

MASTER

Haalbaar en betaalbaar?

raamwerk voor haalbaarheidsstudies naar bio-energie in de gebouwde omgeving

Guldemon, A.M.

Award date:
2007

[Link to publication](#)

Disclaimer

This document contains a student thesis (bachelor's or master's), as authored by a student at Eindhoven University of Technology. Student theses are made available in the TU/e repository upon obtaining the required degree. The grade received is not published on the document as presented in the repository. The required complexity or quality of research of student theses may vary by program, and the required minimum study period may vary in duration.

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain

Haalbaar en Betaalbaar?

*Raamwerk voor haalbaarheidsstudies naar bio-energie in de
gebouwde omgeving*



Marte Guldemond
Maart 2007

Haalbaar en Betaalbaar?

*Raamwerk voor haalbaarheidsstudies naar bio-energie in de
gebouwde omgeving*

**Afstudeerrapport Marte Guldemon
Maart 2007**

Faculteit: Technologie Management
Studie: Technische Bedrijfskunde
Technische Universiteit Eindhoven

Afstudeerbedrijf: Cumae B.V.

Eerste begeleider TU/e: dr. ir. Han van Kasteren
Tweede begeleider TU/e: dr. ir. Fred Lambert

Begeleiders Cumae: ing. Frans Brüning
ir. Maarten van Lange

Abstract

This report describes the results of a graduation project that has been carried out for Cumae in Arnhem, the Netherlands. In this project a framework for feasibility research on sustainable energy in housing is designed. This framework discusses three options:

- biomass combustion and digestion for heat and electricity generation;
- insulation for energy saving;
- wind turbines and solar cells for electricity generation and solar boilers for heat generation.

As a tool a model has been developed to calculate the energy requirements, CO₂-savings and financial results for the different combinations.

Samenvatting

In dit rapport wordt een afstudeeronderzoek beschreven dat is uitgevoerd bij Cumae te Arnhem. Dit afstudeeronderzoek is het sluitstuk van de opleiding Technische Bedrijfskunde aan de Technische Universiteit Eindhoven.

Aanleiding onderzoek

Cumae is een ingenieursbureau gespecialiseerd in de bouw en de industrie. Momenteel wordt Cumae meestal vanaf het procesontwerp bij projecten betrokken. Graag zou Cumae meer frequent in de definitiefase van het proces betrokken raken. Daarvoor is meer kennis nodig over onderwerpen als haalbaarheidsstudies en economische evaluaties. Bovendien wil Cumae zich intensief op de opkomende markt van duurzame energie begeven en verwerft daarom expertise op dit gebied. Het betreft hierbij biomassa, zonne-energie, windenergie alsmede energiebesparing.

Opdrachtformulering

Analyse heeft geleid tot de volgende probleemstelling:

Er bestaat geen standaard methodiek voor het analyseren van de haalbaarheid van energie uit biomassa gekoppeld aan afnemers in woning- en bedrijventerreinen met gebouwgebonden duurzame energie. De vraag is op welke wijze deze standaard methodiek opgesteld kan worden.

Om antwoord te geven op deze probleemstelling zijn de volgende deelvragen geformuleerd:

- Wat is haalbaarheid en welke aspecten moeten hierbij in beschouwing worden genomen?
- Hoe wordt de energievraag van een wijk vastgesteld en hoe wordt aan deze vraag voldaan?
- Hoe kan duurzame energieopwekking worden toegepast in de gebouwde omgeving?
- Wat is biomassa en hoe kan deze omgezet worden in energie?
- Hoe kan de levering van energie en de afname door de gebruikers gemodelleerd worden in één model ter bepaling van de economische haalbaarheid?

Conclusies en aanbevelingen

Op de eerste plaats is onderzoek gedaan naar het begrip haalbaarheid. Haalbaarheid is opgedeeld in vijf aspecten: technische haalbaarheid, maatschappelijke haalbaarheid, milieuverdienste, economische haalbaarheid en bedrijfsspecifieke inpasbaarheid. Elk aspect is onderverdeeld in een aantal indicatoren die in tabel 2.1 (§2.3) weergegeven zijn. Om haalbaar te zijn moet een project op deze punten voldoende scores.

Het aspect economische haalbaarheid is verder uitgewerkt tot een rekenmodel waarbij door het invoeren van de gegevens van een wijk, de haalbaarheid van verschillende duurzame energieopties bepaald kan worden.

Uitgangspunt voor het ontwerp is de energievraag. De energievraag in de gebouwde omgeving bestaat uit drie verschillende onderdelen: warmtevraag voor ruimteverwarming, warmtevraag voor tapwaterverwarming en elektriciteitsvraag. Er zijn drie factoren die de energievraag beïnvloeden: het gebruikersgedrag, de installatiekenmerken en de bouwkundige kenmerken. Uitgaande van een gemiddeld gebruikersgedrag kan aan de hand van de installatiekenmerken, de bouwkundige kenmerken en de samenstelling van een wijk de gemiddelde energievraag bepaald worden. In dit onderzoek wordt de energievraag in een referentiesituatie (nieuwbouwoningen met $EPC \leq 0,8$ en HR107 ketel) vergeleken met een

nieuwe situatie waarin een biomassacentrale warmte levert aan de gebouwen en er gekozen kan worden voor extra isolatie, een zonneboiler, zonnecellen en een stadswindturbine.

Aan de hand van de gegevens waaruit het model is opgebouwd kunnen er een aantal conclusies getrokken worden:

- Doordat er sprake is van nieuwbouwwoningen met een lage EPC (<0,8), is het warmteverbruik voor ruimteverwarming relatief laag ten opzichte van het warmteverbruik voor warm tapwater. De vraag naar warm tapwater is constant verdeeld over het jaar, de vraag naar ruimteverwarming is daarentegen seizoensafhankelijk. Naarmate het aandeel warm tapwater hoger wordt in verhouding tot het aandeel ruimteverwarming, wordt de totale warmtevraag gelijkmatiger verdeeld over het jaar. Dit is enerzijds erg gunstig, aangezien de biomassacentrale zo een groot gedeelte van de totale warmtevraag kan dekken zonder dat er veel warmte verloren gaat. Door het toevoegen van utiliteit of industrie met een hoog, constant warmteverbruik, kan dit effect verder versterkt worden: de capaciteit van de biomassacentrale kan worden vergroot én zo effectief mogelijk worden benut. Dit leidt tot schaalvoordelen. Anderzijds worden de schaalvoordelen gedeeltelijk te niet gedaan doordat de energievraag lager is bij een lagere EPC, waardoor een groter aantal aangesloten woningen nodig is om een hoge capaciteit te verantwoorden.
- De haalbaarheid van de biomassacentrale is afhankelijk van veel factoren. Zoals hierboven beschreven speelt de energievraag en de spreiding hiervan een grote rol. Daarnaast wordt een groot gedeelte van de totale kosten veroorzaakt door de distributiekosten. Hoe dichter een biomassacentrale bij een wijk komt te staan, hoe lager de distributiekosten en des te haalbaarder de centrale wordt. Een ander belangrijk aspect heeft betrekking op de opbrengsten uit de warmte en elektriciteit. Als de prijzen voor gas en elektriciteit stijgen, zullen de opbrengsten van de biomassacentrale stijgen. Met behulp van het model kan berekend worden onder welke omstandigheden de centrale economisch haalbaar is.
- Het toevoegen van extra isolatie aan de woningen leidt tot een beperking van de vraag naar ruimteverwarming. Dit heeft wederom een gunstig effect op de spreiding van de warmtevraag over het jaar. Bovendien heeft energiebesparing de hoogste prioriteit volgens de Trias Energetica. Bij de referentiewoningen met EPC<0,8 zijn er al veel isolatiemaatregelen toegepast. Er kan echter nog extra isolatie worden toegevoegd bij gevel, vloer, dak en beglazing. Uit de berekeningen die worden uitgevoerd in het model blijkt dat investeringen in beglazing met een betere isolatie binnen twee tot zes jaar terug verdiend worden. Investeringen in vloerisolatie worden binnen negen tot twaalf jaar terugverdiend. Gevelisolatie is minder rendabel: de terugverdientijd ligt tussen de veertien en twintig jaar. Dakisolatie verdient zich pas na 24 tot 28 jaar terug. Bij deze terugverdientijden moet er rekening worden gehouden met het feit dat de woningen al erg goed geïsoleerd zijn, waardoor de kosten van het toevoegen van extra isolatie hoog zijn in verhouding tot de energieopbrengsten die het oplevert.
- Zonneboilers kunnen opgesplitst worden in standaard zonneboilers en zonneboilercombi's. Standaard zonneboilers leveren warmte voor warm tapwater. Zonneboilercombi's leveren naast warmte voor warm tapwater ook warmte voor ruimteverwarming. De terugverdientijd van een standaard zonneboiler is 25 jaar en van een zonneboilercombi 30 jaar. Behalve de lange terugverdientijd heeft de zonneboilercombi als nadeel dat het warmte levert op momenten dat de vraag naar ruimteverwarming juist laag is. Bovendien heeft het toevoegen van zonneboilers aan de gebouwen een negatieve invloed op de haalbaarheid van de biomassacentrale: de

warmtevraag aan de biomassacentrale daalt, waardoor de schaalvoordelen van de centrale afnemen.

- Zonnecellen leveren elektriciteit. De investeringskosten van zonnecellen zijn nog erg hoog en de opbrengsten zijn in Nederland betrekkelijk gering. De terugverdientijd ligt dan ook rond de vijftig jaar. De verwachting is dat door de ontwikkeling van de techniek, zonnecellen in de toekomst goedkoper zullen worden en de terugverdientijd zal dalen.
- Voor de stadsturbine geldt dat de opbrengsten sterk afhankelijk zijn van de locatie en de hoogte van plaatsing. In het meest gunstige geval (hoogte 100 m) is de terugverdientijd van de turbine 21 jaar. Bij lagere plaatsing en andere locaties neemt de terugverdientijd sterk toe.

Naar aanleiding van dit onderzoek worden een aantal aanbevelingen gedaan:

- In hoofdstuk 2 van dit rapport is onderzoek gedaan naar het begrip haalbaarheid. Daarbij is een checklist opgesteld van de haalbaarheidscriteria voor duurzame energievoorzieningen. Het is aan te bevelen de criteria van de checklist diepgaander te onderzoeken. Bijvoorbeeld: onder welke omstandigheden scoort een aspect negatief op haalbaarheid of op welke manier kan men invloed uitoefenen op de aspecten om de haalbaarheid te verhogen.
- In het kwantitatieve model is als gebiedsgebonden energievoorziening een biomassa verbranding- of vergistinginstallatie opgenomen. Het model kan verder worden uitgewerkt door toevoeging van andere energievoorzieningen, zoals warmte/koude opslag in combinatie met een warmtepomp, aardwarmte of andere biomassa conversietechnieken. Op deze manier kunnen verschillende energievoorzieningen tegen elkaar worden afgewogen en kan hun onderlinge samenhang worden geoptimaliseerd.
- In dit onderzoek is de energievraag opgedeeld in elektriciteit, warmte voor ruimteverwarming en warmte voor warm tapwater. Tegenwoordig neemt de vraag naar koeling sterk toe. Het is aan te bevelen om de vraag naar koeling en de voorziening hierin toe te voegen aan het model.
- De energievraag van de wijk wordt berekend met behulp van graaddagen. Deze graaddagen worden bepaald aan de hand van de gemiddelde temperatuur op een dag. Dat betekent dat hiermee ook het totale energieverbruik van een dag verkregen wordt en niet de piekvraag. Door toevoeging van een warmteopslagtank kan het verschil in piek- en dalvraag van een dag opgevangen worden. Ook het distributie systeem zelf kan als buffer dienen, maar dit is afhankelijk van de grootte van het systeem en de spreiding in de dagelijkse warmtevraag. Het is daarom aan te bevelen om een model te ontwikkelen waarbij de daadwerkelijke piekvraag en spreiding in de dagelijkse warmtevraag bepaald kunnen worden.
- De milieuverdienste kan worden gemeten met behulp van een Levens Cyclus Analyse. In het rekenmodel is slechts uitgegaan van de CO₂ emissie besparingen die voortvloeien uit de energiebesparingen en duurzame maatregelen om te bepalen wat de milieuverdienste van de gekozen maatregelen is. Het is aan te bevelen om de CO₂ uitstoot over de gehele keten (inclusief winning biomassa, transport, voorbehandeling etc.) in het model te berekenen en dit te vergelijken met de CO₂ uitstoot over de gehele keten bij het gebruik van fossiele brandstoffen.

- In dit rapport wordt uitgegaan van een gemiddeld gebruikersgedrag. Het is echter niet duidelijk over welke perioden dit gemiddelde is bepaald. De laatste jaren kan het gemiddelde gebruikersgedrag veranderd zijn door bijvoorbeeld het toegenomen gebruik van airconditioning. Het is daarom aan te bevelen om te onderzoeken of het gemiddelde gebruikersgedrag dat in dit onderzoek gebruikt wordt representatief is voor het gemiddelde gebruikersgedrag van de laatste jaren.

Voorwoord

Dit rapport is het resultaat van mijn afstudeeronderzoek van de opleiding Technische Bedrijfskunde aan de Technische Universiteit Eindhoven. Dit onderzoek heb ik uitgevoerd bij Cumae tussen juli 2006 en maart 2007.

Mijn onderzoek is erg prettig en soepel verlopen dankzij de steun van een aantal mensen. Allereerst Pol Knops die mij wegwijs heeft gemaakt in de wereld van de duurzame energie. Pol, bedankt voor alle tijd die je vrij hebt gemaakt om mijn talloze vragen te beantwoorden. Ook wil ik mijn bedrijfsbegeleiders Frans Brüning en Maarten van Lange bedanken voor de vrijheid die jullie mij gegeven hebben om deze opdracht zelfstandig uit te werken. Ik ben erg dankbaar voor het vertrouwen dat jullie in mij gesteld hebben. Ik hoop dat het resultaat aan jullie verwachtingen voldoet! Ook bedank ik Han van Kasteren en Fred Lambert, mijn TU begeleiders, voor jullie begeleiding en kritische blik, maar ook voor jullie enthousiasme over de gehele breedte van het onderwerp. Tenslotte wil ik graag mijn kamergenoten Hans, Edwin en Gerrit Jan bedanken. Op de eerste plaats voor jullie inzichten en hulp bij het oplossen van problemen en het gebruik van Excel, maar natuurlijk ook voor de gezellige sfeer en de koekjes bij de koffie!

Ik hoop dat dit rapport inzicht verschaft in de haalbaarheid van duurzame energie in de gebouwde omgeving. Voor mij was het uitvoeren van dit project erg interessant en leerzaam, ik kijk ernaar uit om de opgedane kennis en vaardigheden als technisch bedrijfskundig ingenieur in de praktijk te gaan brengen!

Marte Guldemond
Maart 2007

Inhoudsopgave

Abstract	5
Samenvatting	6
Voorwoord	11
Hoofdstuk 1 Inleiding	15
1.1 Achtergrond.....	15
1.2 Overheidsbeleid.....	15
1.3 Initiële opdracht.....	16
1.4 Probleemformulering	16
1.5 Onderzoeksmodel.....	17
1.6 Oriëntatie duurzame energiehuishouding.....	18
1.6.1 Trias Energetica.....	18
1.6.2 Ladder van Lansink.....	19
Hoofdstuk 2 Analyse Haalbaarheid	20
2.1 TNO-denkmodel.....	20
2.2 Haalbaarheidsaspecten	20
2.2.1 Technische haalbaarheid	21
2.2.2 Maatschappelijke haalbaarheid	22
2.2.3 Economische haalbaarheid.....	22
2.2.4 Milieuverdienste.....	23
2.2.5 Bedrijfsspecifieke inpasbaarheid.....	24
2.3 Haalbaarheid checklist	25
2.4 Multi Criteria Analyse.....	26
2.5 Conclusie.....	27
Hoofdstuk 3 Analyse Energievraag Gebouwde Omgeving	28
3.1 Hoogte energievraag	28
3.2 Energielevering	29
3.2.1 Gemeenschappelijke energievoorziening.....	30
3.2.2 Energiebesparing en gebouwgebonden duurzame energievoorzieningen	33
3.3 Conclusie.....	33
Hoofdstuk 4 Analyse Duurzaam Bouwen	34
4.1 Inleiding duurzaam bouwen	34
4.2 Overheid en duurzaam bouwen.....	34
4.3 Duurzaam bouwen en energie	35
4.3.1 Energiebesparing.....	36
4.3.2 Gebouwgebonden duurzame energie	37
4.4 Conclusie.....	38
Hoofdstuk 5 Analyse Biomassa en Bio-energie	39
5.1 Wat is biomassa?.....	39
5.2 Wettelijke definitie biomassa.....	39
5.3 Energie uit biomassa	40
5.4 Conversietechnieken	42
5.5 Keuze conversietechnieken	43
5.6 Energielevering door biomassacentrale	43

5.7	Warmtenet	44
5.8	Biomassa kentallen	45
5.8.1	Vochtgehalte	45
5.8.2	Asgehalte	45
5.8.3	Verbrandingswaarde	45
5.8.4	Dichtheid	47
5.8.5	Energiedichtheid	47
5.9	Conclusie	47
Hoofdstuk 6 Ontwerp Kwantitatief Beslismodel		48
6.1	Uitgangspunten ontwerp	48
6.2	Energiebesparing	48
6.2.1	Kosten en opbrengsten isolatie	48
6.2.2	Kosten en opbrengsten ventilatie	49
6.3	Gebouwgebonden duurzame energieopties	49
6.3.1	Zonne-energie	49
6.3.2	Kleinschalige windturbines	50
6.4	Biomassacentrale	51
6.4.1	Vermogen biomassacentrale	51
6.4.2	Warmteopbrengsten	52
6.4.3	Elektriciteitsopbrengsten	53
6.4.4	Kosten biomassacentrale	54
6.5	Emissies	54
6.6	Conclusie	54
Hoofdstuk 7 Testcase Meerhoven		55
7.1	Wijkgegevens	55
7.2	Biomassacentrale	55
7.3	Resultaat uit Model	55
7.4	Evaluatie testcase	59
Hoofdstuk 8 Conclusies en Aanbevelingen		60
8.1	Conclusies	60
8.2	Aanbevelingen	61
Nabeschuwing		63
Referenties		64
Eenheden en afkortingen		68
Bijlage I	Bedrijfsbeschrijving	69
Bijlage II	Economische Haalbaarheid	71
Bijlage III	Kenmerken referentiewoningen	73
Bijlage IV	Graaddagen	75
Bijlage V	EPC en EPL	76
Bijlage VI	Berekening Warmteprijs	78
Bijlage VII	Kosten Biomassa	79
Bijlage VIII	Subsidies	90
Bijlage IX	Kosten extra isolatie	92
Bijlage X	Zonneboilers	93
Bijlage XI	Opbrengsten Turby	96

Hoofdstuk 1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Duurzame ontwikkeling staat tegenwoordig sterk in de belangstelling. Eén van de meest gebruikte definities van duurzame ontwikkeling is (Brundtland, 1987):

'Een economische-, sociale- en milieuontwikkeling die voorziet in de behoeften van de huidige generatie zonder daarbij de mogelijkheden van toekomstige generaties in gevaar te brengen om ook in hun behoeften te voorzien'.

Duurzame ontwikkeling is noodzakelijk voor de continuïteit van het menselijk leven op aarde. Door de stijgende behoeften van de mens is duurzame ontwikkeling in het gedrang gekomen. Het gebruik van energie uit fossiele brandstoffen (aardgas, aardolie, steenkool) draagt daar sterk aan bij. Als er geen maatregelen worden getroffen, zal de energiebehoefte de komende jaren sterk groeien door de toenemende welvaart en de groei van de bevolking. Het gebruik van fossiele brandstoffen leidt tot een toename van de concentratie koolstofdioxide (CO₂) in de atmosfeer, waardoor het broeikaseffect versterkt wordt. Daarom is het van belang dat energie in toenemende mate uit CO₂ neutrale bronnen wordt verkregen. In 1997 is in de Japanse stad Kyoto een verdrag opgesteld, het Kyoto-protocol, waarin de vermindering van de uitstoot van broeikasgassen wordt geregeld. In het protocol is vastgelegd om in de periode 2008-2012 de uitstoot met gemiddeld 5% te verminderen ten opzichte van het niveau in 1990. Het protocol is inmiddels door 164 landen ondertekend (waaronder de EU landen en Rusland), die samen meer dan 55% van de totale uitstoot veroorzaken. Helaas hebben de Verenigde Staten, die ook een groot aandeel in de broeikasgasuitstoot veroorzaken, zich tot op heden nog niet bij het protocol aangesloten. Wel hebben diverse staten en steden zich hieraan gecommitteerd.

1.2 Overheidsbeleid

De Nederlandse overheid heeft tot doel gesteld dat in 2020 10% van het Nederlands energieverbruik van duurzame oorsprong moet zijn (Ministerie Economische Zaken, 1997). Ook heeft Nederland in Europees verband afgesproken om in 2010 9% duurzaam opgewekte elektriciteit te gebruiken. Deze ambities komen voort uit de volgende drie hoofddoelstellingen:

1. **Reductie CO₂-emissie**
Duurzame energieopwekkingmethoden genereren nauwelijks extra CO₂-emissie, dit past binnen de Nederlandse Kyoto-doelstelling om CO₂-emissie te reduceren.
2. **Voorzieningszekerheid**
Fossiele brandstoffen zijn eindig en bovendien zijn de voorraden erg onevenwichtig verdeeld over de wereld. Voor Nederland, waar de fossiele brandstofvoorraden klein zijn geworden, leidt een meer divers arsenaal aan opwekkingsmethoden tot een verminderde afhankelijkheid van fossiele brandstoffen en van andere landen. Dit is gunstig voor de lange termijn voorzieningszekerheid.
3. **Vermindering milieubelasting**
Blijvende energiebronnen belasten in potentie het milieu minder dan fossiele brandstoffen.

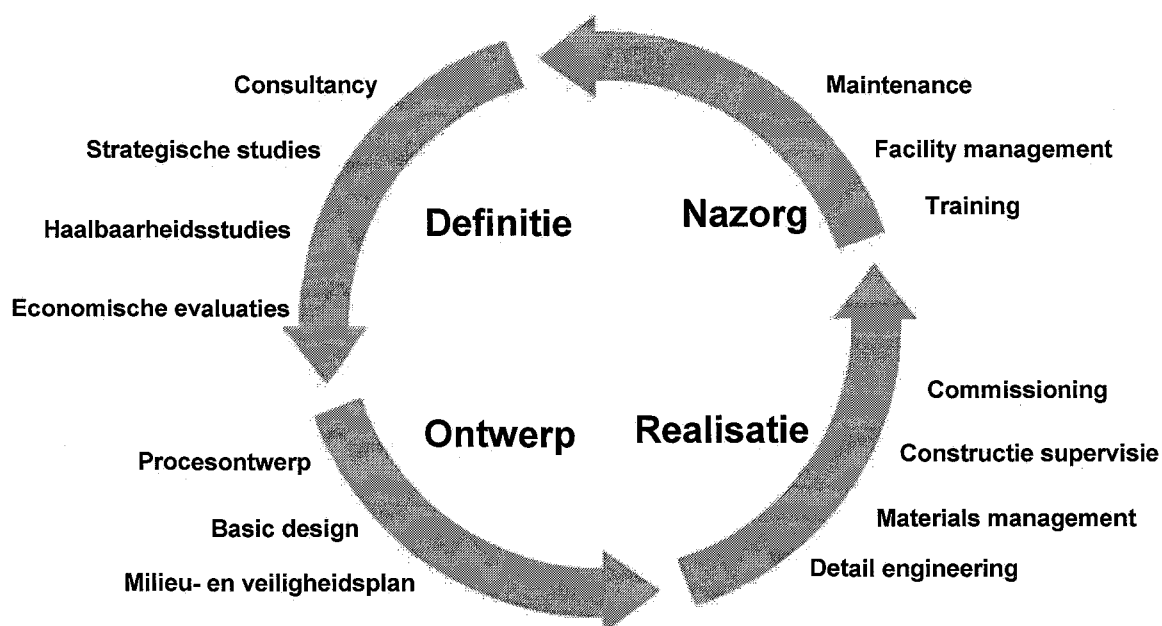
De genoemde doelstellingen voor duurzame energie zijn geen productiedoelstellingen maar zogeheten verbruiksdoelstellingen. Dit betekent bijvoorbeeld dat uit Duitsland geïmporteerde energie van duurzame oorsprong aan de genoemde doelstellingen bijdraagt. Ook investeringen in de opwekking van duurzame energie in het buitenland dragen aan de doelstelling bij. Toch is het streven van Economische Zaken (EZ) dat veruit het grootste deel ervan in Nederland wordt geproduceerd. Productie in Nederland waarborgt immers de voorzieningszekerheid en stimuleert de werkgelegenheid en technologieontwikkeling. Het feit

dat er op dit moment nog geen duidelijke internationale afspraken zijn over garanties van oorsprong voor duurzame elektriciteit draagt bij aan het streven om zoveel mogelijk duurzame energie in Nederland te produceren.

1.3 Initiële opdracht

Dit rapport beschrijft een onderzoek uitgevoerd bij Cumae. Cumae is een multidisciplinair projectmanagement- en ingenieursbureau op het gebied van bouw en industrie. Een uitgebreide bedrijfsbeschrijving is te vinden in bijlage I. Twee doelstellingen van Cumae hebben geleid tot dit onderzoek.

Op de eerste plaats wil Cumae in eerdere fasen bij projecten betrokken raken. De typische fasen van projecten waaraan Cumae meewerkt zijn in figuur 1.1 weergegeven. Momenteel wordt Cumae meestal vanaf het procesontwerp bij projecten betrokken. Graag zou Cumae meer frequent in de definitiefase van het proces betrokken raken. Daarvoor is meer kennis nodig over onderwerpen als haalbaarheidsstudies en economische evaluaties.



figuur 1.1: projectfasen (Cumae, 2006)

Op de tweede plaats wil Cumae zich intensief op de opkomende markt van duurzame energie begeven en verwerft daarom expertise op dit gebied.

Aan de hand van deze twee doelstellingen is de vraag gerezen een standaard model op te stellen waarmee de haalbaarheid van een duurzame energievoorziening gekoppeld aan afnemers op woning- en bedrijventerreinen kan worden bepaald. Enerzijds zal de productie en het gebruik van duurzame energie in beschouwing genomen moeten worden. Anderzijds is het duurzaam bouwen om de energievraag te beperken van belang.

1.4 Probleemformulering

In de initiële opdracht komt het begrip duurzame energievoorziening naar voren. Onder duurzame energievoorziening wordt een energievoorziening verstaan die het milieu minder belast en die een hogere voorzieningszekerheid heeft dan fossiele brandstoffen. Hierbij kan er onderscheid gemaakt worden tussen gebouwgebonden, gebiedsgebonden en gebieds-overstijgende voorzieningen. Voor Nederland zijn de volgende toepassingsmogelijkheden relevant (van den Berg, 2003):

tabel 1.1: duurzame energiebronnen en conversietechnieken

Gebouwgebonden	Gebiedsgebonden	Gebiedsoverstijgend
zonne-energie	biomassa	waterkracht
warmtepomp	warmte-koude opslag	windenergie
windenergie (kleine turbines)	aardwarmte	

Gebouwgebonden duurzame energie is duurzame energie die per gebouw afzonderlijk wordt opgewekt en daar in eerste instantie ook wordt gebruikt. Gebiedsgebonden duurzame energievoorzieningen worden op de locatie ontgonnen en de afzet overstijgt het gebouwniveau. Gebiedsoverstijgende duurzame energie wordt centraal opgewekt en vervolgens naar de gebruikers gedistribueerd. Aangezien deze opdracht op wijkniveau wordt uitgevoerd, worden de gebiedsoverstijgende bronnen buiten beschouwing gelaten.

Op wijkniveau zal er een keuze gemaakt moeten worden voor één van de gebiedsgebonden bronnen. Welke duurzame bronnen aantrekkelijk zijn voor de toekomst is afhankelijk van een aantal factoren (TDO, 2001):

- *Rentabiliteit*: welke duurzame energiebron is financieel-economisch het meest aantrekkelijk en zou in de toekomst economisch gezien kunnen concurreren met fossiele brandstoffen?
- *Ontwikkelingstijd*: welke technologie voor de opwekking van duurzame energie kan op korte termijn een bijdrage leveren aan de energievoorziening?
- *Potentieel*: welke duurzame bron kan een substantiële bijdrage leveren aan de toekomstige energievoorziening?

Op basis van bovenstaande factoren wordt de grootste bijdrage in Nederland in 2020 verwacht van biomassa (TDO, 2001). Daarom zal energie uit biomassa centraal staan in dit onderzoek. Dit zal in combinatie met gebouwgebonden energievoorzieningen gebeuren.

Probleemstelling:

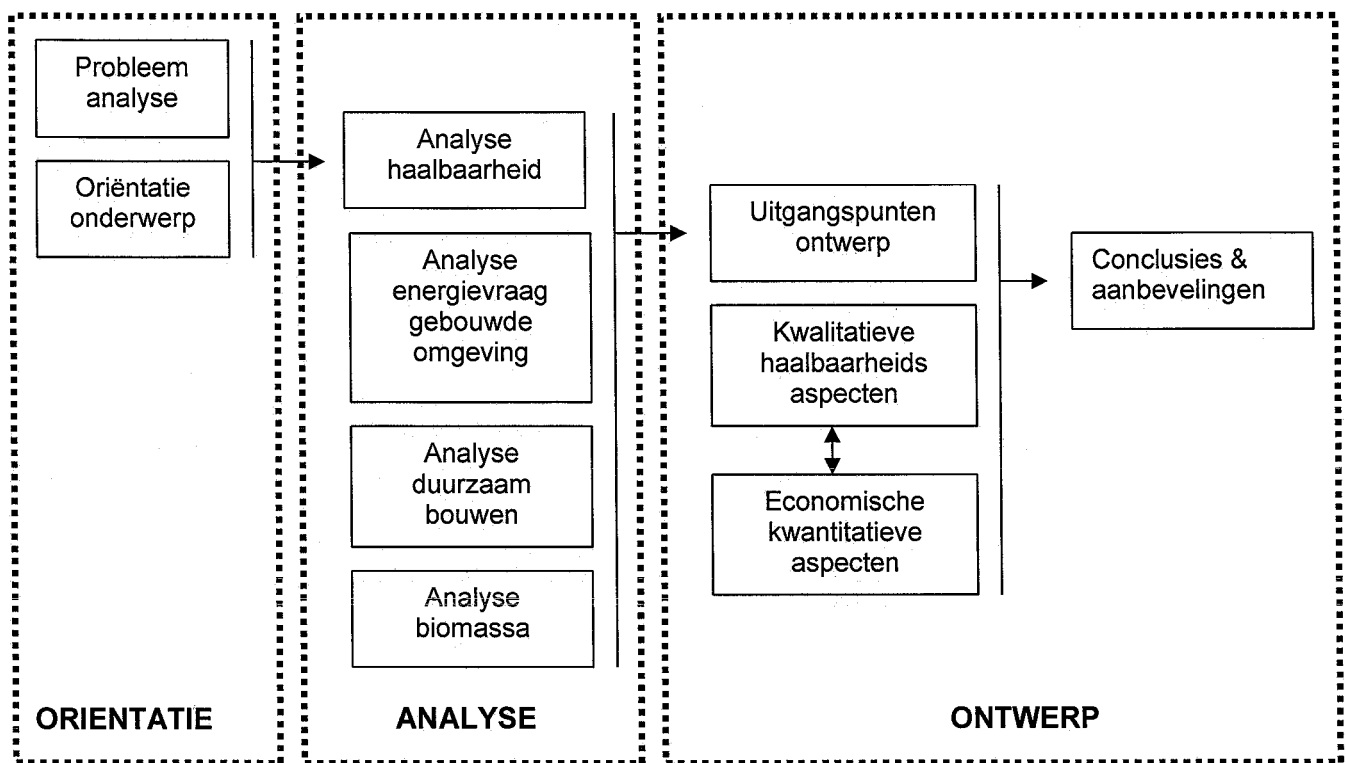
Er bestaat geen standaard methodiek voor het analyseren van de haalbaarheid van energie uit biomassa gekoppeld aan afnemers in woning- en bedrijventerreinen met gebouwgebonden duurzame energie. De vraag is op welke wijze deze standaard methodiek opgesteld kan worden.

Om antwoord te geven op deze probleemstelling zijn de volgende deelvragen geformuleerd:

- Wat is haalbaarheid en welke aspecten moeten hierbij in beschouwing worden genomen?
- Hoe wordt de energievraag van een wijk vastgesteld en hoe wordt aan deze vraag voldaan?
- Hoe kan duurzame energieopwekking worden toegepast in de gebouwde omgeving?
- Wat is biomassa en hoe kan deze omgezet worden in energie?
- Hoe kan de levering van energie en de afname door de gebruikers gemodelleerd worden in één model ter bepaling van de economische haalbaarheid?

1.5 Onderzoeksmodel

De opzet van dit onderzoek is in onderstaande figuur weergegeven, gebaseerd op de methodiek van Verschuren en Doorewaard (2000). Hierin zijn de verschillende fasen van dit onderzoek aangeduid:



figuur 1.2: onderzoeksmodel

De hoofdstuk indeling van dit rapport is analoog aan het onderzoeksmodel. In dit eerste hoofdstuk is de probleemanalyse uitgebreid aan bod gekomen. In §1.6 wordt een oriëntatie op het onderwerp duurzame energiehuishouding beschreven. In hoofdstuk 2, 3, 4 en 5 worden respectievelijk de begrippen haalbaarheid, de energievraag in de gebouwde omgeving, duurzaam bouwen en biomassa geanalyseerd. Hoofdstuk 6 beschrijft de economische kwantitatieve aspecten van begrippen die in de voorgaande hoofdstukken geanalyseerd zijn en verwerkt dit tot een integraal model. In hoofdstuk 7 wordt het model getest met behulp van een case uit de praktijk. In hoofdstuk 8 worden de conclusies en aanbevelingen die volgen uit dit onderzoek besproken.

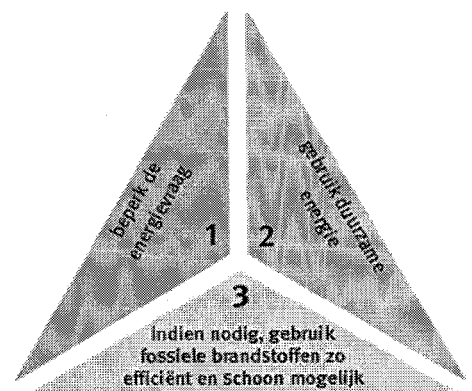
1.6 Oriëntatie duurzame energiehuishouding

In de literatuur bestaan twee raamwerken die gebruikt kunnen worden voor de ontwikkeling van een duurzame (energie)huishouding: de Trias Energetica en de Ladder van Lansink. Beide worden hieronder toegelicht.

1.6.1 Trias Energetica

Een veel gebruikte strategie voor het bereiken van een zo duurzaam mogelijke energiehuishouding is de Trias Energetica (Ecofys, 2004). De Trias Energetica bestaat uit drie sequentiële stappen, weergegeven in figuur 1.3:

1. Beperk de vraag naar energie door het toepassen van vraagbeperkende maatregelen;
2. Gebruik zoveel mogelijk duurzame energiebronnen om de energie die nodig is op te wekken;
3. Zet efficiënte technieken in om het resterende energieverbruik met behulp van fossiele brandstoffen op te wekken.



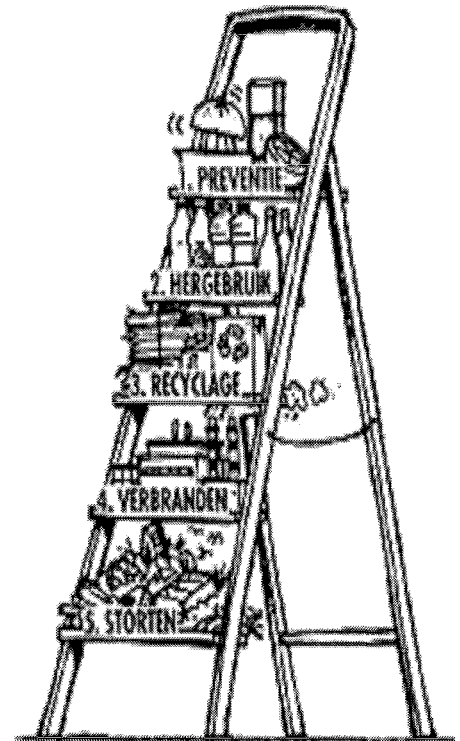
figuur 1.3: Trias Energetica

In de praktijk blijkt dat deze stappen sequentieel worden uitgevoerd in zoverre dit haalbaar is. Zogenaamde energienul woningen kunnen bijvoorbeeld al energie opleveren in plaats van verbruiken [1]. Toch worden deze nauwelijks gebouwd, omdat het op korte termijn economisch nog niet haalbaar is. Dit rapport beschrijft een onderzoek naar de afweging tussen de drie stappen van de Trias Energetica: in welke situatie wordt er voor energiebeperking gekozen, wanneer voor duurzame energie en wanneer wordt er gekozen voor fossiele brandstoffen.

1.6.2 Ladder van Lansink

De Ladder van Lansink [1] is een ordening die de verschillende afvalbehandelingen indeelt van milieuvriendelijkst tot meest milieubelastend. Deze volgorde is in 1979 door het toenmalige Tweede Kamerlid Lansink opgesteld en bestaat uit vijf sequentiële stappen die in figuur 1.4 schematisch zijn weergegeven:

- Op de hoogste en milieuvriendelijkste trede staat *afvalpreventie*, het voorkomen dat afval ontstaat.
- Het *hergebruik* van voorwerpen staat een trede lager. Hierbij worden producten voor een andere functie gebruikt dan de oorspronkelijke functie van het voorwerp.
- De volgende trede op de ladder is het sorteren en *recycleren* van materialen. Materialen die selectief worden ingezameld, kunnen worden herwerkt tot andere, nieuwe producten.
- *Verbranden* staat weer een trede lager op de ladder, omdat hierbij heel wat vervuilende stoffen vrijkomen en de restproducten van de verbranding moeten worden gestort. Het is wel mogelijk om de energie die vrijkomt bij de verbranding te recupereren. Verbranding waarbij energie wordt gerecupereerd staat hoger op de ladder dan verbranding waarbij de energie verloren gaat.
- De laagste trede op de ladder is het *storten* van afval.



figuur 1.4: Ladder van Lansink

De Ladder van Lansink wordt toegepast in dit onderzoek, omdat afval ook gedeeltelijk uit biomassa kan bestaan (hier wordt in §5.2 uitgebreid op ingegaan). Er moet echter rekening mee worden gehouden dat energie opwekking uit afval niet de meest gewenste behandeling is, aangezien preventie, hergebruik en recyclage hoger op de ladder staan. In de praktijk wordt voor verbranding alleen vergunningen verleend, als de behandelingen die hoger op de ladder staan niet mogelijk zijn.

Hoofdstuk 2 Analyse Haalbaarheid

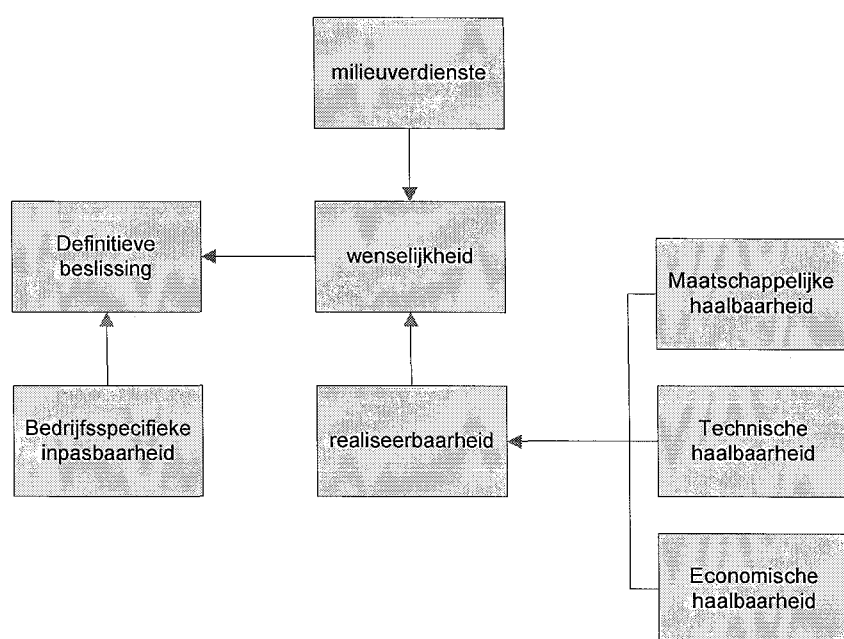
De eerste onderzoeksvraag luidt:

Wat is haalbaarheid en welke aspecten moeten hierbij in beschouwing worden genomen?

Om antwoord te geven op deze vraag is er een literatuurstudie uitgevoerd. Er is een model gevonden dat geschikt is voor de bepaling van de haalbaarheid van duurzame projecten: het TNO-denkmodel. Het TNO-denkmodel wordt in §2.1 beschreven. In §2.2 worden de aspecten van het TNO-denkmodel uitgewerkt om tot de aanpak voor een complete haalbaarheidsanalyse te komen. Deze aanpak wordt in §2.3 vertaald in een checklist die toegepast kan worden op verschillende projecten omtrent duurzaamheid. §2.4 bespreekt de Multi Criteria Analyse, een methode die gebruikt kan worden om een beslissing te nemen op basis van verschillende optimalisatiecriteria. Tenslotte wordt dit hoofdstuk in §2.5 afgesloten met een conclusie.

2.1 TNO-denkmodel

Factoren die van invloed zijn op een uiteindelijke beslissing over het wel of niet doorgaan van een project op het gebied van duurzame ontwikkeling kunnen gestructureerd worden zoals weergegeven in het TNO-denkmodel (Smeets & Tukker, 1995):



figuur 2.1: TNO-denkmodel

2.2 Haalbaarheidsaspecten

De verschillende aspecten van dit model zijn uitgewerkt door Bauwens (2001) en er zijn vanuit andere bronnen een aantal toevoegingen gedaan. Het resultaat wordt in deze paragraaf beschreven.

2.2.1 Technische haalbaarheid

De eerste stap is het controleren van de technische haalbaarheid van de gewenste toepassing. Twee indicatoren voor het bepalen van de technische haalbaarheid zijn:

- *Fase van ontwikkeling van de toepassing*
Het ontwikkelen van een toepassing doorloopt verschillende stadia. Hoe verder de toepassing in zijn ontwikkeling is, des te hoger de technische haalbaarheid.
- *Het tegemoet komen aan acceptatiecriteria*
Aan het gebruik van een toepassing voor duurzame energie worden eisen gesteld door de gebruiker. De vraag is in hoeverre de toepassing aan deze criteria voldoet. Hoe meer er aan deze criteria voldaan wordt, des te hoger de technische haalbaarheid. Een analyse die wordt gebruikt om de technische prestaties van een systeem te meten is de Reliability Availability Maintainability Safety (RAMS) studie (Warmerdam, 2005). Deze aspecten kunnen echter ook tijdens de haalbaarheidsstudie in beschouwing genomen worden als acceptatiecriteria van de techniek. Door aan te geven in hoeverre de techniek aan deze punten voldoet, ontstaat een beeld over de technische haalbaarheid van een techniek. Hoe beter de techniek scoort op de vier punten, des te hoger de technische haalbaarheid.
De betekenis van de RAMS aspecten is als volgt:

- Reliability (betrouwbaarheid)
De waarschijnlijkheid dat het systeem een vereiste functie correct kan uitvoeren onder gegeven omstandigheden gedurende een bepaald tijdsinterval.
De betrouwbaarheid $R(t)$ kan ingeschat worden met behulp van het faalt tempo z (= gemiddeld aantal faalgebeurtenissen per tijdseenheid). De betrouwbaarheid volgt de volgende verdeling (Lammersen, 1990):

$$R(t) = e^{-z \cdot t} \quad (a)$$

$R(t)$: betrouwbaarheid gedurende interval t

t : tijdsinterval

z : gemiddeld aantal faalgebeurtenissen per tijdsinterval

De betrouwbaarheid heeft een waarde tussen 0 en 1, waarbij de waarde 1 een betrouwbaarheid van 100% weergeeft. De haalbare betrouwbaarheid is afhankelijk van de lengte van het tijdsinterval: des te langer het tijdsinterval, des te lager de haalbare betrouwbaarheid. Daarnaast is de aard van het proces van invloed op de haalbare betrouwbaarheid. Gekeken moet worden of de haalbare betrouwbaarheid overeenkomt met de gewenste betrouwbaarheid.

- Availability (beschikbaarheid)
Het vermogen van het systeem om in een toestand te zijn om de gespecificeerde functies onder bepaalde omstandigheden en op een bepaald moment, of gedurende een bepaald tijdsinterval, uit te voeren.
De beschikbaarheid A kan ingeschat worden met behulp van de Mean Time To Failure (MTTF) en Mean Time To Repair (MTTR). De beschikbaarheid wordt dan als volgt berekend (Lammersen, 1990):

$$A = \text{MTTF}/(\text{MTTF}+\text{MTTR}) \quad (b)$$

- Maintainability (onderhoudbaarheid)
De waarschijnlijkheid dat een bepaalde activiteit voor actief onderhoud voor een item onder gegeven gebruikersomstandigheden kan worden uitgevoerd

volgens vastgelegde voorwaarden en aan de hand van vastgestelde procedures en hulpbronnen. De onderhoudbaarheid wordt bepaald door de verwachte frequentie van het onderhoud en de stilstand die optreedt bij dit onderhoud. Zo wordt bepaald hoeveel tijd er jaarlijks aan onderhoud besteed moet worden en of dit past binnen de gebruikersomstandigheden.

- Safety (veiligheid)
De mate waarin een proces vrij is van onaanvaardbare risico's op letsel en onveilige situaties. De veiligheid van een techniek wordt bepaald door te kijken of er aan alle veiligheidseisen kan worden voldaan.

2.2.2 Maatschappelijke haalbaarheid

De maatschappelijke haalbaarheid van projecten is afhankelijk van de gevolgen van het project op de samenleving en de invloed van de samenleving op het verloop van het project. Deze maatschappelijke haalbaarheid is vergelijkbaar met de 'people'-component van het Triple-P model (Neve, 2004). Deze people-component bestaat uit de volgende aspecten:

- *Maatschappelijke acceptatie*
Maatschappelijke acceptatie is de mate waarin alle betrokkenen het project accepteren.
- *Locale natuur en omgeving*
Dit aspect omvat de gevolgen van de techniek op de beleving van het landschap en de natuurwaarde en het ruimtegebruik.
- *Werkgelegenheid*
De techniek kan de werkgelegenheid beïnvloeden door het creëren of verdringen van banen.
- *Maatschappelijke verantwoordelijkheid*
Maatschappelijke verantwoordelijkheid geeft weer of de techniek een bijdrage levert aan het welzijn van de gemeenschap. Voor bio-energie zijn er twee specifieke invloedsgebieden van de techniek die onder maatschappelijke verantwoordelijkheid worden ingedeeld: enerzijds de mate van verdringing van noodzakelijke voedselproductie door energieteelt en anderzijds de mate van afhankelijkheid van het Midden Oosten voor de olievoorziening.
- *Politiek*
Dit aspect bestaat uit alle politieke maatregelen die stimulerende ofwel repressieve gevolgen voor de techniek hebben.

2.2.3 Economische haalbaarheid

Een beslissing van een onderneming om te investeren leidt tot een afweging tussen de uitgaven aan het project die nu gedaan zullen worden, de initiële investering, en de toekomstige kasstromen die het project zal genereren. Omdat bij deze afweging elementen als onzekerheid en risico een belangrijke rol spelen, is deze beslissing niet eenvoudig. Voor elke investering geldt dat de uitgaven moeten worden gedaan voordat de ontvangsten binnenkomen. Om een beslissing te nemen omtrent een investering zijn er een aantal investeringsselectiemethoden beschikbaar, die in te delen zijn in twee categorieën (Beek & Dam, 2000):

1. een groep waarbij uitsluitend rekening wordt gehouden met de operationele geldstromen van de projecten en waarbij de vermogenskosten worden genegeerd;
2. een groep waarbij behalve met de operationele geldstromen ook rekening wordt gehouden met de vermogenskosten.

De vermogenskosten zijn gebaseerd op het principe dat investeringen rendement op leveren en dat een bedrag daardoor op dit moment meer waard is dan hetzelfde bedrag in de toekomst. Dit waardeverschil wordt de rente genoemd. Door inflatie zal de huidige waarde van een toekomstig bedrag nog verder verminderen. In de rente is daarom naast een

vergoeding voor de tijdsvoorkeur van geld een vergoeding voor inflatie opgenomen (Damen, 2004). Deze vermogenskosten worden wel meegenomen in de methoden van de tweede groep.

Tot de eerste groep behoren:

- *Return On Investment (ROI)*
Het beslissingscriterium dat bij deze methode wordt gebruikt is het gemiddelde periodieke overschot tussen opbrengsten en kosten (exclusief vermogenskosten), uitgedrukt in een percentage van het gemiddeld over de looptijd van het project geïnvesteerde vermogen.
- *Terugverdiertijd*
Het project wordt beoordeeld op de tijd die verstrijkt alvorens de initiële uitgaven via de operationele ontvangsten zijn terugontvangen.

Tot de tweede groep behoren:

- *Netto Contante Waarde (NCW)*
Beslissingscriterium is hierbij de contante waarde van de geldstromen, die over de vooraf geschatte levensduur van het project te verwachten zijn
- *Internal Rate of Return (IRR)*
Hierbij wordt het surplus van de toekomstige ontvangsten boven de initiële investeringsuitgaven uitgedrukt in een gemiddeld rentabiliteitspercentage van het gemiddeld geïnvesteerde vermogen en vervolgens vergeleken met het gewenste rentabiliteitspercentage.

Gedetailleerde informatie over deze vier methoden is te vinden in bijlage II.

Een andere methode om een investering te beoordelen is om naar de incrementele veranderingen te kijken (Helfert, 1997). Met andere woorden: wat is het verschil tussen de huidige situatie en de situatie die ontstaat na de investering? Daarbij kijkt men als eerste naar de incrementele investering. Ten tweede dient te worden gekeken naar de incrementele inkomsten en uitgaven. Voor dit onderzoek betekent dit dat de economische haalbaarheid van een duurzame energie project zou worden bepaald door de inkomsten en uitgaven van het project te vergelijken met de inkomsten en uitgaven als het project op basis van fossiele brandstoffen werd uitgevoerd.

2.2.4 Milieuverdienste

Een toepassing van duurzame energie is volgens het TNO-model wenselijk indien de milieuverdienste positief is, dat wil zeggen dat de toepassing een geringere milieuvervuiling en/of een lager energiegebruik met zich mee brengt dan wanneer de investering niet zou zijn gedaan. Bij de bepaling van de milieuverdienste van een toepassing wordt het principe van de Levenscyclusanalyse (LCA) (Bras-Klapwijk et al., 2003) toegepast: de gehele productieketen van het product wordt in beschouwing genomen. Om de verschillende aspecten die invloed hebben op de milieuverdienste te bepalen wordt gebruik gemaakt van de 'planet'-component van het Triple-P model. Deze planet-component bestaat uit de volgende aspecten:

- *Energie*: de toe- of afname van het energieverbruik over de gehele keten door de techniek.
- *Lucht*: de invloed van de techniek op de luchtkwaliteit.
- *Water*: de invloed van de techniek op de kwaliteit van het oppervlaktewater.
- *Bodem*: de invloed van de techniek op de kwaliteit van de bodem.
- *Materialen*: het gebruik van hulpmiddelen die invloed hebben op de milieuvriendelijkheid van de techniek.
- *Flora en fauna*: de invloed van de techniek op biodiversiteit.
- *Grondstoffen*: de invloed van de techniek op de grondstofvoorraden.

2.2.5 Bedrijfsspecifieke inpasbaarheid

Bedrijfsspecifieke inpasbaarheid is de vraag of een techniek bij een bedrijf past op de volgende punten:

- *Aanpassingen*

Bij de overgang van fossiele brandstoffen op duurzame energie technieken is het mogelijk dat er aanpassingen aangebracht moeten worden in de bestaande structuur. Deze aanpassingen kunnen de volgende gevolgen hebben:

- verandering in processtappen
- verandering binnen processtappen
- verandering in logistiek

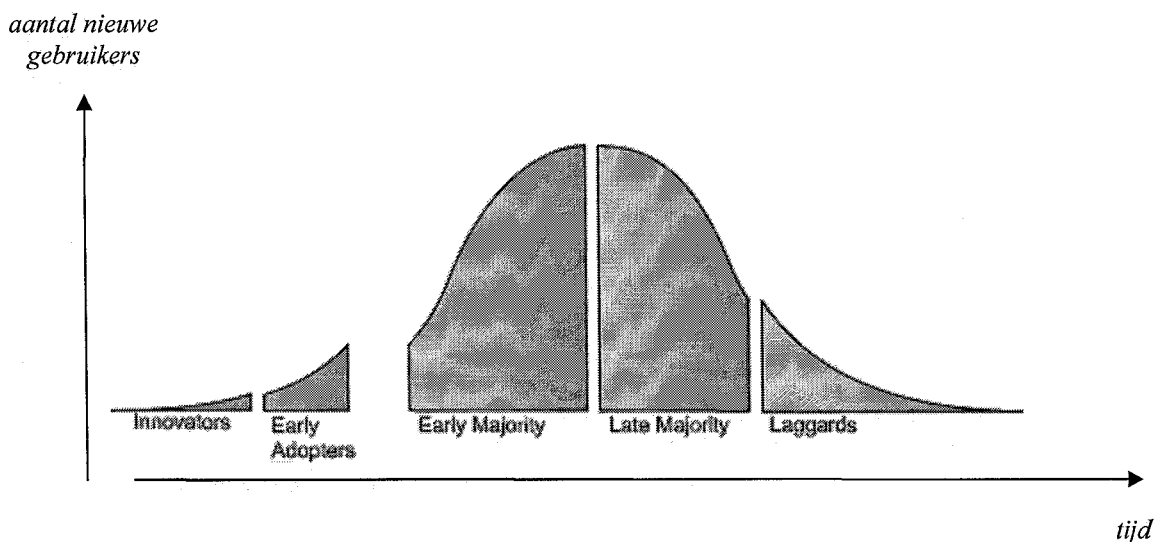
Belangrijk is welke inspanningen en investeringen nodig zijn voor deze veranderingen en de vraag of deze opwegen tegen de voordelen van de nieuwe techniek.

- *Vraag*

Bedrijfsspecifieke inpasbaarheid houdt verder in dat de techniek aansluit op de vraag van het bedrijf naar spreiding en leveringszekerheid. Vraagspreading houdt in of het vraagpatroon van het bedrijf overeenkomt met het leveringspatroon van de techniek. Bij leveringszekerheid wordt gekeken wat de eisen van het bedrijf zijn op dit punt en in hoeverre een techniek daaraan kan voldoen.

- *Bedrijfscultuur*

Bedrijfsspecifieke inpasbaarheid hangt ook samen met de bedrijfscultuur. Is het bedrijf innovatief en geïnteresseerd in het ontwikkelen van nieuwe technologieën, of gaat het bedrijf voor zekerheid en zet het alleen in op technieken die al op grote schaal toegepast worden? Deze innovatiebereidheid kan getypeerd worden met behulp van de Technologie Adaptatie Levenscyclus (Moore, 1991). Deze verdeelt gebruikers in vijf categorieën die aanduiden in hoeverre deze openstaat voor nieuwe technologie. Dit wordt weergegeven in figuur 2.2. Het aantal nieuwe gebruikers van een technologie is afgezet tegen de tijd.



figuur 2.2: Technologie adaptatie levenscyclus

In dit geval is het bedrijf de gebruiker van de techniek en kan in één van de categorieën ingedeeld worden. *Innovators* zijn de bedrijven die van nieuwe technologie houden en altijd willen vernieuwen. *Early adopters* zijn bedrijven met visie, die een technologie als een belangrijke kans zien. De *early majority* is pragmatischer, ze houden niet van te veel risico, maar zien wel de voordelen van nieuwe technologie. Zij zijn het begin van een grootschalige toepassing. De *late*

majority is conservatief en pessimistisch over het voordeel dat een nieuwe technologie kan bieden. *Laggards* zijn de sceptici die niets met nieuwe technologie te maken willen hebben.

2.3 Haalbaarheid checklist

De verschillende aspecten van haalbaarheid van duurzame projecten die in de voorgaande paragraaf zijn besproken, zijn uitgewerkt tot een checklist. Deze checklist dient als een leidraad voor het bepalen van de haalbaarheid van duurzame energie technieken. Het aspect economische haalbaarheid is achterwegen gelaten, omdat hiervoor een economisch rekenmodel zal worden ontwikkeld (hoofdstuk 6). Elk aspect heeft één of meerdere indicatoren waarmee een inschatting van het aspect gemaakt kan worden. De waarde van de indicator geeft weer aan de hand van welke parameter (kwalitatief of kwantitatief) de schatting kan worden gemaakt. Dit geheel is weergegeven in onderstaande tabel:

tabel 2.1: haalbaarheid checklist voor duurzame energie projecten

Technische haalbaarheid			
Aspect	Indicator	Waarde	
Tegemoetkomen acceptatiecriteria	Betrouwbaarheid	zie §2.2.1, formule (a)	
	Beschikbaarheid	zie §2.2.1, formule (b)	
	Onderhoudbaarheid	Frequentie onderhoud	
		Downtime bij onderhoud	
	Veiligheid	Kan er aan alle veiligheidseisen voldaan worden?	
Fase van ontwikkeling	Fase	Mogelijke fasen: ideeënfase, ontwerpfase, pilotfase, geïntegreerde/commerciële toepassing, grootschalige toepassing	
Maatschappelijke haalbaarheid			
Aspect	Indicator	Waarde	
Maatschappelijke acceptatie	Acceptatie actoren	Mate waarin actoren de invoering van een toepassing accepteren	
Locale natuur en omgeving	Landschapbeleving	Invloed op de belevingswaarde van het landschap, mate van landschapsvervuiling.	
	Beleving natuurwaarde	Invloed op de belevingswaarde van de natuurwaarde van de omgeving.	
	Ruimtegebruik	Invloed op ruimtegebruik door invoering toepassing, voldoen aan eisen overheid.	
Werkgelegenheid	Toename aantal banen	Invloed op aantal banen en kwaliteit van deze banen door invoering toepassing	
Maatschappelijke verantwoordelijkheid	Geen verdringing van noodzakelijke voedselproductie	Invloed op concurrentie met voedselvoorziening door invoering toepassing	
	Afhankelijkheid van andere landen voor energievoorziening	Afname afhankelijkheid andere landen door invoering toepassing, aan de hand van percentage energie-import	
Politiek	Stimulerende maatregelen	Subsidies, belasting voordelen	

	Repressieve maatregelen	Heffingen, verboden
Milieuverdienste		
Aspect	Indicator	Waarde
Energie	Energieverbruik over de hele keten	Energiebalans (positief of negatief)
Lucht	Emissies naar atmosfeer	Hoeveelheid broeikasgasemissie in CO ₂ equivalent
		Hoeveelheid overige emissie naar lucht (o.a. fijnstof, SO ₂ , NO _x)
Water	Emissies naar oppervlaktewater	Hoeveelheid en soort emissie naar oppervlakte water
Bodem	Emissies naar bodem	Hoeveelheid en soort emissie naar de bodem
Materialen	Gebruik van hulpmiddelen	Mate waarin hulpmiddelen (zoals kunstmest) voor de voorbereiding en transport voor biomassa nodig zijn
Flora en fauna	Biodiversiteit	De mate van afname in de diversiteit van planten en dieren soorten en rassen, gerelateerd aan de vogel- en habitatrichtlijnen.
Grondstoffen	Grondstofgebruik	Mate waarin het gebruik van de techniek bijdraagt aan de mogelijke uitputting van grondstofvoorraden.
Bedrijfsspecifieke inpasbaarheid		
Aspect	Indicator	Waarde
Aanpassingen	Investeringen	Verlies oude investeringen
		Benodigde nieuwe investeringen
	Inspanningen	Benodigde extra inspanningen
Vraag	Leveringszekerheid	Eisen aan leveringszekerheid van afnemer
		Beschikbaarheid van reserve voorziening.
	Vraagspread	Vraagpatroon bedrijf
		Leveringspatroon techniek
Bedrijfscultuur	Innovatiebereidheid	Mogelijke categorieën: Innovator, Early Adopter, Early Majority, Late Majority, Laggard.

2.4 Multi Criteria Analyse

De checklist uit de voorgaande paragraaf kan gebruikt worden om in te schatten of een techniek haalbaar is. Doordat de checklist uit een groot aantal verschillende optimalisering criteria bestaat, zijn de criteria moeilijk vergelijkbaar ten opzichte van elkaar. Om toch tot een eindoordeel te komen waarin alle criteria worden meegenomen, kan de Multi Criteria Analyse (MCA) worden toegepast (Dodgson et al., 2006). Het doel van deze techniek is het analyseren van grote hoeveelheden complexe informatie op een consistente manier. MCA technieken bestaan uit twee numerieke analyses: het toekennen van scores en het toekennen van wegingsfactoren. Het toekennen van scores betekent dat aan elk aspect een score op een vaste schaal wordt toegekend waarbij geldt: hoe hoger de score, des te gewenster de uitkomst. Weging houdt in dat elke aspect een waarde krijgt toegekend ten opzichte van de andere aspecten, zodat duidelijk wordt welke aspecten het belangrijkste zijn voor de uiteindelijke beslissing. Deze weging is een complex proces, doordat er bij

beslissingen vele betrokkenen met verschillende belangen komen kijken. Uiteindelijk zal er een keuze gemaakt moeten worden welke belangen het zwaarst mee zullen wegen. Op de uitkomst van een MCA zal een gevoeligheidsanalyse moeten worden toegepast om te bepalen welke veranderingen in criteria welke gevolgen hebben voor de einduitkomst.

2.5 Conclusie

De checklist uit §2.3 biedt een goede basis voor haalbaarheidsonderzoeken naar duurzame energie opties. De MCA kan daarbij erg bruikbaar zijn. Toch zal dit onderzoek de haalbaarheidsaspecten die besproken worden in de checklist niet verder uitwerken, omdat de uitwerking bij elk project anders zal zijn. Dit onderzoek is gericht op het ontwerpen van een algemeen raamwerk, dat in verschillende situaties toegepast kan worden. De checklist is opgesteld om aan te geven welke factoren voor een volledig haalbaarheidsonderzoek niet uit het oog verloren mogen worden. In de checklist zijn geen economische aspecten beschreven. In de volgende hoofdstukken zal een economische analyse aan bod komen, die ingezet kan worden om de haalbaarheidsstudie te completeren. Om met de economische analyse tot een betrouwbaar resultaat te komen zullen er alleen technieken en biomassasoorten in het model worden meegenomen die op de haalbaarheidschecklist goed zouden kunnen scoren. Daarbij wordt met name gelet op de schaal waarop deze technieken reeds worden toegepast, omdat de technische haalbaarheid van deze technieken zekerder is. Bovendien sluit dit aan op de innovatiebereidheid van de klanten van Cumae. Deze klanten dienen aanvragen in voor bio-energie projecten omdat ze er voordelen in zien. Ze zijn meestal risicomijdend en daarom behoren deze klanten tot de 'early majority' wier voorkeur uitgaat naar projecten die niet meer in de pilot/ontwikkelingsfase, maar in een verder ontwikkelingsstadium zitten. De overige haalbaarheidsaspecten mogen echter niet vergeten worden. Het doel van de checklist is dat er bepaald wordt of de techniek in een specifieke situatie haalbaar is op de aspecten van de checklist. Zo nodig zullen er aanpassingen gedaan moeten worden om de haalbaarheid te verbeteren, zoals bijvoorbeeld afspraken met leveranciers over de betrouwbaarheid en onderhoudbaarheid van de installaties. Dit valt echter buiten het bereik van dit onderzoek.

Hoofdstuk 3 Analyse Energievraag Gebouwde Omgeving

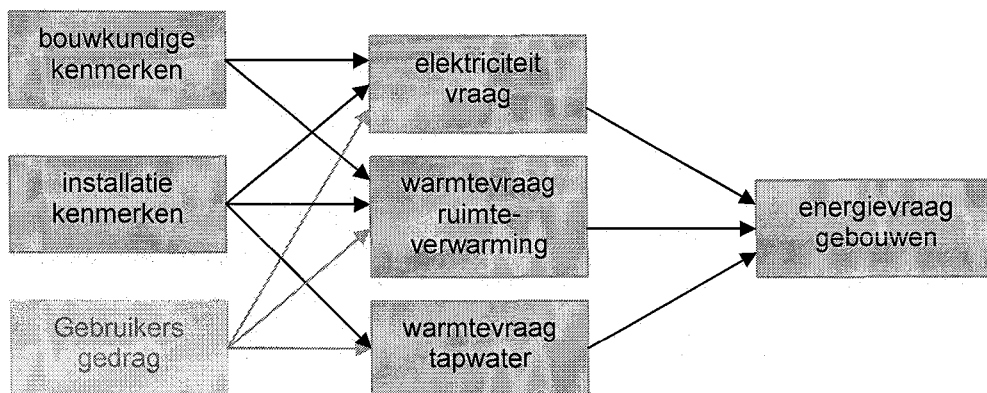
De tweede onderzoeksvraag luidt:

Hoe wordt de hoogte van de energievraag van een wijk vastgesteld en hoe wordt aan deze vraag voldaan?

In §3.1 wordt het eerste gedeelte van de onderzoeksvraag behandeld: het vaststellen van de hoogte van de energievraag. In §3.2 wordt uiteengezet hoe aan deze vraag wordt voldaan.

3.1 Hoogte energievraag

De energievraag van gebouwen bestaat uit een drietal onderdelen: de elektriciteitsvraag, de warmtevraag voor ruimteverwarming en de warmtevraag voor tapwaterverwarming. Er zijn drie factoren die de energievraag van gebouwen beïnvloeden, dit is weergegeven in onderstaande figuur:



figuur 3.1: bepaling elektriciteit- en warmtevraag gebouwen

De eerste invloedsfactor wordt gevormd door de bouwkundige kenmerken van het gebouw, die de elektriciteitsvraag en de warmtevraag voor ruimteverwarming beïnvloeden. Een voorbeeld hiervan is het materiaal waarvan een gebouw gemaakt is. De tweede invloedsfactor wordt gevormd door de kenmerken van de aanwezige installatie(s), die invloed heeft op alle drie de componenten van de energievraag. Een voorbeeld hiervan is het al dan niet aanwezig zijn van een zonnecollector en indien aanwezig het omzettingsrendement van deze collector. De derde invloedsfactor is het gebruikersgedrag, dat ook alle drie de componenten van de energievraag beïnvloedt. Een voorbeeld hiervan is het al dan niet uitschakelen van de verwarming als er niemand in het gebouw aanwezig is. Deze laatste invloedsfactor wordt niet mee genomen in dit onderzoek, omdat deze sterk situatie afhankelijk is en bovendien niet beïnvloedbaar door de projectontwikkelaar. In dit onderzoek zal er daarom uitgegaan worden van een gemiddeld gebruikersgedrag en -behoeften. Dit wordt de referentiesituatie genoemd. SenterNovem [1] heeft woningen opgedeeld in een zestal referenties:

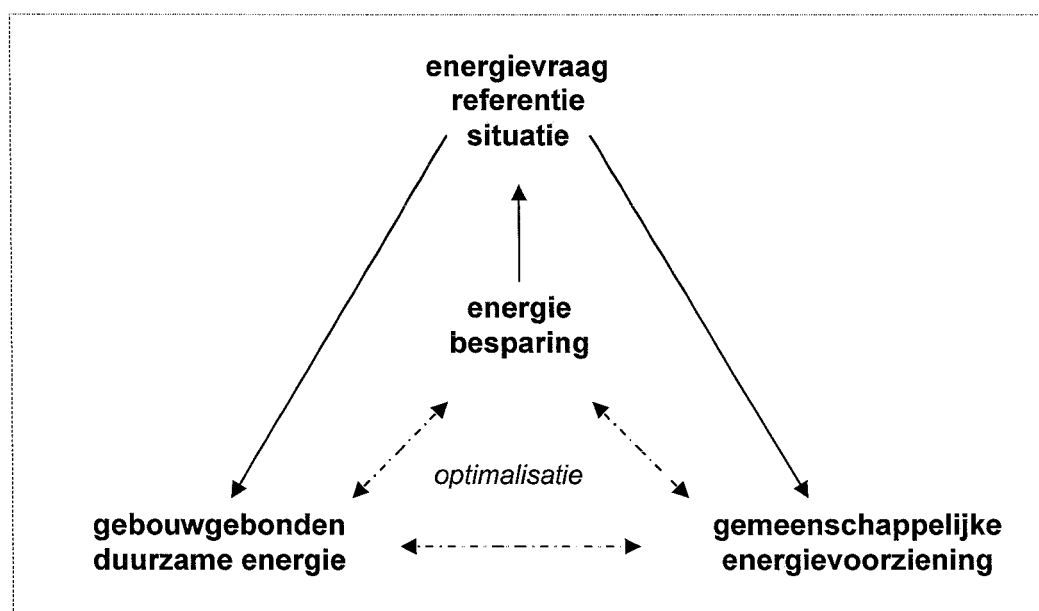
- *Tussenwoning*: tegenwoordig bestaat 50% van de woningproductie in Nederland uit rijwoningen, waarvan driekwart een tussenwoning is.
- *Hoekwoning*: het resterende kwart van de rijwoningen zijn hoekwoningen. Het belangrijkste verschil met een tussenwoning is dat het verliesoppervlak relatief flink hoger is.

- *Twee-onder-een-kap woning*: tegenwoordig is 13% van de woningproductie in Nederland twee-onder-een-kap. Dit type woning is sterk vergelijkbaar met een hoekwoning, het verschil is dat een hoekwoning doorgaans iets kleiner is.
- *Vrijstaande woning*: tegenwoordig is 5% van de woningproductie in Nederland vrijstaand.
- *Appartementencomplex*: appartementen vertegenwoordigen 33% van de woningproductie in Nederland

In bijlage III is een overzicht te vinden van de bouwkundige en installatietechnische kenmerken van deze referentiewoningen waarbij er zonder extra duurzame energievoorzieningen aan de wettelijke eis voor $EPC \leq 0,8$ (zie §4.2) wordt voldaan. Deze referentiewoningen dienen als uitgangspositie voor de energievraag. Door aanpassingen te doen aan de bouwkundige kenmerken en/of de installatiekenmerken, kan het energieverbruik teruggedrongen worden. De mogelijkheden hiervoor zullen worden meegenomen in de ontwerpfase van dit onderzoek (hoofdstuk 6).

3.2 Energielevering

Als er uitgegaan wordt van de energievraag in de referentiesituatie zijn er in dit onderzoek drie aspecten van belang voor de energiehuishouding op wijkniveau: de gemeenschappelijk energievoorziening, de gebouwgebonden duurzame energievoorzieningen en de energie besparingsmaatregelen die worden toegepast. Het is niet mogelijk om de grootte van deze aspecten onafhankelijk van elkaar vast te stellen, omdat ze gecorreleerd zijn. De correlatie tussen deze aspecten is weergegeven in figuur 3.2. Er is te zien dat aan de energievraag van de afnemers wordt voldaan door de gebouwgebonden duurzame energie opties en door de gemeenschappelijke energievoorziening. De vraag van de afnemers wordt echter bepaald door de energiebesparende maatregelen die genomen worden. De hoeveelheid energiebesparende maatregelen, gebouwgebonden duurzame energievoorzieningen en de capaciteit van de gemeenschappelijke energievoorziening worden bepaald door de meest optimale combinatie te kiezen.

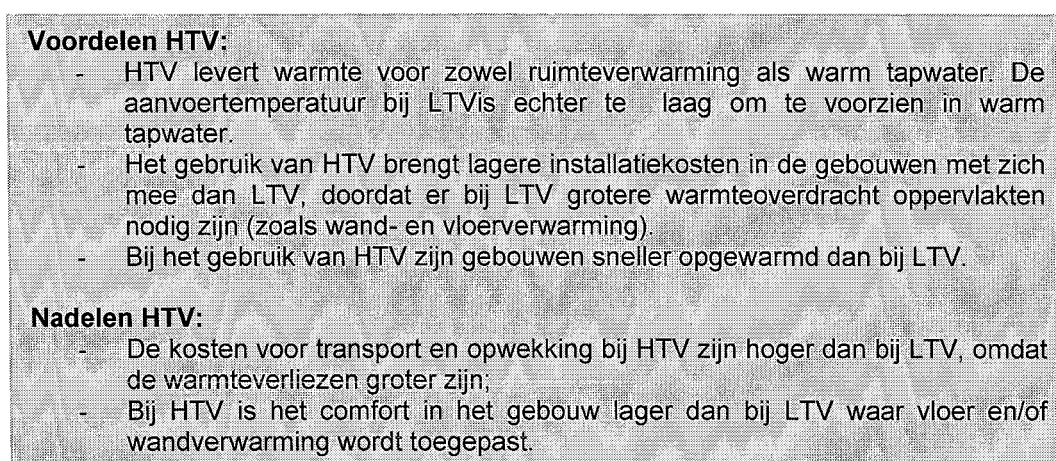


figuur 3.2: correlatie energiehuishouding

In dit hoofdstuk zullen deze aspecten onafhankelijk van elkaar besproken worden. In §3.2.1 komt de energielevering door de biomassacentrale aan bod. Daarna worden in §3.2.2 de energiebesparing en de gebouwgebonden duurzame energievoorzieningen besproken.

3.2.1 Gemeenschappelijke energievoorziening

Zoals besproken in §1.4 is de gemeenschappelijk energievoorziening in dit onderzoek een biomassacentrale die warmte en elektriciteit levert. Warmtelevering kan gebeuren op twee temperatuurniveaus: hoog en laag. Bij hoge temperatuur verwarming (HTV) wordt water met een aanvoertemperatuur van 90 °C en een retourtemperatuur van 70 °C gebruikt. Lage temperatuur verwarming (LTV) gebruikt water met een aanvoertemperatuur van maximaal 55 °C en een retourtemperatuur van maximaal 40 °C. In figuur 3.3 is een overzicht van de voor- en nadelen van HTV ten opzichte van LTV weergegeven. LTV is een techniek die momenteel nog niet veel wordt toegepast, maar sterk in de belangstelling staat doordat restwarmte van lage temperatuur op deze manier nuttig gebruikt kan worden. In dit onderzoek staat echter een biomassa warmte/kracht koppeling centraal, waarbij hoogwaardige warmte beschikbaar komt. Daarom zal in dit onderzoek HTV in beschouwing worden genomen.

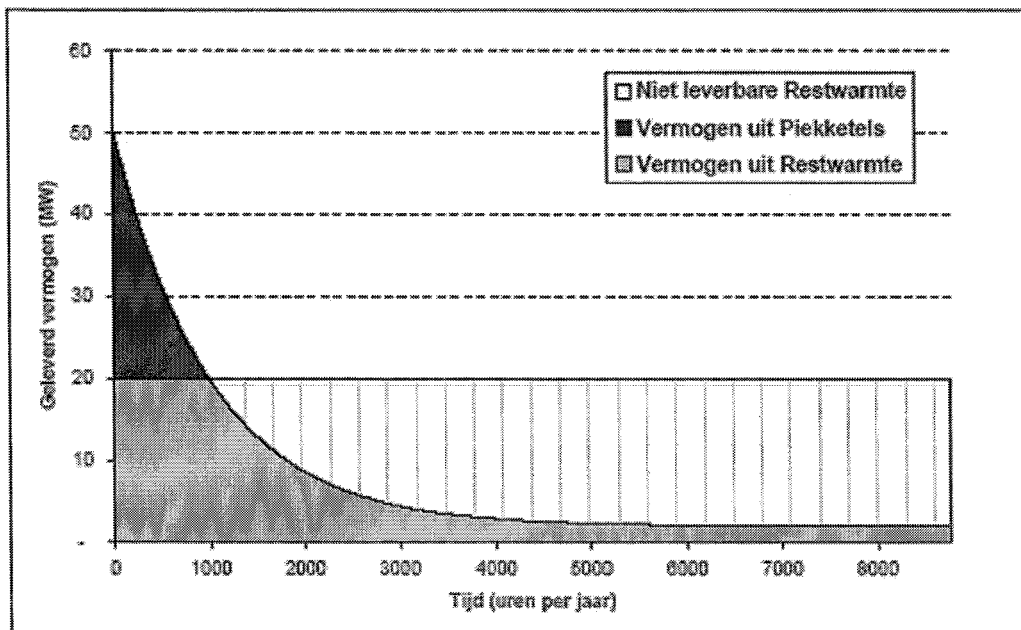


figuur 3.3: voor- en nadelen HTV ten opzichte van LTV

Om het vermogen van de biomassacentrale te bepalen, moeten twee keuzen gemaakt worden.

Op de eerste plaats de vraag of de centrale wordt ontworpen op warmtevraag of elektriciteitsvraag. Om deze keuze te maken wordt er gekeken wat er gebeurt met een eventueel tekort of overschot aan warmte/elektriciteit. Een overschot aan elektriciteit kan aan het net teruggeleverd worden en bij een tekort kan er elektriciteit uit het net onttrokken worden. In het geval van warmte is dit complexer. Een overschot aan warmte kan tot een bepaalde hoeveelheid worden opgeslagen in een buffer, maar voor deze buffer moeten investeringen gedaan worden en bovendien heeft de buffer een eindige capaciteit en treden er verliezen op. Bij een tekort aan warmte kan een hulpketel gebruikt worden om warmte bij te stoken uit gas, maar ook hiervoor geldt dat er investeringen gedaan moeten worden in een hulpketel en dat de capaciteit ervan eindig is. Hieruit blijkt dat het bepalen van de capaciteit van de biomassacentrale het beste kan gebeuren op warmtevraag.

Hierbij moet bepaald worden op welk vermogen de centrale ontworpen moet worden. Daarvoor is de warmtevraag van belang. Deze varieert sterk in tijd. In het algemeen worden deze variaties bepaald door de temperatuur buiten en het bewonersgedrag. De hoogste capaciteit die op enig moment op wijkniveau wordt gevraagd wordt piekvraag genoemd. Deze piekvraag treedt op als het buiten koud is en als de bewoners veel energie vragen. Een jaarbelasting-duurkromme geeft informatie over de piekvraag en de spreiding van de vraag. Deze kromme geeft weer hoeveel uren per jaar de warmtevraag hoe hoog is geweest. In figuur 3.4 is een voorbeeld hiervan weergegeven. Hieruit is af te lezen dat de piekvraag in dit geval 50 MW is. Het oppervlak onder de grafiek geeft de totale warmtevraag weer.



figuur 3.4: jaarbelasting-duurkromme (Hoogsteen et al., 2003)

Omdat de kosten van de warmtevoorziening vooral worden bepaald door het te leveren maximum vermogen, wordt het vermogen van de biomassacentrale nooit uitgelegd op piekvermogen. In plaats daarvan wordt er aan de warmtevoorziening een centrale gasgestookte hulpketel toegevoegd, zodat er te allen tijde aan de piekvraag kan worden voldaan. In figuur 3.4 is uitgegaan van een warmtelevering van 20 MW en een hulpketel die tot aan de piekvraag kan leveren. De warmtelevering voldoet aan ongeveer 80% van de warmtevraag. Maar doordat de warmtevraag vaak lager is dan 20 MW gaat ruim de helft van de warmte verloren.

In de referentiesituatie wordt warmte geleverd uit gas via installaties op gebouwniveau. Om te bepalen op welk vermogen de biomassacentrale wordt ontworpen, is het belangrijk om naar de spreiding van het gasverbruik over het jaar te kijken: welk gedeelte is constant gedurende het jaar en welk gedeelte varieert. Daarbij wordt er onderscheid gemaakt tussen drie groepen gebruikers: huishoudens, utiliteit en industrie.

Gasverbruik huishoudens

Het jaarlijkse warmteverbruik voor ruimteverwarming en warm tapwater van de referentiewoningen is in tabel 3.2 weergegeven [1]:

tabel 3.2: energieverbruik referentiewoningen voor ruimteverwarming en warm tapwater

energieverbruik [MJ/woning/jaar]	tussen woning	hoek woning	2-onder-1-kap woning	vrijstaande woning	appartementen complex (27 woningen)
ruimteverwarming	8.989	16.495	22.115	29.283	219.279
warm tapwater	17.756	15.764	17.924	19.913	406.122

Het warmteverbruik voor warmwatervoorziening zal gelijkmatig over het jaar verdeeld zijn. Het warmteverbruik voor ruimteverwarming daarentegen is sterk seizoensafhankelijk: hoe kouder, des te hoger.

Gasverbruik utiliteit

Utiliteitsbouw wordt ingedeeld in zorginstellingen, kantoren, scholen, sportgelegenheden, cultuurinstellingen en winkels/horeca. Het is niet mogelijk om een gemiddeld gasverbruik weer te geven, omdat dit te sterk afhankelijk is van onder andere de grootte en de type utiliteit. Het gasverbruik voor deze gebouwen zal daarom per project bepaald moeten worden. Wel kan worden aangenomen dat het gas voornamelijk gebruikt wordt voor ruimte- en tapwaterverwarming, waarbij net als in de woningbouw het warm tapwaterverbruik constant is over het jaar en het ruimteverwarmingverbruik seizoensafhankelijk.

Gasverbruik industrie

Industriegebouwen zijn alle gebouwen waar materialen en goederen bedrijfsmatig worden bewerkt of opgeslagen. Industrie is evenals utiliteit een verzamelnaam voor een breed scala aan bedrijven. Ook hier geldt dat het niet mogelijk is om het gasverbruik per eenheid uit te drukken, omdat er geen gemiddelde industrie-eenheid bestaat. De hoogte van het gasverbruik van een industriegebouw is sterk afhankelijk van het type industrie en de grootte van het bedrijf. Voor de industrie geldt bovendien dat het doel waartoe het gas wordt aangewend, niet alleen ruimte- of tapwaterverwarming is, maar ook de aandrijving van processen. Het gasverbruik voor de aandrijving van processen is niet afhankelijk van seizoensinvloeden en daarom kan de graaddagen techniek hier niet toegepast worden. Daarom wordt er aangenomen dat fluctuaties in het gasverbruik nihil zijn: het gasverbruik per etmaal is constant gedurende het jaar. Industrie waarvan het warmteverbruik weliswaar constant is per etmaal, maar niet gedurende het jaar (het bedrijf draait bijvoorbeeld slechts enkele maanden per jaar) kan niet zonder meer meegenomen worden in het model. Eerst moet bepaald worden wat de invloed van dit warmteverbruik is op de totale warmtevraag. Daarnaast geldt dat bij bepaalde typen industrie het gasverbruik niet vervangen kan worden door warmtelevering. Dit type industrie kan zich niet op het industrieterrein vestigen als er geen gasnet wordt aangelegd. De aanleg van een gasnet wordt in dit onderzoek niet meegenomen en daarom zal dit type industrie buiten beschouwing worden gelaten.

In onderstaande tabel is samengevat weergegeven welk type warmtevraag voor welk type gebouw constant of variabel is.

tabel 3.3: spreiding warmtevraag bij typen gebouwen

	constant	variabel (seizoensafhankelijk)
woningen	warm tapwater	ruimteverwarming
utiliteit	warm tapwater	ruimteverwarming
industrie	warm tapwater + proceswarmte	ruimteverwarming

Het vermogen van de biomassacentrale wordt zo gekozen, dat er minimaal aan de constante warmtevraag wordt voldaan. Om te bepalen in hoeverre de biomassacentrale aan de variabele warmtevraag gaat voldoen, wordt gekeken naar de spreiding van deze vraag over het jaar. Dit gebeurt met behulp van graaddagen. Graaddagen geven weer hoeveel de gemiddelde etmaaltemperatuur beneden de stookgrens ligt (graaddagen per dag = stookgrens – gemiddelde etmaaltemperatuur), waarbij geldt:

- als de gemiddelde etmaaltemperatuur hoger is dan de stookgrens is het aantal graaddagen nul;
- de stookgrens is 18°C.

Het gemiddeld aantal graaddagen per maand op tien verschillende plaatsen in Nederland over de periode 2000 tot 2005 is weergegeven in bijlage IV. Door het totale gasverbruik voor ruimteverwarming evenredig met het aantal graaddagen te verdelen over de maanden, wordt inzicht verkregen over het vermogen dat nodig is om aan de gehele warmtevraag te voldoen. In hoofdstuk 6 zal dit uitgebreid besproken worden.

3.2.2 Energiebesparing en gebouwgebonden duurzame energievoorzieningen

Als er uitgegaan wordt van een gemiddeld gebruikersgedrag zijn er tenminste twee manieren voor energiebesparing in de gebouwde omgeving mogelijk: isoleren en gebalanceerd ventileren. Deze zullen besproken worden in het volgende hoofdstuk. Aangezien besparing de eerste stap van de Trias Energetica (§1.6) is, heeft dit prioriteit boven de duurzame energievoorzieningen. Toch dient er in de praktijk ook naar de kosteneffectiviteit van energiebesparing te worden gekeken. Doordat de woningen een EPC van lager dan 0,8 hebben zijn er immers al stappen genomen om het energieverbruik terug te dringen. Verdere investeringen in energiebesparing zullen dan ook mede beoordeeld worden op kosteneffectiviteit. Dit zal gebeuren in hoofdstuk 6.

De gebouwgebonden duurzame energievoorzieningen die invloed hebben op de warmtevraag van de woningen worden afgewogen tegen de biomassa-centrale. In dit onderzoek is dat alleen de zonneboiler. Zowel de zonneboiler als de biomassa-centrale staan op de tweede plaats van de Trias Energetica. De combinatie die het hoogst scoort op de haalbaarheidscriteria zal de voorkeur krijgen. De gebouwgebonden duurzame energievoorzieningen die elektriciteit leveren, in dit onderzoek zonnecellen en stadsturbines, worden onafhankelijk van de biomassa-centrale beoordeeld op haalbaarheid. De elektriciteit die opgewekt wordt door de biomassa-centrale wordt immers teruggeleverd aan het elektriciteitsnet. De elektriciteitsopwekking van de gebouwgebonden installaties heeft daarom geen invloed op de biomassa-centrale.

3.3 Conclusie

In dit hoofdstuk zijn de elementen besproken die samenhangen met de energievraag. Als startpunt wordt de energievraag van de referentiewoningen genomen. Door middel van energiebesparende maatregelen kan deze energievraag afnemen. Aan de overgebleven vraag wordt voldaan door de biomassa-centrale en de gebouwgebonden duurzame energievoorzieningen. De uiteindelijke keuze van het aandeel in de energievraag van deze drie aspecten wordt bepaald door de optimale combinatie te kiezen. Deze keuze kan gemaakt worden met behulp van een kwantitatief model dat in de ontwerpfase van dit onderzoek is opgesteld. Dit wordt in hoofdstuk 6 besproken.

Hoofdstuk 4 Analyse Duurzaam Bouwen

De derde deelvraag luidt:

Hoe kan duurzame energieopwekking worden toegepast in de gebouwde omgeving?

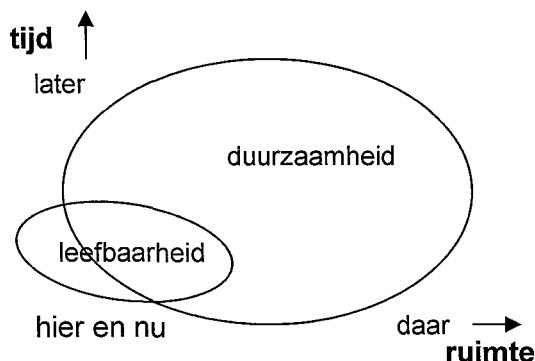
Wereldwijd is de gebouwde omgeving verantwoordelijk voor ongeveer 40% van de totale energieconsumptie (Omer, 2006). De afgelopen jaren zijn gebouwen steeds energie-efficiënter geworden, maar doordat gebruikers hogere eisen stellen aan een gebouw is het totale energieverbruik niet afgenomen. De stijgende energieprijzen en de aandacht voor milieu zorgen ervoor dat duurzaam bouwen steeds meer aandacht krijgt. In §4.1 wordt de definitie van duurzaam bouwen besproken. In §4.2 komt de invloed van de overheid op duurzaam bouwen aan bod. §4.3 beschrijft het energieaspect van duurzaam bouwen. Dit hoofdstuk wordt in §4.4 afgesloten met een conclusie.

4.1 Inleiding duurzaam bouwen

Het begrip duurzaam bouwen komt voort uit de definitie van duurzame ontwikkeling die in §1.1 aan bod is gekomen (Ministerie van VROM, 1990):

'het op een zodanige manier bouwen dat door de bouw, het gebruik en de eventuele sloop van het bouwwerk zo min mogelijk afval en milieuproblemen ontstaan'

Duurzaam bouwen is lang alleen geassocieerd met het verbeteren van het milieu. Het zorgt echter ook voor forse verbetering van de leefbaarheid van het gebied (onder andere kwaliteit op het gebied van flexibiliteit, gezondheid, comfort en veiligheid). Toch is duurzaam bouwen meer dan alleen een opsomming van deze aspecten. In figuur 4.1 is de verhouding tussen leefbaarheid en duurzaamheid weergegeven. Twee belangrijke aspecten van duurzaam bouwen, weergegeven in deze figuur, zijn dat er naar de gevolgen op de lange termijn moet worden gekeken en dat er niet alleen met de eigen omgeving rekening moet worden gehouden.

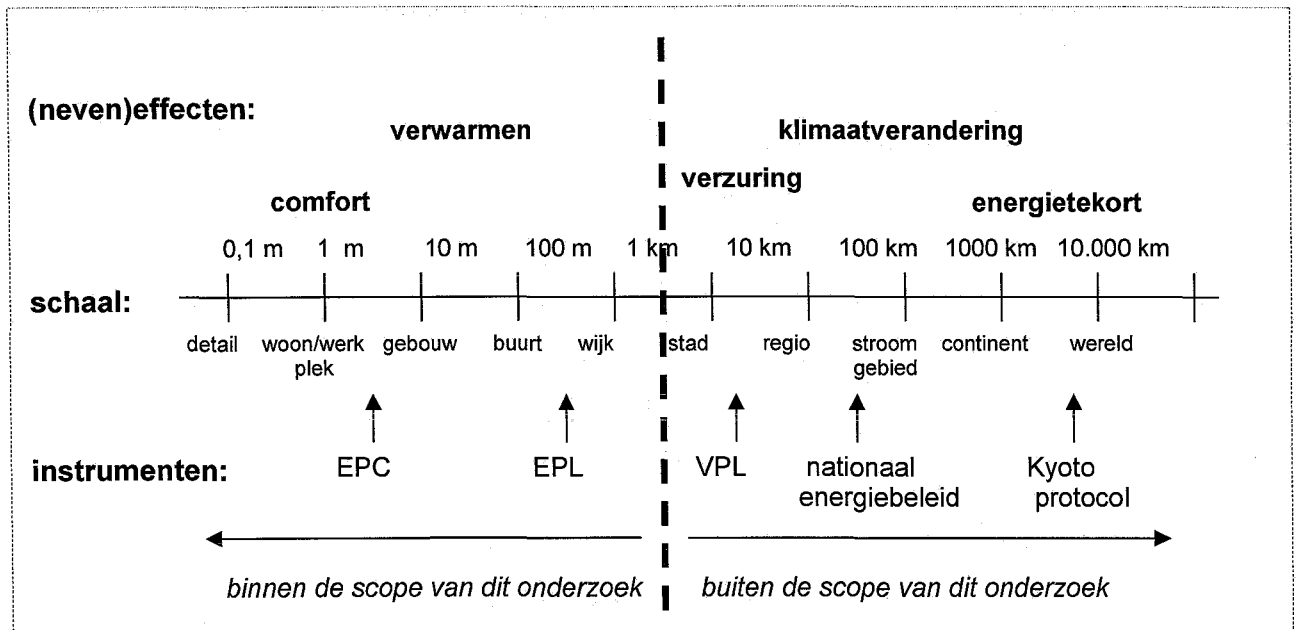


figuur 4.1: duurzaamheid versus leefbaarheid [2]

4.2 Overheid en duurzaam bouwen

In figuur 4.2 zijn de (neven)effecten van hoog energieverbruik weergegeven voor verschillende ruimtelijke schaalgrootten. De invloed van de (neven)effecten werkt altijd door tot op kleinere schaal: bijvoorbeeld energietekort en klimaatverandering ontstaan op grote schaal, maar zijn ook op kleinere schaal zoals op wijkniveau merkbaar. Onder de schaal zijn de instrumenten weergegeven die ingesteld zijn om het energieverbruik te verlagen en

daarmee de (neven)effecten te voorkomen. Het Kyoto-protocol is vertaald in het nationale energiebeleid. Vanuit het nationaal energiebeleid zijn normen opgesteld voor de Vervoers Prestatie op Locatie (VPL), Energie Prestatie op Locatie (EPL) en Energie Prestatie Coëfficiënt (EPC). Dit onderzoek begeeft zich qua schaal op de warmtevraag van gebouwen op wijkniveau, waar slechts de EPC en de EPL van invloed zijn.



figuur 4.2: (neven)effecten van energieverbruik op verschillende schaal [2]

De EPC is een maat voor de gemiddelde energiekwaliteit van een gebouw: hoe lager de EPC, hoe energiezuiniger het gebouw. De wettelijke maximale hoogte van de EPC is sinds januari 2006 voor woningen vastgesteld op 0,8. De EPC wordt berekend op basis van de gebouweigenschappen, een gestandaardiseerd bewoners/gebruikersgedrag en de gebouwgebonden installaties. De EPL geeft in één getal de energiekwaliteit van de locatie aan. In aanvulling op de EPC, die de energiekwaliteit van één gebouw weergeeft, honoreert de EPL ook maatregelen buiten het gebouw, waarbij ook de energievoorziening die voor en/of in deze locatie is aangelegd wordt meegenomen. Het getal geeft aan in hoeverre gebruik wordt gemaakt van energie uit fossiele brandstoffen en de CO₂-emissie die daarbij optreedt. De EPL kent een schaal van 0 en 10, waarbij 10 staat voor de ideale situatie waarbij geen CO₂-emissie optreedt. Er is een rechtstreeks verband tussen de EPL en de EPC: in een wijk bestaande uit woningen met een EPC van maximaal 0,8 is de EPL minimaal 6,6. De hoogte van de EPL is in tegenstelling tot die van de EPC niet wettelijk geregeld, het is slechts een richtlijn. Meer informatie over de EPC en de EPL is te vinden in bijlage V.

4.3 Duurzaam bouwen en energie

Duurzaam bouwen is gedeeltelijk gebaseerd op het principe van Trias Energetica (zie §1.6.1):

- beperk de vraag tot het essentiële, de werkelijke behoeften;
- gebruik zoveel mogelijk duurzame bronnen en materialen;
- ga zo efficiënt mogelijk om met energie, water, ruimte en materialen.

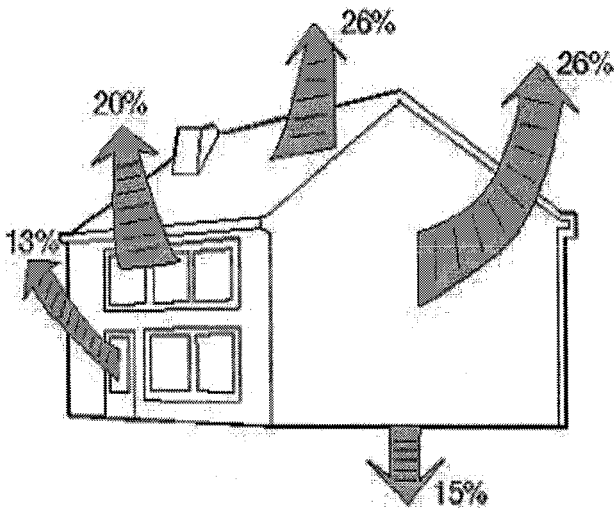
Uit het laatste punt blijkt dat duurzaam bouwen op te splitsen is in vier aandachtsgebieden: energie, water, ruimte en materialen. Dit onderzoek richt zich op energie: het beperken van de energievraag en het gebruik van gebouwgebonden duurzame energie opties.

4.3.1 Energiebesparing

In de bouw kan de energievraag beperkt worden door goed te isoleren en gebalanceerd te ventileren:

- *Isolatie*

Van de totale CO₂ uitstoot van een huishouden wordt bijna de helft veroorzaakt door ruimteverwarming (Ecofys, 2005). Isoleren betekent het verlagen van transmissieverliezen: de warmte die binnen is moet binnen blijven, zodat er minder energie verloren gaat. De gemiddelde percentuele transmissieverliezen via de verschillende delen van een woning zijn weergegeven in figuur 4.3:



figuur 4.3: gemiddelde transmissieverliezen woning [3]

Zoals te zien treedt het grootste verlies op via het dak en via de wanden, maar ook via de vloer kan een aanzienlijke hoeveelheid energie verloren gaan. Bij nieuwbouw is het relatief goedkoop om isolatie aan te leggen, omdat hier tijdens het ontwerp al rekening mee kan worden gehouden. Bij renovatie is het een stuk duurder, aangezien de bestaande structuur opgebroken dient te worden.

De hoeveelheid energie die door een onderdeel van de constructie verloren kan gaan is afhankelijk van gebruikte materiaal, de dikte van het materiaal en het temperatuurverschil binnen en buiten de woning. Elk materiaal heeft een specifieke warmtegeleidingcoëfficiënt (λ) die weergeeft hoeveel vermogen er door 1 m² materiaal met een dikte van 1 m kan gaan per graad temperatuurverschil tussen de beide zijden van het materiaal. Hoe lager λ , des te minder warmte er door het materiaal kan trekken en des te beter de isolatie. Isolatiematerialen hebben een λ van maximaal 0,065 W/m K. Aangezien λ wordt uitgedrukt voor materiaal met een dikte van 1 m, zal er een aanpassing moeten worden gedaan voor materialen met een andere dikte. Daarvoor wordt de warmteweerstand (R_c) van een materiaal laag gebruikt. De R_c wordt berekend door de dikte van het materiaal te delen door λ .

$$R_c = \frac{d}{\lambda} \tag{c}$$

R_c : warmteweerstand in m² K/W

d : dikte van het materiaal in m

λ : warmtegeleidingscoëfficiënt in W/m K

- *Ventilatie*

Onder ventilatie wordt het afvoeren van vervuilde lucht en het aanvoeren van verse lucht verstaan. In eerste instantie wordt geventileerd om de luchtkwaliteit te verhogen. Echter, door het afvoeren van warme lucht gaat energie verloren. Daarom is het van

belang de juiste hoeveelheid lucht te vervangen om de kwaliteit van het binnenmilieu te verbeteren en daarbij zo min mogelijk energie te verliezen.

Er kan onderscheid worden gemaakt tussen drie typen ventilatie (Hasselaar, 2002):

- natuurlijke ventilatie: toe- en afvoer gebeuren op natuurlijke wijze;
- mechanische ventilatie: toevoer gebeurt natuurlijk, afvoer mechanisch;
- balansventilatie: toe- en afvoer gebeuren mechanisch.

In de nieuwbouw wordt natuurlijke ventilatie niet toegepast en daarom zullen alleen mechanische en balansventilatie in beschouwing worden genomen. Bij het gebruik van balansventilatie kan de uitgaande lucht gebruikt worden om de binnenkomende lucht te verwarmen. Hierdoor wordt tot 95% van de daar aanwezige warmte gerecupereerd, waardoor het energieverlies door ventilatie sterk beperkt wordt.

4.3.2 Gebouwgebonden duurzame energie

Zoals weergegeven in tabel 1.1 (§1.4) zijn er drie soorten gebouwgebonden duurzame energie soorten relevant voor Nederland:

- *Zonne-energie*

De zon straalt dagelijks een grote hoeveelheid energie over het aardoppervlak. In 1 uur onderschept de aarde een hoeveelheid energie die overeenkomt met het jaarlijks wereld energieverbruik. Zelfs Nederland ontvangt jaarlijks een hoeveelheid zonne-energie die overeenkomt met 500 maal ons jaarlijks elektriciteitsverbruik. Een gedeelte van deze energie kan passief of actief benut worden. Bij passieve zonne-energie wordt er gebruik gemaakt van de zonnewarmte zonder het gebruik van installaties, bijvoorbeeld door het dusdanig ontwerpen van gebouwen dat optimaal gebruik wordt gemaakt van binnentredende straling voor verwarming en verlichting. Bij actieve zonne-energie worden er installaties ingezet om de zonne-energie te benutten: zonneboilers voor thermische energie en zonnecellen waarmee de thermische energie omgezet wordt in elektrische energie.

- *Windenergie*

Elektriciteit kan worden opgewekt met behulp van windenergie. Windenergie is een schone en onuitputtelijke energievorm en wordt omgezet in elektriciteit met behulp van windturbines. Het belangrijkste deel van de turbine zijn de rotorbladen (de wieken). Deze zijn zo gevormd dat ze al bij weinig wind gaan draaien. De rotorbladen zitten vast aan een as die met de bladen meedraait. De draaiende beweging van de as wordt al dan niet versneld doorgegeven aan een generator die elektriciteit opwekt. Bij de plaatsing van een windturbine wordt rekening gehouden met mogelijke hinder door geluid en schaduw. De windturbine moet op voldoende afstand (vuistregel is 4 maal de masthoogte) van huizen staan om geluidsoverlast te voorkomen. Daarnaast laat de windmolen een (bewegende) schaduw ontstaan. Deze zogeheten slagschaduw kan bij een lage winterzon hinder veroorzaken, als de turbine te dicht bij een woonhuis staat. Verder is het zo dat windturbines beeldbepalende elementen vormen in het landschap, wat door sommigen wordt dit betiteld als horizonvervuiling. Om de overlast te verkleinen worden windturbines buiten bewoond gebied geplaatst. Voor toepassing in de gebouwde omgeving zijn er speciale kleine windturbines ontwikkeld, ook wel stadsturbines genoemd, die op daken van hoge woongebouwen kunnen worden geplaatst. Stadsturbines zijn in twee groepen in te delen. Op de eerste plaats horizontale windasturbine (HAT) die draaien om een as die in de windrichting staat. Op de tweede plaats verticale windasturbine (VAT) die draaien om een as die loodrecht op de windrichting staat.

- *Warmtepomp*

Een warmtepomp onttrekt warmte aan een bron, verhoogt de temperatuur ervan en geeft de warmte weer af. Een warmtepomp maakt gebruik van warmtebronnen die in

eerste instantie niet direct bruikbaar zijn, zoals buitenlucht, oppervlaktewater, grondwater en ventilatielucht. De warmte in deze bronnen is in principe onbeperkt en kosteloos beschikbaar. De warmte kan gebruikt worden als ruimte- of tapwaterverwarming. In de gebouwde omgeving worden warmtepompen veelal toegepast in combinatie met Lage Temperatuur Verwarming (LTV) (§5.7). Aangezien in dit onderzoek uit wordt gegaan van Hoge Temperatuur Verwarming (HTV) die voorziet in ruimte- en tapwaterverwarming, zullen warmtepompen buiten beschouwing worden gelaten.

4.4 Conclusie

In dit hoofdstuk is het begrip duurzaam bouwen uitgelegd, waarbij het energie-aspect van duurzaam bouwen uitgebreid is toegelicht. Vanuit de overheid worden er eisen gesteld aan de energiekwaliteit van nieuwbouw projecten. Om aan deze eisen te voldoen kan er enerzijds energiebesparingmaatregelen worden getroffen, zoals isolatie en gebalanceerde ventilatie. Anderzijds kunnen er op gebouwniveau duurzame energietechnieken worden toegepast, zoals windenergie en zonne-energie. In hoofdstuk 6 zal besproken worden in hoeverre deze technieken bijdragen aan energiebesparing of energielevering en welke kosten hiermee gepaard gaan. In het volgende hoofdstuk wordt de biomassacentrale uitgebreid besproken.

Hoofdstuk 5 Analyse Biomassa en Bio-energie

In dit hoofdstuk zal de vierde onderzoeksvraag beantwoord worden:

Wat is biomassa en hoe kan deze omgezet worden in bio-energie?

Om antwoord te geven op deze vraag zijn verschillende literatuurbronnen geraadpleegd en hebben er gesprekken met experts plaatsgevonden. In dit hoofdstuk wordt in §5.1 antwoord gegeven op de vraag: wat is biomassa? In §5.2 wordt de wettelijke definitie van biomassa besproken. §5.3 bespreekt het pad van biomassa naar bio-energie. In §5.4 worden de verschillende conversietechnieken kort besproken. §5.5 bespreekt de afbakening van het onderzoek. In §5.6 en §5.7 komt de levering van de eindproducten aan bod. Tenslotte wordt in §5.8 besproken welke kentallen een rol spelen bij het gebruik van biomassa.

5.1 Wat is biomassa?

Biomassa kan worden omschreven als organisch materiaal dat, in tegenstelling tot fossiele brandstoffen, kort-cyclisch is ontstaan. In biomassa is zonne-energie chemisch opgeslagen door middel van fotosynthese. Fotosynthese is de omzetting van kooldioxide (CO₂) en water in glucose en zuurstof onder invloed van licht. De glucose wordt vervolgens omgezet in complexe biochemische verbindingen. In een later stadium kan deze weer worden vrijgemaakt en benut. Bij de omzetting komt CO₂ vrij, zodat een gesloten kringloop ontstaat. Doordat biomassa in kort-cyclisch ontstaat, leidt de omzetting in energie niet tot een verhoogd broeikas-effect. Daarom wordt biomassa in tegenstelling tot fossiele brandstoffen als duurzame energie gekenmerkt.

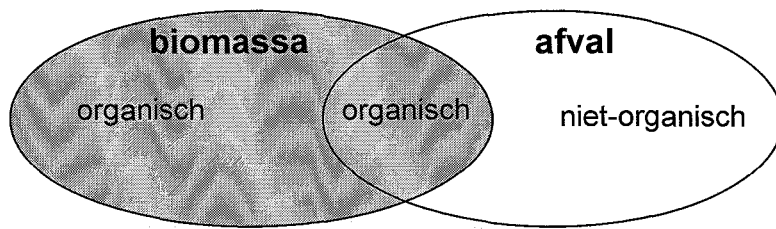
Biomassa kan bestaan uit plantaardige reststromen die direct als duurzame energiebron gebruikt kunnen worden. Via de voedselketen kan het plantaardig materiaal ook omgezet worden in dierlijk organisch materiaal. Mest van koeien, varkens of kippen is daarom ook te zien als biomassa en dus als mogelijke bron voor duurzame energie.

5.2 Wettelijke definitie biomassa

Een wettelijke definitie van biomassa is die van de Europese richtlijn 2001/77/EG (artikel 2b): *'de biologisch afbreekbare fractie van producten, afvalstoffen en residuen van de landbouw (met inbegrip van plantaardige en dierlijke stoffen), de bosbouw en aanverwante bedrijfstakken, evenals de biologisch afbreekbare fractie van industrieel en huishoudelijk afval'*

Biomassa wordt onderverdeeld in zuivere en niet-zuivere biomassa. Biomassa wordt als zuiver beschouwd als het maximaal 3% kunststof bevat. Biomassa met meer dan 3% kunststof wordt als niet-zuivere biomassa beschouwd. De indeling zuivere biomassa versus niet-zuivere biomassa kan van belang zijn bij het toekennen van subsidies. Energie gewonnen uit zuivere biomassa komt eerder in aanmerking voor subsidies dan energie uit niet-zuivere biomassa.

Uit deze definities komt voort dat ook de organische fractie van afval gezien kan worden als biomassa. Een voorbeeld hiervan is huishoudelijk afval, wat kan bestaan uit plastic verpakkingen maar ook karton en groenafval. In figuur 6.1 is de verhouding tussen biomassa en afval weergegeven. Het grijs gekleurde gedeelte van deze figuur geeft aan wat in dit rapport verstaan wordt onder biomassa. In de rest van dit rapport zal de term biomassa dan ook gebruikt worden voor zowel biomassa als afval met een fractie organisch materiaal.

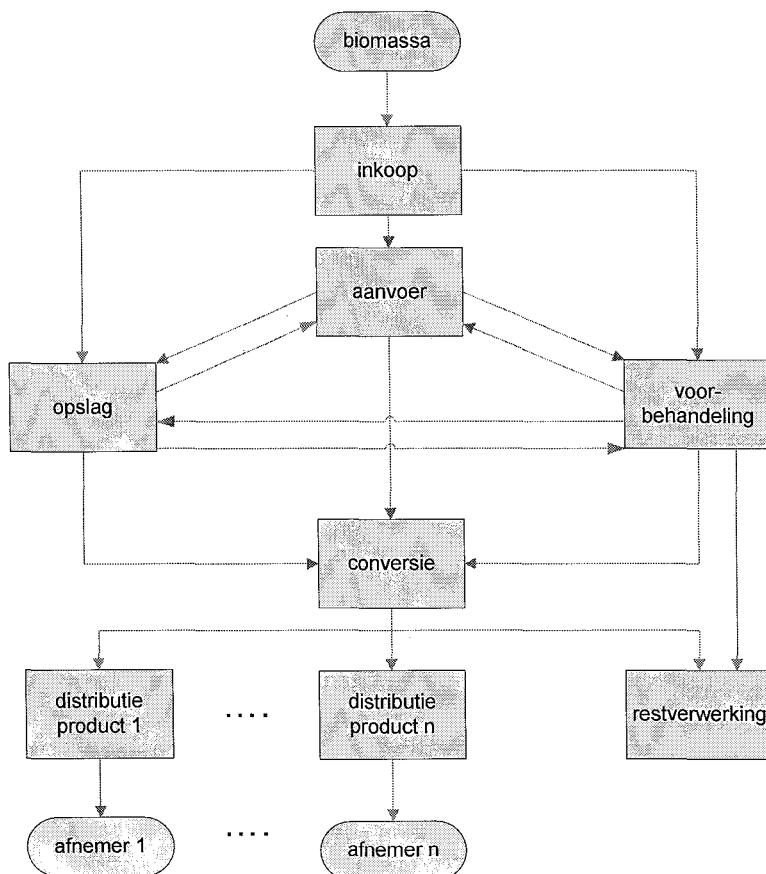


figuur 5.1: indeling biomassa

Een andere indeling is in schone versus niet-schone biomassa. Schone biomassa heeft een bekende constante samenstelling met weinig schadelijke bestanddelen. Deze biomassasoorten mogen worden verbrand onder de eisen, gesteld aan de rookgassen van fossiele brandstoffen (BEES: Besluit Emissie Eisen Stookinstallaties). De rookgassen van niet-schone biomassa moeten voldoen aan eisen bij de verbranding van huishoudelijk afval. Het gegeven of een biomassa schoon of niet-schoon is betekent in de praktijk een aanzienlijk verschil in vergunningsregime, rookgasreiniging en daardoor in investering- en onderhoudskosten.

5.3 Energie uit biomassa

Op basis van het model van Daey Ouwens (in Houben, 1999) en de indeling van Welink en van der Koogh (2004) is de energiewinning uit biomassa, van bron tot afnemer, onderverdeeld in een aantal deelprocessen. Deze deelprocessen en hun mogelijke volgorde worden in figuur 5.2 weergegeven:



figuur 5.2: procesdiagram bio-energie

De deelprocessen kunnen als volgt worden omschreven:

- *Inkoop*
Inkoop is het proces van het verkrijgen van de biomassa. Alle inspanningen die worden gedaan voordat de biomassa beschikbaar is, vallen onder inkoop.
- *Aanvoer*
De biomassa zal van de bron naar de plaats van conversie moeten worden vervoerd. Bij het maken van keuzen betreffende de inzameling van biomassa is de concentratie van de stromen van belang. Als de stroom erg diffuus is (kleine hoeveelheden over een groot gebied verspreid), wordt de inzameling ingewikkelder en kostbaarder. Bij sterk geconcentreerde stromen (grote hoeveelheden op een klein aantal locaties) is de logistiek aanzienlijk eenvoudiger.
- *Voorbehandeling*
Installaties stellen eisen aan de vorm van de voeding. Als de biomassa niet aan deze eisen voldoet, moet hij worden voorbehandeld om geschikt te zijn voor verdere verwerking. Deze voorbehandelingen kunnen plaatsvinden bij de bron (voor de aanvoer) of bij de locatie waar de conversie plaats vindt (na de aanvoer).
- *Opslag*
Bepaalde biomassa stromen zijn alleen periodiek verkrijgbaar, veelal door seizoensinvloeden. Om een zekere continuïteit in de energie voorziening te waarborgen, is er een opslagfaciliteit nodig. Bovendien is de bedrijfsvoering volcontinu, terwijl de aanvoer alleen overdag op doordeweekse dagen plaatsvindt. Daarom zal er een opslagfaciliteit nodig zijn om aan de biomassavraag 's nachts en in het weekend te voorzien. Deze opslag kan voor of na de voorbehandeling plaatsvinden en op de plaats van de bron van de biomassa (voor de aanvoer) of op de plaats van verwerking (na de aanvoer).
- *Conversie*
Conversie is de daadwerkelijke omzetting van biomassa in bruikbare energie. Hiervoor bestaan een aantal verschillende technieken, die in §5.4 beschreven worden.
- *Restverwerking*
Sommige technieken (voorbehandeling en/of conversie) produceren naast energie vaste reststoffen. In sommige gevallen zijn die nuttig bruikbaar, al dan niet na een nabehandeling. Het kan ook voorkomen dat deze reststoffen schadelijke componenten bevatten en daarom een speciale behandeling vereisen.
- *Distributie*
De energie die wordt opgewekt bij de conversie van biomassa kan in verschillende vormen vrijkomen: elektriciteit, warmte en brandstoffen. In het geval dat er twee energieproducten vrijkomen uit een enkele brandstof, meestal een combinatie van warmte en elektriciteit, is er sprake van co-generatie (Sims, 2002). Ieder product moet naar de eigen afnemer vervoerd worden.

5.4 Conversietechnieken

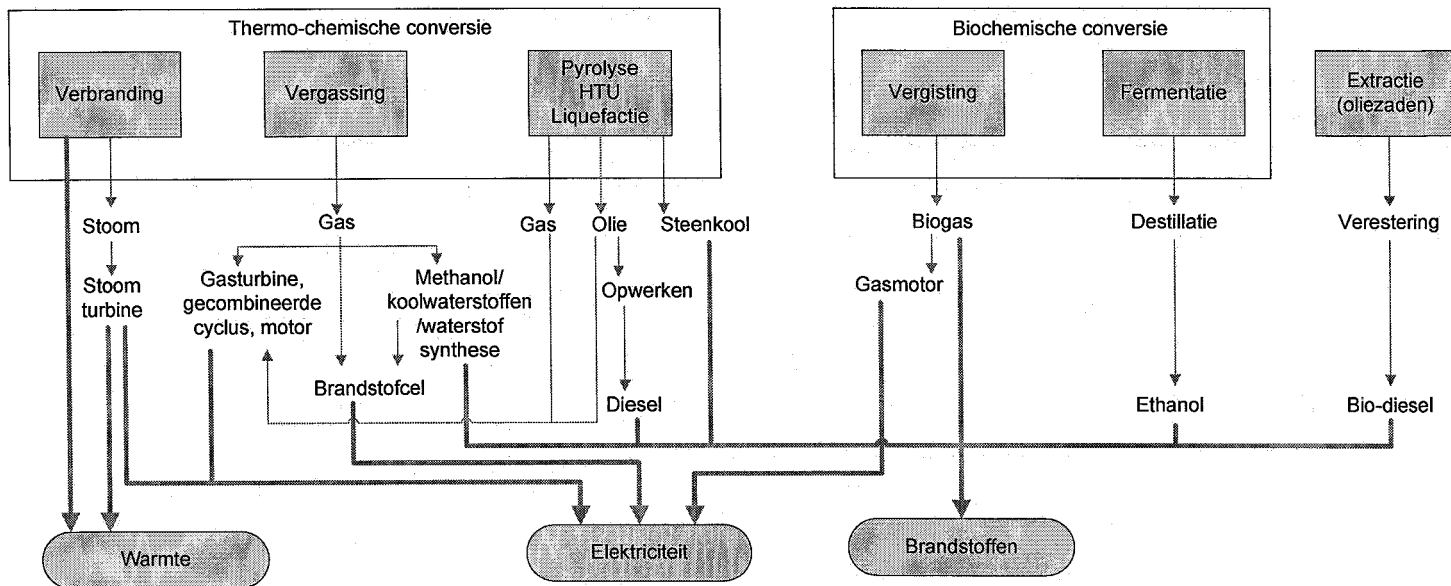
De verschillende conversietechnieken zijn in te delen in drie categorieën (Bastiaans, Oijen & Prins, 2005):

- Thermisch-chemische conversie:
 - *Verbranding*, een thermisch conversieproces waarbij de biomassa onder toevoeging van zuurstof wordt omgezet in warmte. Deze warmte kan vervolgens via een stoomcyclus in elektriciteit worden omgezet. Bij de verbranding van biomassa wordt onderscheid gemaakt tussen stand-alone installaties en mee- en bijstoken. Bij stand-alone installaties wordt warmte of elektriciteit opgewekt of een combinatie hiervan in de vorm van warmtekrachtkoppeling. Bij mee- en bijstoken wordt biomassa verbrandt in (kolen)centrales. Dit brengt relatief lage investeringskosten met zich mee.
 - *Vergassing*, een thermisch conversieproces waarbij de biomassa met een ondermaat aan zuurstof wordt omgezet in een gasvormige brandstof. Afhankelijk van het vergassingsmedium, bijvoorbeeld lucht of zuurstof ontstaat respectievelijk stookgas of synthesegas. Stookgas kan worden gebruikt om elektriciteit op te wekken in een gasmotor of gasturbine, terwijl synthesegas als grondstof in de chemische industrie ingezet kan worden.
 - *Pyrolyse/ hydro-thermal upgrading(HTU)/liquefactie*, het proces waarbij biomassadeeltjes onder invloed van hoge temperaturen in afwezigheid van zuurstof worden omgezet in een brandstof (een olie, gas of kool)

- Fysisch-chemische conversie
Voor bepaalde biomassasoorten, zoals koolzaad en palm- en zonnebloempitten, is een conversie naar plantaardige oliën of bio-olie mogelijk. Dit kan gebeuren via persing of extractie. Bij persing wordt op mechanische wijze de vloeibare fractie van de vaste gescheiden. Bij extractie wordt de vloeibare olie onttrokken door toevoeging van een oplosmiddel, waarbij een vaste fractie overblijft. Door bio-olie te veresteren kunnen de eigenschappen van de olie aangepast worden aan de eisen die aan dieselbrandstof (biodiesel) gesteld worden, zodat een toepassing als transportbrandstof mogelijk wordt. De bio-olie kan ook rechtstreeks als transportbrandstof (PPO: Pure Plant Oil) worden ingezet, alleen dit vergt een aanpassing van de conventionele motoren.

- Biochemische conversie
 - *Vergisting*, hierbij wordt biologisch afbreekbaar materiaal door bacteriën onder anaërobe condities omgezet in een brandbaar biogas dat bestaat uit methaan, koolstofdioxide en sporen van andere gassen. Met het gas kunnen elektriciteit en warmte worden opgewekt en het gas kan ook worden opgewerkt tot aardgaskwaliteit en in het bestaande aardgasnet worden geïnjecteerd. Vergisting is met name geschikt voor natte biomassa.
 - *Fermentatie*, hierbij zetten bacteriën of gist een grondstof om in ethanol (C_2H_5OH).

Deze conversietechnieken en hun tussen- en eindproducten worden in figuur 6.3 schematisch weergegeven.



figuur 5.3: conversietechnieken bio-energie (Bastiaans, Oijen & Prins, 2005)

5.5 Keuze conversietechnieken

Uit het voorgaande blijkt dat biomassa een erg ruim begrip is. Ten behoeve van dit onderzoek moet er een keuze gemaakt worden welke technieken en biomassasoorten worden onderzocht. In de eerste plaats wordt deze keuze bepaald vanuit de eindgebruikers. In dit geval zijn dat de afnemers uit de woning- en bedrijventerreinen. De energievraag van deze afnemers is voornamelijk in de vorm van warmte en elektriciteit. Daarom vallen de conversietechnieken die niet als eindproducten warmte en elektriciteit hebben (fermentatie, extractie en pyrolyse/HTU/liquefactie) af. De conversietechnieken vergisting, vergassing en verbranding blijven over. Uit gesprekken met Daey Ouwens (2006) en Hermans en Knops (2006) is naar voren gekomen dat vergassing van biomassa buiten beschouwing moeten worden gelaten, omdat deze techniek zich nog in de ontwerp/pilotfase bevindt en de technische haalbaarheid daarom niet gegarandeerd is. De twee biomassa conversietechnieken die de komende tien jaar in Nederland een bijdrage kunnen leveren voor het opwekken van warmte/elektriciteit op middelgrote schaal zijn verbranding en vergisting. Dit onderzoek zal zich dan ook richten op biomassa verbrandings- en vergistingsinstallaties.

5.6 Energielevering door biomassacentrale

De twee belangrijkste nuttige producten van een biomassacentrale zijn warmte en elektriciteit. De gekoppelde opwekking van deze twee producten wordt warmte/kracht koppeling (WKK) genoemd. Door deze koppeling kan er een hoger rendement behaald worden dan wanneer de twee producten afzonderlijk zouden worden opgewekt. In figuur 6.4 is een rekenvoorbeeld uitgewerkt om dit hogere rendement aan te tonen:

De energiebesparing die de WKK-centrale oplevert, kan berekend worden door de rendementen van een WKK-centrale te vergelijken met twee afzonderlijke installaties voor de opwekking van elektriciteit en warmte (Bijsterbosch, 2000):

- rendement elektriciteitscentrale: 52%
- rendement ketelinstallatie: 90%
- WKK elektrisch rendement: 35%
- WKK thermisch rendement: 50%

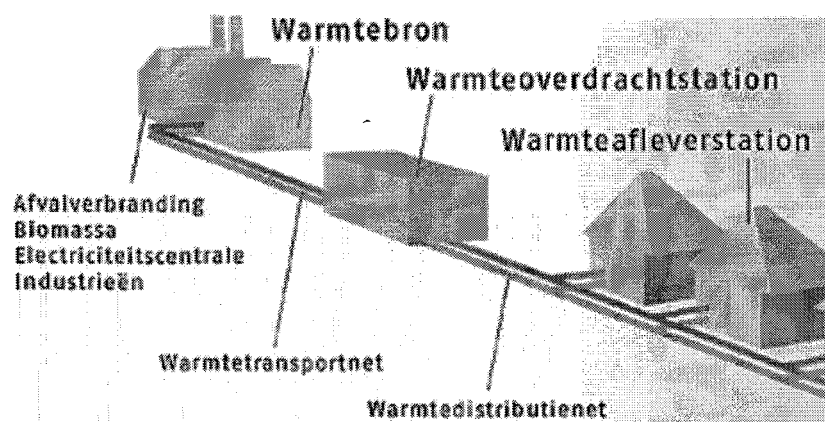
Per eenheid brandstof wekt een WKK-centrale 0,35 eenheden elektrische energie en 0,5 eenheden thermische energie, in totaal 0,85 eenheden energie. Bij gescheiden opwekking zijn voor deze zelfde hoeveelheden energie $0,35/0,52 + 0,5/0,90 = 1,225$ eenheden brandstof nodig. Dat betekent dat deze WKK-centrale 18% minder brandstof nodig heeft dan gescheiden energie opwekking.

figuur 5.4: rekenvoorbeeld rendement WKK

Het vermogen van een centrale wordt doorgaans uitgedrukt in MW_e . Naast het elektrisch vermogen heeft de centrale een thermisch vermogen. Om te benaderen hoeveel warmte en elektriciteit er gekoppeld kan worden opgewekt kan als vuistregel gesteld worden dat bij verbranding $1 MW_e$ kan worden opgewekt tegenover 3 tot $4 MW_{th}$ (van Hilten & Gerlagh, 2000). Bij vergisting geldt dat er $1 MW_e$ kan worden opgewekt tegenover 1,3 tot $1,6 MW_{th}$ (Veenstra, 2006), (CBS, 2007).

5.7 Warmtenet

Bij nieuwbouw van woningen wordt er standaard een elektriciteitsnet en een gasnet aangelegd. Het gas, dat via het gasnet gedistribueerd wordt, wordt in de woningen gebruikt voor verwarming van tapwater, ruimteverwarming en voedselbereiding. In het geval van een biomassacentrale wordt warmte geleverd voor ruimteverwarming en warm tapwater via een warmtenet. Het gasnet zou in dit geval alleen dienen voor de voorziening van gas voor voedselbereiding. Omdat het gasverbruik voor voedselbereiding van een gemiddelde woning slechts 4% van het totale gasverbruik is, is het niet rendabel om een gasnet aan te leggen voor alleen voedselbereiding. Als in de nieuwbouwwoningen een elektrische kookinstallatie wordt aangelegd, kan het gasnet vervangen worden door het warmtenet. Deze bestaat uit een transportsysteem en distributieleidingen. De transportleidingen voeren het water van de biomassacentrale naar een warmteoverdrachtstation, van waaruit het met distributieleidingen wordt verdeeld naar (groepen van) woningen en gebouwen. Dit is weergegeven in onderstaande figuur.



figuur 5.5: warmtenet

De investering in de collectieve voorzieningen van een warmtenetwerk zijn hoger dan die van een gasnetwerk omdat de leidingen die gebruikt worden een grotere diameter hebben en moeten worden geïsoleerd om het warmteverlies te beperken. Bovendien moeten de

leidingen dubbel worden aangelegd: heen voor warm water, terug voor koud water. Daarentegen hoeven er geen investeringen gedaan te worden in cv-ketels.

De keuze voor het al dan niet vervangen van een aardgasinstallatie door een warmtenet wordt niet alleen bepaald op basis van kosten, ook de acceptatie van de gebruiker speelt een belangrijke rol. Gebruikersgemak en comfort van de energievoorziening worden afgemeten aan onder andere de volgende aspecten (Buhre et al., 2001):

- temperatuurniveau van de aangeleverde warmte;
- type warmteafgifte systeem;
- ruimtebeslag;
- snelheid van opwarming van de woning;
- mogelijkheden tot voorregeling van het vermogen;
- wachttijd en capaciteit voor warm tapwater;
- storingsgevoeligheid.

Het comfort van warmtelevering wordt door gebruikers in het algemeen hoger gewaardeerd dan dat van een gasgestookte cv-installatie. Gebruiksvoordelen zijn onder meer de afwezigheid van onderhoud, ruimtebesparing en afwezigheid van open vuur in huis.

5.8 Biomassa kentallen

Voor de opwekking van energie kunnen vele soorten biomassa gebruikt worden. Elke soort wordt gekenmerkt door specifieke fysische en chemische eigenschappen die invloed hebben op de energie opbrengst. De belangrijkste eigenschappen van biomassa worden hieronder behandeld.

5.8.1 Vochtgehalte

Een belangrijk kental van biomassa is het vochtgehalte. Het vochtgehalte geeft het massapercentage vocht ten opzichte van de totale massa van de biomassa weer. Dit vochtgehalte heeft invloed op de hoeveelheid energie die vrij kan komen uit biomassa. Dit zal verder besproken worden in §5.8.3.

5.8.2 Asgehalte

Een ander belangrijk kental van biomassa is het asgehalte. Dit geeft het massapercentage as ten opzichte van de totale massa van de biomassa weer. As is het onbrandbare deel van de biomassa dat uit mineralen bestaat. Dit asgehalte heeft net als het vochtgehalte invloed op de hoeveelheid energie die vrij kan komen uit biomassa. Dit wordt besproken in §5.8.3. Bovendien blijft het asgehalte van de biomassa na de conversie over als reststof die verwerkt moet worden. Dit brengt kosten met zich mee.

5.8.3 Verbrandingswaarde

Verbrandingswaarde is een maat voor de theoretische hoeveelheid warmte die vrijkomt als de brandstof geheel verbrandt. Zij wordt uitgedrukt in Megajoules per kilogram brandstof (MJ/kg). De verbrandingswaarde wordt door twee verschillende variabelen weergegeven: de bovenste (Higher Heating Value, HHV) en de benedenste verbrandingswaarde (Lower Heating Value, LHV). De HHV is de theoretische hoeveelheid warmte die vrijkomt, waarbij het water dat gevormd wordt na afloop van de verbranding wordt gecondenseerd. Bij de meeste verbrandingsprocessen komt water, dat proceswater wordt genoemd, echter gasvormig vrij. In dit geval is een gedeelte van de energie verbruikt voor het vormen van het gasvormige water, waardoor de verbrandingswaarde daalt. De verbrandingswaarde die ontstaat na aftrek van de energie benodigd voor het vormen van gasvormig proceswater wordt de LHV genoemd. De LHV wordt als volgt berekend:

$$LHV = HHV - X_{H_2O} \times W_{H_2O} \quad (d)$$

X_{H_2O} : proceswaterfractie

W_{H_2O} : verdampingswarmte van water = 2,44 MJ/kg

Deze formule geldt alleen voor biomassa zonder water, ook wel 'droge stof' genoemd. In de praktijk bestaat biomassa echter vaak gedeeltelijk uit water. De hoeveelheid warmte die daadwerkelijk vrij komt bij de verbranding hangt ook af van het vochtgehalte van de stof. Als de biomassa veel vocht bevat, dan is een gedeelte van de verbrandingsenergie nodig om dat vocht te laten verdampen. Bij een hoger vochtgehalte zal de hoeveelheid energie die vrijkomt lager zijn dan de verbrandingswaarde van de droge stof. De daadwerkelijke hoeveelheid warmte die vrij komt wordt de LHV als ontvangen (LHV_{ao}) genoemd en wordt eveneens uitgedrukt in MJ/kg. Door voorbehandelingen als mechanisch ontwateren kan het vochtgehalte van de stof verlaagd worden zodat de hoeveelheid warmte die vrijkomt kan toenemen.

Een methode om de LHV_{ao} van een brandstof te bepalen is uitgaan van de verbrandingswaarde van een stof en daar de energie die nodig is om de waterfractie te verdampen af te trekken. De waterfractie is de hoeveelheid water in kg ten opzichte van het totale gewicht van de brandstof in kg. Deze verhoudingen worden weergegeven met de volgende formule [4]:

$$LHV_{ao} = LHV - R_{H_2O} \times W_{H_2O} \quad (e)$$

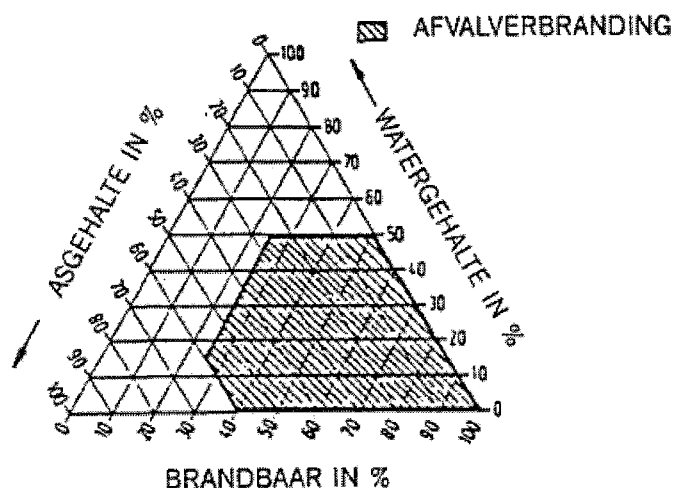
LHV_{ao} : LHV van de biomassa zoals deze ontvangen is

R_{H_2O} : vochtgehalte (kg water / kg totale massa)

W_{H_2O} : verdampingswarmte van water (MJ/kg) = 2,44 MJ/kg

De HHV, LHV en het gemiddelde vochtgehalte van verschillende biomassasoorten kunnen gevonden worden in een database, zoals Phyllis dat opgesteld is door ECN [6].

Bij verbranding speelt behalve het vochtgehalte ook het asgehalte een belangrijke rol. As is het onbrandbare deel van de biomassa dat uit mineralen bestaat. De verbrandingswaarde van een stof wordt dus bepaald door het asgehalte, het watergehalte en het brandbare gedeelte van de stof. De driehoek van Tanner geeft weer aan welke voorwaarden een stof moet voldoen om autotherm (zonder het bijstoken van secundaire brandstoffen) brandbaar te zijn (van Kasteren & Raats, 1997):



figuur 5.6: de driehoek van Tanner

Hieruit blijkt dat het asgehalte in ieder geval beneden de 60% dient te liggen, het watergehalte beneden de 50% en de brandbare fractie boven de 25%. Als de biomassa aan deze eisen voldoet is deze in principe bruikbaar voor verbranding. Echter, ook als de biomassa aan deze eisen voldoet dient er rekening te worden gehouden met de asfractie. Zo kan een te hoge asfractie leiden tot vervuiling van de installatie, wat hoge onderhoudskosten tot gevolg heeft. Dit moet bij een haalbaarheidsstudie worden meegenomen in de technische haalbaarheid onder de indicator onderhoudbaarheid (§2.2.1).

5.8.4 Dichtheid

Bij de aanvoer en opslag van biomassa is de dichtheid ervan van belang. De dichtheid van een materiaal geeft de massa in verhouding tot het volume, bijvoorbeeld kg/m^3 . Deze dichtheid is bij biomassa niet eenduidig te bepalen, omdat vochtgehalte, vorm en verdichting een belangrijke rol spelen. Het vochtgehalte van biomassa heeft invloed op de dichtheid van biomassa. De vorm waarin biomassa zich voordoet (bijvoorbeeld massieve brokken, of snippers) heeft invloed op de hoeveelheid lucht die zich tussen de losse delen kan bevinden en daarmee wordt het specifieke volume en dus ook de dichtheid ervan beïnvloed. Door bepaalde voorbereidingen kan de dichtheid van de biomassa toe- of afnemen.

5.8.5 Energiedichtheid

Uit de verbrandingswaarde en de dichtheid van een stof kan de energiedichtheid van deze stof bepaald worden. Deze energiedichtheid is de hoeveelheid energie die de stof per volume-eenheid kan produceren, uitgedrukt in MJ/m^3 . Deze waarde is erg geschikt om verschillende biomassasoorten te vergelijken. Hoe hoger de energiedichtheid, des te kleiner kunnen de conversie-installaties, opslagcapaciteiten en vervoerscapaciteiten zijn benodigd voor een bepaalde energie hoeveelheid. Meestal geldt dan ook dat biomassa met een hoge energiedichtheid geschikter is voor energievoorziening dan biomassa met een lagere energiedichtheid.

5.9 Conclusie

In dit hoofdstuk is antwoord gegeven op de vraag wat biomassa is en hoe biomassa omgezet kan worden in thermische en/of elektrische energie. De verschillende methoden voor deze omzetting zijn beschreven en er is een keuze gemaakt voor twee methoden die in dit onderzoek zullen worden uitgewerkt: verbranding en vergisting. De kenmerken van biomassa die van invloed zijn op de verwerking ervan zijn besproken. In hoofdstuk 6 wordt deze informatie gebruikt voor het ontwerpen van model ter bepaling van de economische haalbaarheid van deze technieken wanneer toegepast op een woning- en bedrijventerrein.

Hoofdstuk 6 Ontwerp Kwantitatief Beslismodel

In voorgaande hoofdstukken is een analyse gemaakt van biomassa en bio-energie en duurzaam bouwen. In dit hoofdstuk wordt deze analyse verder uitgewerkt tot een beslismodel om antwoord te geven op de vijfde onderzoeksvraag:

Hoe kan de levering van bio-energie en de afname door de gebruikers gemodelleerd worden in één model ter bepaling van de economische haalbaarheid?

In §6.1 worden de uitgangspunten van het ontwerp besproken. In §6.2 worden verschillende energiebesparing opties besproken. In §6.3 worden de duurzame gebouwgebonden energieopties uiteen gezet. Vervolgens wordt in §6.4 de biomassacentrale behandeld. Tenslotte worden in §6.4 veranderingen in emissies die de energieopties met zich mee brengen besproken.

6.1 Uitgangspunten ontwerp

In dit hoofdstuk wordt een kwantitatief beslismodel ontworpen ter beoordeling van de economische haalbaarheid van een bio-energie project. In dit onderzoek zijn reeds een aantal richtlijnen naar voren gekomen waar de projecten aan moeten voldoen om met behulp van het model onderzocht te worden. Deze voorwaarden vormen de uitgangspunten van het ontwerp:

- het onderwerp van het onderzoek is een nieuwbouw woonwijk, eventueel met bedrijventerrein;
- de woningen hebben een EPC van maximaal 0,8;
- de energievraag van de woningen is bepaald op basis van een gemiddeld gebruikersgedrag in de referentiewoningen beschreven in §3.1;
- de woningen kunnen extra geïsoleerd worden om de energievraag te verlagen;
- de wijk wordt van warmte voorzien door een biomassa verbranding- of vergistingcentrale;
- deze centrale produceert ook elektriciteit die teruggeleverd wordt aan het net;
- aan de gebouwen kunnen optioneel zonnecellen, zonneboiler(combi)'s en kleinschalige windturbines worden toegevoegd.

6.2 Energiebesparing

Energiebesparing wordt verkregen door isolatie en gebalanceerde ventilatie. De kosten en opbrengsten hiervan worden hieronder besproken.

6.2.1 Kosten en opbrengsten isolatie

Door een gebouw goed te isoleren kan het energieverbruik dalen. Echter, verdere isolatie brengt ook hogere kosten met zich mee. In dit onderzoek wordt ervan uitgegaan dat de installatiekosten voor de isolatie onafhankelijk zijn van het type materiaal. Bij nieuwbouw leidt betere isolatie dus alleen tot hogere materiaalkosten.

Met behulp van het rekenprogramma EPC & Kosten [1] is berekend wat de bouwkundige kosten zijn van verhoging van R_c van gevel, dak en vloer en verlaging van de warmtedoorgangscoefficiënt (U) van de beglazing voor de verschillende referentiesituaties. Deze zijn weergegeven in bijlage IX.

De energiebesparing door deze verbetering in isolatie kan met behulp van formule f berekend worden (Petersdorff et al., 2005):

$$\Delta E = G \times \Delta U \tag{f}$$

waarbij:

ΔE : energiebesparing [kWh/m²/jaar]

G: het jaarlijks aantal graaduren [kKh/jaar]

ΔU : verschil in warmtedoorgangscoefficiënt voor en na de isolatie [W/ m² K]

waarbij:

$$U = \frac{1}{Rc} \quad (g)$$

Door deze energiebesparing te vermenigvuldigen met de grootte van de warmtegeleidingoppervlakten (zie bijlage III), wordt de absolute jaarlijkse energiebesparing verkregen.

6.2.2 Kosten en opbrengsten ventilatie

Uit de gegevens van de referentiewoningen blijkt dat om een EPC te behalen van 0,8 er gebalanceerde ventilatie moet worden toegepast met warmteterugwinning. Dit is de meest energie-efficiënte manier van ventilatie. Op het gebied van ventilatie zijn dus geen verbeteringen mogelijk ten opzichte van de referentiesituatie waarin uitgegaan wordt van gebalanceerde ventilatie met warmteterugwinning.

6.3 Gebouwbonden duurzame energieopties

In §4.3.2 is aan bod gekomen hoe zonne- en windenergie kunnen worden ingezet om gebouwbonden duurzame energie op te wekken. In deze paragraaf zullen de kwantitatieve aspecten van deze technieken besproken worden.

6.3.1 Zonne-energie

Zonne-energie kan actief gebruikt worden met behulp van zonneboilers en zonnecellen:

- *Zonneboiler*

Een zonneboiler maakt gebruik van zonnewarmte om tapwater te verwarmen. De boiler bestaat uit een collector, waardoor een netwerk van buisjes loopt, die op het dak wordt geplaatst. Door de buisjes stroomt een vloeistof die door de straling van de zon wordt verwarmd. Deze warmte kan in huis ingezet worden voor warm tapwater. Naast zonneboilers zijn er ook zonneboilercombi's die het warme water tevens inzetten voor ruimteverwarming. De verschillende typen zonneboilers worden in bijlage X uitgebreid beschreven. De energiebesparing op warm tapwater is gemiddeld 150 tot 200 m³ aardgas per jaar per woning voor een standaard zonneboiler met een collector van circa 3 m² en een opslagvat van circa 100 liter. De investeringskosten bij een nieuwbouwproject liggen tussen de €1500 en €1800, waar nog €400 tot €600 installatiekosten bij komen. De investeringskosten van een zonneboilercombi zijn €3100 tot €4450, waarboven ook de installatiekosten dienen te worden opgeteld [1]. De kosten van een biomassa-centrale kunnen door middel van subsidies gedeeltelijk vergoed worden door de overheid. In bijlage VIII is een overzicht te vinden van de mogelijkheden voor subsidiëring. De energiebesparing op ruimteverwarming is 75 tot 100 m³ aardgas per jaar.

Een nadeel van de zonneboilercombi is dat deze de meeste warmte levert op het moment dat de warmtevraag voor ruimteverwarming het laagst is, namelijk als de zon het sterkst schijnt. Op momenten dat de zonneboilercombi het water niet sterk genoeg opwarmt, moet het water extra naverwarmd worden met de cv-installatie of het warmtenet. Dit gebeurt op momenten waarop de warmtevraag voor ruimteverwarming uit deze installaties reeds hoog is en zorgt daarom voor een nog sterkere piek in het afnamepatroon.

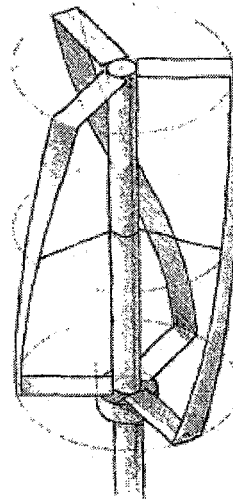
- Zonnecellen

Elektriciteit opgewekt met zonnecellen wordt aangeduid met PV, afgeleid van het Engelse PhotoVoltaic, de afkorting voor fofovoltaïsche zonne-energie. Zonnepanelen zijn opgebouwd uit meerdere fofovoltaïsche zonnecellen die in serie zijn geschakeld. Het elektrisch vermogen dat aan een zonnecel onttrokken kan worden is min of meer evenredig met het oppervlak en met de intensiteit van het zonlicht dat op het oppervlak valt en wordt gemeten in Wattpiek (Wp). Een Wp is gedefinieerd als het elektrisch vermogen dat een zonnecel levert bij standaard test condities (STC: een instraling van 1000 W/m², een stralend blauwe hemel in juni, een celtemperatuur van 25 graden Celsius). Onder deze omstandigheden levert een zonnecel van 1 Wp een vermogen van 1 W. Bij een lagere instraling of een hogere celtemperatuur levert de zonnecel minder vermogen. Het gemiddelde vermogen is voor Nederland ongeveer 10% van het Wp vermogen. Als vuistregel kan worden aangehouden dat 1 Wp jaarlijks 0,8 tot 0,9 kWh aan elektriciteit levert [6]. De investeringskosten per Wp zijn ongeveer €5,20 en de installatiekosten zijn €1 per Wp (Bogers, 2006). De kosten van zonnecellen kunnen door middel van subsidies gedeeltelijk vergoed worden door de overheid. In bijlage VIII is een overzicht te vinden van de mogelijkheden voor subsidiëring

Het aantal cellen dat op een woning geplaatst kan worden wordt begrensd door het dakoppervlak. Bij de referentiewoningen heeft alleen het appartementencomplex een plat dak, waardoor het totale dakoppervlak gebruikt kan worden. Bij de rest van de woningen zal alleen het schuine gedeelte dat op het zuiden georiënteerd is gebruikt kunnen worden voor zonnecellen. Het maximale oppervlak bedraagt bij deze woningen daarom de helft van het dakoppervlak. Hierbij kan als vuistregel genomen worden dat 100 Wp een oppervlakte in beslag neemt van 1 m² [1].

6.3.2 Kleinschalige windturbines

De jaarlijkse opbrengst van een windturbine is afhankelijk van vele factoren, onder andere het rotoroppervlak, de hoogte en de windsnelheid op de locatie. Om een indicatie van de opbrengsten te geven heeft de TU Delft met behulp van een rekenprogramma op basis van gegevens van het KNMI een schema opgesteld dat een indicatie geeft van de opbrengsten van een kleinschalige windturbine bij een bepaalde hoogte per postcode gebied. Dit overzicht is weergegeven in bijlage XI. Deze indicatie is op basis van de Turby, een verticale windasturbine ontwikkeld door onder andere TNO en TU Delft. De Turby is al in verschillende projecten succesvol toegepast [7] en zal in dit onderzoek als voorbeeld dienen. In de bijlage is te zien dat op de meeste plaatsen in Nederland de opbrengst van de Turby sterk afhankelijk is van de hoogte: hoe hoger de mast, hoe hoger de opbrengst. Dat betekent dat het verstandig is om de kleinschalige windturbines op hoge daken te plaatsen. De kosten van een Turby variëren tussen de €11.000 en €12.000 per stuk, afhankelijk van de hoogte exclusief BTW en installatie. In totaal zullen de kosten oplopen tot €20.000 per stuk. De kosten van stadsturbines kunnen door middel van subsidies gedeeltelijk vergoed worden door de overheid. In bijlage VIII is een overzicht te vinden van de mogelijkheden voor subsidiëring.



figuur 6.2: de Turby
(Vermeer, 2003)

6.4 Biomassacentrale

De twee producten van de biomassacentrale zijn warmte en elektriciteit. Om te bepalen of de bouw van de biomassacentrale haalbaar is, zal er zowel naar kosten als naar opbrengsten van de centrale gekeken moeten worden. De opbrengsten worden verkregen door de verkoop van elektriciteit en warmte. De hoogte van de opbrengsten en de kosten zijn afhankelijk van grootte van de centrale

6.4.1 Vermogen biomassacentrale

Zoals besproken in §3.2 wordt het vermogen van de biomassacentrale afgestemd op de warmtevraag. Daarbij wordt als startpunt de warmtevraag in de referentiesituatie genomen en worden de warmtebesparingen door de gekozen maatregelen (isolatie, zonneboiler) hiervan afgetrokken. De overgebleven warmtevraag bestaat uit een constant en een variabel, seizoensafhankelijk gedeelte. Het constante gedeelte is de warm tapwatervraag van de hele wijk en de proceswarmtevraag van de industrie. Het variabele deel bestaat uit de vraag naar ruimteverwarming van de woningen en utiliteit. Dit variabele gedeelte kan evenredig met de graaddagen over het jaar verdeeld worden. Er moet een keuze gemaakt worden welk gedeelte van de variabele warmtevraag door de centrale wordt geleverd:

- Het maximum is de totale variabele vraag, die overeenkomt met de vraag in de maand met het hoogste aantal graaddagen. Dit betekent dat er veel warmte verloren zal gaan, omdat de centrale gedurende de maanden met een lagere warmtevraag toch de maximale warmtevraag levert.
- Het minimum is de vraag in de maand met het laagste aantal graaddagen, wat in warmtevraag uitgedrukt kan worden door het minimaal aantal graaddagen te delen door het maximaal aantal graaddagen en dit te vermenigvuldigen met de variabele warmtevraag. In dit geval gaat er geen warmte verloren.
- Alle keuzen die tussen het maximum en het minimum in zitten leiden tot warmteverlies.

Als de maand met het laagste aantal graaddagen maand 1 wordt genoemd, en de maand met het hoogste aantal graaddagen maand 12, dan wordt bij een afstemming op maand x het vermogen van de biomassacentrale [MWth]:

$$\frac{\left(Q_{const} + \frac{g_x}{g_{tot}} \times Q_{var} \times 12 \right)}{60 \times 60 \times P_t} \left/ (1 - v_{distr}) \right. \quad (h)$$

waarbij:

Q_{const} : constante warmtevraag [MJ/jaar]

$g_{x,i}$: graaddagen in maand x op locatie i

$g_{tot,i}$: totaal aantal graaddagen per jaar op locatie i

Q_{var} : variabele warmtevraag [MJ/jaar]

P_t : productietijd [uren/jaar]

v_{distr} : distributieverlies [percentage]

In onderstaande figuur wordt dit aan de hand van een rekenvoorbeeld verduidelijkt.

Als voorbeeld wordt een wijk op locatie Eindhoven ingevoerd die uit 200 twee-onder-een-kap woningen bestaat. De jaarlijkse vraag naar ruimteverwarming is 4.423 GJ/jaar en naar warm tapwater 3.585 GJ/jaar. Als er voor wordt gekozen om aan de variabele warmtevraag te voorzien voor de vijf maanden met het laagst aantal graaddagen ($x = 5$) wordt het vermogen van de centrale 0,3 MWth. In onderstaande tabel is te zien hoe de ruimteverwarmingvraag over de maanden verdeeld is. Vervolgens is berekend hoeveel warmte voor ruimteverwarming er maandelijks wordt geleverd door de biomassacentrale en of dit leidt tot een warmte overschot of een warmte tekort. De tabel laat zien dat in maand 5 de warmtevraag en warmtelevering nagenoeg gelijk zijn. In maand 1 tot en met 4 is er een warmteoverschot, in maand 6 tot en met 12 een warmtetekort. Het warmtetekort wordt aangevuld door de hulpketel.

maand	aantal graaddagen	warmtevraag ruimteverwarming [GJ/maand]	warmtelevering ruimteverwarming [GJ/maand]	warmte overschot [GJ/maand]	warmte tekort [GJ/maand]
1	31	49	211	162	0
2	42	66	211	145	0
3	60	95	211	116	0
4	98	157	211	54	0
5	137	218	211	0	7
6	207	329	211	0	118
7	240	382	211	0	170
8	330	525	211	0	314
9	348	555	211	0	343
10	387	616	211	0	405
11	448	713	211	0	502
12	450	716	211	0	505
totaal	2.777	4.423	2.535	477	1.854

Hoe groter x wordt gekozen, des te lager het warmte tekort, maar des te hoger het warmte overschot. Hoe lager x wordt gekozen, des te hoger het warmte tekort, maar des te lager het warmte overschot.

figuur 6.1: rekenvoorbeeld vermogen biomassacentrale

Om de warmtelevering aan de wijk te garanderen, zal er een voorziening getroffen moeten worden die de wijk van warmte voorziet als de biomassacentrale deze niet kan leveren: een back-up systeem. Een oplossing hiervoor is een gasgestookte hulpketel. Deze kan bij de biomassacentrale geplaatst worden en warmte afleveren via het bestaande distributienetwerk. Deze voorziening moet ten alle tijden de vraag van de afnemers kunnen leveren en wordt daarom afgesteld op de piekvraag. Meer informatie over de hulpketel is te vinden in bijlage VII.

6.4.2 Warmteopbrengsten

De prijs die de gebruiker betaalt voor warmte wordt bepaald aan de hand van het "niet-meer-dan-anders" beginsel (nmda-beginsel). Dit gaat ervan uit dat er een dusdanig tarief voor de geleverde warmte wordt gevraagd dat het de warmteverbruiker gemiddeld niet meer kost dan bij het gebruik van aardgas voor individuele centrale verwarming (schaduwprijs). EnergieNed (2005) brengt jaarlijks een tariefadvies uit voor de levering van warmte aan kleingebruikers. De bepaling hiervan wordt in bijlage VI beschreven en voor 2005 komt dit neer op een eenmalige bijdrage van €1.897, een jaarlijkse bijdrage van €130,21 en een bijdrage van

$$\frac{1488 \times \text{gasprijs} + 58 \times \text{elektriciteitsprijs}}{35,40} \quad \text{€/GJ.} \quad (\text{i})$$

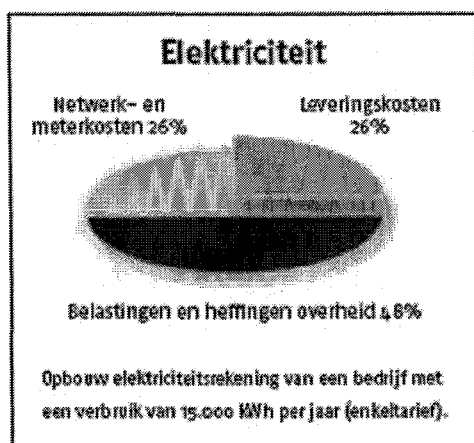
Bij een gasprijs van 0,5 €/m³ en een elektriciteitsprijs van 0,15 €/kWh komt dit neer op een warmteprijs van 21,26 €/GJ.

6.4.3 Elektriciteitsopbrengsten

De elektriciteit opgewekt door de biomassacentrale wordt via het elektriciteitsnet geleverd aan de gebruikers. De prijs die de gebruikers betalen voor deze elektriciteit bestaat uit de volgende onderdelen:

- *Leveringskosten*
De leveringskosten betreffen de elektriciteit zelf. Voor de leveringskosten geldt meestal een volume tarief, al dan niet aangevuld met een vermogensafhankelijk tarief.
- *Belastingen en heffingen*
Elektriciteit valt onder het BTW tarief van 19%. Verder wordt er ook Regulerende Energiebelasting (REB) geheven over elektriciteit.
- *Netwerk- en meterkosten*
De netkosten zijn de kosten van de elektriciteitsaansluiting en het vervoer van de elektriciteit van producent naar aansluiting. Deze bestaan uit de periodieke aansluitkosten en de transportkosten. Iedere regionale netbeheerder hanteert verschillende netkosten, afhankelijk van de aansluitwaarde. De maximale netkosten worden door de Dienst uitvoering en Toezicht Energie (DTE) vastgesteld en gepubliceerd [9]. Bepalend voor de netkosten zijn het totale verbruik van elektriciteit en het maximaal benodigde vermogen.

De verhouding tussen deze drie onderdelen van de elektriciteitsprijs zijn afhankelijk van het type afnemer (bedrijf of particulier) en de hoogte van het verbruik. Voor een bedrijf met een verbruik van 15.000 kWh/jaar is de opbouw van de elektriciteitsprijs in figuur 6.2 weergegeven:



figuur 6.2: voorbeeld opbouw elektriciteitsprijs

Van de prijs die de gebruikers voor de elektriciteit betalen, gaat slechts een gedeelte naar de biomassacentrale die de elektriciteit levert. Uiteraard gaat de belasting naar de overheid. De netkosten gaan naar de netbeheerder, die verantwoordelijk is voor de aanleg en het onderhoud van dit net. De elektriciteit die door de biomassacentrale geleverd wordt, wordt voor een terugleververgoeding verkocht aan de elektriciteitsleveranciers. De hoogte van deze vergoeding is afhankelijk van de lengte van het contract, de afleverhoeveelheid en het afleverpatroon. Het teruglevertarief ligt meestal tussen de 80% en 90% van het leveringstarief op het moment dat het contract wordt afgesloten (Cogen, 2004). Het leveringstarief zal rond de €0,05/kWh liggen. Omdat de kosten van het opwekken van elektriciteit uit duurzame bronnen momenteel hoger zijn dan €0,05/kWh, is het alleen rendabel om duurzaam elektriciteit op te wekken als daar een subsidie voor verleend wordt (zie bijlage VIII).

6.4.4 Kosten biomassacentrale

Onder de kosten van de biomassacentrale worden alle kosten verstaan die gemaakt worden om de producten op te wekken. Om deze kosten te berekenen wordt het proces uit figuur 5.2 van §5.3 gevolgd: inkoop, aanvoer, opslag, voorbereiding, conversie, distributie. Voor iedere processtap worden de kosten bepaald, zodat voor een specifieke situatie een specifieke volgorde van stappen kan worden bepaald. In bijlage VII zijn de kosten voor elke processtap gedetailleerd beschreven. De kosten van een biomassacentrale kunnen door middel van subsidies gedeeltelijk vergoed worden door de overheid. In bijlage VIII is een overzicht te vinden van de mogelijkheden voor subsidiëring.

6.5 Emissies

Naast de economische aspecten die in de voorgaande paragrafen aan bod zijn gekomen, is ook de milieuvriendelijkheid van de maatregelen van belang. Met behulp van een vergelijking tussen het energieverbruik in de referentiesituatie en in de nieuwe situatie, kan berekend worden welke invloed de maatregelen hebben op de hoeveelheid emissies. Een schadelijke stof die vrijkomt bij het gebruik van fossiele brandstoffen is CO₂. CO₂ versterkt het broeikas effect en wordt door de overheid gebruikt als maatstaf in de duurzame energie doelstellingen (zie §1.2). De invloed van de maatregelen op emissies wordt in het model daarom gemeten aan de hand van de hoogte van de CO₂ besparing die de maatregelen met zich mee brengen:

- Isolatie leidt tot een daling van het energieverbruik en daarmee de emissies;
- Door het gebruik van CO₂ neutrale energie van zonneboiler(combi)s, zonnecellen en stadsturbines worden emissies verlaagd;
- Warmte- en elektriciteitslevering door de biomassacentrale is een CO₂ neutrale energievoorziening, aangezien er alleen kort-cyclische CO₂ wordt uitgestoten;
- Door externe warmtelevering in plaats van gaslevering zal er in de huishoudens ook een besparing van hulpenergie plaatsvinden. Deze hulpenergie is de energie die bij een HR107 ketel (zoals in de referentiesituatie) nodig is voor elektronica, ventilator in de ketel en de pompregeling (Nederlands Normalisatie Instituut, 2005). De hoogte van het hulpenergieverbruik van de referentiewoningen is te vinden in bijlage III.

Door de hoeveelheid gas/elektriciteit die jaarlijks bespaard wordt door deze maatregelen te vermenigvuldigen met de hoeveelheid CO₂ die per m³ gas/kWh elektriciteit vrijkomt, wordt de jaarlijkse CO₂ besparing verkregen. Per kWh elektriciteit opgewekt uit gas (conventioneel) met een rendement van 44% wordt 0,46 kg CO₂ uitgestoten. Per MJ warmte opgewekt uit gas (conventioneel) met een rendement van 100% wordt 0,06 kg CO₂ uitgestoten.

6.6 Conclusie

In dit hoofdstuk zijn de kwantitatieve aspecten van een biomassacentrale, zonneboilers, windturbines, zonnecellen en isolatie aan bod gekomen. Er is bepaald wat de kosten en de opbrengsten zijn van deze voorzieningen. Met behulp van deze informatie en energievraag in de gebouwde omgeving (hoofdstuk 3) is er een rekenmodel opgesteld waarin, op basis van het aantal woningen van de verschillende typen, de voorzieningen beoordeeld worden op de economische haalbaarheidscriteria die in §2.2.3 zijn besproken. Ook geeft het model inzicht in de energievraag in de gekozen situatie en de besparing van CO₂ emissies ten opzichte van de referentiesituatie. In het volgende hoofdstuk wordt het model getest op een case uit de praktijk.

Hoofdstuk 7 Testcase Meerhoven

In de voorgaande hoofdstukken is toegewerkt naar het eindresultaat van dit onderzoek: een rekenmodel waarbij de haalbaarheid van een wijk met warmtelevering uit biomassa bepaald kan worden. Om dit model te verifiëren is de testcase Meerhoven uitgevoerd. Tussen de gemeenten Eindhoven en Veldhoven wordt de nieuwbouwwijk Meerhoven gebouwd bestaande uit ongeveer 9000 woningen. Deze wijk is opgedeeld in negen deelwijken. Voor twee hiervan, Waterrijk en Meerrijk, is er in opdracht van de gemeente Eindhoven onderzoek uitgevoerd naar de haalbaarheid van warmtelevering. Daarbij wordt de wijk gebouwd door een projectontwikkelaar, de distributie van de warmte en elektriciteit wordt door NRE Energie verzorgd en de biomassacentrale wordt ontwikkeld door de firma Van de Wiel uit Drachten in samenwerking met Staatsbosbeheer dat de biomassa levering voor zijn rekening neemt. In §7.1 worden de wijkgegevens weergegeven, in §7.2 de gegevens van de biomassacentrale. De verzamelde gegevens worden in §7.3 ingevoerd in het rekenmodel en in §7.4 worden de resultaten van het rekenmodel geëvalueerd aan de hand van de haalbaarheidsgegevens die verstrekt zijn door NRE. De gebruikte gegevens komen voort uit interviews met Dhr. Baeten (2007) en Dhr. van Hedel (2007).

7.1 Wijkgegevens

Het project bestaat zoals aangegeven uit twee deelwijken, Meerrijk en Waterrijk, die elk uit ongeveer 700 appartementwoningen bestaan. De woningen krijgen een EPC van 1,0. Dit is hoger dan de verplichte maximale EPC van 0,8, maar wordt door de gemeente Eindhoven toegestaan omdat de EPL door de warmtelevering hoog is, namelijk 8. De totale ruimteverwarmingvraag is 18.481 GJ/jaar, de vraag naar warm tapwater 19.144 GJ/jaar. Verder is er 20.000 m³ utiliteitsbouw met een vraag naar ruimteverwarming van 5.924 GJ/jaar. De biomassacentrale komt op een industrieterrein 1,5 km van Meerrijk en 600 tot 700 meter van Waterrijk te liggen. In beide wijken wordt verder een gasgestookte hulpketel toegevoegd, die warmte levert als de biomassacentrale niet aan de vraag kan voldoen. Deze hulpketels voorzien in 100% van de piekvraag.

7.2 Biomassacentrale

Er wordt een biomassa-verbrandingscentrale gebouwd, die gestookt wordt op lokaal snoeihout dat voor conversie gechipt wordt. Het vermogen van de centrale wordt 1,5 MWth en 0,5 MWe, waardoor er 70% van de totale warmtevraag geleverd wordt en 30% van de piekvraag. De biomassa wordt ingekocht voor een prijs van €15 tot €30 per ton. Het vochtgehalte is 40 tot 50% en het asgehalte bedraagt 1,5%. De dichtheid is 250 kg/m³. De biomassa aanvoer is verdeeld over de maanden augustus tot maart. De biomassa wordt op de locatie van winning in de openlucht opgeslagen. Vanaf de verschillende opslaglocaties wordt de biomassa per vrachtwagen vervoerd naar de centrale, waar de biomassa gechipt en verbrand wordt. Er is op de locatie van de biomassacentrale een veiligheidsvoorraad in een bunker om het weekend door te komen.

7.3 Resultaat uit Model

Met behulp van het rekenmodel dat opgesteld is in dit rapport is de haalbaarheid van dit project berekend. In de eerste plaats zijn de wijkgegevens ingevoerd (52 appartementencomplexen, bestaande uit 1404 woningen) om de warmtevraag te berekenen:

tabel 7.1: warmtevraag woningen

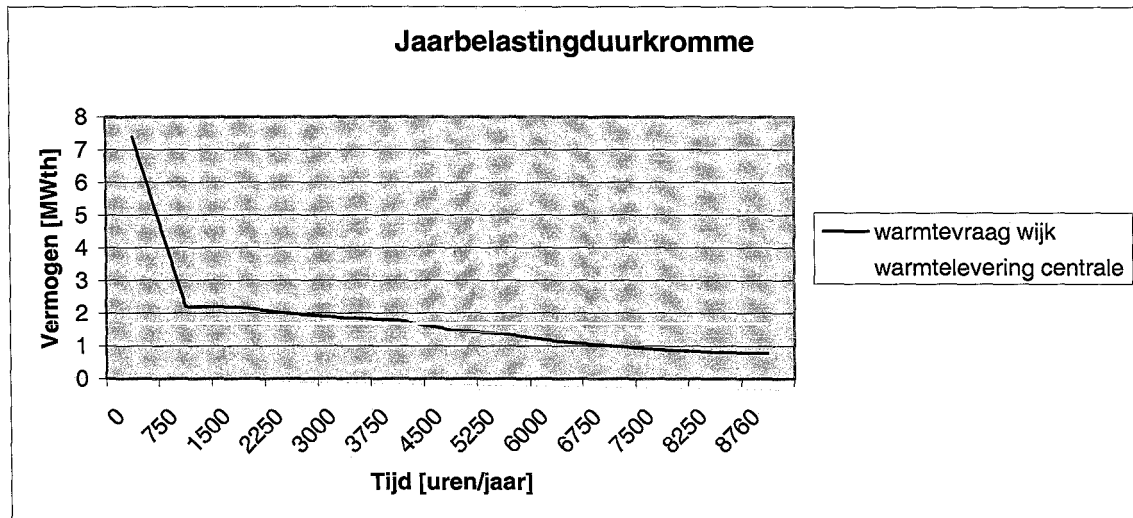
warmtevraag woningen	model [GJ/jaar]	gegeven [GJ/jaar]
ruimteverwarming	11.403	18.481
warm tapwater	21.118	19.144

De grote afwijking van de ruimteverwarmingvraag van het model ten opzichte van de gegeven situatie is te verklaren door de ongunstigere EPC. In het model wordt uitgegaan van een EPC van 0,8. De appartementen die gebouwd gaan worden krijgen echter een EPC van 1,0 wat betekent dat de woningen minder energiezuinig zijn. Dit vertaalt zich in een hoger warmtegebruik voor ruimteverwarming. Bij de verdere berekeningen in het model zal de ruimteverwarmingvraag van de gegeven situatie gebruikt worden.

Bij de gegeven warmtevraag en een dekking van de ruimteverwarmingvraag van de vijf maanden met het laagste aantal graaddagen (zie §6.4.1) berekent het model de volgende waarden:

- Vermogen centrale: 1,7 MWth en 0,5 MWe
- Vermogen hulpketels (totaal): 7 MWth
- 78% van de totale vraag en 23% van de piekvraag

De jaarbelasting-duurkromme ziet er schematisch als volgt uit:



figuur 7.1: jaarbelasting-duurkromme voorbeeldcase

Het gedeelte dat zowel onder de gele als onder de paarse lijn ligt is de warmte die door de biomassacentrale aan de wijk geleverd wordt. Dit is 35.285 GJ/jaar. Het gedeelte dat onder de paarse lijn, maar boven de gele lijn ligt is het aantal GJ dat door de hulpketels geleverd dient te worden. Dit is 10.236 GJ/jaar. Het gedeelte dat onder de gele lijn ligt en boven de paarse lijn geeft het aantal GJ weer dat de biomassacentrale te veel levert. Dit is 2.666 GJ/jaar.

Er zijn twaalf scenario's doorgerekend op basis van drie variabelen:

- een stabiele energieprijs, een stijgende energieprijs van 2,5% per jaar en een stijgende energieprijs van 5% per jaar. Daarbij worden als basisprijzen voor het eerste jaar genomen:
 - o gasprijs: € 0,50/m³
 - o elektriciteitsprijs: € 0,15/kWh
 - o terugleververgoeding elektriciteit: € 0,05/kWh
- een levensduur van zowel 10 als 20 jaar;
- met en zonder MEP subsidie, waarbij de MEP subsidie €0,10/kWh over de eerste tien jaar bedraagt.

In tabel 7.2 zijn de jaarlijkse kosten per onderdeel van het biomassa proces weergegeven voor de drie scenario's en de levensduur van 10 en 20 jaar. Ook is te zien welk percentage ieder onderdeel bijdraagt aan de totale jaarlijkse kosten. Hier is te zien dat alleen de kosten van de hulpketel verschillende zijn voor de drie scenario's. De hulpketel wordt immers op gas gestookt en daardoor zullen deze kosten stijgen bij een stijgende gasprijs.

In tabel 7.3 zijn de scores op de vier economische haalbaarheid indicatoren en de jaarlijkse winst weergegeven voor de twaalf scenario's. Voor de NCW berekening is uitgegaan van een rentabiliteitseis van 5%.

tabel 7.2: verdeling jaarlijkse kosten biomassaproces

scenario	GEEN PRIJSSTIJGING				PRIJSSTIJGING 2,5%				PRIJSSTIJGING 5%			
	10 jaar		20 jaar		10 jaar		20 jaar		10 jaar		20 jaar	
	€/jaar	%	€/jaar	%	€/jaar	%	€/jaar	%	€/jaar	%	€/jaar	%
distributie	563.987	32	368.026	26	563.987	32	368.026	25	563.987	31	368.026	23
conversie	456.861	26	348.034	24	456.861	26	348.034	23	456.861	25	348.034	22
hulpketel	293.848	17	275.140	19	322.510	18	341.171	23	355.248	20	430.742	27
inkoop	229.518	13	229.518	16	229.518	13	229.518	15	229.518	13	229.518	14
voorbehandeling	114.759	7	114.759	8	114.759	6	114.759	8	114.759	6	114.759	7
transportkosten	74.364	4	74.364	5	74.364	4	74.364	5	74.364	4	74.364	5
restverwerking	19.796	1	19.796	1	19.796	1	19.796	1	19.796	1	19.796	1
voorraad	1.609	0	1.609	0	1.609	0	1.609	0	1.609	0	1.609	0
totale kosten	1.754.743	100	1.431.246	100	1.783.405	100	1.497.277	100	1.816.143	100	1.586.848	100

tabel 7.3: score op economische criteria

levensduur	GEEN PRIJSSTIJGING		PRIJSSTIJGING 2,5%		PRIJSSTIJGING 5%		
	10 jaar	20 jaar	10 jaar	20 jaar	10 jaar	20 jaar	
zonder MEP	- 426.284	- 102.787	- 317.238	148.430	- 192.685	489.206	winst [€/jaar]
	35,4	33,8	22,8	15,3	16,2	8,8	terugverdiëntijd [jaar]
	- 11,2	- 2,7	- 8,3	3,9	- 5,1	12,8	ROI [%]
	- 4.854.629	- 3.798.806	- 4.012.606	- 668.076	- 3.050.841	3.578.742	NCW [€]
	- 17,1	- 3,8	- 11,5	3,7	- 6,6	11,0	IRR [%]
met MEP (€0,10/kWh extra de eerste tien jaar)	- 73.395	73.657	35.651	324.875	160.204	665.651	winst [€/jaar]
	12,7	18,3	10,6	11,0	8,9	7,2	terugverdiëntijd [jaar]
	- 1,9	1,9	0,9	8,5	4,2	17,5	ROI [%]
	- 2.129.711	- 1.599.914	- 1.287.687	1.530.816	-325.923	5.777.633	NCW [€]
	- 2,6	1,8	0,6	7,7	3,9	14,2	IRR [%]

7.4 Evaluatie testcase

Uit de resultaten van de testcase kunnen een aantal conclusies getrokken worden.

Op de eerste plaats blijkt uit de verdeling van de jaarlijkse kosten dat de grootste kostenpost distributie is. De distributiekosten bestaan uit de kosten voor de aansluitingen van de gebouwen op het warmtenet en uit de warmtetransportleidingen van de biomassacentrale naar het warmteoverdrachtstation. De aansluitkosten zijn lineair met het aantal gebouwen. De kosten van de warmtetransportleidingen zijn slechts afhankelijk van de afstand tussen de biomassacentrale en de wijk. Door de centrale zo dicht mogelijk bij de wijk te plaatsen nemen de kosten af. Bovendien geldt dat door het toevoegen van meerdere woningen aan het warmtenet, de totale distributiekosten niet evenredig zullen stijgen met de opbrengsten, doordat de kosten van de warmtetransportleidingen gelijk blijven. De kosten per eenheid energie zullen daardoor dalen.

De verschillende scenario's zijn ingedeeld in drie haalbaarheidscategorieën: goed, redelijk en slecht. Een scenario is goed haalbaar als het op alle vijf de criteria positief scoort. Redelijk haalbaar betekent dat er weliswaar niet op alle criteria positief gescoord wordt, maar de rentabiliteit (zowel ROI als IRR) zijn positief. Slecht haalbaar betekent dat er op de ROI en/of de IRR negatief gescoord wordt. In tabel 7.4 zijn de scenario's met hun haalbaarheidscategorie weergegeven:

tabel 7.4: scenario's met haalbaarheidscategorie

	geen prijsstijging		prijsstijging 2,5%		prijsstijging 5%	
levensduur	10 jaar	20 jaar	10 jaar	20 jaar	10 jaar	20 jaar
geen MEP	slecht	slecht	slecht	redelijk	slecht	goed
MEP	slecht	redelijk	redelijk	goed	redelijk	goed

Uit tabel 7.4 blijkt dat een scenario alleen als goed haalbaar kan worden getypeerd als er met een levensduur van 20 jaar wordt gerekend. Ook is het van belang dat ofwel de energieprijzen stijgt met minimaal 5% per jaar gedurende de levensduur danwel dat er MEP subsidie over de elektriciteitsproductie wordt verleend.

Hoofdstuk 8 Conclusies en Aanbevelingen

In de voorgaande hoofdstukken van dit rapport zijn de deelvragen uit §1.4 behandeld om tot het uiteindelijke resultaat te komen: een raamwerk voor haalbaarheidsstudies naar biomassa gekoppeld aan afnemers in woning- en bedrijventerreinen met gebouwgebonden duurzame energievoorzieningen alsmede een rekenmodel om de economische haalbaarheid van dergelijke projecten te bepalen. In dit hoofdstuk wordt een overzicht gegeven van de conclusies (§7.1) en worden aanbevelingen gedaan voor verder onderzoek (§7.2).

8.1 Conclusies

Het onderzoek dat in dit rapport beschreven is, is in te delen in twee onderdelen: het onderzoek naar haalbaarheid in het algemeen (hoofdstuk 2) en het onderzoek naar de economische haalbaarheid van bio-energie in woning- en bedrijventerreinen met gebouwgebonden duurzame energie opties (hoofdstuk 3 tot en met 6).

Het begrip haalbaarheid is opgedeeld in vijf aspecten: technische haalbaarheid, maatschappelijke haalbaarheid, milieuvriendelijkheid, economische haalbaarheid en bedrijfsspecifieke inpasbaarheid. In tabel 2.1 is een overzicht weergegeven van de indicatoren waarmee de haalbaarheid van deze aspecten ingeschat kan worden. Deze tabel dient als checklist om aan te geven welke factoren voor een volledig haalbaarheidsonderzoek niet uit het oog verloren mogen worden. Als een project op deze criteria voldoende scoort, zal de economische haalbaarheid bepaald worden.

Analyse van de begrippen energievraag in de gebouwde omgeving, duurzaam bouwen en biomassa heeft geleid tot het uiteindelijke resultaat van dit onderzoek: een kwantitatief rekenmodel dat gebruikt kan worden bij het bepalen van de economische haalbaarheid van nieuwbouw woning- en bedrijventerreinen met duurzame energievoorzieningen. Met behulp van het model dat opgesteld is kan snel inzicht verkregen worden in de energiehuishouding van de wijk en de score op de economische haalbaarheid criteria terugverdientijd, ROI, NCW en IRR.

Aan de hand van de gegevens waaruit het model is opgebouwd kunnen er een aantal conclusies getrokken worden:

- Doordat er sprake is van nieuwbouwwoningen met een lage EPC (<0,8), is het warmteverbruik voor ruimteverwarming relatief laag ten opzichte van het warmteverbruik voor warm tapwater. De vraag naar warm tapwater is constant verdeeld over het jaar, de vraag naar ruimteverwarming is daarentegen seizoensafhankelijk. Naarmate het aandeel warm tapwater hoger wordt in verhouding tot het aandeel ruimteverwarming, wordt de totale warmtevraag gelijkmatiger verdeeld over het jaar. Dit is enerzijds erg gunstig, aangezien de biomassacentrale zo een groot gedeelte van de totale warmtevraag kan dekken zonder dat er veel warmte verloren gaat. Door het toevoegen van utiliteit of industrie met een hoog, constant warmteverbruik, kan dit effect verder versterkt worden: de capaciteit van de biomassacentrale kan worden vergroot én zo effectief mogelijk worden benut. Dit leidt tot schaalvoordelen. Anderzijds worden de schaalvoordelen gedeeltelijk te niet gedaan doordat de energievraag lager is bij een lagere EPC, waardoor een groter aantal aangesloten woningen nodig is om een hoge capaciteit te verantwoorden.
- De haalbaarheid van de biomassacentrale is afhankelijk van veel factoren. Zoals hierboven beschreven speelt de energievraag en de spreiding hiervan een grote rol. Daarnaast wordt een groot gedeelte van de totale kosten veroorzaakt door de distributiekosten. Hoe dichter een biomassacentrale bij een wijk komt te staan, hoe

lager de distributiekosten en des te haalbaarder de centrale wordt. Een ander belangrijk aspect heeft betrekking op de opbrengsten uit de warmte en elektriciteit. Als de prijzen voor gas en elektriciteit stijgen, zullen de opbrengsten van de biomassacentrale stijgen. Met behulp van het model kan berekend worden onder welke omstandigheden de centrale economisch haalbaar is.

- Het toevoegen van extra isolatie aan de woningen leidt tot een beperking van de vraag naar ruimteverwarming. Dit heeft wederom een gunstig effect op de spreiding van de warmtevraag over het jaar. Bovendien heeft energiebesparing de hoogste prioriteit volgens de Trias Energetica. Bij de referentiewoningen met $EPC < 0,8$ zijn er al veel isolatiemaatregelen toegepast. Er kan echter nog extra isolatie worden toegevoegd bij gevel, vloer, dak en beglazing. Uit de berekeningen die worden uitgevoerd in het model blijkt dat investeringen in beglazing met een betere isolatie binnen twee tot zes jaar terugverdiend worden. Investerings in vloerisolatie worden binnen negen tot twaalf jaar terugverdiend. Gevelisolatie is minder rendabel: de terugverdiendtijd ligt tussen de veertien en twintig jaar. Dakisolatie verdient zich pas na 24 tot 28 jaar terug. Bij deze terugverdiendtijden moet er rekening worden gehouden met het feit dat de woningen al erg goed geïsoleerd zijn, waardoor de kosten van het toevoegen van extra isolatie hoog zijn in verhouding tot de energieopbrengsten die het oplevert.
- Zonneboilers kunnen opgesplitst worden in standaard zonneboilers en zonneboilercombi's. Standaard zonneboilers leveren warmte voor warm tapwater. Zonneboilercombi's leveren naast warmte voor warm tapwater ook warmte voor ruimteverwarming. De terugverdiendtijd van een standaard zonneboiler is 25 jaar en van een zonneboilercombi 30 jaar. Behalve de lange terugverdiendtijd heeft de zonneboilercombi als nadeel dat het warmte levert op momenten dat de vraag naar ruimteverwarming juist laag is. Bovendien heeft het toevoegen van zonneboilers aan de gebouwen een negatieve invloed op de haalbaarheid van de biomassacentrale: de warmtevraag aan de biomassacentrale daalt, waardoor de schaalvoordelen van de centrale afnemen.
- Zonnecellen leveren elektriciteit. De investeringskosten van zonnecellen zijn nog erg hoog en de opbrengsten zijn in Nederland betrekkelijk gering. De terugverdiendtijd ligt dan ook rond de vijftig jaar. De verwachting is dat door de ontwikkeling van de techniek, zonnecellen in de toekomst goedkoper zullen worden en de terugverdiendtijd zal dalen.
- Voor de stadsturbine geldt dat de opbrengsten sterk afhankelijk zijn van de locatie en de hoogte van plaatsing. In het meest gunstige geval (hoogte 100 m) is de terugverdiendtijd van de turbine 21 jaar. Bij lagere plaatsing en andere locaties neemt de terugverdiendtijd sterk toe.

8.2 Aanbevelingen

- In hoofdstuk 2 van dit rapport is onderzoek gedaan naar het begrip haalbaarheid. Daarbij is een checklist opgesteld van de haalbaarheidscriteria voor duurzame energievoorzieningen. Het is aan te bevelen de criteria van de checklist diepgaander te onderzoeken. Bijvoorbeeld: onder welke omstandigheden scoort een aspect negatief op haalbaarheid of op welke manier kan men invloed uitoefenen op de aspecten om de haalbaarheid te verhogen.

- In het kwantitatieve model is als gebiedsgebonden energievoorziening een biomassa verbranding- of vergistinginstallatie opgenomen. Het model kan verder worden uitgewerkt door toevoeging van andere energievoorzieningen, zoals warmte/koude opslag in combinatie met een warmtepomp, aardwarmte of andere biomassa conversietechnieken. Op deze manier kunnen verschillende energievoorzieningen tegen elkaar worden afgewogen en kan hun onderlinge samenhang worden geoptimaliseerd.
- In dit onderzoek is de energievraag opgedeeld in elektriciteit, warmte voor ruimteverwarming en warmte voor warm tapwater. Tegenwoordig neemt de vraag naar koeling sterk toe. Het is aan te bevelen om de vraag naar koeling en de voorziening hierin toe te voegen aan het model.
- De energievraag van de wijk wordt berekend met behulp van graaddagen. Deze graaddagen worden bepaald aan de hand van de gemiddelde temperatuur op een dag. Dat betekent dat hiermee ook het totale energieverbruik van een dag verkregen wordt en niet de piekvraag. Door toevoeging van een warmteopslagtank kan het verschil in piek- en dalvraag van een dag opgevangen worden. Ook het distributie systeem zelf kan als buffer dienen, maar dit is afhankelijk van de grootte van het systeem en de spreiding in de dagelijkse warmtevraag. Het is daarom aan te bevelen om een model te ontwikkelen waarbij de daadwerkelijke piekvraag en spreiding in de dagelijkse warmtevraag bepaald kunnen worden.
- De milieuverdienste kan worden gemeten met behulp van een Levens Cyclus Analyse. In het rekenmodel is slechts uitgegaan van de CO₂ emissie besparingen die voortvloeien uit de energiebesparingen en duurzame maatregelen om te bepalen wat de milieuverdienste van de gekozen maatregelen is. Het is aan te bevelen om de CO₂ uitstoot over de gehele keten (inclusief winning biomassa, transport, voorbehandeling etc.) in het model te berekenen en dit te vergelijken met de CO₂ uitstoot over de gehele keten bij het gebruik van fossiele brandstoffen.
- In dit rapport wordt uitgegaan van een gemiddeld gebruikersgedrag. Het is echter niet duidelijk over welke perioden dit gemiddelde is bepaald. De laatste jaren kan het gemiddelde gebruikersgedrag veranderd zijn door bijvoorbeeld het toegenomen gebruik van airconditioning. Het is daarom aan te bevelen om te onderzoeken of het gemiddelde gebruikersgedrag dat in dit onderzoek gebruikt wordt representatief is voor het gemiddelde gebruikersgedrag van de laatste jaren.

Nabeschuwing

De achtergrond van dit afstudeeronderzoek, duurzame energie in de gebouwde omgeving, is een vakgebied dat tijdens mijn studie nauwelijks aan bod is gekomen. Het was daarom noodzakelijk om een uitgebreide analyse te doen naar de mogelijkheden van duurzame energie. Tijdens deze analyse is het voor mij duidelijk geworden dat duurzame energie een erg breed onderwerp is en dat er een keuze gemaakt moest worden voor een bepaalde techniek. Het onderzoek heeft zich uiteindelijk toegespitst op een biomassacentrale die een wijk van warmte voorziet. Daarnaast is er gekeken naar gebouwgebonden duurzame energievoorzieningen.

Er is erg veel informatie beschikbaar over de technieken en toepassingen van duurzame energie, maar bedrijfseconomische gegevens ontbreken vaak. Door informatie uit vele verschillende bronnen te combineren is het uiteindelijk gelukt om een kostenplaatje te genereren.

In tegenstelling tot de meeste onderzoeken naar duurzame energie, is dit geen onderzoek naar een specifieke situatie. Er is een algemeen raamwerk op gesteld dat in verschillende situaties kan worden toegepast. Het gevolg hiervan is dat de gebruikte informatie in meerdere situaties van toepassing moet zijn. Dit gaat ten koste van de nauwkeurigheid van het eindresultaat, omdat gemiddelden van variabelen worden gebruikt. Een voorbeeld hiervan zijn de investeringskosten van de biomassacentrale, die een gemiddelde bij een bepaald vermogen zijn. Het model kan door de gemaakte aannames gebruikt worden om snel een inschatting te doen van de haalbaarheid van een concept en de gevoeligheid van de haalbaarheid op veranderingen in variabelen. Om een preciezer uitkomst te verkrijgen moeten de variabelen dieper, situatieafhankelijk uitgewerkt worden. Bijvoorbeeld bij de investeringskosten van de biomassacentrale: is er een rookgasreiniging en wat is het gevolg hiervan op de investeringskosten.

Het begrip duurzame energie is tijdens het uitvoeren van dit onderzoek steeds meer in de belangstelling komen te staan. Mensen worden zich sterker bewust van het belang van een duurzame toekomst. In dit onderzoek wordt op economische gegevens een afweging gemaakt tussen het gebruik van duurzame energie en het gebruik van fossiele brandstoffen. Uiteraard is de afweging voor het al dan niet investeren in duurzame energie niet slechts een economische afweging. Er dient ook naar de andere criteria gekeken te worden. Toch is de economische haalbaarheid van belang om het risico van een investering in te schatten en om een keuze te maken tussen verschillende duurzame opties.

Ik hoop dat dit onderzoek een startpunt is voor verdere haalbaarheidsstudies naar (andere) duurzame energie bronnen!

Marte Guldemond

Referenties

- Baeten, E. (januari 2007), *Interview*, NRE
- Bauwens, J.T.S. (juli 2001), *Een studie naar de mogelijkheden van recycling van bitumineus dakafval*, afstudeerverslag Technische Universiteit Eindhoven
- Bastiaans, R.J.M. & Oijen, J.A. van & Prins, M.J. (oktober 2005), *Energy from biomass*, dictaat bij het college 4S610, Technische Universiteit Eindhoven
- Beek, Th.A. van & Dam, C. van (2000), *Financieel management: analyse, planning en beheer*, Stenfert Kroese/Educatieve Partners Nederland B.V., Houten
- Berg, R.L.P. van den (augustus 2003), *De implementatie van duurzame energie in de woningbouw, gebaseerd op OEI-studies*, afstudeerverslag Technische Universiteit Eindhoven
- Berns, W. & Boerée, R. (juli 2002), *Energiezuinig bouwen met zonneboilers, leidraad zonneboilers voor projectmatige nieuwbouw*, Novem: Duurzame Energie in Nederland
- Bijsterbosch, H. (januari 2000), *Het kookpunt van warmte: een onderzoek naar de voorkeur voor warmtelevering onder bewoners van Amsterdam*, afstudeerverslag Technische Universiteit Eindhoven
- Bogers, S. (december 2006), *Aangevraagde informatie*, Solarpanels
- Bras-Klapwijk, R.M. & Heijungs, E. & Mourik, P. van (2003), *Levenscyclusanalyse voor onderzoekers, ontwerpers en beleidsmakers*, Delft University Press, Delft
- Brundtland, G.H. (1987), *Our common future, world commission on environment and development*, Oxford University Press, VS, pp 43-45
- Buhre, I.J.M. & Wit, J.B. de & Wolff, J.J. de & Braber, K.J. (2001), *Onderzoek naar de haalbaarheid van het combineren van de aanleg van een transportnet voor duurzame warmte met de wegconstructiewerkzaamheden in Apeldoorn*, TNO-rapport TNO-MEP-R 2001/180
- CBS (2007), *CBS tabel: productiemiddelen en elektriciteit*, www.cbs.nl
- Cogen Projects (november 2004), *Belichten met elektriciteit uit eigen WKK of inkopen op de vrije markt*, informatiebrochure, www.cogenproject.nl
- Cumae (2006), *Bedrijfspresentatie*
- Daey Ouwens, C. (september 2006), *Persoonlijk gesprek*, Technische Universiteit Eindhoven
- Damen, M. (2004), *Inleiding basisbegrippen en uitgangspunten uit de financiële rekenkunde*, Van Nimwegen & Partners, www.ikcro.nl/artikelen/vnp280404.doc
- Dodgson, D. & Pearmann, A. & Phillips, L. & Spackman, M. (juli 2006), *DTLR multi-criteria analysis manual*,

- http://www.communities.gov.uk/pub/252/MulticriteriaanalysismanualPDF1380Kb_id1142252.pdf
- Dornburg, V. Faaij, A.P.C. (2001), *Efficiency and economy of wood-fired biomass energy systems in relation to scale regarding heat and power generation using combustion and gasification technologies*, Biomass and Bioenergy 21, page 91-108
- Ecofys (september 2005), *Kosteneffectieve energiebesparing en klimaatbescherming: de mogelijkheden van isolatie en de kansen voor Nederland*, in opdracht van Stichting Spaar het Klimaat
- Ecofys (2004), *Geïntegreerde duurzame energie-oplossingen*, Ecofys bedrijfsbrochure, http://www.ecofys.nl/nl/publicaties/brochures_nieuwsbrieven.htm
- ECB Europese Centrale Bank (2006), *Jaarverslag 2005*
- EnergieNed (december 2005), *Tariefadvies voor de levering van warmte aan kleinverbruikers 2006*, www.energiened.nl
- Hagen, M. (december 2006), *Aangevraagde informatie*, E kwadraat advies
- Hamelinck, C.N. & Suurs, R.A.A. & Faaij, A.P.C. (2005), *International bioenergy transport costs and energy balance*, Biomass and Bioenergy 29, page 114-134
- Hanssen, D. (april 2004), *Bio-energie op industriële locaties: techno-economische analyse van kansen en mogelijkheden van bio-energieopwekking door houtverbranding*, afstudeerverslag Technische Universiteit Eindhoven
- Hasselaar, E. (december 2002), *Ventilatie in de praktijk: kwaliteit voor bewoners*, Onderzoeksinstituut OTB, TU Delft, in opdracht van SenterNovem: projectnummer 149208-0054
- Hedel, R. van (februari 2007), *Telefonisch interview*, Staatsbosbeheer
- Helden, R.B.T.J. van (mei 2003), *Torrefactie: een bedrijfseconomische vergelijking van grootschalige bio-energieketens met en zonder toepassing van torrefactie*, afstudeerverslag Technische Universiteit Eindhoven
- Helfert, E.A. (1997), *Techniques of financial analysis (a modern approach)*, 9de editie, Irwin, Chicago
- Hermans, W. & Knops, P. (september 2006), *Persoonlijk gesprek*, Bio Shape Holding B.V.
- Hilten, O. van & Gerlagh, T. (2000), *Bedrijfseconomische en beleidsmatige evaluatie van elektriciteit- en warmteopwekking uit afval en biomassa: deelrapport taak 3 van het Marsroute-project*, ECN projectnummer 355299/0100
- Hoogsteen, R. & Braber, K.J. & Smit, R.W. (april 2003), *Haalbaarheid warmtenet regio Twente*, KEMA Power Generation & Sustainables in opdracht van Overijsselsche Ontwikkelingsmaatschappij, 50261286-KPS/SEN 02-3061
- Houben, M (september 1999), *Oordeelvorming, haalbaarheid en acceptatie rond biomassa als energiebron*, afstudeerverslag Technische Universiteit Eindhoven

- Kasteren, J.M.N. van & Raats, M.H.M. (1997), *Vaste afvalstoffen technologie*, collegedictaat 6S330, Technische Universiteit Eindhoven
- Knops, P. (februari 2007), *persoonlijk gesprek*, Cumae B.V.
- Koppejan, J. & Boer-Meulman, P.D.M. de (November 2005), *De verwachte beschikbaarheid van biomassa in 2010*, TNO Industrie en Techniek in opdracht van SenterNovem
- Kumar, A., Jay, B. & Flynn, P.C. (2003), *Biomass power cost and optimum plant size in western Canada*, Biomass and Bioenergy 24, page 445-464
- Kumar, A., Flynn, P.C., Sokhansanj, S. (2005), *Feedstock availability and power costs associated with using BC's beetle-infested pine*, BIOCAP Canada Foundation
- Lammersen, H. (1990), *STEP-cursus Reliability in Design Engineering*, Akzo Engineering
- Ministerie van Economische Zaken (Ministerie van EZ) (1997), *Duurzame energie in opmars*, Den Haag: EZ.
- Ministerie van Economische Zaken (oktober 2003), *Transitie naar een duurzame energieuishouding*, standaarddossiers energietransitie
- Ministerie van VROM (1990), *Nationaal Milieubeleidsplan-plus: notitie instrumenten en duurzaam bouwen*, SDU Uitgevers, Den Haag, ISBN: 9012069300
- Moore, G.A. (1991), *Crossing the Chasm, Marketing and selling technology products to mainstream customers*, New York: Harper Collins
- Nederlands Normalisatie Instituut (april 2005), *Nederlandse praktijkrichtlijn NPR 5129: energieprestatie van woonfuncties en woongebouwen-*
- Neve, C. (mei 2004), *De beoordeling van bio-energie ketens op duurzaamheid*, afstudeerverslag Technische Universiteit Eindhoven
- Nolen (2006), *Torrefactie als sleuteltechnologie voor de productie van (vaste) brandstoffen uit biomassa en afval*, EOS projecten lange termijn, SenterNovem
- Omer, A.M. (2006), *Green energies and the environment*, Renewable & Sustainable Energy Reviews, article in press
- Petersdorff, C. & Boermans, T. & Harnisch, J. & Stobbe, O. & Ullrich, S. & Wartmann, S. (februari 2005), *Cost-Effective Climate Protection in the EU Building Stock*, rapport ontwikkeld door Ecofys in opdracht van EURIMA
- Quaijtaal, N. (november 2006), *persoonlijk gesprek*, Cumae B.V.
- Rabou, L.P.L.M., Durwaarder, E.P., Elbersen, H.W. & Scott, E.L. (2006), *Biomassa in de Nederlandse energieuishouding in 2030*, Platform Groene Grondstoffen, Energieonderzoek Centrum Nederland en Wageningen UR
- SenterNovem (2004), *PV Technologie 2004*, presentatie te downloaden op www.senternovem.nl

- Sims, R.E.H. (2002), *The brilliance of bioenergy, in business and in practice*, James & James Science Publishers Ltd, London, United Kingdom
- Smeets, E. & Tukker, A. (1995), *Criteria voor haalbaarheid van reststof-grondstof kringloopaansluiting*, TNO-rapport STB/95/021
- TDO Centrum Technologie voor Duurzame Ontwikkeling (2001), *Technologie voor duurzame ontwikkeling*, dictaat nummer 1710, Technische Universiteit Eindhoven
- Veenstra, A.J. (november 2006), *Aangevraagde informatie*, Thecogas
- Vermeer, E. (november 2004), *Slagroomkloppers, grasmaaiers of wikkels? Een onderzoek naar de implementatie van kleine windturbines in de gebouwde omgeving van Noord-Brabant*, afstudeerverslag Technische Universiteit Eindhoven
- Verschuren, P.J.M. & Doorewaard, H. (2000), *Het ontwerpen van een onderzoek*, Lemma, 3^e druk
- Warmerdam, D.L.M. (8 juli 2005), *RAM(S) aspecten voor het ontwerpen van wissels: wissel ontwerpen op basis van Reliability, Availability, Maintainability en Safety*, afstudeerverslag Technische Universiteit Delft
- Welink, J.H. & van der Koogh, E. (2004), *Energie uit afval en biomassa: een handleiding bij het kiezen van methoden*, Delft University Press, Nederland
- Zantingh, J. (november 2006), *Aangevraagde informatie*, Cogas

Internetbronnen:

- [1] <http://www.senternovem.nl>
- [2] <http://www.boomdelft.nl/upload/files/DUBO%20tetraeder%20tekst.pdf>
- [3] <http://www.cedubo.be>
- [4] http://www.nuon.nl/nl/fs_main.html?L1=producten&L2=stadswarmte
- [5] <http://www.verantwoordgroen.nl>
- [6] <http://www.ecn.nl/phyllis>
- [7] <http://www.zonnestroom.net>
- [8] <http://www.turby.nl>
- [9] <http://www.nma-dte.nl>
- [10] <http://www.enerq.nl>
- [11] <http://www.belastingdienst.nl>
- [12] <http://www.subsidieshop.nl>
- [13] <http://www.hollandsolar.nl>
- [14] <http://www.schober.nl>

Eenheden en afkortingen

Basis eenheden:

J	= Joule
j	= jaar
d	= dag
h	= uur
s	= seconde
kg	= kilogram
m	= meter
K	= Kelvin

Toevoegingen:

k	= kilo	= eenheid maal 1.000
M	= Mega	= eenheid maal 1.000.000
G	= Giga	= eenheid maal 1.000.000.000
e	= elektrisch	
th	= thermisch	

Overige termen:

1 t	= 1 ton	= 1.000 kg
1 W	= 1 Watt	= 1 J/s
1 kWh	= 1 kilowattuur	= 3,6 MJ
1 l	= 1 liter	= 0,001 m ³

Afkortingen:

BSC	Besluit Subsidies CO ₂ reductie
CO ₂	Koolstofdioxide
DTE	Dienst uitvoering en toezicht Energie
EIA	Energie Investerings Aftrek
EPC	Energie Prestatie Coëfficiënt
EPL	Energie Prestatie op Locatie
EPN	Energie Prestatie Norm
HAT	Horizontale windAs Turbine
HHV	Higher Heating Value
HTU	Hydro Thermal Upgrading
HTV	Hoge Temperatuur Verwarming
IRR	Internal Rate of Return
LCA	Levens Cyclus Analyse
LHV	Lower Heating Value
LTV	Lage Temperatuur Verwarming
MCA	Multi Criteria Analyse
MEP	Milieukwaliteit Elektriciteit Productie
MTTF	Mean Time To Failure
MTTR	Mean Time To Repair
NCW	Netto Contante Waarde
PV	PhotoVoltaic (fotovoltaïsch)
RAMS	Reliability Availability Maintainability Safety
R _c	warmteweerstand [m ² K/W]
REB	Regulerende Energie Belasting
RDF	Refuse Derived Fuel
ROI	Return On Investment
STC	Standaard Test Conditie
U	warmtedoorgangscoefficiënt [W/m ² K]
VAT	Verticale windAs Turbine
VPL	Vervoers Prestatie op Locatie
WKK	Warmte Kracht Koppeling
Wp	Wattpiek

Bijlage I Bedrijfsbeschrijving

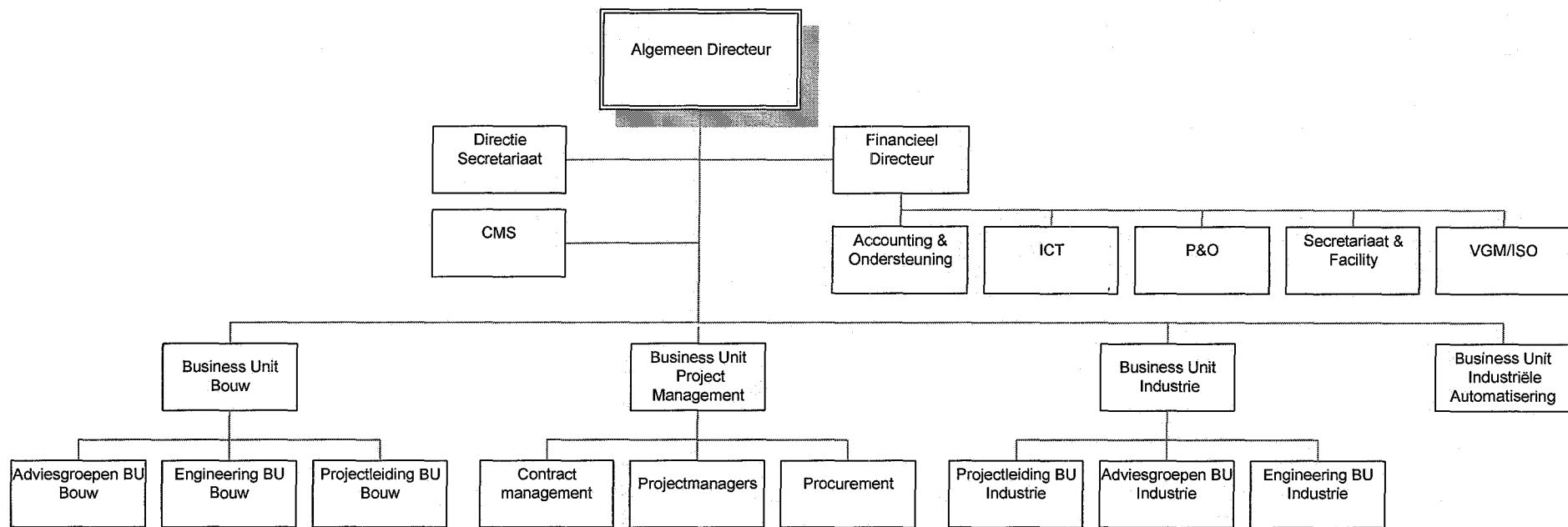
Cumae is een multidisciplinair projectmanagement- en ingenieursbureau gespecialiseerd in de bouw en industrie. Cumae heeft momenteel ongeveer 180 werknemers in dienst en bedient opdrachtgevers vanuit drie vestigingen (Arnhem, Rotterdam en Aruba). Sleutelwoord binnen het bedrijf is samenwerking: met opdrachtgevers, andere bureaus, strategische partners en financiers.

Cumae is in de jaren negentig ontstaan uit fusies tussen vier verschillende ingenieurbureaus. De kennis binnen Cumae is dan ook erg breed. Momenteel bestaat Cumae uit vier business units:

- *Business unit Bouw*
Het werkterrein van Bouw ligt op het gebied van wonen, werken, winkelen, scholen, zorg en ondersteuning. De vakgebieden van deze business unit zijn bouwtechniek, constructietechniek en gebouwinstallatie E&W.
- *Business unit Industrie*
Industrie biedt oplossingen voor vraagstukken over milieu, voedingsmiddelen, energie, afval, lichte chemie, beton en papier. Hiervoor wordt expertise ingezet van uiteenlopende vakgebieden. Een goed voorbeeld van een project van deze business unit is de uitbreiding van de afvalverbrandingsinstallatie HR-AVI te Amsterdam. Dit project wordt uitgevoerd in een joint venture met Fichtner GmbH uit Stuttgart. De rol van Cumae in dit project is het ontwerpen van de complete piping/lay out, het stoom/water- en koelcircuit, de automatisering en elektrotechniek alsmede de gehele bouwkundige en civiele engineering, inclusief uitvoering en begeleiding.
- *Business unit Projectmanagement*
Projectmanagement adviseert en begeleidt projecten die om een integrale expertise en aanpak van vakgebieden vragen.
- *Business unit Industriële Automatisering*
Deze business unit werkt aan complete automatiseringsoplossingen met inbegrip van elektrische en instrumenttechnische aspecten. Uitgangspunten als het optimaal omspringen met grondstoffen en utilities, bedieningscomfort, ergonomie, bedrijfsveiligheid en –zekerheid vormen daarbij de ankers.

De jaarlijkse omzet van Cumae is ongeveer €14 miljoen. Cumae is ISO 9001/2000 gecertificeerd.

De organisatiestructuur van Cumae kan als volgt worden weergegeven:



figuur 1.1: organisatiestructuur Cumae

Bijlage II Economische Haalbaarheid

Return on Investment (ROI)

De berekening van de ROI is als volgt:

$$O_g = \sum_{j=1}^n G_j / n \quad (j)$$

$$A_g = (G_0 - R_n) / n \quad (k)$$

$$W_g = O_g - A_g \quad (l)$$

$$I_g = (G_0 + R_n) / 2 \quad (m)$$

$$ROI = W_g / I_g \times 100\% \quad (n)$$

Waarbij:

A_g : gemiddeld afschrijvingsbedrag per periode over de periode 1 tot en met n [€/jaar]

G_j : geldstroom van periode j [€]

I_g : gemiddelde investering per periode over de periode 1 tot en met n [€/jaar]

O_g : gemiddelde opbrengst per periode over de periode 1 tot en met n [€/jaar]

R_n : restwaarde van de activa aan het einde van de looptijd van een project (periode n) [€]

W_g : gemiddelde periodewinst over de periode 1 tot en met n [€/jaar]

n : looptijd van een project [jaren]

Kanttekening die gemaakt moet worden bij deze methode is dat het project met de hoogste ROI niet de hoogste absolute winst hoeft te hebben.

Terugverdientijd

Bij de terugverdientijdmethode wordt berekend hoelang het duurt tot de som van de operationele ontvangsten gelijk is aan de som van de operationele uitgaven. De berekening is buitengewoon eenvoudig. Een nadeel is echter dat de methode optimaliseert op minimalisering van risico en niet op winstmaximalisatie op de lange termijn.

Netto Contante Waarde (NCW)

De NCW van een project kan berekend worden door alle met het project verbonden geldstromen contant te maken tegen de rentabiliteitseis r en deze vervolgens bij elkaar op te tellen. De rentabiliteitseis is daarbij afhankelijk van het risico van het te beoordelen project. Hoe hoger het risico, des te hoger de rentabiliteitseis.

$$NCW = \sum_{j=0}^n \frac{G_j}{(1+r)^j} \quad (o)$$

Waarbij:

r : rentabiliteitseis, uitgedrukt in een perunage

r_i : interne rentevoet, uitgedrukt in een perunage

Een project is in beginsel aanvaardbaar als wordt voldaan aan de voorwaarde:

$$NCW \geq 0$$

In dit geval zijn de geldstromen van het project niet alleen toereikend om de operationele uitgaven te dekken, maar ook om het door de vermogensverschaffers gewenste rendement op te leveren.

Een kanttekening die bij de NCW gemaakt dient te worden, is dat de NCW's van projecten met verschillende levensduur niet zondermeer met elkaar vergeleken kunnen worden. Om deze projecten toch te kunnen vergelijken, zal de NCW door de annuïteit gedeeld moeten worden zodat de jaarlijkse equivalente opbrengsten van beide projecten verkregen worden (Kooistra & de Vries, 2004). De annuïteit wordt als volgt berekend:

$$\sum_{x=1}^n \frac{1}{(1+r)^x} \quad (p)$$

De voorkeur gaat uit naar het project met de hoogste jaarlijkse opbrengsten. Dit hoeft niet het project met de hoogste NCW te zijn!

Internal Rate of Return (IRR)

Bij de toepassing van de IRR wordt berekend tegen welke rentevoet de toekomstige geldstromen moeten worden gediscoteerd om een netto contante waarde over de looptijd van het project te krijgen die nihil is.

$$G_0 + \frac{G_1}{(1+r_i)} + \frac{G_2}{(1+r_i)^2} + \dots + \frac{G_n}{(1+r_i)^n} = 0 \quad (q)$$

Ofwel

$$\sum_{j=0}^n \frac{G_j}{(1+r_i)^j} = 0 \quad (r)$$

De keuze zal vallen op het project waarvoor geldt:

$$r_i - r = \text{maximaal}$$

Bijlage III Kenmerken referentiewoningen

Van de referentiewoningen zijn de bouwkundige en installatietechnische kenmerken weergegeven, waarbij er zonder extra duurzame energievoorzieningen aan de wettelijke eis voor $EPC \leq 0,8$ wordt voldaan [1]:

tabel III.1: kenmerken referentiewoningen [1]

	tussen woning	hoek woning	2-onder-1 kap woning	vrijstaande woning	appartementen complex (27 woningen)
gebruik oppervlak Ag [m ²]	124,3	124,3	147,7	169,5	3034,8
verlies oppervlak Av [m ²]	156,9	230	268,5	358,4	2644,2
verhouding Ag/Av	0,8	0,5	0,6	0,5	1,1
U ramen [W/m ² K]	1,8	1,7	1,8	1,8	1,8
U voordeur [W/m ² K]	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
buitenzonwering	zuid	zuid	zuid	zuid, west	zuid
EPC	0,74	0,76	0,78	0,8	0,78
Energieverbruik [MJ/m ² /jaar]	339	383	391	418	335
CO₂ uitstoot [kg/jaar]	2520	2828	3455	4149	59710

Bij deze referentiewoningen geldt het volgende:

- Verwarming en warm tapwater: HR107 combi-ketel (CW-klasse 3)
- Gebalanceerde ventilatie met warmteterugwinning (rendement 95%)
- Gelijkstroom ventilatoren
- R_c gevel: 3,0 m²K/W
- R_c dak: 4,0 m²K/W

R_c begane grondvloer: 3,0 m²K/W

De verliesoppervlakten van deze referentiewoningen zijn weergegeven in onderstaande tabel:

tabel III.2: verliesoppervlakten referentiewoningen gevel/vloer/dak/beglazing [1]

oppervlakte [m ²]	tussen woning	hoek woning	2-onder-1 kap	vrijstaand	appartement (27 woningen)
gevel	34,4	100,0	103,0	140,9	714,1
vloer	46,5	46,5	56,7	76,7	502,0
dak	62,8	62,8	71,6	90,7	502,0
beglazing	17,3	20,1	29,9	35,1	409,5

Hulpenergie is de energie die bij een HR107 ketel (zoals in de referentiesituatie) nodig is voor elektronica, ventilator in de ketel en de pompregeling (Nederlands Normalisatie Instituut, 2005). De hoogte van het hulpenergieverbruik is voor de referentiewoningen als volgt:

tabel III.3: hulpenergieverbruik referentiewoningen

	tussen woning	hoek woning	2-onder-1- kap woning	vrijstaande woning	appartementen complex (27 woningen)
hulpenergieverbruik [MJ/jaar]	2917	2917	3462	3987	71151

Bijlage IV Graaddagen

tabel IV.1 gemiddeld aantal graaddagen per maand per locatie over 2000-2005

maand	De Bilt	Den Helder	Eelde	Maastricht	Twenthe	Vlissingen	Amsterdam	Leeuwarden	Rotterdam	Eindhoven
1	441	421	458	453	463	414	428	450	427	448
2	385	384	410	392	408	362	377	405	374	387
3	358	372	388	344	378	345	356	387	352	348
4	249	267	267	242	256	249	247	273	250	240
5	149	174	169	134	152	150	151	178	155	137
6	69	88	91	55	75	59	70	93	69	60
7	44	49	56	41	51	33	42	56	41	42
8	32	27	42	27	41	15	28	39	29	31
9	101	78	115	97	117	57	84	102	88	98
10	211	192	234	201	227	166	196	223	194	207
11	320	293	338	330	339	278	307	325	304	330
12	444	414	465	450	467	399	428	453	427	450
Eindtotaal	2803	2756	3034	2766	2974	2528	2714	2985	2711	2777

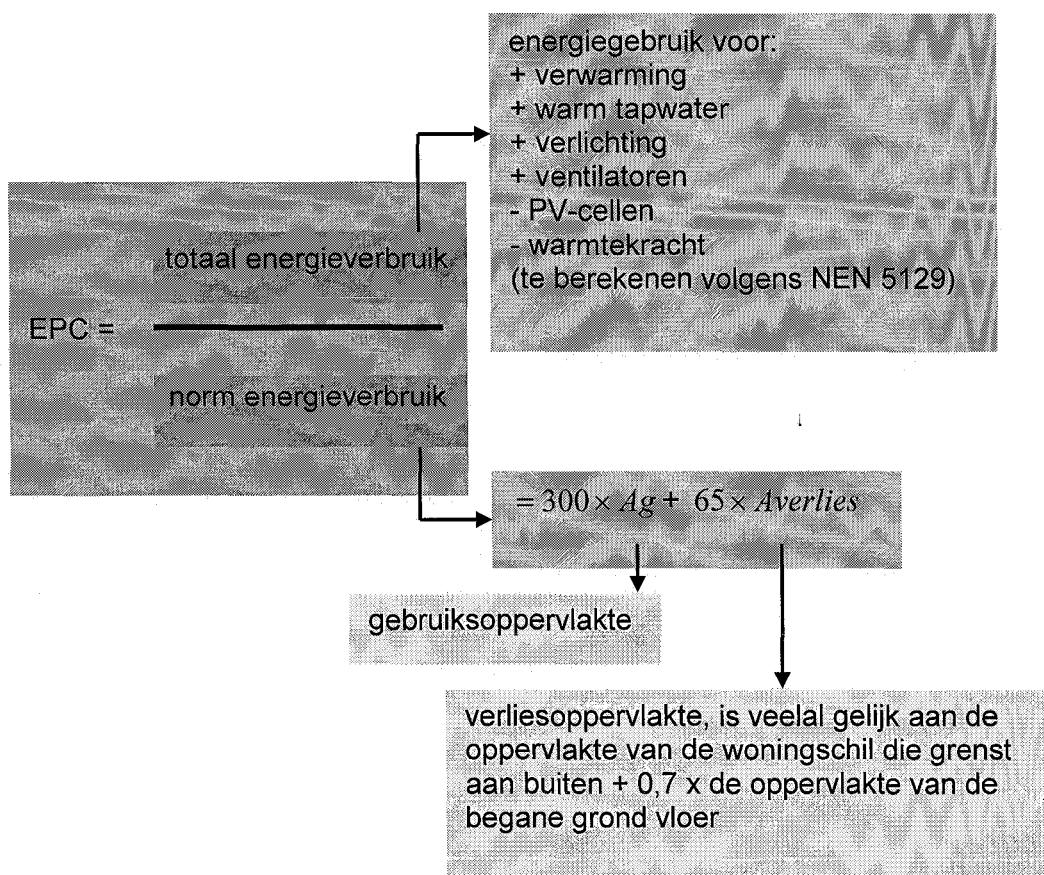
KWA bedrijfsadviseurs, www.kwa.nl

Bijlage V

EPC en EPL

Energie Prestatie Coëfficiënt (EPC)

De EPC is een maat voor de (gemiddelde) energiekwaliteit van een gebouw: hoe lager de EPC, hoe energiezuiniger het gebouw. De wettelijke maximale hoogte van de EPC is sinds januari 2006 voor woningen vastgesteld op 0,8. De EPC wordt berekend op basis van de gebouweigenschappen, een gestandaardiseerd bewoners/gebruikersgedrag en de gebouwgebonden installaties. In de Energie Prestatie Normen (EPN) staat aangegeven hoe de EPC van een woning of een utiliteitsgebouw berekend dient te worden. Voor de berekening van de EPC wordt het karakteristieke energiegebruik gedeeld door het voor de gebouw genormeerde energiegebruik [1]:



figuur V.1: EPC berekening

Door warmtelevering te combineren met andere maatregelen in de woning, is tegen geringe kosten een EPC van 0,8 mogelijk. Dit komt doordat warmtelevering middels WKK hoger wordt gewaardeerd in de EPN dan een HR-combi ketel.

Energie Prestatie Locatie (EPL)

De EPL is een instrument van de overheid om besparingen op fossiele brandstoffen te realiseren. In aanvulling op de EPC, die de energiekwaliteit van één gebouw weergeeft, honoreert de EPL ook maatregelen buiten het gebouw. De EPL geeft in één getal de energiekwaliteit van de locatie aan. Het getal geeft aan in hoeverre gebruik wordt gemaakt van energie uit fossiele brandstoffen en de CO₂-emissie die daarbij optreedt. De EPL kent

een schaal van 0 en 10, waarbij 10 staat voor de ideale situatie waarbij geen CO₂ -emissie optreedt. Deze waardering is tegengesteld aan de EPC waardering, aangezien geldt hoe hoger de EPL, des te wenselijker.

De EPL wordt als volgt berekend:

$$EPL = 10 - 4 \times \left(\frac{B_{locatiekeuze}}{B_{locatiereferentie}} \right) \quad (s)$$

B: fossiele brandstofverbruik

locatiekeuze: de situatie waarvoor de EPL berekend wordt

locatiereferentie: referentiesituatie

B_{locatiekeuze} is de som van het fossiele brandstofverbruik *B_{gebouw}* voor de woningen in een locatie:

$$B_{locatiekeuze} = \sum B_{gebouw} \quad (t)$$

B_{gebouw} wordt bepaald door de energievraag *E* op de meter van de woning, vermenigvuldigd met een correctiefactor *C* voor de verschillende energiedragers:

$$B_{gebouw} = E_{elektriciteit} \times C_{elektriciteit} + E_{warmte} \times C_{warmte} + E_{gas} \times C_{gas} \quad (u)$$

E: energievraag op de meter [GJ]

C: correctiefactor voor de fossiele brandstofinhoud van de geleverde energiedrager

De correctiefactoren voor enkele energiedragers zijn in onderstaande tabel weergegeven:

tabel V.1: correctiefactoren van enkele energiedragers [1]

	C [1/GJ]
Elektriciteit	
- standaard	29,9
- 50% duurzaam	15
- 100% duurzaam	0
Gas	
- standaard	15
- 50% duurzaam	7,5
- 100% duurzaam	0
Warmte	
- gasmotor	12
- grote warmtepomp	11
- grote STEG (stadsverwarming)	3

Een EPL van 10 kan alleen worden bereikt door de energievraag te reduceren tot 0 en/of de fossiele brandstofinhoud van elke energiedrager te reduceren tot 0, wat de inzet van duurzame energie inhoudt.

Bijlage VI Berekening Warmteprijs

De warmteprijs bestaat uit een drietal onderdelen:

- **Aansluitbijdrage**

De aansluitbijdrage is een éénmalige vergoeding die verschuldigd is op het moment dat de woning op het warmtenet wordt aangesloten. De aansluitbijdrage is voor 2006 vastgesteld op €1.897 inclusief BTW. Bij deze prijs komen de kosten van het warm tapwater-apparaat voor de rekening van de gebruiker.

- **Vastrecht**

Het vastrecht is een jaarlijkse vergoeding die verschuldigd is voor de aansluiting op het warmtenet. De hoogte van het vastrecht voor warmtelevering is opgebouwd uit de volgende elementen:

- Het uitgespaard vastrecht voor gas is afhankelijk van het gebied waarin de woning ligt. Hier wordt er uitgegaan van €23,88 per jaar inclusief BTW [4];
- De kosten voor uitgespaard onderhoud van een cv-ketel en vervanging van onderdelen vastgesteld op €74;
- De kosten voor verschillen in levensduur vastgesteld op €32,33.

Het totale vastrecht voor warmte is €130,21 per jaar.

- **Warmteprijs**

Om de prijs van 1 GJ warmte van een woning met stadswarmte te berekenen, wordt onderstaande formule gebruikt:

$$\text{€} / \text{GJ} = \frac{(1488 \text{ m}^3 \times \text{gasprijs}) + (4121 \text{ kWh} \times \text{elekt.prijs}) - (4063 \text{ kWh} \times \text{elek.prijs})}{35,40 \text{ GJ}} \quad (\text{v})$$

Waarbij:

- 1488 m³ - het gemiddeld gasverbruik per jaar van een woning die op het aardgasnet is aangesloten
- 4121 kWh - het gemiddeld stroomverbruik per jaar van een woning die op het aardgasnet is aangesloten
- 4063 kWh - het gemiddeld stroomverbruik per jaar van een woning die op het warmtenet is aangesloten
- 35,40 GJ - het gemiddeld warmteverbruik per jaar van een woning die op het warmtenet is aangesloten

Bijlage VII Kosten Biomassa

In deze bijlage wordt een beschrijving gegeven van de kostenaspecten van de verschillende stappen van het proces van biomassa tot energie bij de gebruiker. Voor de verschillende aspecten van het model zijn waarden nodig die zullen dienen als input. Voor deze parameters wordt een geschatte waarde aangenomen. Dit betreft de actuele waarde op het moment van het schrijven van dit rapport. Het is mogelijk dat deze waarden in de toekomst aangepast moeten worden.

Biomassa inkoop

Biomassa is door SenterNovem ingedeeld in een aantal categorieën (Koppejan & de Boer-Meulman, 2005). Deze indeling is beperkt tot alle biomassastromen die een voldoende grote bijdrage kunnen leveren aan een biomassa verbrandings- of vergistingsinstallatie. Aan elke biomassastroom is de geschatte beschikbaarheid in Nederland in 2010 en een prijsindicatie met een eventuele toelichting gekoppeld.

tabel VII.1: Biomassa indeling

Gebruikte indeling	kosten aankoop [€/ton]	opmerkingen	beschikbaarheid NL 2010 [kton/jaar]
HOUTACHTIGE STROMEN			
1 Vers resthout:			
a houtblokken	5 tot 10	seizoens-, vorm-, en afnamegrootte afhankelijk	500
b houtsnippers	20 tot 40		540
2 Energieteelt	70	inclusief voorbehandeling	2*
3 schoon resthout uit de houtverwerkende industrie			
a zaagsel	0	NL, incl. transport	270
b houtpellets	85 tot 90	Import	100*
c afkorthout	100 tot 125		250
4 gesch. ingezameld hout, A-hout kwaliteit	10	chips/blok	500
	0	zaagsel	
5 gesch. ingezameld hout, B-hout kwaliteit	0		700
NIET HOUTACHTIGE STROMEN			
6 hooi van gras	?		140
7 energieteelt (m.n. miscantus)	?	Sterk afhankelijk van grondkosten.	0,5
8 olie	350 tot 400	Import	4*
9 stro	35		15
10 schillen en schroot	25		
a schillen	85	Import	100*
b schroot/schiffers	140 tot 160	Afhankelijk van verbrandingswaarde	100*
OVERIGEN			
11 VGI bijproducten			
a frituurvet	250 tot 300	Juist voor grote hoeveelheden	60
b bleekarde	0		12*
c vetzuren	150 tot 250		60
e diermeel	0		50*

f dierlijke vetten	150 tot 350		200
12 swill	-30		215
13 kippenmest	-10 tot -40	Seizoens- en locatieafhankelijk	1.000
14 runder- en varkensmest	-5 tot -20		15.000
15 papier/plastic pellets (RDF)	4,5	Afval	1.400

* biomassaströmen die in de periode tot 2010 een belangrijke import van biomassa kunnen vormen

De jaarlijkse inkoopkosten van biomassa is de prijs van de biomassa vermenigvuldigd met de hoeveelheid die jaarlijks ingekocht wordt.

Voorbehandeling

Conversieprocessen kennen strenge brandstofsspecificaties, waaraan veel biomassa(rest)stromen moeilijk kunnen voldoen. Om toch aan deze specificaties te voldoen moet de biomassa voorbehandeld worden. De voorbehandelingen zijn in te delen in twee categorieën. Op de eerste plaats de voorbehandelingen die de vorm van de biomassa veranderen, zodat vervoer en conversie gemakkelijker kunnen verlopen. Deze leiden niet tot een verandering van de LHV of massa, wel tot verandering van de dichtheid. Deze voorbehandelingen zijn:

- *hakselen, chippen, shredderen*, dichtheid blijft bij benadering gelijk;
- *malen*, dichtheid blijft bij benadering gelijk;
- *verpoederen*, dichtheid neemt met ongeveer 20% af;
- *pelletieren, briketteren*, dichtheid neemt met ongeveer 10% toe (Knops, 2007).

Omdat deze voorbehandelingen geen invloed hebben op de verbrandingswaarde van de biomassa, zullen ze ook geen invloed hebben op de conversie. Wel kunnen zij de transport- en opslagkosten verlagen of verhogen, als deze na de voorbehandeling plaatsvinden. Vaak is de biomassa voor de levering al voorbehandeld, waardoor de kosten van de voorbehandeling in de inkoopprijs inbegrepen zijn.

De tweede categorie betreft de voorbehandelingen waarbij de verbrandingswaarde van de biomassa wel degelijk verandert. Deze voorbehandelingen zijn:

- *Voorbehandeling Refuse Derived Fuel (RDF) uit huishoudelijk afval voor meestoken*
Hierbij worden de brandbare bestanddelen van de niet-brandbare delen gescheiden en verwerkt tot pellets waardoor transport en verwerking eenvoudiger wordt. De toename van de verbrandingswaarde is afhankelijk van de brandbare fractie van het afval. De verbrandingswaarde zal uiteindelijk de verbrandingswaarde van de brandbare fractie zijn.
- *Productie brandstof pellets uit keuken-, winkel- en dienstafval voor verbranding*
Dit is vergelijkbaar met de productie van RDF pellets. Uit het keuken-, winkel- en dienstafval worden de brandbare bestanddelen gescheiden en verwerkt tot pellets.
- *Scheiden door windziften of zeven*
Biomassa bevat vaak stoffen die niet geschikt zijn voor conversie. Om het bruikbare gedeelte van de biomassa te scheiden van het niet-bruikbare deel kan scheiding worden toegepast door windziften of zeven. Doordat het niet-bruikbare gedeelte wordt afgescheiden, zal de verbrandingswaarde van het overgebleven deel toenemen.
- *Ontwateren*
Biomassa bevat vaak een grote hoeveelheid water. Als biomassa veel vocht bevat, dan is een gedeelte van de verbrandingsenergie nodig om dat vocht te laten verdampen. Door voor de conversie de biomassa te ontwateren, bijvoorbeeld door middel van persen, zal de hoeveelheid energie die vrijkomt bij conversie toenemen. Deze toename is te berekenen met behulp van formule e. Bij fysisch ontwateren zal

het vochtgehalte dalen tot 25%. De biomassa wordt gedroogd tot 25% droge stof. Dat betekent dat de relatieve massa (1-vochtgehalte) + 0,25 wordt. De relatieve verbrandingswaarde wordt 1/relatieve massa. De dichtheid neemt met 10% toe (Knops, 2007).

- *Drogen*

Bij drogen wordt energie toegevoerd om het vocht uit de biomassa te laten verdampen. Drogen kost evenveel energie als de energie die je bespaart in het verbrandingsproces. Drogen heeft daarom energetisch gezien alleen zin als het gebeurt met behulp van restwarmte. Hout wordt gedroogd tot 15% droge stof. Dat betekent dat de relatieve massa (1-vochtgehalte) + 0,15 wordt. De verbrandingswaarde wordt 1/relatieve massa. Mest wordt gedroogd tot 100% droge stof. De relatieve massa wordt dan 1-vochtgehalte, de relatieve verbrandingswaarde wordt 1/relatieve massa.

- *Pyrolyse*

Onder pyrolyse wordt het thermisch ontleden van organisch materiaal in afwezigheid van zuurstof verstaan. De uitvoering van pyrolyse als voorbehandeling leidt ertoe dat de biomassa wordt omgezet in meer homogene fracties waardoor de verdere verwerking eenvoudiger wordt. Ook wordt de biomassa sterker geconcentreerd en neemt de verbrandingswaarde ervan toe. Pyrolyse is echter een techniek die nog niet op grote/commerciële schaal toegepast kan worden en daarom zal pyrolyse niet in dit onderzoek worden meegenomen.

- *Torrefactie*

Bij torrefactie wordt de biomassa zonder toevoer van zuurstof verwarmd tot 200-300°C, zodat een vast product ontstaat met 70 % van de oorspronkelijke massa en 90% van de oorspronkelijke energie inhoud (van Helden, 2003). Dit betekent dat de verbrandingswaarde met 29% toeneemt. Bovendien wordt de maalbaarheid van de biomassa sterk verbeterd en wordt het product hydrofoob, waardoor het bij buitenopslag geen water opneemt en minder gevoelig is voor rotting en broei [1].

SenterNovem heeft een overzicht gemaakt van de mogelijke voorbehandelingen van biomassa en de kosten die hieraan verbonden zijn (Koppejan & de Boer-Meulman, 2005):

tabel VII.2: voorbehandelingsmethoden met kosten

Methode van voorbehandeling	kosten (incl. energie)
hakselen, chippen, shredderen	10 € / ton input
malen	20 € / ton input
verpoederen	50 € / ton input
pelletieren, briketteren	35 € / ton input
thermisch drogen van mest	3 GJth / ton waterverdamping
drogen (hout van 50 naar 15% watergehalte)	10 € / ton input
fysisch ontwateren (tot 25% ds)	5 € / ton input
voorbehandeling RDF uit HHA voor meestoken	50 € / ton input
productie brandstof pellets uit kwd voor verbranding	55 € / ton brandstof
scheiden door windziften, zeven	15 € / ton input
torrefactie	50 € / ton product
pyrolyse	4 tot 18 / GJ product

Transport

Onder transport wordt hier verstaan het vervoer van de biomassa naar de plaats van conversie. De transportkosten zijn afhankelijk van de opbouw van de opgegeven inkoopprijs van de biomassa. Deze prijs kan bijvoorbeeld inclusief transport gegeven zijn en in dit geval zijn de expliciete transportkosten nul. Voor geïmporteerde biomassa kan de prijs bijvoorbeeld weergegeven zijn vanaf de Nederlandse haven waar de biomassa opgehaald moet worden.

In dat geval bestaan de transportkosten alleen uit de kosten van het transport binnen Nederland. Het startpunt van de transportkosten is dus de plaats waar de biomassa wordt opgehaald bij een bepaalde prijs.

Er zijn drie mogelijke modaliteiten voor het vervoer van biomassa: vrachtwagen, trein en schip. Deze zullen hieronder besproken worden.

Vrachtwagen

Vrachtwagens worden gebruikt voor het vervoer van biomassa op relatief korte afstanden. De kosten van het vervoeren van biomassa per vrachtwagen zijn afhankelijk van de dichtheid en de waterfractie van de biomassa. In tabel VII.3 zijn de kentallen weergegeven voor conventionele Nederlandse vrachtwagens en vrachtwagens gespecialiseerd in het vervoer van pellets. Deze kentallen zijn verzameld door Suurs (2002).

tabel VII.3: kentallen biomassa vervoer per vrachtwagen

vrachtwagen soort	vrachtwagen NL	pellet vrachtwagen
maximum capaciteit [ton]	25	35
maximum capaciteit [m ³]	120	80
km kosten [€/km]	1,24	1,1

De benodigde hoeveelheid vrachtwagens om de biomassa aan te voeren kan met onderstaande formules berekend worden:

$$R = \frac{a}{cap_i} \quad (w)$$

$$R = \frac{a/\rho}{cap_m} \quad (x)$$

R: benodigde aantal ritten per jaar
a: vraag biomassa [ton/jaar]
cap_i: maximum capaciteit modaliteit [ton]
cap_m: maximum capaciteit modaliteit [m³]
ρ: dichtheid biomassa [ton/m³]

De benodigde hoeveelheid vrachtwagens om de biomassa aan te voeren is afhankelijk van de dichtheid van de biomassa in ton/m³. Voor de conventionele vrachtwagens geldt dat als de biomassa een dichtheid heeft hoger dan 25/120 = 0,21 ton/m³, dan zal de maximum capaciteit in ton de doorslag geven. Is de dichtheid lager, dan zal de maximum capaciteit in m³ de doorslag geven. In het geval van de pellet vrachtwagen geldt dit zelfde bij een dichtheid hoger of lager dan 35/80 = 0,44 ton/m³.

Behalve de kosten per afgelegde kilometer spelen ook de laad- en loskosten een rol. De kosten hiervoor worden geschat op 2 €/ton (Koppejan, 2005).

De totale transportkosten bij het vervoer per truck worden als volgt berekend:

$$T_{truck} = R \times d \times 2 \times k_{truck} + 2 \times l_{truck} \times a \quad (y)$$

T_{truck}: jaarlijkse transportkosten bij het vervoer per vrachtwagen [€]
R: benodigde aantal ritten per jaar
d: afstand die met de modaliteit wordt afgelegd [km]
k_{truck}: transportkosten vrachtwagen [€/km]
l_{truck}: laad- en loskosten vrachtwagen [€/ton]

Bij deze berekening wordt uitgegaan van toegewijd vervoer, wat inhoud dat de vrachtwagen vol heen komt en leeg terug gaat. Daardoor moeten de transportkosten per km over de dubbele afstand meegenomen worden.

Trein

Het voordeel van het vervoer van biomassa per trein is dat de capaciteit groter is dan die van een vrachtwagen, maar niet zo groot als die van een schip. Dit maakt treinvervoer geschikt voor het vervoer van middelgrote hoeveelheden biomassa (enkele honderden tonnen per transport). Het nadeel van het vervoer per trein is dat het spoornetwerk in Europa niet goed afgestemd is. Zo is het bij bepaalde grenzen nodig om van trein te wisselen omdat de spoorbreedte niet gelijk is. Ook is het moeilijk om inzicht te krijgen in de kosten van treinvervoer. Zo kan treinvervoer van Rotterdam naar Parijs vier keer zo duur zijn als van Rotterdam naar Barcelona. Toch heeft Hamelinck (2005) een poging gedaan om de kosten van treinvervoer per km uit te drukken. Deze waarde is echter een grove schatting en het is aan te raden om de werkelijke kosten voor een specifieke situatie bij een transportbedrijf aan te vragen.

tabel VII.4: kentallen biomassa vervoer per trein

maximum capaciteit [ton]	1000
maximum capaciteit [m ³]	2500
km kosten [€/km]	8450/d + 4
laad- en loskosten [€/ton]	2

$$T_{\text{trein}} = R \times d \times k_{\text{trein}} + 2 \times l \times a \quad (\text{z})$$

De benodigde hoeveelheid treinritten om de biomassa aan te voeren is afhankelijk van de dichtheid van de biomassa in ton/m³. Als de biomassa een dichtheid heeft hoger dan 1000/2500 = 0,4 ton/m³, dan zal de maximum capaciteit in ton de doorslag geven. Is de dichtheid lager, dan zal de maximum capaciteit in m³ de doorslag geven.

Bij deze berekening wordt niet uitgegaan van toegewijd vervoer, waardoor alleen de heenreis in de kosten dienen te worden meegenomen.

Schip

Het vervoer van biomassa per schip is geschikt voor grote hoeveelheden over lange afstanden. De kosten worden bepaald door de grootte van het schip, de locatie, de afstand, de transportsnelheid en de havenkosten. De gegevens in tabel VII.5 geven een indicatie van de kentallen van biomassa vervoer per schip (Koppejan, 2005):

tabel VII.5: kentallen biomassa vervoer per schip

	binnenvaartschip	zeeschip
maximum capaciteit [ton]	10.000	50.000
maximum capaciteit [m ³]	16.400	82.000
transport kosten [€/ton]	3,5	10
laadkosten [€/ton]	2	2

De transportkosten bij vervoer per schip kunnen als volgt berekend worden:

$$T_{\text{schip}} = R \times d \times k_{\text{schip}} + 2 \times l \times a \quad (\text{ab})$$

Ook hier geldt dat de benodigde hoeveelheid schepen om de biomassa aan te voeren afhankelijk is van de dichtheid van de biomassa in ton/m³. Voor beide typen schepen geldt dat als de biomassa een dichtheid heeft hoger dan 10.000/16.400 = 50.000/82.000 = 0,6

ton/m³, dan zal de maximum capaciteit in ton de doorslag geven. Is de dichtheid lager, dan zal de maximum capaciteit in m³ de doorslag geven.

Opslag

De totale jaarlijkse opslagkosten van biomassa zijn afhankelijk van de duur van de opslag, de hoeveelheid biomassa die opgeslagen moet worden en de kosten van de opslag per eenheid biomassa per periode. Een goede indicator om de opslagkosten te berekenen is de jaarlijkse gemiddelde voorraad in aantal ton maanden. Deze kan berekend worden met behulp van drie parameters. Op de eerste plaats is de biomassa vraag in ton/jaar nodig. Dit is de hoeveelheid biomassa die nodig is om de gewenste output van de biomassacentrale te kunnen produceren. Verder is het belangrijk om te weten over hoeveel maanden de aanvoer verdeeld is. Dit heeft te maken met de seizoensafhankelijkheid van de biomassa. Bijvoorbeeld, wordt de biomassa twee maal per jaar geoogst en duurt het twee maanden per oogst voordat de totale hoeveelheid biomassa naar de opslagruimte vervoerd is, dan is de aanvoer over $2 \times 2 = 4$ maanden verdeeld. Tenslotte kan er om enige fluctuaties in de biomassavoorziening op te vangen een veiligheidsvoorraad worden aangelegd. Met behulp van deze gegevens kan aan de hand van formule ac de gemiddelde jaarlijkse voorraad berekend worden:

$$v = \frac{\frac{1}{2} \times \left(a - \frac{a \times t_a}{12} \right) \times t_a + \frac{1}{2} \times \left(a - \frac{a \times t_a}{12} \right) \times (12 - t_a)}{c} + vv \times 12 \quad (\text{ac})$$

v : jaarlijkse voorraad [ton maanden/jaar]

a : jaarlijkse vraag biomassa [ton/jaar]

t_a : aantal maanden waarover de aanvoer verdeeld wordt [maanden/jaar]

vv : veiligheidsvoorraad [ton]

c : jaarlijks aantal keer aanvoeren [1/jaar]

Deze formule is opgesteld onder drie aannamen:

- het biomassa verbruik is constant;
- de aanvoersnelheid van de biomassa is constant;
- als het aantal leveringen hoger is dan één per jaar, zijn deze leveringen gelijkmatig over het jaar verspreid.

De hoogte van de veiligheidsvoorraad is afhankelijk van de fluctuaties in de biomassavoorziening en de grootte van de biomassavoorziening en daarmee het vermogen van de installatie. De hoogte van de veiligheidsvoorraad kan uitgedrukt worden in het aantal uur dat de installatie kan draaien met deze hoeveelheid biomassa. De veiligheidsvoorraad in ton kan dan als volgt berekend worden:

$$vv = \frac{vv_{uur}}{p_t} \times a \quad (\text{ad})$$

vv_{uur} : veiligheidsvoorraad [uren]

p_t : jaarlijkse productietijd van de centrale [uur/jaar]

De veiligheidsvoorraad is op te delen in twee categorieën. De eerste is de operationele veiligheidsvoorraad die variatie in de aanvoer van biomassa door bepaalde bedrijfsvoering keuzen op te vangen, zoals geen levering in verband met feestdagen. Deze veiligheidsvoorraad heeft de grootte van ongeveer vier productiedagen. De tweede categorie is de strategische veiligheidsvoorraad die als doel heeft het opvangen van leveringonzekerheid op de langere termijn. De hoogte van deze veiligheidsvoorraad is sterk

afhankelijk van de biomassastroom en het belang van een constante energielevering aan de afnemers. Gemiddeld kan een hoogte worden genomen van vier weken productie.

Door de jaarlijkse gemiddelde voorraad te vermenigvuldigen met de kosten van het op voorraad houden van één ton gedurende één maand worden de jaarlijkse opslagkosten berekend. SenterNovem hanteert als opslagkosten 2,5 euro per ton per maand (Koppejan, 2006). Hamelinck et al. (2005) maakt onderscheid tussen het opslaan in de openlucht en het overdekt opslaan en tussen de verschillende vormen biomassa, zoals in tabel VII.6 te zien is. Bij opslag in de openlucht moet worden meegenomen dat de biomassa kwaliteit sterk afneemt: het droge stof verlies kan oplopen tot 3% per maand.

tabel VII.6: opslagkosten per biomassa vorm voor openlucht en overdekte opslag

kosten in €/m ³ opgeslagen product/jaar	Openlucht	Overdekt
chips	1,1	87
pellets	-	87
houtblokken	1,1	-
balen	1,1	-
vloeistoffen	-	310

Conversie

Om de conversiekosten te bepalen moeten de jaarlijkse kosten van de centrale bepaald worden. Deze bestaan uit de afschrijvingskosten, de rentekosten en de beheer- en onderhoudskosten. Deze kosten zullen bepaald worden aan de hand van een aantal gegevens van de centrale: de economische levensduur, het rendement en de beschikbaarheid.

$$K_{conversie} = K_{afschrijving} + K_{rente} + K_{b\&o} \quad (ae)$$

$K_{conversie}$: conversie kosten [€/jaar]

$K_{afschrijving}$: afschrijvingskosten [€/jaar]

K_{rente} : rentekosten [€/jaar]

$K_{b\&o}$: beheer- en onderhoudskosten [€/jaar]

De gegevens die nodig zijn voor de bepaling van de conversie kosten zullen hieronder besproken worden. Daarbij wordt waar nodig een onderscheid gemaakt tussen verbranding en vergisting.

Economische Levensduur

De economische levensduur van een installatie is van invloed op de rentabiliteit van de investering. Immers, hoe langer een installatie gebruikt wordt, over des te meer jaren kan de investering verdeeld worden en des te rendabeler wordt de installatie. Bij verschillende onderzoeken varieert de economische levensduur van de installatie tussen 20 jaar (Kumar et al., 2005) en 30 jaar (Kumar et al., 2003). In Nederland was het tot voor de afschaffing van de MEP-subsidie (zie bijlage VIII) gebruikelijk om uit te gaan van een economische levensduur van 10 jaar, aangezien de subsidie voor een periode van tien jaar verschaft werd (Veenstra, 2006). Bovendien is over een levensduur van tien jaar de zekerheid van de financiering beter gegarandeerd dan over een levensduur van 20 jaar.

Rendement

Het elektrisch omzettingsrendement van de centrale bepaalt hoeveel procent er van de energetische waarde van de biomassa omgezet kan worden in energie in de vorm van elektriciteit. Dit rendement ligt voor biomassa verbrandingcentrales rond de 25% (Kumar et al., 2005), (Knops, 2007) en voor vergistingcentrales rond de 40% (Hagen, 2006), (Veenstra, 2006). Hierbij geldt hoe groter de centrale, des te hoger het rendement (Veenstra, 2006).

Een gedeelte van de opgewekte elektriciteit zal echter weer verbruikt worden in de centrale zelf ten behoeve van hulpapparatuur zoals pompen, voor verbranding is dit 2 tot 4% (Knops, 2007) en voor vergisting is dit 4 tot 7% (Veenstra, 2006). Daardoor zal het netto-elektrisch rendement van de installatie dalen. Het netto-rendement wordt als volgt berekend:

$$\eta_{\text{netto}} = \eta_{\text{centrale}} - \eta_{\text{centrale}} \times e_{\text{centrale}} \quad (\text{af})$$

η_{netto} : netto elektrisch rendement van de centrale als perunage

η_{centrale} : elektrisch rendement van de centrale als perunage

e_{centrale} : eigen elektriciteitsgebruik van de centrale als perunage

In dit onderzoek worden alleen technieken meegenomen die al op grote schaal worden toegepast. Deze technieken zullen qua rendement in de loop der tijd nauwelijks tot niet meer verbeteren (van Hilten & Gerlagh, 2000).

Beschikbaarheid

De beschikbaarheid van een biomassacentrale gebaseerd op een volwassen techniek wordt geschat op 90% van de tijd. In de eerste twee jaar zal de beschikbaarheid lager zijn, doordat de opstart van een centrale nooit geheel vlekkeloos verloopt. In jaar 1 wordt daarom de beschikbaarheid geschat op 80% en in jaar 2 op 85% (Kumar et al, 2005). Om met een jaarlijkse gelijke beschikbaarheid te kunnen rekenen, wordt een gemiddelde beschikbaarheid over de levensduur van de centrale genomen. Ter vergelijking: de houtverbrandingsinstallatie van Essent in Cuijk heeft een beschikbaarheid van 87% [1].

Afschrijvingskosten

De investering die aan het begin van jaar 1 moeten worden gedaan in de installatie kan gedurende de levensduur van de installatie worden afgelost. De meest eenvoudige manier is lineair afschrijven in jaarlijks gelijke bedragen.

De jaarlijkse afschrijvingskosten worden als volgt berekend (van Beek & van Dam, 2000):

$$K_{\text{afschrijving}} = \frac{(I - b)}{l} \quad (\text{ag})$$

I : investering [€]

b : restwaarde [€]

l : economische levensduur [jaren]

Om de investeringskosten van een biomassacentrale met een bepaald vermogen in te schatten, wordt gebruik gemaakt van de schaalfactor en een basis centrale. De basis centrale is een gerealiseerde vergelijkbare centrale met investeringskosten 1 en vermogen 1. De schaalfactor is een exponent die gebruikt wordt om de kosten van centrale 1 met vermogen 1 om te zetten in de kosten van centrale 2 met vermogen 2, volgens onderstaande vergelijking (Kumar et al., 2003):

$$Kosten_2 = Kosten_1 \times \left(\frac{Capaciteit_2}{Capaciteit_1} \right)^{\text{Schaalfactor}} \quad (\text{ah})$$

De schaalfactor van een biomassa verbrandingscentrale van 0 tot 450 MW ligt tussen de 0,7 en 0,8 (Kumar et al., 2003). Voor biomassa verbrandingsinstallaties kan de houtverbrandingsinstallatie van Essent in Cuijk als basis centrale genomen worden. Deze centrale heeft een vermogen van 25 MWe met investeringskosten van €50.000.000. [1].

Uit gegevens verkregen van Veenstra (2006) en Hagen (2006) blijkt dat de schaalfactor van een vergistingsinstallatie ligt tussen de 0,6 en 0,7. De basiscentrale heeft een vermogen van 0,55 MWe met investeringskosten van €1.500.000.

De restwaarde van een centrale bestaat voornamelijk uit de waarde van de grond en kan geschat worden op 10 tot 20% van de initiële investering.

Beheer- en onderhoudskosten

De jaarlijkse kosten om een centrale draaiende te houden worden de beheer- en onderhoudskosten genoemd. Deze kosten bevatten de onderhoudskosten, verzekeringskosten en personeelskosten en worden uitgedrukt als percentage van de initiële investering. Deze waarde ligt voor verbrandingsinstallaties gewoonlijk tussen de 3% en 6% (Dornburg & Faaij, 2001). Veenstra (2006) gebruikt als vuistregel voor vergistingsinstallaties 3,5% van de initiële investering.

Rentekosten

In het begin van jaar 1 zal de hele installatie gefinancierd moeten worden. Daardoor wordt er beslag gelegd op vermogen en daarover moet rente betaald worden. De rente wordt uitgedrukt in een jaarlijks percentage, bij Cumae is 5% gebruikelijk.

$$K_{rente,i} = r \times \left(I - \sum_0^i K_{afschrijving} \right) \quad (ai)$$

$K_{rente,i}$: rentekosten in jaar i [€]
 r : rentepercentage als perunage

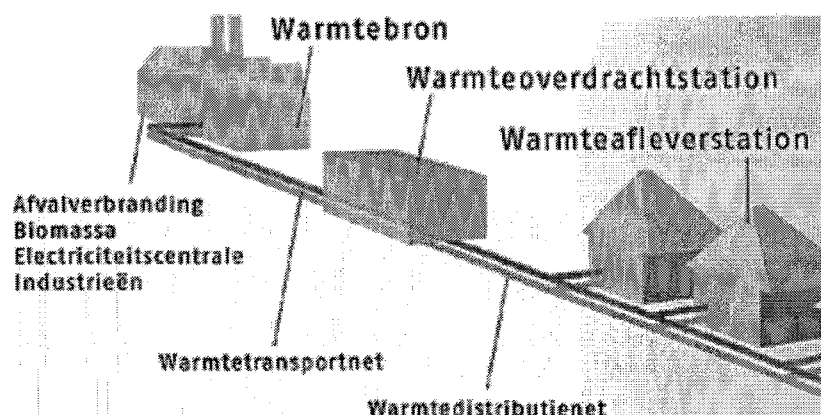
Om met jaarlijks gelijke rentekosten te kunnen rekenen, wordt het gemiddelde van de rentekosten over de gehele levensduur van de installatie berekend:

$$K_{rente,gem} = \frac{\sum_{i=0}^l K_{rente,i}}{l} \quad (aj)$$

$K_{rente,gem}$: gemiddelde jaarlijkse rentekosten [€/jaar]

Distributie

Warmte die vrijkomt bij de conversie van de biomassa wordt gebruikt om water te verwarmen met behulp van een warmtewisselaar. Dit water wordt via leidingen naar woningen en bedrijven getransporteerd als ruimteverwarming en warm tapwater (na tussenkomst van een warmtewisselaar). Dit wordt ook wel 'warmtedistributie' of 'stadsverwarming' genoemd. Als het water dat gebruikt is als ruimteverwarming is afgekoeld wordt het teruggevoerd en opnieuw verwarmd. Dit proces is weergegeven in figuur VII.1. Kenmerkend voor warmtelevering is dat, in plaats van een energiedrager zoals gas, het eindproduct (warmte) wordt getransporteerd. In Nederland zijn inmiddels al 350.000 woningequivalenten aangesloten op een warmtenet (SenterNovem).



figuur VII.1: warmtenet (Nuon)

De kosten van een warmtenet zijn de transportkosten en de kosten voor de aanleg van een wijkdistributiesysteem (Hoogsteen et al., 2003):

tabel VII.7: kosten distributiesysteem

Warmtetransportleidingen [€/km]	
- groene weide	500.000
- matige bebouwing/industrie	800.000
- stedelijk gebied	1.500.000
Aansluitkosten [€/aansluiting]	
- woonwijk nieuwbouw	2.400
- woonwijk inbreiding	6.000
- bedrijventerrein nieuw	30.000
- bedrijventerrein bestaand	80.000

Voor de kosten van de warmtewisselaar in de woning moet €1.600 toegevoegd worden aan de aansluitkosten. Het warmteverlies over het net is 20% en de kosten voor beheer en onderhoud bedragen 2% van de totale investering.

De totale kosten voor de aanleg van een warmtenet worden als volgt berekend:

$$T_{\text{warmte}} = w \times T_{\text{transp.w}} + b \times T_{\text{transp.b}} + n_w \times T_{\text{aansluit.w}} + n_b \times T_{\text{aansluit.b}} \quad (\text{ak})$$

T_{warmte} : aanlegkosten warmte net [€]

$T_{\text{transp.w}}$: aanlegkosten warmtetransportleidingen woningen [€/km]

w : benodigd aantal kilometer transportleiding woningen [km]

$T_{\text{transp.b}}$: aanlegkosten warmtetransportleidingen bedrijven [€/km]

b : benodigd aantal kilometer transportleiding bedrijven [km]

$T_{\text{aansluit.w}}$: distributiekosten woningen [€/aansluiting]

$T_{\text{aansluit.b}}$: distributiekosten bedrijven [€/aansluiting]

n_w : aantal woningaansluitingen op warmtenet

n_b : aantal bedrijfsaansluitingen op warmtenet

Hulpketel

Om warmte te leveren als de biomassacentrale niet in de vraag kan voldoen, is er een gasgestookte hulpketel nodig. De investeringskosten voor deze ketel zijn €50 per kW en het thermisch omzettingsrendement is 85%. De beheer- en onderhoudskosten zijn 2,5% van de investering (Hoogsteen et al., 2003).

$$I_{hk} = P \times 50 \quad (\text{al})$$

$$V_{hk} = p_t / 31,6 \times q + 0,025 \times I_{hk} \quad (\text{am})$$

I_{hk} : investeringskosten hulpketel [€]

P : opgesteld vermogen [kW]

V_{hk} : variabele kosten hulpketel [€/jaar]

p_t : geleverd vermogen [MJ/jaar]

q : gasprijs [€/m³]

Warmteopslagtank

De hoeveelheid warmte die de centrale levert en de hoeveelheid warmte die de afnemers vragen sluiten niet op ieder moment op elkaar aan. In het geval van een groter warmte aanbod dan warmte vraag kan het rendabel zijn om de warmte tussentijds op te slaan in plaats van deze verloren te laten gaan. Deze opslag kan met behulp van een

warmteopslagtank die dient als buffer. Deze tank is een lokale oplossing om de continuïteit van de warmtelevering te verbeteren en de geleverde warmte optimaal te benutten. De investeringskosten van een dergelijke tank zijn afhankelijk van de grootte van de tank (Zantingh, 2006):

tabel VII.8: investeringskosten warmteopslagtank met hoogte 10 meter

Inhoud [m ³]	Totale investeringskosten [€]
600	99.200
745	107.700
800	111.300
1000	121.300
1100	128.100
1200	136.200
1600	168.500
2000	207.000

De isolatiedikte van deze tanks is 160 mm, waardoor het warmteverlies verwaarloosbaar is. De beheer- en onderhoudskosten van de tank zijn €1500 per jaar op basis van een onderhoudscontract, de levensduur is 8 tot 10 jaar (Zantingh, 2006).

Restverwerking

Bij de conversie en voorbereiding van de biomassa ontstaat er restafval dat verwerkt moet worden. Het restafval bestaat voornamelijk uit het as van de biomassa. Als er vanuit wordt gegaan dat het as allemaal gestort moet worden, zijn de kosten van de restverwerking gelijk aan de hoeveelheid biomassa vermenigvuldigd met de asfractie van de biomassa en de kosten voor het storten. De asfractie is afhankelijk van het type biomassa. De stortkosten zijn gemiddeld €115 per ton inclusief transport (Knops, 2007).

Bijlage VIII Subsidies

Om de ontwikkeling van duurzame energie te stimuleren, worden er door de overheid subsidies uitgereikt. Er zijn een aantal subsidies waarvoor projecten die in dit onderzoek centraal staan in aanmerking kunnen komen:

- *Besluit Subsidies CO₂ reductie (BSC)*

Het CO₂-reductieplan ondersteunt grootschalige investeringsprojecten die een belangrijke bijdrage leveren aan de vermindering van de nationale CO₂-uitstoot. Het CO₂-reductieplan richt zich op duurzame projecten die de uitstoot van broeikasgassen aanzienlijk terugdringen en die voor het bedrijfsleven niet rendabel genoeg zijn. Het doel van de subsidie is om met de investeringsprojecten in 2010 een jaarlijkse reductie van vier tot vijf megaton CO₂- equivalent te bereiken. Binnen de verschillende subsidieregelingen van het CO₂-reductieplan schrijft het Projectbureau CO₂-reductieplan tenders (inschrijvingsrondes) uit. Deze tenders variëren naar onderwerp, hebben elk een eigen budget en kennen soms eigen criteria. Aangezien er tot nu toe al meer dan 4 megaton CO₂ reductie is bereikt, zijn er op dit moment geen tenders uitgeschreven. Het is onduidelijk of er in de toekomst nieuwe tenders uitgeschreven worden.

- *Energie Investerings Aftrek (EIA)*

Bij de aanschaf van bedrijfsmiddelen waarmee zuiniger met energie om kan worden gegaan, kan er gebruik worden gemaakt van de energie-investeringsaftrek. De EIA houdt in dat 44% van de investeringskosten in energiebesparende bedrijfsmiddelen en duurzame energie afgetrokken kunnen worden van de winst, wat leidt tot fiscale voordelen. Een investering komt in aanmerking voor de EIA als deze aan de volgende drie voorwaarden voldoet:

1. Het bedrag aan energie-investeringen moet ten minste € 2.100 zijn;
2. Het bedrijfsmiddel is niet eerder gebruikt;
3. Het bedrijfsmiddel staat op de Energielijst, verkrijgbaar via de belastingdienst. Deze lijst geeft weer welke bedrijfsmiddelen in ieder geval in aanmerking komen voor de EIA. Daarnaast komen ook middelen in aanmerking die niet in de lijst staan maar wel fossiele brandstoffen besparen en een algemene besparingsnorm halen. Deze lijst wordt elk jaar opnieuw vastgesteld.

Naast bedrijfsmiddelen kunnen ook de kosten van het inhuren van extern advies fiscaal voordelig zijn.

Een aanvraag moet binnen drie maanden na het aangaan van de verplichtingen worden ingediend. Dat betekent dus dat de dag dat de offerte of opdrachtbevestiging getekend wordt bepalend is. Met ingang van 12 oktober 2006 is de EIA voor het jaar 2006 gesloten in verband met overschrijding van het budget. Vanaf 1 januari 2007 wordt de regeling weer geopend.

- *Milieukwaliteit Elektriciteit Productie (MEP)*

Bij de productie van elektriciteit uit duurzame bronnen, warmtekrachtkoppeling (WKK) of Klimaat Neutrale Fossiele Energie (KNFE) kan er voor de investeringen en exploitatie van de installaties een subsidie worden verkregen die bedoeld is om de meerkosten ten opzichte van grijze elektriciteit te overbruggen. De subsidie wordt niet alleen toegekend voor de aanschaf van nieuwe installaties, maar ook voor bestaande duurzame elektriciteitsinstallaties van na 1 januari 1996. Voor WKK geldt deze datumgrens niet, wel een volumegrens van 1000 GWh per jaar. Een eenmaal toegekende subsidie voor duurzame energie staat voor maximaal tien jaar vaststaat. Voor warmtekrachtinstallaties wordt de subsidie jaarlijks vastgesteld. Met ingang van 28 augustus 2006 kunnen voor nieuwe projecten geen subsidieaanvragen meer worden ingediend. Medio november 2006 zijn er twee nieuwe subsidieregelingen opgesteld: een tegemoetkomingsregeling voor bedrijven die rechtstreeks zijn

getroffen door de abrupte sluiting van de MEP-regeling. Het gaat hierbij vooral om een vergoeding van de legeskosten en de onderzoek- en advieskosten die noodzakelijk daarvoor zijn gemaakt; een overgangsregeling voor (co)vergistingsinstallaties. Deze regeling is bedoeld als maatregel gericht op de vergevorderde investeringsplannen in met name vergistingsinstallaties. Het is onduidelijk of er een nieuwe MEP subsidie wordt vastgesteld in de toekomst.

Zoals al aangegeven in de beschrijving van de subsidies, is de EIA de enige waarvoor duidelijk is dat de subsidie in 2007 geleverd kan worden. Zowel de BSC als MEP subsidie zijn voor nieuwe projecten tot nader bericht afgeschaft. Informatie over de subsidies is te vinden bij SenterNovem [1], Enerq [10] en de Belastingdienst [11]. Op de website 'subsidieshop' [12] is bovendien een overzicht te vinden van alle subsidies die betrekking hebben op duurzame energie. In dit onderzoek zijn alleen landelijke subsidies meegenomen. Mogelijk zijn er voor projecten ook regionale subsidies beschikbaar. Deze zouden kunnen worden gevonden via de subsidieshop.

Bijlage IX Kosten extra isolatie

tabel IX.1: extra kosten voor verbetering isolatie referentiewoningen

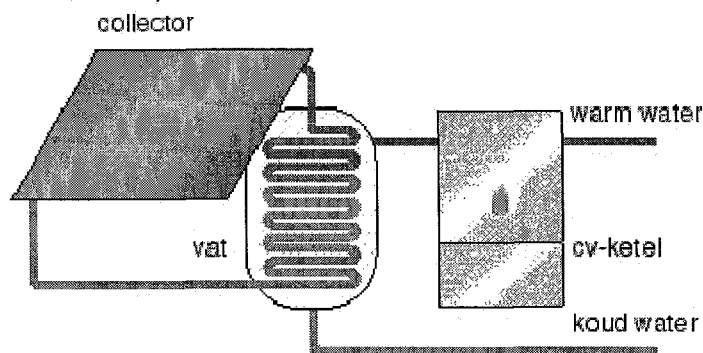
extra kosten t.o.v. referentiesituatie [€/woning]						
	tussen woning	hoek woning	2 onder 1 kap	vrijstaand	appartementen complex (27 woningen)	
Rc gevel [m²K/W]:						
referentie: 3						
3,5	83	243	250	342	1997	
4	149	433	446	610	3566	
4,5	294	855	880	1204	7038	
Rc vloer [m²K/W]:						
referentie: 3						
3,5	75	75	92	124	812	
4	150	150	183	247	1618	
4,5	225	225	273	371	2429	
Rc dak [m²K/W]:						
referentie: 4						
4,5	160	160	183	232	1281	
5	321	321	366	463	2563	
5,5	450	450	513	650	3467	
beglazing [W/Km²):						
referentie:						
HR+ (U=1,6)						
HR++ (U=1,2)	44	52	76	89	1062	
HR++ (U=1,0)	274	324	474	557	6656	

Bijlage X Zonneboilers

De verschillende typen zonneboilers worden hieronder beschreven, op basis van de beschrijving van Berns & Boerée (2002).

Standaard zonneboiler

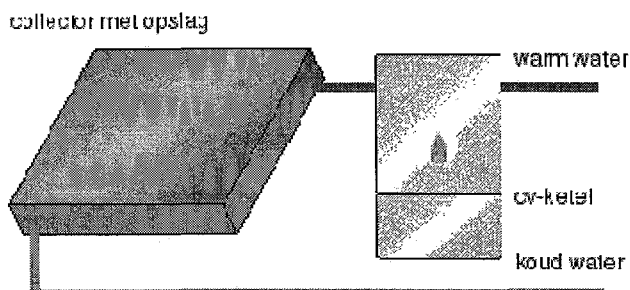
De standaard zonneboiler wordt gebruikt voor het verwarmen van tapwater en dus niet voor het verwarmen van ruimten. Een standaard zonneboiler bestaat uit een collector met een oppervlakte van 1,4 tot 5,0 m² en een los voorraadvat van 80 tot 200 liter. De collectorvloeistof wordt rondgepompt in een gesloten circuit, dat zijn warmte in het voorraadvat via een warmtewisselaar aan het leidingwater afgeeft. Een standaard zonneboiler heeft een na-verwarmer nodig. Dit kan een combiketel, een cv-ketel of een modulerende badgeiser zijn. Een standaard zonneboiler heeft altijd een los voorraadvat. Sommige merken werken met een rond vat (diameter circa 40 - 80 cm, hoogte 80 - 165 cm), dat op de vloer wordt geplaatst. Andere merken hebben een wandconstructie, waardoor het vat naast of boven de combiketel kan worden opgehangen. Een ander voorbeeld van een standaard zonneboiler is het thermosifon-systeem. Hierbij wordt een liggend vat op zolder onder het dak opgehangen. Door het vat hoger te plaatsen dan de collector, stroomt het warme collectorwater vanzelf naar het vat, zonder hulp van een pomp (deze installatie heet thermosifon).



figuur X.1: standaard zonneboiler [13]

Compacte zonneboiler

Een compacte zonneboiler is een zonneboiler waarbij het leidingwater direct in een goed geïsoleerde collector wordt verwarmd en opgeslagen. Er is dus geen apart voorraadvat nodig. De watervoorraad bedraagt 75 tot 140 liter. Net als bij de standaard zonneboiler, loopt het opgewarmde water uit het collectorvat via een na-verwarmer naar de kraan. Bij een compacte zonneboiler komt alleen een collector op het dak. Omdat de watervoorraad in de collector zit, is deze hoger en zwaarder dan de collector van een standaard zonneboiler. Ook de compacte zonneboiler wordt alleen gebruikt voor het verwarmen van tapwater. Het voordeel van een compacte zonneboiler is dat er geen extra ruimte in huis nodig is.

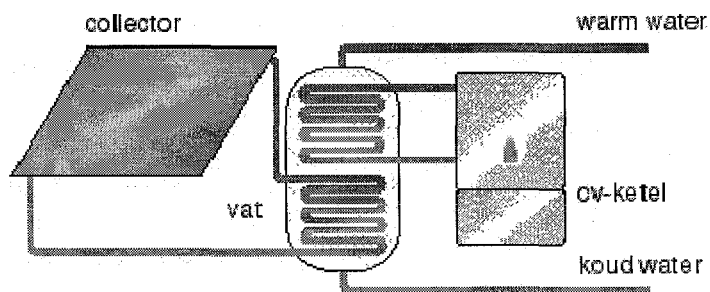


figuur X.2: compacte zonneboiler [13]

Cv-zonneboiler

Een cv-zonneboiler is een standaard zonneboiler met een extra warmtewisselaar in het voorraadvat. Een cv-zonneboiler werkt in principe op elke cv-ketel en wordt gebruikt voor het verwarmen van tapwater. Bij een cv-zonneboiler is geen aparte na-verwarmer nodig. Omdat direct uit het voorraadvat wordt getapt is er een forse straal warm water en geen temperatuurval bij gelijktijdig tappen. Het vat heeft een inhoud van ongeveer 110 tot 200 liter. Een cv-zonneboiler heeft, net als een standaard zonneboiler, altijd een los voorraadvat (diameter circa 50 - 65 cm, hoogte 100 - 145 cm). Er zijn ook kleinere wandmodellen verkrijgbaar.

Een variant op dit systeem is de elektrische zonneboiler, waarin het leidingwater wordt bijverwarmd door een elektrisch element. Er is dan geen cv-ketel nodig.

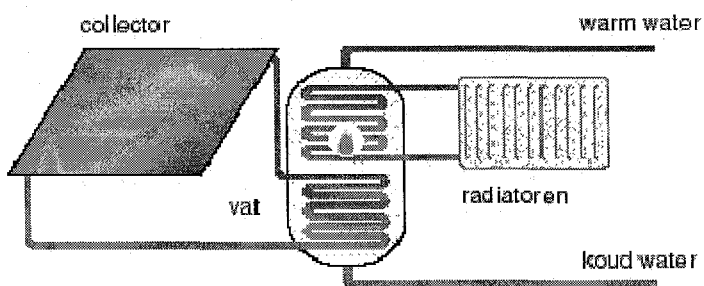


figuur X.3: cv-zonneboiler [13]

Zonneboilercombi

Een zonneboilercombi is een grote cv-zonneboiler, waarin voorraadvat en cv-brander geïntegreerd zijn. Dit systeem geeft net als de cv-zonneboiler een forse straal warm water. De warmte in het vat wordt gebruikt voor tapwaterverwarming én voor ruimteverwarming, uiteraard in gescheiden circuits. Een zonneboilercombi is dus warm-watertoestel en cv-ketel in één. Een zonneboilercombi komt in de plaats van cv-ketel en eventuele geisers. De zonneboilercombi is door zijn grote watervoorraad (circa 180 - 200 liter) in afmeting vergelijkbaar met een flinke boiler (circa 50 - 65 cm breed, 50 - 90 cm diep, 190 - 215 cm hoog).

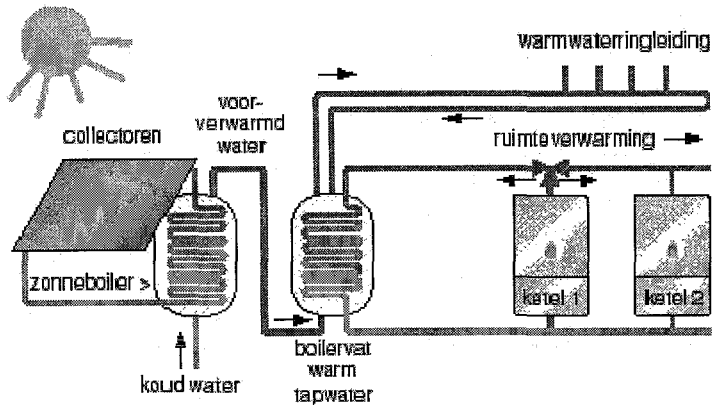
Als een zonneboilercombi wordt gebruikt, moeten ook aansluitingen op het gas of een HTV-net en het waterleidingnet voor cv-water aanwezig zijn. Deze voorzieningen zijn meestal al aanwezig wanneer op dezelfde plaats een cv-ketel of combiketel zit of gezeten heeft.



figuur X.4: zonneboilercombi [13]

Grote zonneboilers

De grote zonneboiler is qua werking vergelijkbaar met de standaard zonneboiler. Meestal wordt een grote zonneboiler ingepast in een bestaande warmwaterinstallatie door het voorraadvat simpelweg voor de al aanwezige (gas)boiler te plaatsen. In plaats van koud leidingwater stroomt dan het door de zonneboiler voorverwarmde water in het bestaande boilervat. Met name 's zomers zal de gasbesparing groot zijn, omdat de ketels het voorverwarmde water dan niet of nog maar weinig hoeven bij te verwarmen.



figuur X.5: grote zonneboiler [13]

Bijlage XI

Opbrengsten Turby

tabel XI.1: opbrengsten Turby per postcode en per hoogte [8]

hoogte mast [m]	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
postcode	berekende jaaropbrengst [kWh]										
10xx	49	432	1596	2700	3564	4220	4799	5213	5003	5884	6054
11xx	949	2118	3724	4654	5169	5475	5794	5925	6095	6158	6115
12xx	93	463	1391	2254	2976	3574	4127	4581	5021	5394	5694
13xx	455	1291	2730	3719	4372	4829	5265	5538	5825	6011	6097
14xx	476	1324	2732	3683	4310	4752	5179	5448	5733	5922	6012
15xx	363	1092	2419	3381	4054	4548	5018	5340	5671	5910	6055
15xx	588	1571	3220	4297	4951	5365	5754	5949	6164	6265	6254
17xx	688	1786	3508	4550	5131	5468	5794	5919	6074	6114	6045
18xx	697	1786	3319	4211	4711	5016	5330	5466	5695	5699	5662
19xx	494	1418	2952	3951	4571	4979	5371	5586	5820	5947	5970
20xx	476	1324	2732	3683	4310	4752	5179	5448	5733	5922	6012
21xx	560	1467	2886	3812	4407	4819	5225	5472	5740	5910	5982
22xx	254	893	2266	3394	4223	4831	5372	5741	6098	6346	6482
23xx	510	1398	2836	3785	4395	4816	5226	5473	5740	5907	5975
24xx	476	1324	2732	3683	4310	4752	5179	5448	5733	5922	6012
25xx	200	797	2161	3322	4186	4818	5374	5749	6108	6352	6479
26xx	457	1348	2986	4120	4836	5299	5720	5944	6179	6296	6299
27xx	524	1390	2782	3712	4323	4756	5178	5446	5732	5923	6018
28xx	524	1390	2782	3712	4323	4756	5178	5446	5732	5923	6018
29xx	363	1092	2419	3381	4054	4548	5018	5340	5671	5910	6055
30xx	265	934	2278	3294	4010	4534	5020	5350	5683	5917	6052
31xx	558	1437	2842	3783	4402	4838	5264	5534	5822	6014	6109
32xx	757	1878	3571	4580	5142	5470	5794	5921	6080	6127	6065
33xx	947	2072	3484	4287	4738	5021	5330	5472	5652	5733	5718
34xx	334	1047	2379	3357	4042	4544	5018	5343	5674	5913	6054
35xx	68	369	1155	1920	2589	3162	3698	4157	4601	4992	5327
36xx	528	1327	2610	3498	4112	4568	5015	5326	5654	5897	6054
37xx	97	430	1232	1983	2629	3179	3695	4137	4567	4947	5274
38xx	272	888	2105	3051	3751	4287	4790	5160	5532	5820	6020
39xx	124	570	1641	2589	3343	3943	4495	4924	5341	5678	5927
40xx	297	928	2143	3076	3764	4292	4789	5156	5526	5814	6015
41xx	354	1041	2296	3229	3899	4406	4888	5235	5589	5859	6040
42xx	347	1005	2213	31222	3788	4300	4788	5149	5515	5803	6006
43xx	602	1590	3235	4305	4954	5366	5754	5949	6164	6267	6258
44xx	563	1534	3192	4282	4945	5363	5754	5949	6162	6261	6247
45xx	457	1348	2986	4120	4836	5299	5720	5944	6179	6296	6299
46xx	259	901	2274	3399	4226	4832	5372	5740	6097	6345	6482
47xx	397	1144	2462	3408	4067	4553	5017	5337	5667	5908	6055
48xx	272	888	2105	3051	3751	4287	4790	5160	5532	5820	6020
49xx	627	1526	2880	3768	4349	4764	5177	5442	5729	5925	6028
50xx	130	537	1479	2322	3017	3590	4124	4563	4992	5357	5655
51xx	272	888	2105	3051	3751	4287	4790	5160	5532	5820	6020
52xx	218	742	1830	2724	3419	3972	4490	4896	5298	5627	5880
53xx	263	817	1905	2777	3449	3984	4489	4885	5280	5605	5859
54xx	187	640	1078	2409	3068	3611	4121	4541	4954	5310	5602

55xx	130	537	1479	2322	3017	3590	4124	4563	4992	5357	5655
56xx	12	559	1504	2341	3028	3595	4124	4558	4984	5347	5643
57xx	170	610	1561	2384	3054	3605	4122	4547	4965	5323	5617
58xx	170	610	1561	2384	3054	3605	4122	4547	4965	5323	5617
59xx	142	559	1504	2341	3028	3595	4124	4558	4984	5347	5643
60xx	129	491	1305	2041	2665	3195	3692	4119	4535	4904	5225
61xx	69	337	1005	1654	2233	2741	3219	3643	4054	4429	4766
62xx	27	231	860	1529	2149	2703	3225	3690	4137	4543	4905
63xx	47	286	939	1598	2196	2724	3222	3664	4092	4480	4829
64xx	27	231	860	1529	2149	2703	3225	3690	4137	4543	4905
65xx	93	463	1391	2254	2976	3574	4127	4581	5021	5394	5694
66xx	218	742	1830	2724	3419	3972	4490	4896	5298	5627	5880
67xx	137	560	1530	2390	3092	3668	4203	4639	5065	5426	5715
68xx	27	231	860	1529	2149	2703	3225	3690	4137	4543	4905
69xx	94	386	1067	1706	2267	2756	3216	3624	4020	4381	4707
79xx	170	610	1561	2384	3054	3605	4122	4547	4965	5323	5617
71xx	130	537	1479	2322	3017	3590	4124	4563	4992	5357	5655
72xx	170	610	1561	2384	3054	3605	4122	4547	4965	5323	5617
73xx	97	430	1232	1983	2629	3179	3695	4137	4567	4947	5274
74xx	170	610	1561	2384	3054	3605	4122	4547	4965	5323	5617
75xx	97	430	1232	1983	2629	3179	3695	4137	4567	4947	5274
76xx	170	610	1561	2384	3054	3605	4122	4547	4965	5323	5617
77xx	170	610	1561	2384	3054	3605	4122	4547	4965	5323	5617
78xx	150	583	1556	2410	3104	3672	4203	4634	5057	5416	5704
79xx	251	852	2070	3028	3739	4282	4790	5164	5538	5826	6024
80xx	130	537	1479	2322	3017	3590	4124	4563	4992	5357	5655
81xx	218	742	1830	2724	3419	3972	4490	4896	5298	5627	5880
82xx	509	1384	2931	4012	4720	5201	5647	5911	6186	6352	6408
83xx	513	1361	2855	3914	4625	5121	5583	5872	6171	6365	6452
84xx	397	1144	2462	3408	4067	4553	5017	5337	5667	5908	6055
85xx	765	1847	3357	4250	4764	5087	5419	5577	5768	5855	5841
86xx	841	1956	3418	4257	4727	5019	5330	5470	5645	5720	5696
87xx	799	1933	3607	4598	5149	5471	5794	5922	6084	6134	6077
88xx	703	1807	3523	4557	5134	5469	5794	5920	6075	6117	6049
89xx	504	1362	2761	3700	4318	4754	5178	5447	5733	5923	6015
90xx	457	1348	2986	4120	4836	5299	5720	5944	6179	6296	6299
91xx	564	1506	3115	4193	4867	5308	5720	5943	6182	6310	6326
92xx	504	1362	2761	3700	4318	4754	5178	5447	5793	5923	6015
93xx	361	1027	2233	3135	3895	4303	4787	5147	5512	5799	6004
94xx	297	928	2143	3076	3764	4292	4789	5156	5526	5814	6015
95xx	170	610	1561	2384	3054	3605	4122	4547	4965	5323	5617
96xx	326	974	2185	3104	3779	4297	4788	5152	5520	5807	6010
97xx	438	1138	2329	3197	3828	4315	4785	5136	5496	5782	5989
98xx	559	1368	2641	3517	4121	4571	5015	5324	5651	5895	6053
99xx	423	1227	2738	3843	4591	5111	5584	5878	6175	6364	6440
zee	1751	3498	5098	5623	5648	5510	5375	5257	5110	4916	4630



figuur XI.1: Postcodekaart Nederland [14]