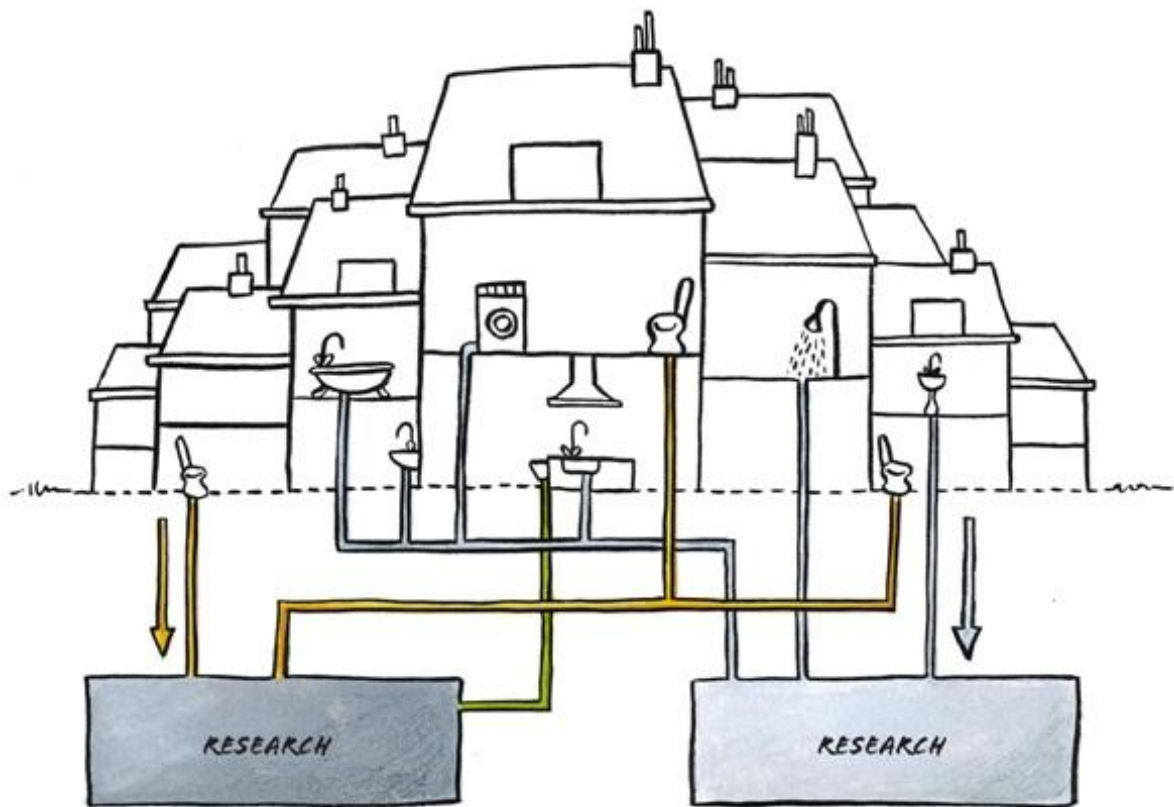


Terugwinnen van energie uit afvalwater binnen een appartementencomplex

Kansen of theoretische mogelijkheden



Figuur voorkant: Schematische schets met mogelijkheden voor het terugwinnen van energie uit afvalwater binnen een gebouw (WGS, z.j.)

Terugwinnen van energie uit afvalwater binnen een appartementencomplex

Kansen of theoretische mogelijkheden

Datum

4 juni 2013

Student

Martine Burgstaller

Studentnummer: 1559014

Meloenstraat 48

3552 VC Utrecht

msburgstaller@gmail.com

06-52684187

Afstudeerrichting

Milieukunde dual

Begeleiders Hogeschool Utrecht

Eerste begeleider: Roger Klaver

Tweede begeleider: Ron Heusdens

Afstudeerbedrijf

Tauw

Australiëlaan 5

3526 AB Utrecht

www.tauw.nl

“Someday everything will make perfect sense. So, for now, laugh at the confusion, smile through the tears and keep reminding yourself that everything happens for a reason”

Aleph – Paulo Coelho

Samenvatting

Voor veel organisaties en voor de overheid is duurzaamheid, het beperken van de CO₂-uitstoot, energiebesparing en dus kostenbesparing een speerpunt. Het terugwinnen en hergebruiken van thermische energie uit het afvalwater heeft de potentie om een bijdrage te leveren aan het beperken van het energieverbruik en dus de CO₂ emissie.

Het doel van het onderzoek is inzicht te krijgen wanneer en in welke situatie het haalbaar is om energie uit het afvalwater terug te winnen binnen een appartementencomplex. De onderzoeksvraag is:

Wanneer wordt het toepassen van een warmteterugwinsysteem voor afvalwater binnen een appartementencomplex economisch en energie technisch haalbaar?

Om de onderzoeksvraag te kunnen beantwoorden is een model gebruikt dat is ontwikkeld door Tauw voor de stad Gent. In het model is onderscheid gemaakt in locaties waar de thermische energie teruggewonnen kan worden. Dit is op een centrale plaats in het appartementencomplex waar al het afvalwater wordt verzameld. De andere mogelijkheid is op woningniveau. Voor het terugwinnen van de thermische energie op een centraal niveau zijn drie verschillende systemen bestudeerd. Deze systemen zijn van de bedrijven FEKA en KASAG. Op het niveau van een woning wordt gekeken naar een douchewarmtewisselaar.

Uit de resultaten van het model blijkt dat op het niveau van een appartementencomplex de investeringskosten hoog zijn. Op basis van de resultaten kan gesteld worden dat met de huidige energieprijzen en de gekozen grootte van de appartementencomplex het niet economisch rendabel is om een centraal systeem voor het terugwinnen van energie uit afvalwater aan te schaffen. Voor het FEKA-systeem kan een reductie van de CO₂ emissie van circa 45% gerealiseerd worden voor het warmwatergebruik.

Op het niveau van een woning met een gemiddeld aantal personen (2,36 per woning) is de terugverdientijd voor een douchewarmtewisselaar circa 13 jaar. De investeringskosten voor de aanschaf van een douchewarmtewisselaar zijn gering. Daar staat tegenover dat de besparing in gasverbruik en CO₂ emissie lager is.

Het terugwinnen van energie uit het afvalwater is, zeker in de toekomst met stijgende energieprijzen, een goede mogelijkheid om bij te dragen aan de duurzaamheidsdoelstelling. Het voordeel van het terugwinnen van energie binnen een appartementencomplex is dat de energie direct weer benut kan worden op de locatie zelf. Het installeren van een douchewarmtewisselaar voor een woning is relatief goedkoop en gemakkelijk. Voor het terugwinnen van energie op een centrale plaats binnen een appartementencomplex moeten rekening gehouden worden met hoge investeringskosten en met voldoende beschikbaar afvalwater. Bij deze afweging kan de grotere reductie in CO₂ emissie positief meewegen.

Voor een specifieke locatie zal aanvullend een haalbaarheidsstudie uitgevoerd moeten worden om de mogelijkheden voor die locatie te bestuderen. Aanbevolen wordt om aanvullende onderzoek uit te voeren naar de werkelijke rendementen en besparingen bij een locatie waar een systeem voor het terugwinnen van energie uit afvalwater geïnstalleerd is.

Inhoudsopgave

1.	Inleiding.....	13
1.1.	Aanleiding	13
1.2.	Probleemstelling en doelstelling	14
1.3.	Onderzoeksvragen.....	14
1.4.	Afbakening	15
1.5.	Korte beschrijving onderzoeksmethode.....	15
1.6.	Leeswijzer	16
2.	Theoretisch kader.....	17
2.1.	Theorie warmteterugwinsysteem.....	17
2.1.1	Warmtetransport.....	17
2.1.2	Warmtewisselaar	17
2.1.3	Warmtepomp.....	18
2.2	Energiekosten en CO ₂ uitstoot	19
2.3	Systemen om energie terug te winnen uit afvalwater.....	20
2.3.1	FEKA-systeem	20
2.3.2	KASAG _{TANK}	21
2.3.3	KASAG _{DOUBLE}	23
2.3.4	Douchewarmtewisselaar.....	23
2.4	Modelbeschrijving	25
2.4.1	Niveau van een appartementencomplex.....	26
2.4.2	Niveau van een woning	30
3	Onderzoeksmethode	33
3.1	Modelberekeningen	33
3.1.1	Invoergegevens model	33
3.1.2	Modelresultaten.....	34
3.1.3	Vergelijking van de systemen	34
3.2	Gevoeligheidsanalyse	34
4	Onderzoeksresultaten	37
4.1	Modelresultaten	37
4.1.1	Invoergegevens model	37
4.1.2	Resultaten van het model.....	39
4.1.3	Vergelijking van de systemen	42
4.2	Gevoeligheidsanalyse	44
5	Conclusie en aanbevelingen	47

5.1 Conclusie	47
5.2 Aanbevelingen	48
Literatuur	51

Bijlage I	Modelresultaten FEKA-systeem
Bijlage II	Modelresultaten KASAG _{TANK} -systeem
Bijlage III	Modelresultaten KASAG _{DOUBLE} -systeem
Bijlage IV	Modelresultaten douchewarmtewisselaar
Bijlage V	Vragenlijst leveranciers

Afkortingen en begrippen

Afkorting	
MUSIC	Mitigation in Urban areas; Solutions for Innovative Cities
CO ₂	Kooldioxide
PJ	PetaJoule; 10 ¹⁵ Joule
CV	Centrale Verwarming
RWZI	Rioolwaterzuiveringsinstallatie
P	Energie
Q	Debiet
C _w	Soortelijke warmte van water
P _w	Dichtheid van water
ΔT	Temperatuurverschil
COP	Coëfficiënt Of Performance
z.j.	Zonder jaartal
kWh	Kilo Watt per uur
NCW	Netto Contante Waarde

1. Inleiding

1.1. Aanleiding

Voor veel organisaties en voor de overheid is duurzaamheid, het beperken van de CO₂-uitstoot, energiebesparing en dus kostenbesparing een speerpunt. Zo ook voor de stad Gent in België. De stad Gent is aangesloten bij het internationaal MUSIC-project: Mitigation in Urban areas; Solutions for Innovative Cities. Het doel van dit project is het reduceren van de CO₂ uitstoot met 50% in de samenwerkende steden Aberdeen, Montreuil, Gent, Ludwigsburg en Rotterdam in 2030 (MUSIC, 2013). De stad Gent wil in het kader van dit project bekijken wat de mogelijkheden zijn om energie uit het afvalwater te gaan benutten om zo het energieverbruik te beperken.

Energie in de waterketen komt in drie vormen voor; thermische energie, chemische energie en operationele energie. De thermische energie is de energie in de vorm van warmte die door huishoudens en bedrijven aan het afvalwater wordt toegevoegd. De chemische energie is de energie die opgeslagen is in de chemische verbindingen. De operationele energie is de energie die gebuikt wordt voor het functioneren van de waterketen. Dit betreft voornamelijk elektrische energie, aardgas en diesel voor transport. De thermische energie vormt het grootste deel van de totale energie in de waterketen. Door huishoudens en bedrijven wordt 65 PetaJoule (PJ ofwel 10¹⁵ Joule) per jaar aan thermische energie aan het afvalwater toegevoegd. Driekwart (49 PJ/jaar) is afkomstig van huishoudens. De temperatuur van het afvalwater van huishoudens en bedrijven op het lozingspunt wordt geschat op 25 tot 30 °C (Blom et al., 2010).

Uit het rapport van Kluck et al. (2011) blijkt dat het aardgas gebruik voor huishoudens daalt door dat er minder gas verbruikt wordt voor ruimteverwarming. De reden hiervoor is dat de CV ketels een beter rendement hebben en de huizen beter geïsoleerd zijn. Daar tegenover staat dat het gasverbruik voor huishoudelijk warmwater is toegenomen. Het aandeel van huishoudelijk warmwater is toegenomen tot circa 30% van het totale aardgasverbruik per huishouden. Hierdoor in de warmtelozing via het afvalwater steeds relevanter geworden.

Het terugwinnen van warmte uit het afvalwater wordt in het algemeen op drie verschillende plaatsen mogelijk geacht: binnen een woning, in het riool of in het effluent van een rioolwaterzuiveringsinstallatie (RWZI). Het is van belang dat de warmte teruggewonnen wordt in de nabijheid van de plaats van de afzet van deze energie (Kluck et al., 2011). Hoe langer het transport van het warme afvalwater is hoe meer afkoeling plaats zal vinden. De ideale plaats voor warmteterugwinning is op locaties waar een aanbod is van thermische energie en direct een vraag is naar energie. Een van de manieren om deze warmte terug te winnen is via een warmtewisselaar gecombineerd met een warmtepomp binnen het gebouw zelf. Het voordeel hiervan is dat de teruggewonnen energie direct weer benut kan worden in het gebouw. Het terugwinnen van thermische energie, zeker voor locaties waar veel (warm)water wordt gebruikt, kan mogelijk bijdragen aan het bereiken van de duurzaamheidsdoelstellingen van een stad als Gent.

De mogelijkheden voor energiebesparingen kunnen beoordeeld worden aan de hand van een voorkeursvolgorde die is weergegeven in figuur 1.1 De Trias Energetica is een driestappen strategie om energie zuinig en duurzaam te ontwerpen



Figuur 1.1 Trias Energetica (Agentschap NL, 2012)

De Trias Energetica geeft drie stappen weer:

1. Beperk het energievraag
2. Gebruik duurzame energie
3. Gebruik de fossiele brandstoffen zo optimaal mogelijk

Het terugwinnen en hergebruiken van de thermische energie uit het afvalwater heeft de potentie om een bijdrage te leveren aan het beperken van het energievraag wat 1^{ste} voorkeursstap is in de Trias Energetica. Daarnaast is er potentie om aanzienlijke kostenbesparing op te leveren.

1.2. Probleemstelling en doelstelling

De thermische energie uit het afvalwater heeft een potentie om benut te worden. De technieken om deze warmte terug te winnen zijn beschikbaar. Een probleem vormt vaak de afzetmogelijkheden van de teruggewonnen warmte. Hoe langer het transport van het warme afvalwater is hoe meer afkoeling plaats vindt. De ideale plaats voor warmteterugwinning is op die locaties waar een aanbod is van thermische energie en direct een vraag naar energie zodat transport van de warmte geen factor is. Een appartementcomplex zou een mogelijke locatie zijn om de thermische energie terug te winnen. Maar is het haalbaar de warmte hier terug te winnen en op welke manier? Zover bekend is het toepassen van een warmteterugwinsysteem voor een appartementencomplex nog niet in België of in Nederland toegepast.

Het doel van dit onderzoek is om informatie te verkrijgen over de mogelijkheden om energie uit afvalwater terug te winnen binnen een appartementencomplex en inzicht te krijgen in de verschillende beschikbare systemen hiervoor. Het uiteindelijke doel is om globaal inzicht te krijgen wanneer en in welke situatie het haalbaar is om energie uit het afvalwater terug te winnen binnen een appartementencomplex.

1.3. Onderzoeksvragen

Op basis van de probleemstelling is een centrale onderzoeksvraag voor dit afstudeeronderzoek opgesteld.

Wanneer wordt het toepassen van een warmteterugwinsysteem voor afvalwater binnen een appartementencomplex economisch en energie technisch haalbaar?

De probleemstelling en dus de centrale onderzoeksvraag is niet in één keer te beantwoorden daarom zijn verschillende deelvragen opgesteld. Deze vragen zijn hieronder weergegeven.

- Hoe werkt een warmtewisselaar en een warmtepomp?
- Welke systemen zijn beschikbaar voor het terugwinnen van energie uit afvalwater en hoe werken deze systemen?
- Hoe werkt het model om de energiebesparingen, terugverdientijden en reductie in CO₂ emissies te berekenen voor de verschillende systemen?
- Welke gegevens dienen als invoergegevens van het model?
- Wat zijn de resultaten (output) van het model (energiebesparingen, terugverdientijden en reductie in CO₂ emissies) van de verschillende systemen?
- Wat is de gevoeligheid van de invoergegevens en wat levert dat voor spreiding op in de resultaten?
- Welk systeem levert de meeste besparingen op?

1.4. Afbakening

Het terugwinnen van warmte uit het afvalwater wordt in het algemeen op drie verschillende plaatsen mogelijk geacht: binnen een woning, in het riool of in het effluent van een RWZI. In dit onderzoek wordt alleen gekeken naar de mogelijkheden van het terugwinnen van thermische energie uit afvalwater binnen een appartementencomplex. Mogelijke andere systemen voor het terugwinnen van energie uit afvalwater zoals via het rioolstelsel of bij de RWZI worden niet bestudeerd. Het terugwinnen van energie voor andere gebouwen of bedrijven wordt niet meegenomen in deze opdracht.

Dit onderzoek richt zich alleen op systemen voor het terugwinnen van energie uit afvalwater binnen appartementencomplex. Met het systeem wordt in dit onderzoek bedoeld een systeem met een warmtewisselaar en een warmtepomp. Voor dit onderzoek worden maximaal vier systemen beschreven. Voor het bepalen van de milieurendement wat wordt uitgedrukt als CO₂ emissie reductie wordt alleen het gebruik van elektriciteit door de systemen bekeken. De CO₂ emissie bij de fabricage van de systemen wordt niet meegenomen.

1.5. Korte beschrijving onderzoeksmethode

Om de onderzoeksvraag en deelvragen te kunnen beantwoorden wordt een model gebruikt dat is ontwikkeld door Tauw naar aanleiding van de vraag van de stad Gent. In het model wordt onderscheid gemaakt tussen twee locaties waar de thermische energie teruggewonnen kan worden binnen een appartementencomplex. Dit is op een centrale plaats in het appartementencomplex waar al het afvalwater wordt verzameld. De andere mogelijkheid is een decentrale locatie op woningniveau. Voor het terugwinnen van de thermische energie op een centraal niveau zijn drie verschillende systemen bestudeerd. Deze systemen zijn van de bedrijven FEKA en KASAG. Op het niveau van een woning wordt gekeken naar een douchewarmtewisselaar.

De invoergegevens voor het model zijn verzameld voor de vier verschillende systemen en de resultaten zijn berekend. Op de resultaten van het model is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd. Op basis van de resultaten van het model worden de verschillende systemen met elkaar vergeleken door te kijken naar de energiebesparingen, de terugverdientijden en de reductie in CO₂ emissie.

1.6. Leeswijzer

In hoofdstuk 2 wordt het theoretische kader beschreven. Hierin is antwoordt gegeven op een aantal deelvragen die betrekking hebben op het literatuuronderzoek. In het hoofdstuk wordt kort ingegaan op de basistheorie van warmtetransport en de werking van een warmtewisselaar en een warmtepomp (paragraaf 2.1). De kosten van energie wordt in paragraaf 2.2 beschreven. Daarnaast worden de verschillende systemen voor het terugwinnen van energie besproken (paragraaf 2.3). Als laatste onderdeel in het hoofdstuk wordt het toegepaste model beschreven (paragraaf 2.4).

Vervolgens is in hoofdstuk 3 de onderzoeksmethode beschreven. In paragraaf 3.1 is beschreven hoe en welke invoergegevens voor het model zijn verzameld en op welke manier de verschillende systemen worden vergeleken. Daarna wordt de aanpak van de gevoeligheidsanalyse besproken (paragraaf 3.2).

De resultaten van het onderzoek zijn beschreven in hoofdstuk 4. Als eerste worden de resultaten van het model van de verschillende systemen besproken (paragraaf 4.1). De resultaten van de gevoeligheidsanalyse worden weergegeven in paragraaf 4.2.

In hoofdstuk 5 worden de conclusies van het onderzoek besproken (paragraaf 5.1) gevolgd door de aanbevelingen (paragraaf 5.2).

2. Theoretisch kader

In dit hoofdstuk wordt het theoretisch kader beschreven. Als eerste wordt kort ingegaan op de basistheorie van warmtetransport en de werking van een warmtewisselaar en een warmtepomp (paragraaf 2.1). Daarnaast worden de kosten voor energie besproken (paragraaf 2.2) en de verschillende systemen voor het terugwinnen van energie (paragraaf 2.3). Als laatste onderdeel in het hoofdstuk wordt het toegepaste model beschreven (paragraaf 2.4).

2.1. Theorie warmteterugwinsysteem

Voor het terugwinnen van warmte uit het afvalwater wordt gebruik gemaakt van een warmtewisselaar. De wisselaar zorgt voor de overdracht van de thermische energie van het afvalwater naar het op te warmen medium. Een warmtepomp brengt de temperatuur van het water naar het gewenste temperatuurniveau.

Voor dit onderzoek wordt gekeken naar het terugwinnen van energie uit afvalwater. Hieronder wordt kort beschreven wat afvalwater is. Onder afvalwater van een appartementencomplex wordt zowel grijs- als zwartwater verstaan. Grijs water is huishoudelijk afvalwater afkomstig van de wasmachine, de vaatwasmachine, de douche, het bad of uit de keuken. Dit water is licht verontreinigd met zeepresten. Zwart water is huishoudelijk afvalwater afkomstig van het toilet. Dit afvalwater is verontreinigd met fecaliën.

2.1.1 Warmtetransport

Warmtetransport vindt plaats als gevolg van temperatuurverschillen. Het transport van warmte verloopt van hoge naar lage temperatuur. Warmteoverdracht kan plaatsvinden door geleiding, convectorie en straling. De beschikbare thermische energie in afvalwater kan berekend worden aan de hand van onderstaande formule.

$$P = Q * C_w * \rho_w * \Delta T \quad (1)$$

Waarbij:

P = Energie (kW)

Q = Debiet (m³/s)

C_w = Soortelijke warmte water = 4,18 kJ/kg/ K

ρ_w = Dichtheid van water = 1.000 kg/m³

ΔT = Temperatuurverschil tussen bron (afvalwater) en doel (K)

2.1.2 Warmtewisselaar

In het boek van Feijen (1987) wordt beschreven dat elk apparaat dat gebruikt wordt om warmte uit te wisselen tussen twee media (gas, vloeibaar of vast) een warmtewisselaar genoemd kan worden. Dit onderzoek richt zich op het terugwinnen van energie uit afvalwater en daarom wordt er alleen gekeken naar een vloeistof – vloeistofwarmtewisselaar. In een vloeistofwarmtewisselaar wordt de warmte voornamelijk via geleiding en convectorie overgedragen.

De meest eenvoudige warmtewisselaar bestaat uit twee concentrische pijpen waarbij het ene medium door de binnenpijp stroomt en het andere medium door het ringvormige kanaal tussen binnen- en buitenpijp. Via de binnenpijp zal dan warmte tussen de beide media

worden uitgewisseld. De vloeistof in beide pijpen kan in dezelfde richting stromen of in tegengestelde richting.

Na een periode van gebruik van een warmtewisselaar kan de oppervlakte van de wisselaar vervuild raken door vuil uit het systeem (biofilm) of corrosie van het materiaal. Hierdoor ontstaat een extra weerstand voor de warmtestroming en uitwisseling (Holman, 2002). Het rendement van het systeem neemt hierdoor af

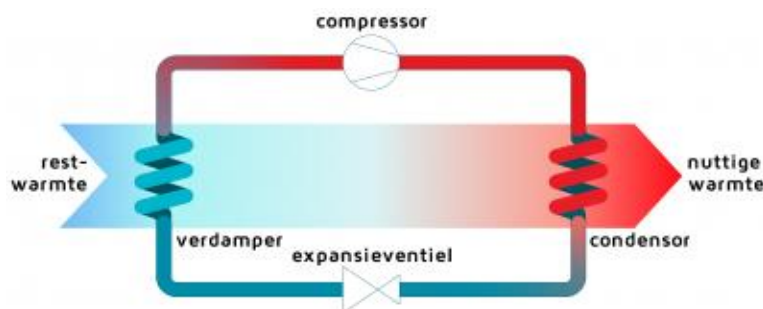
2.1.3 Warmtepomp

Boot et al. (1998) omschrijft een warmtepomp als een apparaat dat in staat is om thermische energie (warmte) van een relatief laag temperatuurniveau 'op te pompen' naar een hoger temperatuurniveau. De organisatie voor duurzame Energie Vlaanderen (2009) heeft in een rapport de werking van de warmtepomp uitvoerig beschreven. Onderstaande omschrijving van de werking van een warmtepomp is een samenvatting van deze omschrijving.

Een warmtepomp onttrekt thermische energie aan een warmtebron. De thermische energie wordt op een hogere temperatuur gebracht en aan een warmteafgiftesysteem afgegeven. Het warmtetransport vindt plaats via een warmtedragendevloeistof ook wel transportmedium genoemd. De werking van een warmtepomp is gebaseerd op drie fysische verschijnselen:

- Bij verdamping wordt warmte opgenomen en bij condensatie komt warmte vrij.
- Het kookpunt van een vloeistof is afhankelijk van de druk van de vloeistof. Het kookpunt stijgt bij een stijgende druk van de vloeistof.
- De temperatuur van een gas stijgt onder een toenemende druk.

In een warmtepomp vinden de volgende processen plaats. Het transportmedium verdampt bij een lage temperatuur door de warmtebron. De compressor verhoogt de druk van de ontstane damp zodat de damp bij een hogere temperatuur kan condenseren. De condensor zorgt ervoor dat de damp gaat condenseren en de vrijgekomen warmte wordt afgegeven aan het warmteafgiftesysteem. Door de druk te verlagen via het expansieventiel kan het proces opnieuw plaatsvinden. Voor de werking van de compressiepomp is toegevoegde energie nodig. Deze energie kan van mechanische of thermische aard zijn, maar de hoeveelheid aandrijfenergie is kleiner dan de totale warmte die geleverd wordt. In figuur 2.1 is een schematische werking van een warmtepomp weergegeven.



Figuur 2.1 Werkingsprincipe van een warmtepomp (Industrial heat pumps, 2013)

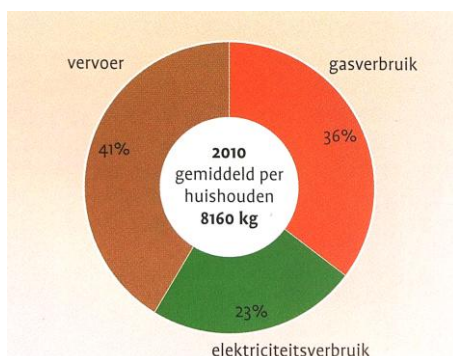
De Coëfficiënt Of Performance (COP) van een mechanisch aangedreven warmtepomp wordt gedefinieerd als de verhouding tussen de geleverde warmte en de daar voor benodigde energie. De COP, stel 4.0, geeft dus de verhouding weer tussen benodigde energie voor de warmtepomp en de geleverde warmte. 1 kWh gebruikte elektriciteit levert, in dit voorbeeld, 4.0 kWh warmte op. Het rendement van de warmtepomp is afhankelijk van de te realiseren verhoging van de temperatuur. Hoe hoger de gewenste temperatuur, hoe lager het rendement van de warmtepomp. Voor het realiseren van een hogere temperatuur is een hogere druk nodig die geleverd wordt door de compressor.

2.2 Energiekosten en CO₂ uitstoot

De verwachting is dat de kosten voor gas en elektriciteit in de komende jaren zullen gaan stijgen. In het rapport van Blom et al. (2010) wordt gesteld dat bij de beoordeling van de mogelijkheden voor het terugwinnen van energie uit het afvalwater het relevant is om de ontwikkelingen op de energiemarkt meer te nemen. Het toepassen van energiebesparende maatregelen vereist namelijk een investering. Deze investering kan over een periode van meerdere jaren terugverdiend worden. Hierbij is de ontwikkeling van de energieprijzen van invloed.

De prijs van aardgas is gevoelig voor prijsfluctuaties omdat de prijs gekoppeld is aan de aardolieprijs en hierdoor gevoelig voor internationale ontwikkelingen (bijvoorbeeld spanningen in het Midden-Oosten of Rusland). De elektriciteitsprijs is in verhouding met de aardgas prijs stabiel. De verwachting is dat prijs van de elektriciteit geleidelijke zal stijgen door het schaarser worden van grondstoffen en stijgende kosten voor compensatie van CO₂ uitstoot. (Blom et al., 2010). In het rapport wordt aangegeven dat het moeilijk is om een goede voorspelling te doen over de energieprijzen in de toekomst.

De huidige prijzen van elektriciteit in België bedragen circa 11 eurocent per kWh en 65 eurocent per m³ gas. De prijzen zijn afkomstig van de energierekening van een collega in België. Voor Nederland ligt het prijspeil van 2012/2013 op 22 eurocent per kWh voor stroom en 65 eurocent per m³ voor aardgas (Milieucentrale, z.j.). De prijzen voor Nederland zijn ook nagegaan aan de hand van mijn eigen energierekening. Bij de bovengenoemde energieprijzen zijn ook de transportkosten, vastrecht, dag/nachttaarif en belastingen meegenomen. Een gemiddeld huishouden in Nederland stoot circa 8,5 ton CO₂ per jaar uit (Milieucentrale, z.j.). Dit getal is gebaseerd op vervoer, gebruik van gas en elektriciteit. De verdeling van deze uitstoot is weergegeven in figuur 2.2 voor een huishouden in 2010.



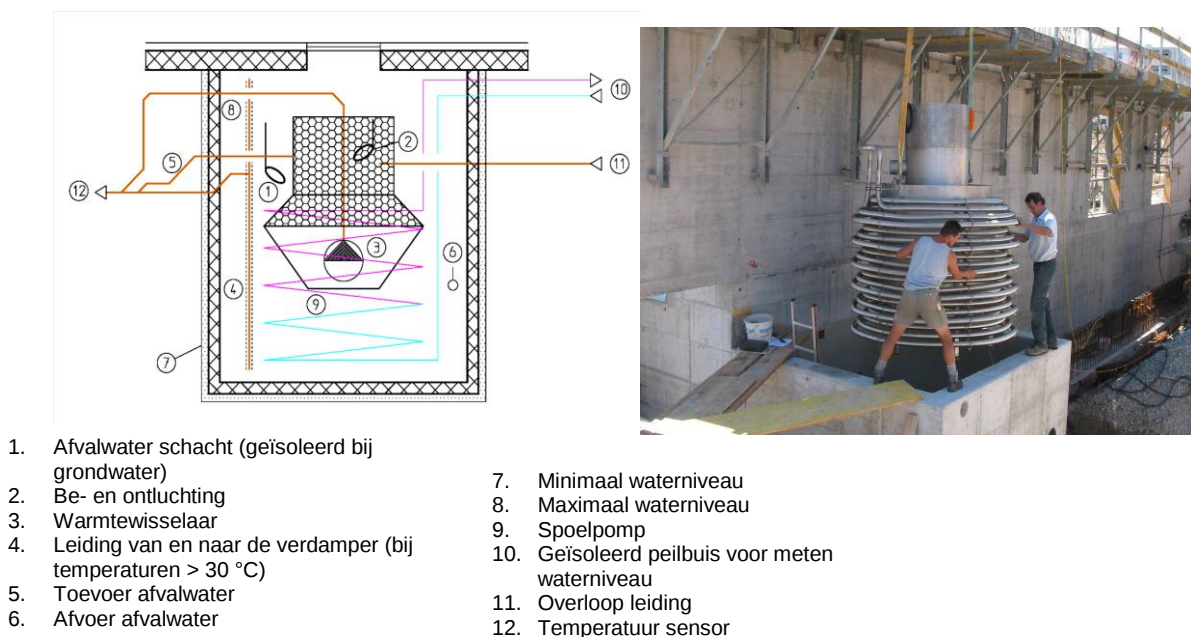
Figuur 2.2 Gemiddelde CO₂-emissie per huishouden (Bosatlas, 2012)

2.3 Systemen om energie terug te winnen uit afvalwater

Voor het terugwinnen van energie zijn er verschillende systemen beschikbaar. Op internet is gezocht naar systemen om op het niveau van een appartementencomplex (centraal) en op woningniveau warmte terug te winnen. In de eerste drie paragrafen worden systemen besproken voor het terugwinnen van energie op een centrale locatie in een appartementencomplex. Dit is een systeem van het bedrijf FEKA (2.3.1) en twee systemen van het bedrijf KASAG (2.3.2 en 2.3.3). In de laatste paragraaf wordt de douchewarmtewisselaar op woningniveau besproken (2.3.4). De informatie is verzameld op basis van de gegevens op de websites van de leveranciers. Daarnaast zijn aanvullende vragen over het FEKA-systeem en de systemen van KASAG gesteld via vragenlijst die per e-mail is verstuurd. De reacties van de leveranciers zijn uitgewerkt en opgenomen in bijlage 5.

2.3.1 FEKA-systeem

Het FEKA-systeem bestaat uit een warmtewisselaar en een warmtepomp die specifiek zijn ontwikkeld voor het hergebruiken van energie uit het afvalwater. Het systeem is in Zwitserland ontwikkeld waar de eerste installatie in 1979 is geplaatst. Thermische energie uit het afvalwater wordt door middel van een warmtewisselaar op een centrale plek in het gebouw teruggewonnen en door middel van een warmtepomp op de gewenste eindtemperatuur gebracht (FEKA, 2009). In figuur 2.3 laat een schematische weergave en een foto van de warmtewisselaar zien.



Figuur 2.3 Warmtewisselaar van FEKA (FEKA, 2009)

Het huishoudelijke afvalwater, zowel grijs- als zwartwater, wordt via een filter in een betonnen schacht op een centrale locatie in het appartementencomplex verzameld. In het filter wordt het vuil verzameld. Het filter wordt dagelijkse door middel van een spoelpomp gereinigd en het vuil wordt geloosd op het riool. In de schacht is een spiraalvormige warmtewisselaar (figuur 2.3) aanwezig. De teruggewonnen warmte wordt door middel van een warmtepomp op de gewenste temperatuur gebracht. Het eventueel extra benodigde koude water wordt direct opgewarmd door de warmtepomp tot de gewenste temperatuur. Als

het afvalwater warmer is dan 30 °C dan moet bij de warmtepomp een verdampingstemperatuurbegrenzer worden ingebouwd.

Door de combinatie van een warmtepomp en het gebruik van energie uit het collectieve afvalwater kan in de vraag naar warmwater worden voorzien. Het gegenereerde warmte kan voor huishoudelijk warmwater of voor verwarming gebruikt worden. Het is mogelijk naast het gebruik van afvalwater ook koelwater en/of lucht te gebruiken als bron om warmwater te realiseren (FEKA, 2009). Het systeem van FEKA is toepasbaar in situaties waar voldoende warm afvalwater beschikbaar is. Een aantal potentiële locaties zijn:

- Appartementen
- Zwembaden, wellnesscentra (spa), hotels, bejaardentehuizen, ziekenhuizen enzovoorts
- Gaarkeuken en wasserijen
- Douche- en wc-voorzieningen zoals bij sportcentra
- Rioleringen
- Industrieel afvalwater (koeling voor processen en reiniging)

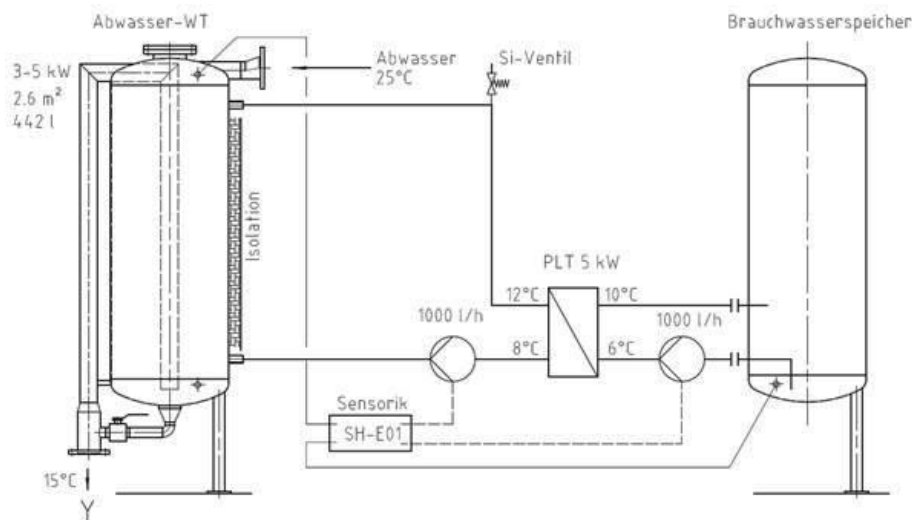
De benodigde ruimte voor het FEKA-systeem in het appartementencomplex is voornamelijk afhankelijk van de grootte van de warmtepomp. De grootte van de schacht met de warmtewisselaar varieert van 15 tot 40 m³. Dit is afhankelijk van de hoeveelheid afvalwater en de vraag naar warmte. Bij de aanleg van het systeem moet rekening gehouden worden met de toegang tot het systeem voor onderhoud en schoonmaak. Eens in de 1 à 2 jaar moet het systeem geheel gelegeerd en gereinigd worden voor het verwijderen van aanslag op de warmtewisselaar en dus behoud van het rendement. Als de afvalwaterschacht buiten het gebouw ligt is dit eenvoudig met een tankwagen te realiseren. Uit de gegevens van FEKA (bijlage 5) blijkt dat een installatie die 30 jaar geleden is aangelegd nog in gebruik is. De warmtepomp is in de tussentijd vervangen. Een warmtepomp heeft een gemiddelde levensduur van 15 à 20 jaar.

Bij een toepassing van een systeem voor het terugwinnen van thermische energie binnen een appartementencomplex is het nodig om een aanvullend conventioneel verwarmingssysteem te hebben. Als het systeem bijvoorbeeld gereviseerd moet worden dan kan aan de vraag van warmwater en verwarming voldaan worden. Het is ook mogelijk om met een aanvullend verwarmingssysteem het warme water tot hogere temperaturen van boven de 65 °C te verwarmen. Daarnaast kan het voordelig zijn om in zeer koude periodes bij te stoken met een conventioneel verwarmingssysteem op aardgas om aan de energievraag te voldoen.

2.3.2 KASAG_{TANK}

Een andere Zwitsers bedrijf KASAG, opgericht 1929, heeft zich gespecialiseerd in het maken van roestvrijstalen eindproducten. Een aantal van deze producten zijn voor het regenereren van energie uit bijvoorbeeld afvalwater. Er zijn twee systemen die geschikt zijn voor het terugwinnen van energie binnen gebouwen. Dit zijn de systemen KASAG_{TANK} en KASAG_{DOUBLE}.

Op dit moment wordt door KASAG een nieuwe warmtewisselaar ontwikkeld. Voor dit onderzoek wordt dit systeem KASAG_{TANK} genoemd. Het betreft een opslagtank met warmtewisselaar voor kleinere gebouwen. De warmtewisselaar is aanwezig in de dubbelwandige laag van een cilindrische tank (gegevens van KASAG, bijlage 5). In figuur 2.4 is het systeem schematisch weergegeven.



Figuur 2.4 Schematische schets van het KASAG_{TANK} systeem (gegevens KASAG)

Het afvalwater stroomt, indien nodig door een filter, naar de tank. De grootte van de tank is afhankelijk van de hoeveelheid afvalwater en de energiebehoefte. Via de tank met ingebouwde warmtewisselaar wordt het opgewarmde water door een warmtepomp naar de gewenste temperatuur gebracht. Het systeem kan binnen of buiten het gebouw worden geïnstalleerd. In figuur 2.4 is een tussenliggend circuit weergegeven. Afhankelijk van de situatie en het ontwerp kan dit tussenliggend circuit worden ingebouwd.

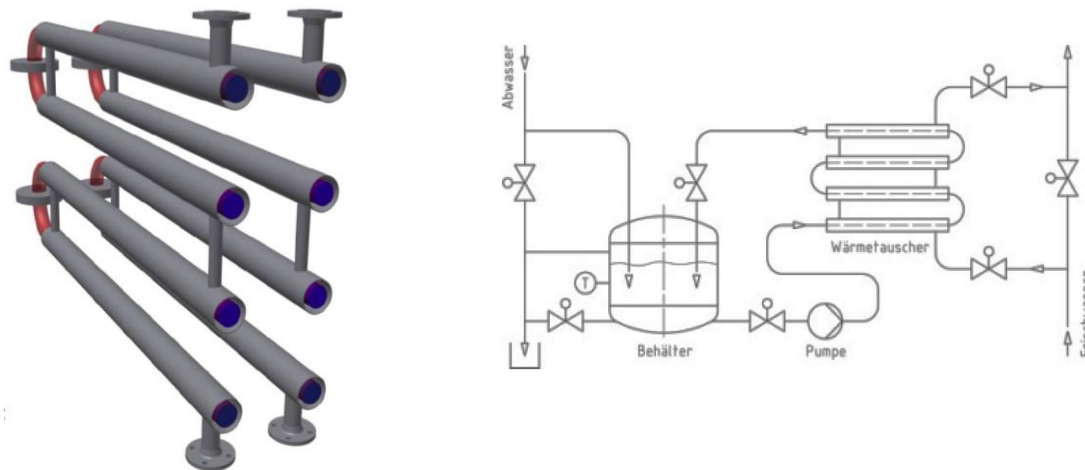
Er zijn geen algemene cijfers van de werking van het apparaat beschikbaar omdat voor elke specifieke locatie een nieuw ontwerp wordt gemaakt. Op basis van het afvalwater (hoeveelheid en tijdelijke accumulatie), temperatuur van het afvalwater en het gebruik van energie wordt een eerste inschatting van de vermogen en grootte van het systeem bepaald.

KASAG geeft aan dat speciale software is ontwikkeld om de warmtewisselaar te ontwerpen en door te rekenen. Hierbij wordt rekening gehouden met vervuiling. De warmtewisselaar wordt zo gedimensioneerd dat met volledige vervuiling de warmtewisselaar voldoende capaciteit levert (geleverde informatie van KASAG, bijlage 5). Hiermee geeft KASAG aan dat onderhoud en schoonmaken van de warmtewisselaar niet nodig is.

Het bedrijf KASAG produceert alleen de warmtewisselaar en niet de warmtepomp. De levensduur van de warmtewisselaar wordt geschat tussen de 30 en de 50 jaar (gegevens KASAG). Een warmtepomp heeft een gemiddelde levensduur van 15 à 20 jaar.

2.3.3 KASAG_{DOUBLE}

Dit systeem is geschikt voor het terugwinnen van thermische energie uit industrieel en huishoudelijk afvalwater (zowel grijs- als zwartwater) en kan binnen of buiten geïnstalleerd worden. Het afvalwater stroomt door de binnenste buis van de dubbele-pijp-warmtewisselaar (figuur 2.5). Dit afvalwater wordt gebruikt als een bron van energie waarbij de warmte onttrokken of juist wordt afgevoerd. Het systeem is dus zowel geschikt voor verwarmen als koelen. In figuur 2.5 is de warmtewisselaar en het systeem schematisch weergegeven.



Figuur 2.5 Warmtewisselaar en systeem KASAG_{DOUBLE} voor gebouwen (KASAG, z.j.)

Het afvalwater stroomt via een buffertank door de warmtewisselaar. Het transportmedium vloeit tussen de binnenste en buitenste buis door. Het schone water wordt verwarmd en stroomt daarna naar een installatie om op de gewenste temperatuur gebracht te worden. De pijpen zijn van roestvrijstaal en hebben een lengte van 3 tot 6 meter. Het type buis kan variëren. Dit is afhankelijk van de optimalisatie van de prestatie van het systeem en of het afvalwater grote hoeveelheden vaste stoffen bevat.

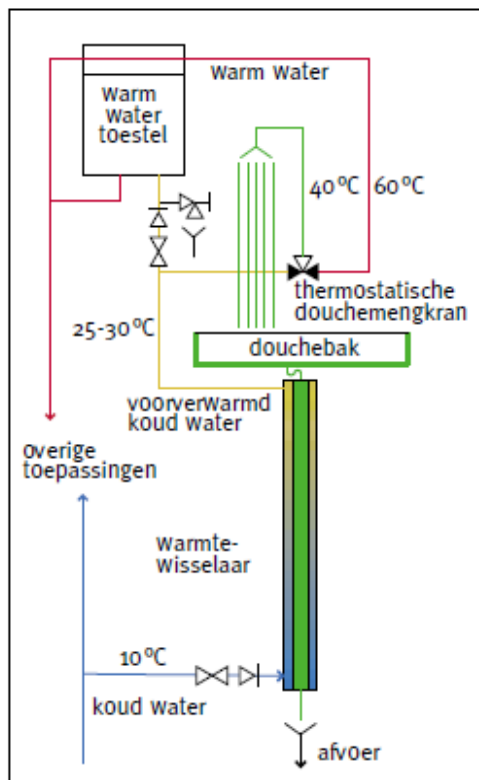
Net als bij het andere systeem van KASAG is onderhoud en schoonmaken van de warmtewisselaar niet noodzakelijk. Ook hier wordt opgemerkt dat KASAG niet het volledige systeem levert maar alleen de warmtewisselaar. De levensduur van de warmtewisselaar wordt geschat tussen de 30 en de 50 jaar (gegevens KASAG).

2.3.4 Douchewarmtewisselaar

Douchewater bevat relatief veel thermische energie omdat de temperatuur van het water relatief hoog is. Daarbij komt dat het aanbod van warmte en de vraag naar warmwater vrijwel gelijk lopen. Hierdoor kan de warmte teruggewonnen worden met een eenvoudige warmtewisselaar.

Een douchewarmtewisselaar zorgt er voor dat het schone koude water (voor)verwarmd wordt met de warmte van de uitgaande vervuilde stroom. Een warmtewisselaar voor de douche is een dubbelwandige leiding waar het schone koude water en het warme vuile water energie kunnen uitwisselen zonder fysiek met elkaar in contact te komen. De teruggewonnen warmte wordt afgegeven aan het koude water van de douche. De warmte kan ook afgegeven worden aan de CV-installatie of de boiler. In stationair bedrijf, dit is wanneer

thermisch evenwicht is bereikt, is de volumestroom van het warmwater naar de douche kleiner en die van de voorverwarmde koud waterstroom groter (Scheffer, 2002). De douchewarmtewisselaar is onderhoudsvrij (Bries, 2009). De technische levensduur van een douchewarmtewisselaar ligt gelijk aan de levensduur van een koperen waterleiding (> 30 jaar) (Bries, 2005). Voor het gebruik van een douchewarmtewisselaar is een thermostatische douchemengkraan vereist (Scheffer, 2002). De aansluiting van de wastafel wordt afgeraden omdat scheerzeep- en tandpastaresten een aanslag op de warmtewisselaar kunnen vormen. In figuur 2.6 staat een schema weergegeven van de inpassing van een douchewater warmteterugwinning.



Figuur 2.6 Principeschema inpassing douchewater warmteterugwinning (Scheffer, 2002)

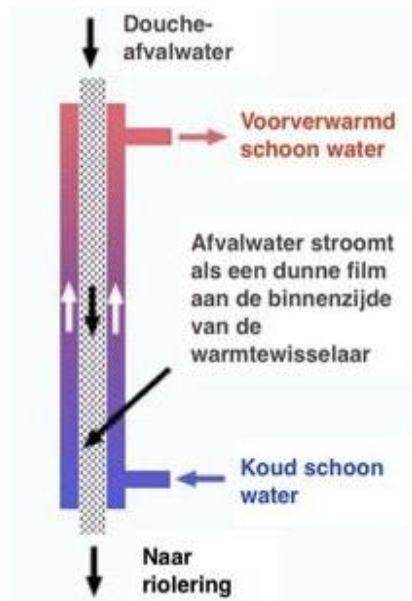
Er zijn verschillende typen van douchewarmtewisselaars te verkrijgen namelijk:

- Verticale warmtewisselaar
- Horizontale warmtewisselaar
- Geforceerde warmtewisselaar

De verschillende typen douchewarmtewisselaars worden hieronder besproken.

Verticale douchewarmtewisselaar

In figuur 2.7 is schematisch de werking van een verticale douchewarmtewisselaar weergegeven. Door de centrale buis stroomt het afvalwater naar beneden en in de omringende mantel stroomt het schone drinkwater in tegenstroom spiraalsgewijs omhoog. Er wordt gebruik gemaakt van het feit dat in een vallende film een efficiënte warmte-uitwisseling optreedt (Bries, 2009). Hierdoor wordt ondanks het feit dat het beschikbare temperatuurverschil relatief klein is, toch een aanzienlijk vermogen overgedragen.



Figuur 2.7 Schematische weergave van een douchewarmtewisselaar (Bries, 2005)

Bij een douchevolume van 7,5 l/min (40°C) wordt 9,3 kW netto teruggewonnen (Dutch solar systems, 2012). Het rendement van deze wisselaar ligt tussen de 50 en de 60 %. Deze rendementen zijn afgegeven door de leverancier. Het kan zijn dat deze rendementen positiever zijn dan in een praktijksituatie. De lengte van de tegenstroomwarmtewisselaar varieert van 1,5 tot 2,5 meter. Voor het inbouwen van warmtewisselaar in de afvoer moet er voldoende verticale ruimte zijn.

Horizontale warmtewisselaar

Horizontale douchewarmtewisselaars zijn kruisstroom of tegenstroom warmtewisselaars die in de douchebak zijn geïntegreerd of verdiept in de vloer zijn aangebracht (Blom et al., 2010). Er is sprake van een vrije afstroming van het afvalwater. Hiervoor is voldoende afschot noodzakelijk. De inbouw van een horizontale warmtewisselaar heeft vaak minder grote gevolgen voor een bestaande woning. Deze warmtewisselaars zijn vaak kostbaarder en minder efficiënt dan de verticale warmtewisselaar. Bij een verticale warmtewisselaar is de turbulentie van het afvalwater groter en de warmte-uitwisseling efficiënter.

Geforceerde warmtewisselaar

Dit type warmtewisselaar wordt toegepast in situaties waar meerdere douches aanwezig zijn. De warmtewisselaars worden parallel geplaatst of er is een gemeenschappelijke wisselaar. Het warme water wordt verzameld in een reservoir waarna het water door een pomp door de warmtewisselaar wordt gevoerd (Blom et al., 2010). De warmte wordt overgedragen aan de koude waterleiding vanwege het grote verschil in temperatuur tussen beide leidingen.

2.4 Modelbeschrijving

De stad Gent heeft in het kader van het MUSIC-project Tauw opdracht gegeven om een studie uit te voeren naar de mogelijkheden van het terugwinnen van thermische energie uit het afvalwater. Zo wil de stad Gent graag inzicht krijgen in mogelijkheden van het terugwinnen van energie uit afvalwater op het niveau van een woning, appartementencomplex en op straatniveau. Het doel van de opdracht is dat de stad Gent

een afweging kan maken of ze bij een aanvraag van een bouwvergunning of andere werkzaamheden aanvullende eisen kunnen gaan opleggen voor het benutten van thermische energie uit het afvalwater. Voor de opdracht voor de stad Gent is door Tauw een model ontwikkeld om de mogelijkheden op de diverse niveaus te berekenen (Aerts et al., 2013)

Het ontwikkelde model is een statisch wiskundig model dat in Excel is gemaakt. In het model is onderscheid gemaakt tussen drie niveaus waar de thermische energie teruggewonnen kan worden. Voor deze afstudeeropdracht wordt het straatniveau buitenbeschouwing gelaten en alleen gekeken naar de mogelijkheden voor het terugwinnen van energie binnen een appartementencomplex.

Binnen een appartementencomplex kan op twee locaties energie uit het afvalwater terug worden gewonnen. Dit is op een centrale plaats in het appartementencomplex waar al het afvalwater wordt verzameld. De andere mogelijkheid is op een decentrale plaats in het appartementencomplex en wel op woningniveau. In paragraaf 2.4.1 wordt het model op het niveau van een appartementencomplex besproken. Daarna wordt het model op woningniveau beschreven (2.4.2).

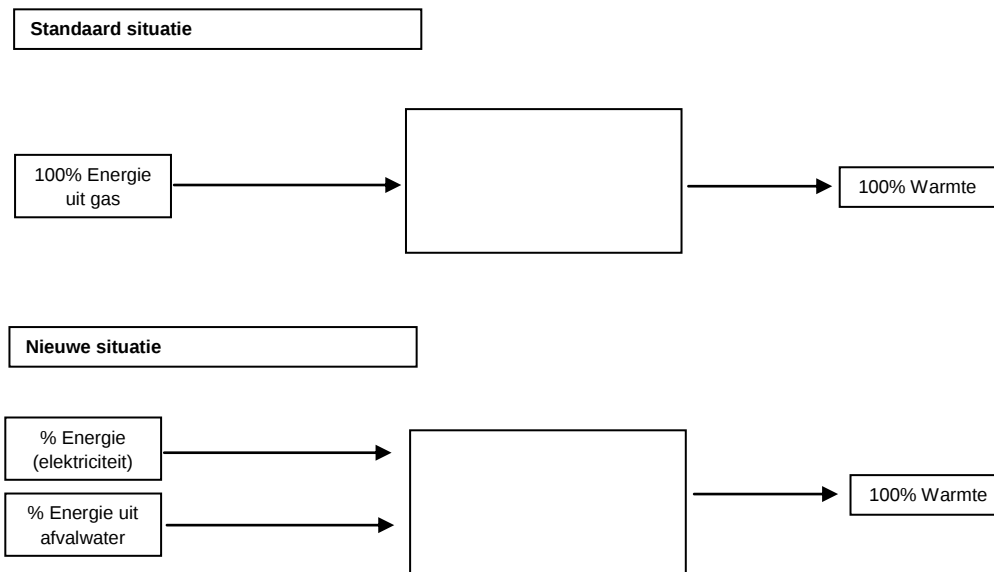
2.4.1 Niveau van een appartementencomplex

Het doel van het model is om inzicht te krijgen in de mogelijke besparingen op het gebied van energie en CO₂ uitstoot om zo te bepalen of het rendabel is een systeem voor het terugwinnen van energie aan te schaffen voor een appartementencomplex. De besparing van energie is afhankelijk van het aanbod van energie en de vraag naar energie.

De energiebesparing wordt berekend door het energieverbruik te vergelijken tussen een standaard situatie (centrale verwarming op gas) en een nieuwe situatie (systeem met een warmtewisselaar en een warmtepomp). De uiteindelijke besparing van energie uitgedrukt in een formule is als volgt:

$$\Delta P = P_{\text{Huidig energieverbruik}} - P_{\text{(Energie uit afvalwater + Energie voor warmtepomp)}} \quad (2)$$

Figuur 2.8 geeft de uitgangspunten van het model schematisch weer.



Figuur 2.8 Schematische schets van de berekening van de energiebesparing

De energiebesparing door het benutten van de thermische energie uit het afvalwater wordt berekend als het vermeden aardgasverbruik minus de benodigde elektriciteit voor de warmtepomp.

Uitgangspunten en aannames

Om verschillende systemen van energierugwinning te kunnen vergelijken is eerst bepaald wat verstaan wordt onder een appartementencomplex. Voor een appartementencomplex zijn de uitgangspunten en de randvoorwaarden gedefinieerd. Als uitgangpunt is een gemiddeld appartement in Gent gekozen. De oppervlakte en het volume van de wooneenheden binnen het appartementencomplex worden als een constante beschouwd.

Op basis van de karakteristiek van het Gents woningpark bedraagt de gemiddelde vloeroppervlakte van een wooneenheid 79 m² (180 m³) met een gemiddeld aantal inwoners van 2,36 per wooneenheid. Het aantal wooneenheden binnen een appartementcomplex varieert tussen de vier en de honderd woningen per complex. Voor het uitvoeren van de berekeningen is gekozen voor appartementencomplex met 4, 20, 50 en 100 wooneenheden.

Voor het berekenen van het energiegebruik in een standaard situatie wordt gebruik gemaakt van het gemiddelde energieverbruik voor een appartement. Dit is weergegeven in tabel 2.1.

Tabel 2.1 Gemiddeld energieverbruik voor een appartement (Energieleveranciers, 2013)

Bewoners	Stroom (kWh)	Gas (m ³)
1	1.900	800
2	3.150	1.300
3	3.400	1.450
4	4.200	1.550
5+	4.750	2.100

Voor een appartement met 2,36 inwoners is uitgegaan van een gemiddeld gasverbruik van 1.350m³ per jaar. Van de totale hoeveelheid aardgas wordt circa 30% gebruikt voor de

productie van warmwater (Blom, et al., 2010). De overige 70% van het aardgas wordt gebruikt voor het verwarmen van de woning.

Voor het verbruik van de hoeveelheid afvalwater is gebruik gemaakt van de gegevens weergegeven in tabel 2.2.

Tabel 2.2 Huishoudelijke afvalstromen en bijbehorende temperaturen (Blom et al., 2010)

	Gemiddelde lozing (aanname), (l inw/d)	Afvoer temperatuur (°C)	Geloosde thermische energie (kJ/pp.d)
Bad	2,5	30	188
Douche	49,8	35	4.788
Wastafel	5,3	22	222
Toiletspoeling	37,1	18	930
Wassen hand	1,5	30	115
Wasmachine	14,0	30	1.050
Afwassen hand	3,4	30	257
Afwasmachine	2,7	35	260
Voedselbereiding	1,5	50	243
Koffie/thee	1,1	37	113
Water drinken	0,5	37	56
Overig Keukenkraan	4,8	15	60
Totaal	124	28	8.282

In het model is gekozen om onderscheidt te maken in drie soorten systemen waaraan de warmte wordt afgegeven. Deze systemen zijn:

- Warmwater (60°)
- CV-installatie (60°)
- Vloerverwarming (30°)

Daarbij wordt voor de verwarmingssystemen rekening gehouden met het isolatieniveau van een appartement en een seizoenfactor. Voor een appartement met vloerverwarming is er vanuit gegaan dat deze woning goed geïsoleerd is. Een appartement met een CV-installatie is matig tot slecht geïsoleerd. Een seizoenfactor is meegenomen omdat het verwarmen van een appartement alleen nodig is tijdens het stookseizoen (van oktober tot mei).

De kosten voor het installeren van de systemen zijn sterk afhankelijk van de locatie en of het een nieuwbouw- of bestaande locatie betreft. Daarom is er voor gekozen om alleen de aanschafkosten van het systeem mee te nemen in het model en niet de installatiekosten. Dit is ook van toepassing op de berekeningen voor de douchewarmtewisselaar.

Berekeningstappen

In het model worden de berekeningen in verschillende stappen uitgevoerd.

- *Bepalen hoeveelheid energie aanbodzijde*
De potentieel beschikbare energie uit het afvalwater is aan de hand van formule (1) berekend. Op basis van de gegevens van tabel 2.2 wordt de totale hoeveelheid afvalwater per persoon op 124 liter per dag gesteld.

- *Bepalen hoeveelheid energie aan vraagzijde*
De energievraag is afhankelijk van het afgiftesysteem. In het model worden drie verschillende systemen bekeken, namelijk voor levering van warmwater (60°C), centrale verwarming (60°C) met matige isolatie en vloerverwarming (30°C) met goede isolatie. De energievraag is berekend aan de hand van het gemiddeld aardgasverbruik voor een appartement. Voor vloerverwarming is een correctie toegepast omdat het energieverbruik lager ligt vanwege de aanname van goede isolatie en de lagere temperatuurvraag van de verwarming.
- *Bepalen energieverbruik in nieuwe situatie*
Het energieverbruik voor de nieuwe situatie wordt bepaald door de energie uit het afvalwater en het energiegebruik van de warmtepomp bij elkaar op te tellen (formule 2). De hoeveelheid toe te voegen energie als elektriciteit is afhankelijk van het energiegebruik van de warmtepomp. Het rendement (COP) van een warmtepomp is afhankelijk van het afgiftesysteem. Hoe hoger de temperatuur van het afgiftesysteem hoe lager het rendement.
- *Berekening besparingen in energie*
Het energieververschil tussen de huidige situatie en de nieuwe situatie is de besparing. Aan de hand van de besparing kan de terugverdientijd worden berekend en de reductie van de CO₂ emissie.

Om de energiebesparing te kunnen berekenen moet de energie van elektriciteit en aardgas met elkaar vergeleken kunnen worden. Qua energie-inhoud staat 1 kilowattuur (kWh) elektriciteit gelijk aan 3,6 Megajoules (MJ) want 1 Watt is 1 Joule per seconde. Dus 1 kWh is 1.000 Watt gedurende 3.600 seconden. Aardgas (Gronings) levert bij verbranding een gemiddelde energetische waarde van 32 MJ/m³ op. Dit betreft de ondergrens. Omgerekend naar kWh is dit 8,9 kWh/m³ aardgas (Binas, 2004). Het verminderde aardgasverbruik van huishoudens is om te rekenen naar verminderde CO₂-uitstoot. Agentschap.nl (2012) heeft kengetallen opgesteld voor de uitstoot van CO₂ bij gebruik van elektriciteit en aardgas. Bij 1,0 kWh aan elektriciteitsverbruik komt 0,625 kg CO₂ vrij en bij 1 m³ aardgasverbruik 1,67 kg CO₂ vrij. In tabel 2.3 is een overzicht gegeven.

Tabel 2.3 Overzicht omrekeningen

1 kWh	3,6 MJ
1 m³ gas	32 MJ/m ³
1 m³ gas	8,79 kWh/m ³
1 m³ gas	1,67 kg CO ₂
1 kWh	0,625 kg CO ₂

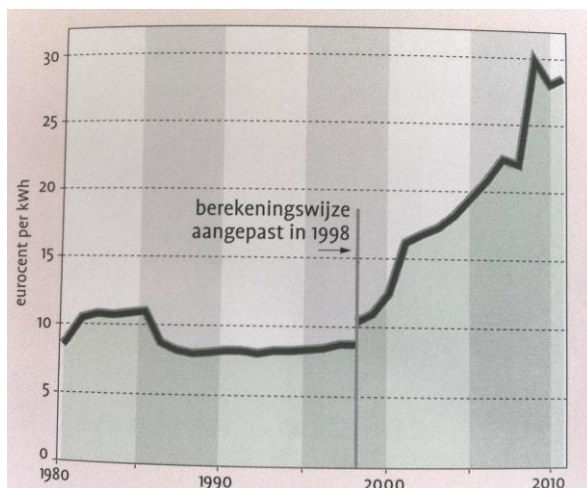
Resultaten van het model

De berekende besparingen worden uitgedrukt in besparing in energieverbruik en reductie in CO₂ uitstoot. De besparing in energieverbruik wordt uitgedrukt in kWh en in m³ gas per jaar. Op basis van deze gegevens en de kosten van de energie (elektriciteit in kWh) is de

besparing per jaar bepaald die uitgedrukt wordt in euro's. Om een besluit te nemen om te investeren in een systeem is het belangrijk om de terugverdientijd te weten. De terugverdientijd is berekend aan de hand van de besparing op de energiekosten en de investeringskosten voor het aanleggen van het betreffende systeem.

De terugverdientijd wordt in de eerste plaats berekend op basis van de huidige energieprijzen. Voor het bepalen van de terugverdientijd is aanvullend uitgegaan van de methodiek van de netto contante waarde (NCW), waarbij toekomstige prijsstijgingen voor energie (gas en elektriciteit) zijn meegenomen. De contante waarde is de huidige waarde van een bedrag waarover je pas na een bepaalde periode de beschikking hebt. Door het berekenen van de contante waarde kunnen de effecten van de kosten en de inkomsten, die op verschillende tijdstippen plaats vinden, met elkaar vergeleken worden (Wikipedia, 2013). De NCW is de contante waarde van de kosten (investeringskosten in systeem) die van de contante waarde van de opbrengsten (in dit geval besparing van energiekosten) wordt afgetrokken.

De stijging van de energieprijzen is moeilijk te voorspelling (paragraaf 2.2). De ontwikkeling van de elektriciteitsprijs van 1980 tot 2010 is weergegeven in figuur 2.9. Figuur 2.9 laat een stijging van de elektriciteitsprijs van gemiddeld 12% per jaar zien.



Figuur 2.9 Ontwikkeling elektriciteitsprijs (Bosatlas, 2012)

Voor de berekeningen in het model wordt uitgegaan van een stijging van de aardgasprijs van 6% per jaar en van 3% per jaar voor de prijs van elektriciteit.

2.4.2 Niveau van een woning

Voor een appartement is gekozen voor het terugwinnen van de warmte ter hoogte van de douche. Douchewater bevat relatief veel thermische energie. Het aanbod van deze warmte en de vraag naar warmwater lopen vrijwel gelijk. Het is mogelijk om met een eenvoudige warmtewisselaar deze warmte terug te winnen. In dit model wordt alleen gekeken naar een verticale warmtewisselaar omdat deze wisselaar bijna in alle huizen in te bouwen is zowel bij nieuwbouw als bestaande bouw (verbouwing van de badkamer), een hoog rendement heeft en lage aanschafkosten.

Uitgangspunten en aannames

Het aantal bewoners bepaalt in grote mate de energievraag, de warmwatervraag en het verloop van de water- en energievraag in de tijd. Voor een appartement is uitgegaan van 2,36 bewoners per appartement. Daarnaast is aanvullend gekeken naar de mogelijke besparingen voor appartementen met één bewoner of met vier bewoners. Voor het uitvoeren van de berekeningen is wederom gekozen voor appartementcomplex met 4, 20, 50 en 100 wooneenheden.

Op basis van de gegevens van tabel 2.2 is uitgegaan van gebruik van 49,8 liter water per douchebeurt met een temperatuur van 40°C (afvoer). Het debiet van douchewater is circa 7,5 liter per minuut (Scheffer, 2002). Het koude water heeft een temperatuur van 10°C. Verder wordt aangenomen dat elke bewoner één keer per dag doucht.

Een douchewarmtewisselaar moet opwarmen. Deze opwarmtijd bedraagt gemiddeld twee minuten (Scheffer, 2002). Uit gegevens van praktijkproeven is gebleken dat tussen de 5.5°C en de 10 °C teruggewonnen kan worden (Scheffer, 2002). Dit is afhankelijk van de temperatuur van het koude water en de temperatuur van het douchewater. Het koude water heeft in de zomer een temperatuur van circa 18°C en in de winter van circa 6°C. Voor de berekeningen in dit onderzoek wordt uitgegaan van een gemiddeld van 8,75°C (ΔT) dat aan warmte kan worden teruggewonnen bij een temperatuur van het douchewater van 40 °C.

Berekeningstappen

In het model wordt de besparing van energie in kWh door de douchewarmtewisselaar berekend aan de hand van formule 1. Hierbij wordt rekening gehouden met de opwarmtijd van de warmtewisselaar. In de twee minuten opwarmtijd neemt de temperatuur toe van 10 tot 18,75 graden (na opwarmen ΔT van 8,75). Het rendement van de warmtewisselaar wordt berekenend door de hoeveelheid benodigde energie met een douchewarmtewisselaar te delen door de hoeveelheid benodigde energie zonder warmtewisselaar.

Resultaten van het model

Besparingen worden uitgedrukt in besparing in energieverbruik en reductie in CO₂ uitstoot. De terugverdientijd is ook bepaald. De berekeningen komen overeen met de berekeningen voor het terugwinnen van energie op het niveau van een appartementencomplex en zijn in vorige paragraaf (2.4.1) beschreven.

3 Onderzoeksmethode

In dit hoofdstuk wordt de onderzoeksoepzet beschreven waarin wordt aangegeven op welke wijze het onderzoek wordt uitgevoerd. Het gaat om het verkrijgen van de modelresultaten en het uitvoeren van een gevoeligheidsanalyse. In de eerste paragraaf (3.1.1) wordt bepaald welke invoergegevens voor het model nodig zijn. De verwerking van de resultaten van het model (3.1.2) en de wijze van vergelijken van de systemen (3.1.3) wordt daarna besproken. In de daaropvolgende paragraaf (3.2) wordt de methode voor het uitvoeren van de gevoeligheidsanalyse besproken.

3.1 Modelberekeningen

Om te kunnen bepalen of het terugwinnen van energie rendabel is moeten de berekeningen per systeem worden uitgevoerd. Hiervoor wordt het in paragraaf 2.4 beschreven model gebruikt. In het hoofdstuk van de theoretisch kader (paragraaf 2.3) zijn de verschillende systemen voor de terugwinnen van energie uit afvalwater besproken. Een overzicht van de verschillende systemen is in tabel 3.1 weergegeven.

Tabel 3.1 Overzicht van de geselecteerde systemen

Systeem	Niveau
FEKA-systeem	Appartementencomplex
KASAG _{TANK} -systeem	Appartementencomplex
KASAG _{DOUBLE} -systeem	Appartementencomplex
Douchewarmtewisselaar	Woning

3.1.1 Invoergegevens model

Per systeem wordt een separaat tabblad in Excel aangemaakt waarin de verschillende invoergegevens per systeem kunnen worden ingevoerd. De variabele invoergegevens voor de systemen op het niveau van een appartementencomplex zijn:

- Temperatuur van het afvalwater voor de warmtewisselaar
- Temperatuur van het afvalwater na warmtewisselaar
- COP van de warmtepomp voor 30 °C
- COP van de warmtepomp voor 60 °C
- Kosten voor het aanschaffen van het systeem
- Onderhoudskosten per jaar

De variabele invoergegevens voor het systeem op het niveau van een woning zijn:

- Hoeveelheid douchewater
- Hoeveelheid warmte uitgedrukt in temperatuur die teruggewonnen kan worden (ΔT)
- Kosten voor het aanschaffen van het systeem
- Onderhoudskosten per jaar

De invoergegevens worden in paragraaf 4.1.1 per systeem besproken.

3.1.2 Modelresultaten

De resultaten van het model (output) worden per systeem beschreven. Per systeem worden de resultaten weergegeven in een tabel en de resultaten worden besproken en toegelicht.

Op het niveau van een appartementencomplex worden de resultaten van de hoeveelheid beschikbaar afvalwater, het warmte-aanbod, de warmtevraag per afgiftesysteem, de besparing aan gas per jaar, de terugverdientijd en de reductie CO₂ emissie in ton per jaar weergegeven in een tabel. Er wordt gekeken naar een appartementencomplex met 4, 20, 50 en 100 woningen.

Op het niveau van een woning worden de resultaten in een tabel weergegeven. Dit is de hoeveelheid beschikbaar afvalwater, de besparing van energie in kWh/dag, de besparing aan aardgas op jaarbasis, de terugverdientijd en de reductie CO₂ emissie in kg/jaar. Er wordt gekeken naar een woning met 1, 2,36 en 4 personen.

3.1.3 Vergelijking van de systemen

De resultaten van het model worden voor een appartementencomplex met 100 woningen en een warmteafgiftesysteem voor warmwater in een tabel gezet om een overzicht tussen de verschillende systemen te krijgen. Gekozen is om deze resultaten weer te geven en kort te beschrijven om zo het aantal parameters en variabelen te beperken. De besparing in aardgas (m³/jaar), de terugverdientijd, de reductie CO₂ emissie (ton/jaar) en de aanschafkosten van de systemen worden weergegeven.

Daarnaast wordt een overzicht per systeem gegeven met de besparing in hoeveelheid gas en reductie CO₂ emissie per geïnvesteerde EUR. Zo kan een vergelijking gemaakt worden onafhankelijk van de aanschafkosten van een systeem. De verschillen tussen de systemen wordt kort besproken.

Het model is ontwikkeld voor de stad Gent. In paragraaf 4.1.3 wordt kort ingegaan op de verschillen ten opzichte van appartementencomplex in Nederland.

3.2 Gevoeligheidsanalyse

De berekeningen in het model zijn gebaseerd op de formule:

$$P = Q * C_w * \rho_w * \Delta T \quad (1)$$

Alle parameters worden met elkaar vermenigvuldigd. Een wijziging van de invoer van een parameter heeft invloed op het resultaat. Om te bepalen wat een verandering in de input tot gevolg heeft op de output van het model kan een gevoeligheidsanalyse worden uitgevoerd.

Een gevoeligheidsanalyse kan worden beschreven als het bepalen van de invloed van systematische variaties in de invoergegevens op de modelresultaten.

Op het niveau van een appartementencomplex is gekozen om de invoerparameter hoeveelheid afvalwater (l/dag per persoon), temperatuur van het afvalwater (°C) en de COP

(30°C en 60°C) van de warmtepomp te variëren. De resultaten bij het variëren van de hoeveelheid afvalwater en de temperatuur van het afvalwater wordt uitgedrukt in besparing in energie (kWh/dag). Voor de parameter COP (30°C en 60°C) wordt de resultaten in terugverdiëntijd (jaren) aangegeven.

Op het niveau van een woning worden de invoerparameter de hoeveelheid douchewater per persoon per dag en de ΔT (°C) gevarieerd. De output bij het variëren van de invoerparameters worden uitgedrukt in besparing in aardgas (m³/jaar).

Voor de gevoeligheidsanalyse worden de verschillende invoerparameters van het model gevarieerd met de volgende percentages:

- -10%
- -5%
- +5%
- +10%

De resultaten van de gevoeligheidsanalyse worden weergegeven in een tabel en in een grafiek. In de aanvullende tabel worden de afwijking van het resultaat (in percentage) ten opzichte van de uitgangswaarde (0%) weergegeven. Dit heeft de spreiding van de resultaten weer.

4 Onderzoeksresultaten

In dit hoofdstuk worden de resultaten van het onderzoek besproken. Het verloop van het onderzoek en analyse de resultaten worden in dit hoofdstuk beschreven. In paragraaf 4.1 worden de resultaten van het model per systeem besproken. Eerst wordt aangegeven welke gegevens als input van het model zijn gebruikt. De resultaten van het model worden daarna beschreven. De vergelijking van de verschillende systemen wordt besproken in paragraaf 4.1.3. De resultaten van de gevoeligheidsanalyse van het model is paragraaf 4.2 weergegeven.

4.1 Modelresultaten

De modelresultaten per systeem worden hieronder beschreven. Als eerste worden de variabele invoerparameters per systeem bepaald. Waarna de invoergegevens in het model zijn ingevoerd. Per systeem is een aparte Excelsheet ingevuld.

4.1.1 Invoergegevens model

Model is aangepast voor de verschillende systemen. Op basis van de gegevens van uit tabel 2.2 is uitgegaan van een hoeveelheid afvalwater van 124 l/dag per inwoner van een appartement. Voor de systemen op een niveau van een appartementencomplex zijn de volgende parameters variabel per systeem:

- Temperatuur van het afvalwater voor de warmtewisselaar
- Temperatuur van het afvalwater na warmtewisselaar
- COP van de warmtepomp voor 30 °C en voor 60 °C
- Kosten voor het aanschaffen van het systeem
- Onderhoudskosten per jaar

Voor het systeem op het niveau van een woning zijn de volgende invoergegevens verzameld:

- Hoeveelheid douchewater
- Hoeveelheid warmte in temperatuur die teruggewonnen kan worden (ΔT)
- Kosten voor het aanschaffen van het systeem
- Onderhoudskosten per jaar

De invoergegevens per systeem worden hieronder besproken.

FEKA-systeem

De thermische warmte die uit het afvalwater is te onttrekken wordt bepaald door het beschikbare hoeveelheid afvalwater en de temperatuur van dit water. De temperatuur van het afvalwater ter hoogte van de schacht waar het afvalwater wordt verzameld heeft een gemiddelde waarde van 23°C. Uit de gegevens van FEKA blijkt dat de temperatuur van het afvalwater na de warmtewisselaar circa 5°C bedraagt. Bij de berekeningen wordt uitgegaan van een ΔT van 18°C. Een ΔT van 18°C is hoog voor een warmtewisselaar. Het FEKA-

systeem is echter wel jarenlang specifiek ontwikkeld voor het terugwinnen van warmte uit afvalwater.

De COP van de warmtepomp is sterk afhankelijk van de temperatuur van afgiftesysteem. Hoe hoger de gevraagde temperatuur hoe lager de COP van de warmtepomp. Voor een afgiftetemperatuur van 60 °C is uitgegaan van een COP van 4 en voor een afgiftetemperatuur van 30°C is uitgegaan van een COP van 5.5.

Kosten bedragen circa EUR 40.000 voor de warmtewarmtewisselaar en circa EUR 40.000 tot EUR 150.000 voor de warmtepomp. De kosten van de warmtepomp zijn sterk afhankelijk van de warmtevraag en afgiftesysteem en de daar aangekoppelde COP van de warmtepomp. Op kosten zijn bepaald op basis van een project voor een hotel in Zwitserland van FEKA en Viessmann groep (leverancier van warmtepompen). De gegevens zijn opgenomen in bijlage 5. Hoe groter het appartementencomplex is, hoe meer vermogen de warmtepomp moet leveren en dus hoe duurder de pomp.

Het onderhoud van het systeem bestaat uit het één keer per jaar reinigen van de schacht door middel van doorspoelen van het systeem. Uit de informatie van FEKA blijkt dat de onderhoudskosten circa EUR 500 per jaar bedragen.

KASAG_{TANK}

De temperatuur van het afvalwater ter hoogte van de tank is circa 25°C. Uit de gegevens van KASAG blijkt dat de temperatuur van het afvalwater na de warmtewisselaar circa 15°C bedraagt (gegevens KASAG) Bij de berekeningen wordt uitgegaan van een ΔT van 10°C.

De COP van de warmtepomp is sterk afhankelijk van de temperatuur van afgiftesysteem. Hoe hoger de gevraagde temperatuur hoe lager de COP van de warmtepomp. Voor een afgifte temperatuur van 60 °C is uitgegaan van een COP van 3 en voor een afgifte temperatuur van 30°C is uitgegaan van een COP van 6.1 (gegevens KASAG).

De verwachting is dat de kosten voor de warmtewisselaar van KASAG lager zullen zijn dan van het FEKA-systeem omdat de ΔT van het FEKA-systeem veel groter is. Voor de kosten is een bedrag van circa EUR 25.000 aangehouden voor de warmtewarmtewisselaar. Voor de warmtepomp is uitgegaan van kosten tussen de EUR 40.000 tot EUR 150.000. Voor de kosten van de warmtepomp worden de kosten van de Viessmann warmtepomp uit het voorbeeldproject samen met FEKA aangehouden. Het onderhoud of het schoon maken van de warmtewisselaar is niet nodig (gegevens KASAG). Uitgangspunt is dat de onderhoudskosten EUR 250 per jaar bedragen voor het onderhoud aan de warmtepomp.

KASAG_{DOUBLE}

Voor de KASAG_{DOUBLE} wordt aangegeven door de leverancier dat de temperatuur van het afvalwater hoogte van de warmtewisselaar circa 13°C is en het koude water 6°C. Dit zou betekenen dat ΔT 5°C bedraagt.

De COP van de warmtepomp is sterk afhankelijk van de temperatuur van afgiftesysteem. Hoe hoger de gevraagde temperatuur hoe lager de COP van de warmtepomp. Voor een afgifte temperatuur van 60 °C is uitgegaan van een COP van 3 en voor een afgifte temperatuur van 30°C is uitgegaan van een COP van 6.1 (gegevens KASAG).

Vergelijkbaar met het KASAG_{TANK} systeem is uitgegaan van kosten van circa EUR 25.000 voor de warmtewarmtewisselaar en EUR 40.000 tot EUR 150.000 voor de warmtepomp. Voor de kosten van de warmtepomp worden de kosten van de Viessmann warmtepomp aangehouden. Het onderhoud of het schoon maken van de warmtewisselaar is niet nodig (gegevens KASAG). Uitgangspunt is dat de onderhoudskosten EUR 250 per jaar bedragen voor het onderhoud aan de warmtepomp.

Douchewarmtewisselaar

Voor het uitvoeren van de berekeningen voor besparingen bij installatie van een douchewarmtewisselaar is uitgegaan van de volgende gegevens:

- Hoeveelheid douchewater: 49,8 l/dag
- Debiet van de douche: 7,5 l/min
- Voorverwarmen douche: 2 minuten
- $\Delta T = 8,75^{\circ}\text{C}$
- Temperatuur douchewater: 40°C
- Temperatuur koude water: 10°C

De technische levensduur van een douchewarmtewisselaar ligt gelijk aan de levensduur van een koperen waterleiding. De levensduur van een douchewarmtewisselaar is ten minste 30 jaar (Bries, 2005). Daarnaast is de douchewarmtewisselaar onderhoudsvrij (Bries, 2009). De kosten, exclusief installatiekosten, liggen tussen de EUR 400,00 en de EUR 600,00 exclusief BTW (Bries (2009) en Groene-energiewinkel (2013)). Voor de modelberekening is uitgegaan van aanschafkosten van EUR 500,00 exclusief BTW.

4.1.2 Resultaten van het model

De gegevens uit paragraaf 4.1.1 zijn in het model ingevoerd voor de vier verschillende systemen. De resultaten per systeem staan in onderstaande tabellen weergegeven.

FEKA-systeem

In tabel 4.1 zijn resultaten van het FEKA-systeem weergegeven. Een overzicht van de berekeningen is weergegeven in bijlage 1.

Tabel 4.1 Modelresultaten FEKA systeem

Aantal appartementen	Afvalwater (l/dag)	Systeem	Warmte aanbod (kWh/dag)	Warmte vraag (kWh/dag)	Besparing gas (m ³ /jaar)	Terugverdien tijd (jaren)	Reductie CO ₂ emissie (ton/jaar)
4	1.171	Warmwater	33	39	1.005	246	5,3
4	1.171	CV 60°C	33	184	1.005	491	5,3
4	1.171	CV 30°C	30	104	1.005	368	5,3
20	5.853	Warmwater	163	197	5.023	61	26,7
20	5.853	CV 60°C	163	921	5.023	123	26,7
20	5.853	CV 30°C	150	518	5.023	92	26,7
50	14.632	Warmwater	408	493	12.557	37	66,8
50	14.632	CV 60°C	408	2.301	12.557	74	66,8
50	14.632	CV 30°C	374	1.295	12.557	55	66,8
100	29.264	Warmwater	815	986	25.115	23	133,7
100	29.264	CV 60°C	815	4.603	25.115	47	133,7
100	29.264	CV 30°C	748	2.589	25.115	35	133,7

Uit de resultaten komt naar voren dat het warmte-aanbod lager ligt dan de warmtevraag. Alle teruggewonnen energie uit het afvalwater kan benut worden. Er is een aanvullend systeem nodig om aan de totale warmtevraag te kunnen voldoen. Uit de resultaten blijkt dat het FEKA-systeem bij 100 appartementen en een warmteafgiftesysteem voor warmwater een terugverdientijd van rond de 23 jaar heeft. Het systeem is dus bijna kosteneffectief als er rekening gehouden wordt met een levensduur van de warmtepomp van circa 20 jaar.

FEKA geeft aan dat het systeem kosteneffectief is bij een hoeveelheid afvalwater van minimale 15.000 liter/dag. Dit komt overeen met het watergebruik van 120 personen. Op basis van de resultaten van deze modelberekeningen zou het systeem kosteneffectief zijn bij circa 110 woningen of circa 260 inwoners per appartementencomplex en huidige energieprijzen.

Bij deze berekening is geen rekening gehouden met stijgende energieprijzen. In bijlage 1 is een grafiek opgenomen die de terugverdientijden weergeeft met en zonder prijsstijgingen van de energieprijzen in de toekomst. Als er rekening gehouden wordt met stijgende energieprijzen dan loopt de terugverdientijd terug naar 13 jaar voor een appartementencomplex met 100 woningen en een afgiftesysteem voor warmwater.

KASAG_{TANK}

In tabel 4.2 zijn resultaten van het KASAG_{TANK}-systeem weergegeven. Een overzicht van de berekeningen is weergegeven in bijlage 2

Tabel 4.2 Modelresultaten KASAG_{TANK}

Aantal appartementen	Afvalwater (l/dag)	Systeem	Warmte aanbod (kWh/dag)	Warmte vraag (kWh/dag)	Besparing gas (m ³ /jaar)	Terugverdien tijd (jaren)	Reductie CO ₂ emissie (ton/jaar)
4	1.171	Warmwater	20	39	558	723	3,0
4	1.171	CV 60°C	20	184	558	1.446	3,0
4	1.171	CV 30°C	16	104	558	508	3,0
20	5.853	Warmwater	102	197	2.791	189	14,9
20	5.853	CV 60°C	102	921	2.791	378	14,9
20	5.853	CV 30°C	81	518	2.971	133	14,9
50	14.632	Warmwater	255	493	6.976	120	37,1
50	14.632	CV 60°C	255	2.301	6.976	240	37,1
50	14.632	CV 30°C	203	1.295	6.976	84	37,1
100	29.264	Warmwater	510	986	13.953	78	74,3
100	29.264	CV 60°C	510	4.603	13.953	156	74,3
100	29.264	CV 30°C	406	2.589	13.953	55	74,3

Uit de resultaten komt naar voren dat het warmte-aanbod lager ligt dan de warmtevraag. Alle teruggewonnen energie uit het afvalwater kan benut worden. Er is een aanvullend systeem nodig om aan de totale warmtevraag te kunnen voldoen. Uit de resultaten blijkt dat het KASAG_{TANK} -systeem bij 100 appartementen en een warmteafgiftesysteem voor warmwater zichzelf niet terugverdiend. Als rekening wordt gehouden met een levensduur van de warmtepomp van circa 20 jaar.

Op basis van de resultaten van deze modelberekeningen zou het systeem kosteneffectief zijn bij circa 350 appartementen voor een appartementencomplex. Bij deze berekening is geen rekening gehouden met stijgende energieprijzen. In bijlage 2 is een grafiek opgenomen

die de terugverdientijden weergeeft met en zonder prijsstijgingen van de energieprijzen in de toekomst. Als er rekening gehouden wordt met stijgende energieprijzen dan is terugverdientijd circa 20 jaar voor een appartementencomplex met 100 woningen en een afgiftesysteem voor warmwater.

KASAG_{DOUBLE}

In tabel 4.3 zijn resultaten van het KASAG_{DOUBLE}-systeem weergegeven. Een overzicht van de berekeningen is weergegeven in bijlage 3

Tabel 4.3 Modelresultaten KASAG_{DOUBLE}

Aantal appartementen	Afvalwater (l/dag)	Systeem	Warmte aanbod (kWh/dag)	Warmte vraag (kWh/dag)	Besparing gas (m ³ /jaar)	Terugverdien tijd (jaren)	Reductie CO ₂ emissie (ton/jaar)
4	1.171	Warmwater	14	39	391	1.033	2,1
4	1.171	CV 60°C	14	184	391	2.065	2,1
4	1.171	CV 30°C	11	104	391	726	2,1
20	5.853	Warmwater	71	197	1.953	270	10,4
20	5.853	CV 60°C	71	921	1.953	540	10,4
20	5.853	CV 30°C	57	518	1.953	190	10,4
50	14.632	Warmwater	178	493	4.883	172	26,0
50	14.632	CV 60°C	178	2.301	4.883	343	26,0
50	14.632	CV 30°C	142	1.295	4.883	121	26,0
100	29.264	Warmwater	357	986	9.767	111	52,0
100	29.264	CV 60°C	357	4.603	9.767	222	52,0
100	29.264	CV 30°C	284	2.589	9.767	78	52,0

Uit de resultaten komt naar voren dat het warmte-aanbod lager ligt dan de warmtevraag. Alle teruggewonnen energie uit het afvalwater kan benut worden. Er is een aanvullend systeem nodig om aan de totale warmtevraag te kunnen voldoen. Uit de resultaten blijkt dat het KASAG_{DOUBLE} -systeem bij 100 appartementen en een warmteafgiftesysteem voor warmwater zichzelf niet terugverdiend. Als rekening wordt gehouden met een levensduur van de warmtepomp van circa 20 jaar.

Op basis van de resultaten van deze modelberekeningen zou het systeem kosteneffectief zijn bij circa 500 appartementen voor een appartementencomplex. Bij deze berekening is geen rekening gehouden met stijgende energieprijzen. In bijlage 3 is een grafiek opgenomen die de terugverdientijden weergeeft met en zonder prijsstijgingen van de energieprijzen in de toekomst. Als er rekening gehouden wordt met stijgende energieprijzen dan is terugverdientijd circa 20 jaar voor een appartementencomplex met 150 woningen en een afgiftesysteem voor warmwater.

Douchewarmtewisselaar

Voor het terugwinnen van energie ter hoogte van de douche lopen de warmtevraag en het warmte-aanbod nagenoeg gelijk. De resultaten staan in tabel 4.4 weergegeven voor appartement met 1, 2,36 en 4 bewoners. Een overzicht van de berekeningen is weergegeven in bijlage 4. De reductie in CO₂ emissie is weergegeven in kg/jaar in plaats van ton/jaar zoals bij de overige systemen.

Tabel 4.4 Modelresultaten douchewarmtewisselaar

Aantal personen	Afvalwater (l/dag)	Besparing energie (kWh/dag)	Besparing gas (m ³ / jaar)	Terugverdientijd (jaren)	Reductie CO ₂ emissie (kg/jaar)
1	49,8	0,61	25	31	42
2,36	117,5	1,43	59	13	98
4	199,2	2,42	99	8	166

Uit de berekeningen blijkt dat de terugverdientijd voor een appartement met 2,36 bewoners rond de 13 jaar ligt. Hoe meer bewoners, hoe meer douchewater, hoe korter de terugverdientijd zal zijn. Bij deze berekening is geen rekening gehouden met stijgende energieprijzen. In bijlage 4 is een grafiek opgenomen die de terugverdientijden weergeeft met en zonder prijsstijgingen van de energieprijzen in de toekomst. Als er rekening gehouden wordt met stijgende energieprijzen dan loopt de terugverdientijd terug naar circa 9 jaar.

Het rendement van de douchewarmtewisselaar is in het model berekend. Het rendement is 35% (bijlage 4). Dit is een behoorlijk verschil ten opzichte van het rendement van 50-60% dat wordt aangegeven door de leveranciers.

4.1.3 Vergelijking van de systemen

Voor één situatie is gekozen om de modelresultaten van de verschillende systemen naast elkaar te zetten, te vergelijken en te bespreken. De resultaten voor een appartementencomplex met 100 woningen met 2,36 inwoners per appartement en het afgiftesysteem voor warmwater zijn weergegeven in tabel 4.5.

Tabel 4.5 Overzicht verschillende systemen bij 100 appartementen en warmwater

Systeem	Besparing gas (m ³ /jaar)	Terugverdientijd (jaren)	Reductie CO ₂ (ton/jaar)	Kosten (EUR)
FEKA systeem	25.115	23	133,7	190.000
KASAG_{TANK}	13.953	78	74,3	175.000
KASAG_{DOUBLE}	9.767	111	52,0	175.000
Douchewarmtewisselaar	5.852	13	9,8	50.000

De resultaten geven aan dat de hoogste besparingen voor gas en CO₂ emissie te verkrijgen zijn met het FEKA-systeem. Voor een standaard situatie wordt circa 400 m³ aardgas per appartement gebruikt en circa 2.938 kg CO₂ per jaar uitgestoten voor warmwaterproductie. Met de nieuwe situatie (FEKA) wordt 251 m³ gas bespaard en 1.337 kg CO₂ minder uitgestoten. Daar staat tegenover dat de hoogste investeringskosten voor dit systeem zijn. De terugverdientijd is voor een douchewarmtewisselaar het kleinst en valt binnen de levensduur van het systeem. In het overzicht van de terugverdientijden in tabel 4.5 is geen rekening gehouden met stijgingen van de energieprijzen.

In tabel 4.6 geeft een overzicht van de besparing in hoeveelheid gas en CO₂ emissie per EUR investering.

Tabel 4.6 Overzicht besparing gas en CO₂ reductie per EUR investering

Systeem	Besparing gas per EUR investering (m ³)	CO ₂ reductie per EUR investering (ton)
FEKA systeem	0,13	0,0007
KASAG_{TANK}	0,080	0,0004
KASAG_{DOUBLE}	0,056	0,0003
Douchewarmtewisselaar	0,12	0,0002

In het overzicht van figuur 4.6 komt naar voren dat het FEKA-systeem de beste resultaten geeft ten opzichte van de overige systemen. De besparing in gas komt voor een douchewarmtewisselaar bij het FEKA-systeem in de buurt. De besparing in CO₂ emissie valt lager uit.

De beschikbare warmte (aanbod) uit het afvalwater is voor alle appartementencomplexen niet toereikend om te voldoen aan de warmtevraag. Er zal gebruik gemaakt moeten worden van een aanvullend systeem (CV installatie op gas of andere warmte bron) om in de warmtevraag te kunnen voorzien. De hoeveelheid beschikbaar afvalwater is ook afhankelijk van de soort bewoners. Uit ervaring van FEKA blijkt dat appartementen met gezinnen met kinderen meer warmwater verbruiken dan appartementen met werkende zonder kinderen. Voor een appartement met gezinnen met kinderen kan een systeem om warmte terug te winnen uit afvalwater rendabeler zijn.

Systemen voor het terugwinnen van energie op het niveau van een appartementencomplex zijn niet standaard in ontwerp maar moeten per locatie specifiek ontworpen en gedimensioneerd worden. Hiervan zijn de kosten sterk afhankelijk. Voor de modelberekeningen zijn vele aannames per systeem gemaakt. De uitkomsten van het model geeft een algemeen beeld van de mogelijkheden om energie teug te winnen binnen een appartementcomplex.

Dit model is ontwikkeld voor de stad Gent en er is met gegevens voor Belgische situatie gerekend. De situatie voor Nederland is vergelijkbaar. Alleen de prijzen voor elektriciteit in Nederland (22 eurocent per kWh) liggen hoger dan in België (11 eurocent per kWh). De terugverdientijden zullen langer zijn omdat de kosten voor het gebruik van de warmtepomp hoger zijn. Het gemiddeld aantal inwoners per appartement komt overeen met Nederlandse situatie.

Voor de verschillende systemen is er gekeken of het economische rendabel is om warmte uit afvalwater te benutten. Met andere woorden leveren de besparingen in het aardgasverbruik genoeg op zodat het systeem zichzelf terug betaald in de toekomst. Het aanschaffen van een bijvoorbeeld een CV-installatie zijn kosten verboden en het systeem levert geen besparing op. Bij het bepalen van aanschaf van een installatie voor verwarming en warmwater moet per locatie goed bekeken worden wat de mogelijkheden zijn. Een combinatie van beide systemen kan een optie zijn. Een back-up systeem is dan aanwezig en het vermogen van beide systemen kunnen afgestemd worden. Ook de duurzaamheidsdoelstelling van een locatie kunnen meewegen in de beslissing van een aanschaf van een systeem.

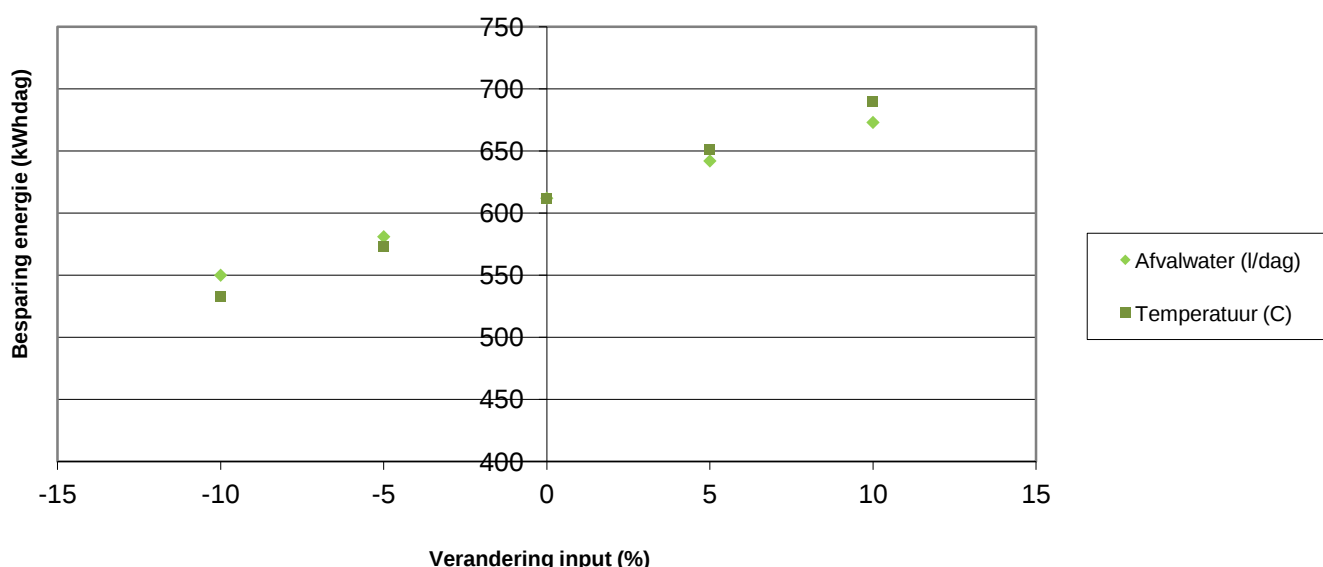
4.2 Gevoeligheidsanalyse

Op het niveau van een appartementencomplex zijn de parameters van de hoeveelheid afvalwater (l/dag per persoon) en de temperatuur van het afvalwater gevarieerd. De resultaten zijn weergegeven in tabel 4.7 en figuur 4.1. De uitgangswaarde is aangegeven in de tabel. Deze waarde is met de aangegeven percentages aangepast. In de tabel staan de resultaten van het model in besparing energie. De waarde bij 0% is het resultaat bij de uitgangswaarde van het FEKA-systeem bij 100 appartementen. De berekeningen van alle systemen op het niveau van een appartementencomplex zijn gebaseerd op dezelfde formule. Het soort systeem of aantal appartementen zijn niet van invloed op de gevoeligheidsanalyse.

Tabel 4.7 Resultaten gevoeligheidsanalyse besparing energie (kWh/dag)

Parameter	Uitgangswaarde	0%	-10%	-5%	+5%	+10%
Hoeveelheid afvalwater (l/dag)	124	612	550	581	642	673
Temperatuur afvalwater (°C)	23	612	533	573	651	690

Figuur 4.1 Resultaten gevoeligheidsanalyse besparing energie (kWh/dag)



In tabel 4.8 wordt de spreiding in percentages van de resultaten van het model weergegeven.

Tabel 4.8 Spreiding resultaten besparing energie (kWh/dag)

Parameter	Uitgangswaarde	0%	-10%	-5%	+5%	+10%
Hoeveelheid afvalwater (l/dag)	124	0	-10%	-5%	5%	10%
Temperatuur afvalwater (°C)	23	0	-13%	-6%	6%	13%

Het verschil in percentage tussen invoerparameter en het modelresultaat is voor de hoeveelheid afvalwater gelijk. Voor de temperatuur van het afvalwater is het resultaat ten

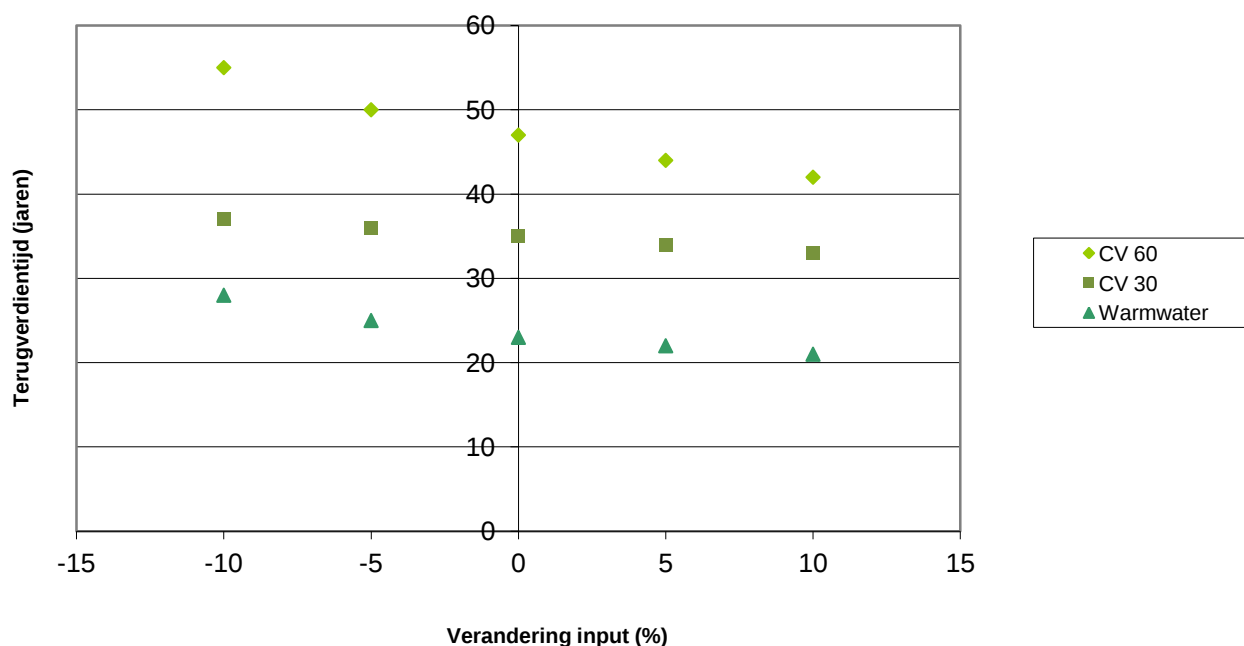
opzicht van de 0% iets groter dan de verandering van de invoergegevens. Er zijn geen grote uitschieters in de modelresultaten ten opzichte van de invoerparameters.

Op het niveau van een appartementencomplex is ook de parameter COP gevarieerd. De resultaten van het model (terugverdientijd) bij het variëren van de COP van de warmtepomp staan weergegeven in tabel 4.9 en in figuur 4.2.

Tabel 4.9 Resultaten gevoeligheidsanalyse terugverdientijd (jaren)

Parameter	Uitgangswaarde	0%	-10%	-5%	+5%	+10%
Warmwater	4	23	28	25	22	21
COP 60	4	47	55	50	44	42
COP 30	5.5	35	37	36	34	33

Figuur 4.2 Resultaten gevoeligheidsanalyse terugverdientijd (jaren)



In tabel 4.10 wordt de spreiding in percentages weergegeven van de resultaten van het model.

Tabel 4.10 Spreiding resultaten terugverdientijd (jaren)

Parameter	Uitgangswaarde	0%	-10%	-5%	+5%	+10%
Warmwater	4	0	-22%	-9%	4%	9%
COP 60	4	0	-17%	-6%	6%	11%
COP 30	5.5	0	-6%	-3%	3%	6%

Voor een warmtepomp voor warmwater en verwarming met COP 60 °C is het resultaat ten opzicht van de 0% groter dan de verandering van invoergegevens. Voornamelijk bij een verandering van de invoerparameter met -10%. Een kleinere COP heeft invloed op de

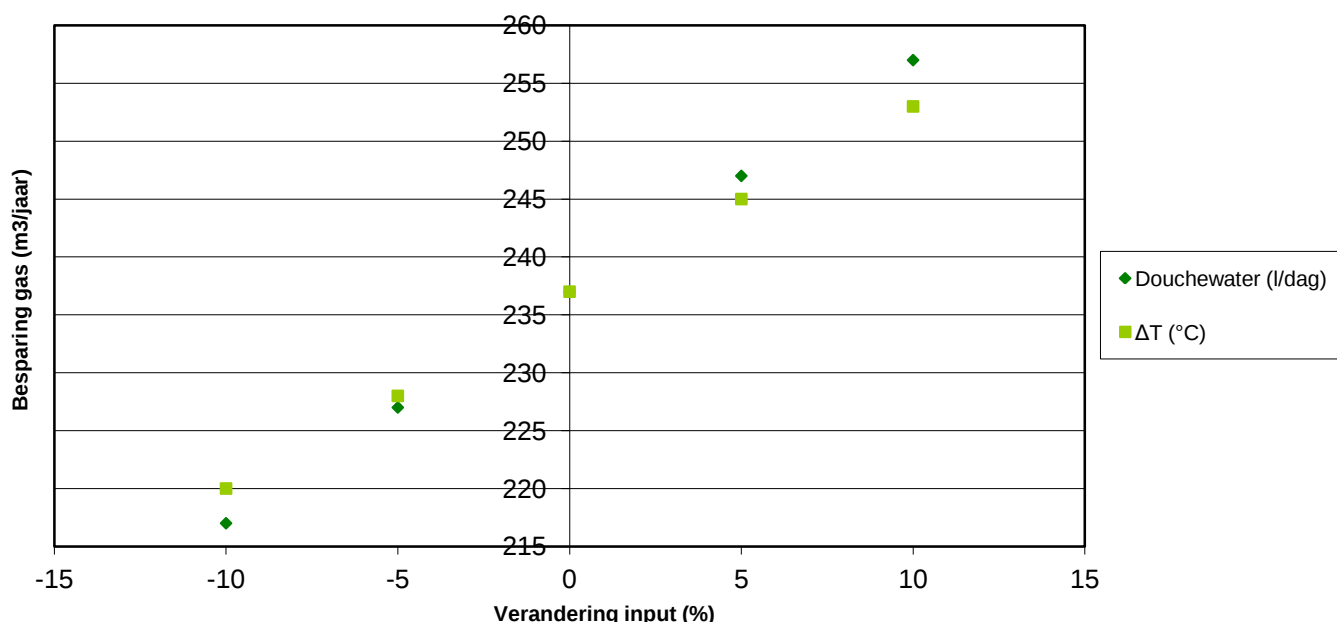
terugverdiëntijd. Hiermee moet rekening gehouden worden bij de systemen van KASAG met een COP van 3 voor warmwater en verwarming 60 °C. Het verschil in percentage tussen invoerparameter en modelresultaat voor de COP 30 is kleiner.

Voor de berekeningen voor een douchewarmtewisselaar (woningniveau) worden de invoerparameters van de hoeveelheid douchewater per persoon per dag en de ΔT (°C) gevarieerd. De resultaten van de modelresultaten in besparing gas staan weergegeven in tabel 4.11 en figuur 4.3. De waarde bij 0% is het resultaat bij de uitgangswaarde van vier appartementen met 2,36 bewoners per appartement.

Tabel 4.11 Resultaten gevoeligheidsanalyse besparing gas (m³/jaar)

Parameter	Uitgangswaarde	0%	-10%	-5%	+5%	+10%
Hoeveelheid afvalwater (l/dag)	49,8	234	214	224	244	254
ΔT (°C)	8,75	234	217	226	242	256

Figuur 4.3 Resultaten gevoeligheidsanalyse op woningniveau



In tabel 4.12 wordt de spreiding in percentages weergegeven van de resultaten van het model.

Tabel 4.12 Spreiding resultaten besparing gas (m³/jaar)

Parameter	Uitgangswaarde	0%	-10%	-5%	+5%	+10%
Hoeveelheid afvalwater (l/dag)	49,8	0	-8,6%	-4,3%	4,3%	8,6%
ΔT (°C)	8,75	0	-7,26%	-3,4%	3,2%	9,4%

Voor de hoeveelheid afvalwater en ΔT ligt het resultaat ten opzicht van de 0% iets lager dan de verandering van invoergegevens. Er zijn geen grote uitschieters in de modelresultaten ten opzichte van de invoerparameters.

5 Conclusie en aanbevelingen

Voor veel organisaties en de overheid is duurzaamheid, het beperken van de CO₂-uitstoot, energiebesparing en dus kostenbesparing een speerpunt. Een van de mogelijkheden om deze duurzaamheid doelstellingen te realiseren is het beperken van de energie-inkoop door het terugwinnen van energie uit het afvalwater voor een appartementencomplex. Het voordeel hiervan is dat de energie direct weer benut kan worden door de locatie zelf.

Het doel van het onderzoek is inzicht te krijgen wanneer en in welke situatie het haalbaar is om energie uit het afvalwater terug te winnen binnen een appartementencomplex. De centrale onderzoeksvraag is:

Wanneer wordt het toepassen van warmteterugwinsysteem voor afvalwater binnen een appartementencomplex economisch en energie technisch haalbaar?

5.1 Conclusie

Om de onderzoeksvraag te kunnen beantwoorden is een inventarisatie gemaakt van beschikbare systemen om de thermische energie uit het afvalwater terug te kunnen winnen. Voor een appartementencomplex is gekozen om op het niveau van het appartementencomplex (centraal) en op woningniveau de mogelijkheden te bestuderen. Het voordeel van het terugwinnen van energie binnen een appartementencomplex is dat waar het afvalwater wordt geproduceerd ook de locatie is waar de thermische energie wordt toegepast. De energieverlies door transport is hierdoor beperkt.

Op het niveau van een appartementencomplex is het systeem van FEKA, KASAG_{TANK} en KASAG_{DOUBLE} beschreven. Op woningniveau is een douchewarmtewisselaar bestudeerd. Informatie over de vier systemen is verzameld. De informatie van de systemen is gebruikt voor de invoer van het model.

Uit de resultaten van het model blijkt dat op het niveau van een appartementencomplex de investeringskosten hoog zijn. Hierdoor zijn de terugverdientijden langer dan de levensduur van een warmtepomp. Op basis van de resultaten kan gesteld worden dat met de huidige energieprijzen en de gekozen grootte van de appartementencomplex het niet economisch rendabel is om een centraal systeem voor het terugwinnen van energie uit afvalwater aan te schaffen. De systemen dragen wel bij aan een beperking van de CO₂ emissie. Het FEKA-systeem kan een reductie van de CO₂ emissie van circa 45% gerealiseerd worden voor het warmwaterverbruik.

Op het niveau van een woning met een gemiddeld aantal personen (2,36 per woning) zijn de terugverdientijd voor een douchewarmtewisselaar korter dan de levensduur van de warmtewisselaar. De investeringskosten voor de aanschaf van een douchewarmtewisselaar zijn gering. Daar staat tegenover dat de besparing in gasverbruik en CO₂ emissie lager is.

Voor het terugwinnen van energie geldt hoe meer afvalwater beschikbaar is hoe hoger het rendement. Warmtepompen zijn voor kleine afnemers relatief kostbaar. De kosten nemen af

bij toenemende schaalgrote. Globaal kan gesteld worden dat de terugverdientijd sterk terugloopt bij toenemende schaalgrote als er voldoende afvalwater, en dus thermische energie, beschikbaar is. Op een locatie moet een grote hoeveelheid afvalwater, circa 30.000 liter/dag, beschikbaar zijn wil het aanschaffen van het FEKA-systeem economisch haalbaar zijn. De ontwikkeling van de energieprijzen is moeilijk te voorspellen. Als de energieprijzen blijven stijgen dan lopen de terugverdientijden terug en zullen de systemen rendabel worden.

Het terugwinnen van energie uit het afvalwater is, zeker in de toekomst met stijgende energieprijzen, een goede mogelijkheid om bij te dragen aan de duurzaamheidsdoelstelling voor een stad als Gent. Het kan bijdragen in het verlagen van de energievraag (stap 1 in de trias energetica). Het voordeel van het terugwinnen van energie binnen een appartementencomplex is dat de energie direct weer benut kan worden op de locatie zelf. Het installeren van een douchewarmtewisselaar op woning is relatief goedkoop en relatief gemakkelijk. Voor het terugwinnen van energie op een centrale plaats binnen een appartementencomplex moeten rekening gehouden worden met hoge investeringskosten en er moet voldoende afvalwater beschikbaar zijn. Bij deze afweging kan de grotere reductie in CO₂ emissie positief meewegen.

5.2 Aanbevelingen

De resultaten van dit onderzoek geven een algemene beeld van de mogelijkheden voor het hergebruiken van thermische energie uit het afvalwater voor een appartementencomplex. Op basis van de resultaten van het model kan bepaald worden of een locatie in theorie geschikt is voor het terugwinnen van deze energie.

Voor een specifieke locatie zal een haalbaarheidsstudie moeten worden uitgevoerd. Of systemen rendabel zijn is sterk afhankelijk van de locatie en situatie. Dit is afhankelijk van het gebruik van de gebouw, type bewoners van een gebouw, de hoeveelheid afvalwater en de aanschafkosten van de installatie. Voor een specifieke locatie moeten deze data verzameld worden. De kosten en de dimensie van de systemen kunnen bij de leveranciers opgevraagd worden. Hierdoor kan een gedetailleerdere analyse van de mogelijkheden voor het benutten van thermische energie uit afvalwater uitgevoerd worden.

Om de aannames in het model en de gegevens van de leveranciers te controleren is aanvullend onderzoek wenselijk. Bij een locatie waar een systeem is geïnstalleerd kunnen data verzamelen worden zoals de hoeveelheid afvalwater, de temperatuur van het afvalwater maar ook gekeken worden naar de invloed van het type bewoners (gezinnen met kinderen of tweeverdieners). Daarnaast kan ook onderzoek gedaan worden naar de werkelijke rendementen van de warmtewisselaar en de warmtepomp ook gedurende lange tijd. Met deze gegevens kan bepaald worden wat de invloed is van de vervuiling of de biofilm op de warmtewisselaar op het rendement. Aan de hand van deze gegevens kunnen de werkelijke besparingen bepaald worden.

Voor de Nederland zou het interessant zijn om de mogelijkheden van een gaswarmtepomp nader te bestuderen vanwege de hoge kosten voor elektriciteit in Nederland. Ook locaties waar veel (warm) water wordt gebruikt zoals hotels, ziekenhuizen, wasserijen, zwembaden kunnen interessante locaties voor het terugwinnen van energie zijn.

Indien de interesse gaat toenemen voor het terugwinnen van energie op een centrale locatie binnen een gebouw zal een bedrijf gezocht moeten worden in België of Nederland die warmtewisselaars met een grote capaciteit kunnen ontwikkelen en produceren.

Literatuur

Agentschap NL. (2012). *Kengetallen CO₂ besparing*.

<http://www.agentschapnl.nl/onderwerp/kentallen-co2-besparing>. (Geraadpleegd op 26 oktober, 2012).

Agentschap NL (2012). *Infoblad Trias Energetica en energieneutraal bouwen*.

Publicatienummer: 2FLOK1207.

<http://www.agentschapnl.nl/sites/default/files/bijlagen/Infoblad%20Trias%20Energetica%20en%20energieneutraal%20bouwen%20-%20mei'12.pdf>. Geraadpleegd op 1-6-2013.

Aerts, L., Brauw, H. de & Burgstaller, M. (2013). *Kortopdracht Energierecuperatie stad Gent*. Leuven: Tauw.

Binas (2004; Vijfde druk). *Informatieboek voor natuurwetenschappen en wiskunde*.

Groningen/Houten: Wolters Noordhoff.

Blom, J.J., Telkamp, P., Sukkar, G.F.J. & Wit, G.J. de. (2010). *Energie in de waterketen*.

STOWA Rapport 35. Amersfoort: Stichting Toegepaste Onderzoek Waterbeheer (STOWA).

Boot, H., Nies, J., Verschoor, M.J.E. & de Wit, J.B. (1998). *Handboek Industriële warmtepompen*. Deventer: Kluwer techniek.

Bosatlas (2012). *De Bosatlas van de Energie*. Groningen: Noordhoff Atlasproducties.

Bries (2009). *2^e generatie douchewarmtewisselaar*.

<http://www.brieswaterenenergie.nl/dubbelwandigeWTW.html>. Geraadpleegd op 5-4-2013.

Bries (2005). *BRIES dubbelwandige douche WTW – Verdraaid goed*.

<http://www.bwtconsultancyweert.nl/downloads/briesdubbelwandigedouchewtw.uitgebreidebrochur.pdf> Geraadpleegd op 5-4-2013.

Dutch solar systems (2012). *Werking van een douchewarmtewisselaar*.

http://www.dutchsolarsystems.com/douche_wtw/werking.php Geraadpleegd op 5-10-2012

Energieleveranciers (2013). *Verbruik energie per type woning*.

<http://www.energieleveranciers.nl/energie/gemiddeld-energieverbruik> . Geraadpleegd op 29-3-2013

FEKA (2009). *Energie aus Abwasser; Lehrmittel – System FEKA*.

http://www.FEKA.ch/pdf/FEKA_Energie_aus_Abwasser.pdf Geraadpleegd op 9-11-2012.

Feijen, J.J. (1987). *Inleiding tot de warmtetechniek*. Baarn: HBuitgevers.

Groene-energiewinkel (2013). *Kosten douchewarmtewisselaar*. <http://www.groene-energiewinkel.nl/Douche+warmte-terugwinning/Douche-pijp+warmtewisselaar/>. Geraadpleegd op 5-4-2013.

Holman, J.P. (2002). *Heat transfer*. Singapore: McGraw-Hill Book Company.

Industrial heat pumps (2013). *De werking van een warmtepomp*. <http://www.industrialheatpumps.nl/nl/techniek/>. Geraadpleegd op 5-4-2013.

KASAG (z.j.). *Wärmetauscherlösungen für die Energienutzung aus Wasser, Abwasser und Prozesswärme*. <http://www.KASAG.ch/LinkClick.aspx?fileticket=Vd6Z14kaXi0%3d&tabid=94&language=de-CH> Geraadpleegd op 30-11-2012.

Kluck, J., van den Bulk, J., Flaming, T. & de Brauw, H. (2011). *Thermische Energie uit de afvalketen in Zwolle*. Amersfoort: STOWA (Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer).

Milieucentrale (z.j.). *CO₂ uitstoot per huishouden*. <http://www.milieucentraal.nl/themas/klimaat-en-milieu Problemen/klimaatverandering/klimaatcompensatie/bereken-uw-co2-uitstoot> Geraadpleegd op 9-5-2013

Milieucentrale (z.j.). *Prijzen elektriciteit en aardgas voor een huishouden*. <http://www.milieucentraal.nl/themas/energie-besparen/energieprijzen> Geraadpleegd op 9-5-2013

MUSIC (Mitigation in Urban areas; Solutions for Innovative Cities) (2013). *Informatie over MUSIC project*. www.themusicproject.eu Geraadpleegd op 8-3-2013

Organisatie voor duurzame Energie Vlaanderen (ODE) (2009). *Warmtepompen voor woningverwarming*. D/2009/3241/023. <http://publicaties.vlaanderen.be/docfolder/14083/warmtepompen.pdf> Geraadpleegd op 20-5-2013

Scheffer, W. (2002). *Warmteterugwinning uit douchewater*. Intech pp 80 – 83.

Wikipedia (2013) *Contante waarde*. http://nl.wikipedia.org/wiki/Contante_waarde. Geraadpleegd op 29-3-2013.

WGS (Waterschap Groot Salland) (z.j.) *Afbeelding van het terugwinnen van energie uit afvalwater binnen een gebouw*. http://www.wgs.nl/publish/pages/10763/illustraties_deelprojecten_9_-_waterboard_groot_salland_new_sanitation_concepts_in_the_city_of_deventer_def.jpg Geraadpleegd op 3-6-2013