warmtelevering;
 - Het kan een weerstand zijn voor gebouwbeheerder om minder invloed op de energiestromen te hebben.

7 Conclusies en aanbevelingen

7.1 CONCLUSIES

In de huidige studie is onderzoek gedaan naar vraagsturing middels warmte en koude in utiliteitsgebouwen. Er zijn verschillende systeemconcepten ontwikkeld en gemodelleerd om de energetische en financiële haalbaarheid te toetsen. Een belangrijk criterium waaraan de systemen moesten voldoen was dat de warmtevraag niet of nauwelijks beïnvloed mocht worden. Globaal zijn er 2 concepten onderzocht:

- 1 een systeem met een opslag (3 varianten met een buffervat);
- 2 een systeem waarbij de warmtepomp op- en afschakelt (opslag vindt plaats in de thermische massa van het gebouw).

Het eerste systeemconcept bevat 3 varianten, waarbij het buffervat een centrale rol speelt als opslagmethode. Er kan worden geconcludeerd dat het concept met een buffervat energetisch haalbaar is. De belangrijkste knelpunten zijn de ruimtelijke inpassing van het buffervat en de investeringskosten van een buffervat ten opzichte van het referentiesysteem (WKO met warmtepomp en gasketel). In de utiliteitsbouw kan de warmtevraag variëren, afhankelijk van het bruto-vloeroppervlak en de functie. In de huidige studie is een referentiegebouw als uitgangspunt genomen met een warmtevraag van $\sim 1500 \text{ GJ}_{\text{th}}/\text{a}$. Dit zorgt ervoor dat het benodigde volume van het buffervat significant kan zijn. In het systeemconcept waar een buffervat de gasketel vervangt, en dus de piekvoorziening levert, is een buffervat benodigd van $\sim 350 \text{ m}^3$. Niet alle gebouwen hebben de mogelijkheid om een buffervat met die afmetingen te plaatsen, bovendien zijn de investeringskosten relatief hoog ten opzichte van het referentiesysteem (gasketel voor piekvoorziening). De terugverdientijd voor het modelgebouw is ~ 32 jaar. Daarom zijn er 2 aanvullingen op dit concept toegepast. De eerste aanvulling is het plaatsen van een dompelaar (weerstandsverwarming) in het buffervat. Deze dompelaar zorgt ervoor dat de extreme warmtevraag pieken opgevangen kunnen worden, waardoor het buffervat significant kleiner wordt ($\sim 90 \text{ m}^3$) en de investeringskosten dalen. De terugverdientijd voor hetzelfde modelgebouw kan teruggebracht worden naar ~ 31 jaar. De tweede aanvulling is met het handelen op de onbalansmarkt een extra verdienmodel toegevoegd. Bij deze variant kan warmte worden geleverd met de dompelaar aan het buffervat als de elektriciteitsverrekenprijs gunstig is, en kan het systeem worden uitgeschakeld als de verrekenprijs ongunstig is. De terugverdientijd bij de te verwachten inkomsten (30% juiste voorspelling van verrekenprijs op onbalansmarkt) is 16 jaar. Nadelen van dit systeem zijn onder andere de ruimtelijke inpassing van het buffervat, warmteverlies uit het buffervat en het financiële risico bij handel op de onbalansmarkt.

Bij het laatste systeemconcept is het buffervat weggelaten en wordt warmte geleverd door te schakelen met de warmtepomp. De terugverdientijd bij de te verwachten inkomsten (30% juiste voorspelling van verrekenprijs op onbalansmarkt) is 9 jaar. Belangrijke voordelen van de concepten zijn onder andere de vermindering van CO_2 uitstoot, volledige onafhankelijkheid van aardgas en de bijdrage aan de balans op de onbalansmarkt. Het nadeel van dit systeem is ook het risico van handel op de onbalansmarkt, daarnaast moet het gebouw aangepast zijn op een flexibele warmtelevering. Daarnaast kan het tot comfortklachten leiden, omdat de warmtelevering niet exact plaatsvindt op het moment van de vraag. Een voorbeeld van een aanpassing is betonkernactivering, waar de betonmassa als buffer fungeert.



Tijdens het onderzoek is actuele data verzameld van het FED gebouw van de HAN in Nijmegen. Het concept met een buffervat met pompelaar en handel op de onbalansmarkt is vergeleken met de huidige situatie, waarbij het gebouw door een WKO met warmtepomp van warmte wordt voorzien. Hieruit blijkt dat de terugverdientijd rond de 78 jaar ligt, in het geval dat de verrekenprijzen op 30% van de potentiële inkomsten liggen. Hieruit kan worden geconcludeerd dat het huidige systeem niet interessant lijkt om handel op de onbalansmarkt te integreren in het systeem. Dit kan natuurlijk veranderen als er subsidies beschikbaar zijn om gebouwen zonder een gasaansluiting te stimuleren.

7.2 AANBEVELINGEN

7.2.1 Beschrijving vervolgproject

Een grote uitdaging van de haalbaarheid van vraagsturing middels warmte en koude met handel op de onbalansmarkt is de organisatie van alle betrokken actoren en het bepalen van de juridische knelpunten. Voordat een dergelijk vorm van warmtelevering in de markt gezet kan worden, zullen de mogelijkheden en knelpunten uitgezocht moeten worden om de haalbaarheid te toetsen van het op deze manier handelen op de onbalansmarkt. Financieel zijn er op dit moment (nog) subsidies nodig om de terugverdientijden interessant te maken voor marktpartijen. In een vervolgproject zou moeten worden gekeken welke subsidievormen het meest geschikt zijn voor deze markt.

Voor handel in elektriciteit en acteren op de onbalans zal gekeken moeten worden waar de verantwoordelijkheid moet komen te liggen. Enerzijds is het mogelijk de gebouweigenaar elektriciteit te laten inkopen als programmaverantwoordelijke partij. Dit vergt veel kennis van de gebouweigenaar en grote organisatorische veranderingen, maar de eigenaar houdt volledig controle over het systeem. Anderzijds kan een aggregator of programmaverantwoordelijke partij mogelijkheid krijgen om tegen vergoeding met bepaalde parameters, zoals de pompelaar, te spelen in het systeem. De mate van invloed zal de vergoeding bepalen. Dit maakt dat een gebouweigenaar weinig hoeft te doen maar wel enige controle van het systeem moet afgeven. Door toenemende vraag naar flexibiliteit zullen dit soort initiatieven gaan toenemen.

In de huidige studie is een financiële analyse op hoofdlijnen uitgevoerd. Een uitgebreide business case waarin een complete financiële analyse wordt gemaakt van de kosten en de baten van de investeringen, waarbij rekening wordt gehouden met de risico's. Dit zou in combinatie met een pilot project kunnen worden uitgevoerd.

Het vervolgtraject kan de daadwerkelijke inpassing van een dergelijk concept bij een utiliteitsgebouw zijn. Bij een positief resultaat zullen wij actief ons netwerk benaderen voor een pilot project. Het doel van dit eerste project is om kennis en ervaring op te doen. Het uiteindelijke doel is om nieuwe diensten te leveren aan zowel de ontwerpkant (hoe maak je dit soort flexibele systemen?), als de exploitatiekant (hoe haal je het meeste uit een flexibel systeem?).

Op het moment zijn er nog geen concrete klanten in beeld. Potentieel interessante klanten zijn de grotere utiliteitsgebouwen en bedrijventerreinen/campussen. Dit komt omdat de kosten van deze toepassing redelijk constant blijven doordat deze vooral zitten in adviesdiensten, software, contractonderhandelingen, die niet mee schalen met de grootte van de installatie. De opbrengsten zijn echter afhankelijk van het elektrisch vermogen dat flexibel te regelen is en de mate van

flexibiliteit daarin. Dit betekent dat gebruikers met grote vermogens meer baat hebben bij dit concept dan gebruikers met kleine vermogens.

7.2.2 Kennisoverdracht

Als blijkt dat er inderdaad potentie zit in de flexibilisering van warmte en koude productie in de utiliteitsbouw dan moet dit actief onder de aandacht gebracht worden. Gedeeltelijk heeft dit op kleine schaal al plaatsgevonden in de laatste fase van deze haalbaarheidsstudie tijdens de workshop, maar hier kan achteraf ook mee worden doorgegaan. Daarnaast is er een pitch gehouden bij de Werkconferentie Topsector Energie 2017. Een ander concreet kanaal om dit concept in de markt te zetten is via realisatie projecten. Afhankelijk van de uitkomsten van het onderzoek kan het flexibiliseren van de gebouwinstallatie onder de aandacht gebracht worden bij nieuwbouwprojecten. Als vroeg met de opdrachtgever om tafel wordt gezeten is het mogelijk om al in een vroeg stadium na te denken over eventuele aanpassingen.



8 Afkortingen

CAPEX	capital expenditures
ESCo	Energy Service Company
OPEX	operating expenditures
WKO	warmte-koude opslag
WP	warmtepomp
WTW	well to wheel

IF Technology **Creating energy**



Velperweg 37
6824 BE Arnhem
Postbus 605
6800 AP Arnhem

T 026 35 35 555
E info@iftechnology.nl
I www.iftechnology.nl

NL60 RABO 0383 9420 47
KvK Arnhem 09065422
BTW nr. NL801045599B01

IF Technology **Creating energy**