Technologische beschrijving en screening van het ander thermisch aanbod

Auteur(s): Salenbien Robbe, Koen Allaerts, Johan Desmedt

Datum: 22/10/2012

Deze studie werd uitgevoerd in het kader van het IWT-VIS traject Smart Geotherm (2011-2017)

Inhoudstafel

Samenvatting 5
Lijst van tabellen 7
Lijst van figuren 8
Lijst van afkortingen 10
Lijst van symbolen 11
1 Inleiding 12
2 Klassieke zonnecollectoren 15
2.1 State of the art 15
2.1.1 Vlakke plaatcollector 15
2.1.2 Vacuümbuis collector 17
2.1.3 Geïntegreerde collectoren 19
2.1.4 Thermosfles zonnecollectoren 20
2.2 Karakteristieken 22
2.2.1 Inleiding 22
2.2.2 Rendementscurve 23
2.2.3 Opstelling van de collector 27
2.2.4 Geïntegreerde collectoren 28
2.2.5 Zonnecollector in combinatie met warmtepomp 30
2.3 Economische aspecten 33
2.3.1 Kostprijs 33
2.3.2 Subsidies 44
2.4 Demonstratieproject Molse bouwmaatschappij 50
3 Asfaltcollectoren 53
3.1 State of the art 53
3.1.1 Wegdekcollectoren 55
3.2 Karakteristieken 55
3.3 Economische aspecten 60
3.4 Duurzaamheidsaspecten 71
4 Betoncollectoren 72
4.1 State of the Art 72

4.2 Voorbeelden ... 72
4.2.1 Omnisportbaan Apeldoorn ... 72
4.2.2 Academy of Engineering in Delft ... 73
4.2.3 QuaWiDis ... 73
5 Warmte uit rioleringen ... 74
5.1 State of the Art ... 74
6 Oppervlaktewater ... 76
6.1 State of the Art ... 76
6.2 Regelgeving en heffingen ... 77
6.2.1 Bevaarbare waterlopen ... 77
6.2.2 Onbevaarbare waterlopen ... 80
7 Restwarmte uit WKK ... 81
7.1 WKK voor 12 woningen in Herenthout ... 81
8 Afvalwarmte uit productieprocessen ... 85
8.1 State of the art ... 85
8.2 Technische voorwaarden ... 86
9 Warmte uit stadsdistributienetten ... 89
9.1 State of the art ... 89
9.1.1 Soorten installaties ... 89
9.1.2 Opbouw van een installatie ... 90
9.2 Economische parameters ... 90
9.2.1 Bevraging bestaande netten in Vlaanderen ... 91
9.2.2 Richtwaarden en kostprijzen uit de literatuur ... 93
10 ... 101
10.1 Voorbeelden in Vlaanderen ... 104
10.1.1 SPE-elektriciteitscentrale op de site Ham te Gent ... 104
10.1.2 MIROM – Roeselare ... 104
10.1.3 IVBO – Brugge ... 106
10.1.4 Andere voorbeelden ... 106
11 Neerslagwater ... 108
12 Koeltoren ... 110
13 Passieve verwarming en koeltechnieken ... 112
13.1 Trombe muren ... 112

13.2 Zonneschouw 113
13.3 Zonnefaçade zonder glas 113
13.4 Zonnedak 114
13.5 Verdampingskoelte 114
14 Zonnekoeling 116
14.1 State of the art 116
14.1.1 Open lus met drogende materialen 117
14.1.2 Passieve keeling 117
14.1.3 Adsorptie en absorptive 118
14.2 Toepasbaarheid 123
14.3 Meetcampagne AZ Sint Jan, Brugge 124
14.4 IEA SHC Task 38 Solar Air-Conditioning and Refrigeration 126
15 Besluit 130
Literatuurlijst 131

Samenvatting

In het kader van het tweede werkpakket (WP2 aanbodbepaling, subtaak 2.4) van het IWT VIS Smart Geotherm project worden de voornaamste technieken besproken die in een groot gebouw kunnen toegepast worden voor de productie van verwarming en koeling. Het doel is een beschrijving van mogelijke aanvullende systemen die gebruikt kunnen worden naast het aanbod aan ondiepe geothermie of bodemgekoppelde warmtepompen.
Het ander thermische aanbod beperkt zich in technieken tot zonnecollectoren, asfaltcollectoren, restwarmte uit warmtekracht koppelingen (WKK), restwarmte uit productieprocessen, warmtenetten in een stad, neerslagwater, koeltorens, passieve koel- en verwarmingstechnieken en tot slot koude uit zonnewarmte.

Voor elke van de hierboven opgesomde technieken wordt de state of the art beschreven, samen met de typische bijhorende karakteristieken (rendement, levensduur, …). Waar mogelijk worden economische en duurzaamheidaspecten toegevoegd die het toe moeten laten om in volgende werkpakketen te modeleren.

Zonnecollectoren worden al veelvuldig toegepast, de techniek heeft dan ook al een zekere maturiteit. Toch blijven er nieuwe, innovatieve designs en toepassingen gelanceerd worden. De robuustheid, lagere installatiekosten en een kader van subsidieregelingen maken van deze techniek een goede kandidaat. Toch moet er aandacht besteed worden aan het wisselvallige karakter van zonnewarmte: de warmtevraag is vaak het grootste als de zon niet schijnt of in de winter, waardoor warmtevraag en –aanbod niet overstemmen. Een gepast thermisch energieopslagsysteem brengt soelaas, maar al bij al is het rendement van een zonnecollector niet bijzonder hoog. Om toepasbaar te zijn voor gebouwverwarming is bovendien al een vrij fors collectoroppervlak nodig, al dan niet in combinatie met een systeem voor naverwarming.

Hoewel WKK op zich een iets minder aangewende techniek lijkt te zijn, is er potentieel voor de toepassing. Noodzakelijke voorwaarde is de voldoende grote warmtevraag in het gebouw op jaarbasis, en een nuttige bestemming voor de geproduceerde elektrische energie. Bij voorkeur wordt die intern verbruikt omdat de teruglever tarieven aan het net bij grote installaties maar een fractie van de aankoopkosten uit het net bedragen. Afhankelijk van de dimensies van het beoogde gebouw komen verschillende varianten van WKK in aanmerking. De techniek geniet bovendien ook van subsidiemaatregelen, o.a. door warmtekrachtcertificaten.

Asfaltcollectoren, neerslagwater, koeltorens en passieve technieken zijn allemaal technieken met sterke beperkingen zoals een te laag rendement, te dure installatiekost of te weinig marktrijpheid. Hun eigenschappen staan opgelijst en hun werkingsprincipe werd beschreven. Hun toepassingsmogelijkheid richt zich veeleer op het bijspringen wanneer de hoofdbron van warmte niet volstaat, of op het herstellen van de warmtebalans in de bodem.

Warmte uit een stadsnet behoort weliswaar niet echt tot het ander thermisch aanbod binnen een groot gebouw, maar is zeker een waardig alternatief wanneer aangekoppeld kan worden aan een bestaand net. Wanneer restwarmte uit productieprocessen beschouwd wordt, dan hangt het aanbod sterk af van het nutgebruik van het gebouw in kwestie. Een kantoorgebouw zal bijvoorbeeld weinig tot geen warmtebronnen hebben, een groot appartement, zwembad of hotel met een wasserij en drogerij kan hier wel gebruik van maken.

Als conclusie kwam naar voor dat voor grote gebouwen het best de keuze kan gemaakt worden uit zonnewarmte en WKK. De andere technieken zijn deels nog niet ver genoeg doorontwikkeld, zijn te kostelijk om economisch rendabel te zijn of horen niet echt thuis in het aanbod binnen een groot gebouw op zich. Het in de tijd variabele karakter van zonnewarmte maakt de combinatie met thermische energieopslagtechnieken noodzakelijk, terwijl het karakter van een WKK de noodzaak aan correct dimensioneren van het systeem duidelijk maakt.

Een overzicht van het andere thermische aanbod en de belangrijkste selectiecriteria is terug te vinden in Tabel 1.

Thermisch aanbod	Toepassing	Temperatuursbereik	Energiebron	Maturiteit	Toepasbaarheid grote gebouwen	Opmerkingen & beperkingen
Warmtekrachtkoppeling	Verwarming	Lage / hoge temperatuur	Aardgas Biogas Stortgas Olie Waterstof	Toepasbaar	Afhankelijk van warmtevraag en elektriciteitsverbruik	
Klassieke zonnecollectoren	Verwarming	lage / hoge temperatuur	Zon	Toepasbaar	Ruimteverwarming / SWW / regeneratie BEO	Beschikbare ruimte met correcte oriëntatie
Asfaltcollectoren	Verwarming	lage temperatuur	Zon	Toepasbaar	Ruimteverwarming / regeneratie BEO	Grote oppervlakte noodzakelijk
Betoncollectoren	Verwarming	lage temperatuur	Zon	Toepasbaar	Ruimteverwarming / regeneratie BEO	Grote oppervlakte noodzakelijk
Rioolwater	Verwarming	lage temperatuur	Restwarmte	Onderzoeksfase	Ruimteverwarming	Eerder geschikt in residentiele/stedelijke toepassingen met hoge gebouwdichtheid
Oppervlaktewater	Verwarming / koeling	lage temperatuur	Omgeving	Toepasbaar	Ruimteverwarming / koeling	Aanwezigheid voldoende oppervlaktewater en opslagcapaciteit, minder toegepast
Productieprocessen	Verwarming	lage / hoge temperatuur	Restwarmte	Toepasbaar	Ruimteverwarming / SWW / regeneratie BEO	Nabijheid afvalwarmte productieprocessen, weinig toegepast
Stadsdistributienetten	Verwarming	lage / hoge temperatuur	varia	Toepasbaar	Ruimteverwarming / SWW	Aanwezigheid warmtenet
Neerslagwater	Verwarming / koeling	lage temperatuur	Omgeving	Toepasbaar	Minder geschikt.	Voldoende oppervlakte en opvangcapaciteit noodzakelijk, weinig toegepast
Koeltoren	koeling	lage temperatuur	Omgeving	Toepasbaar	Koeling / regeneratie BEO	
Passieve technieken	Verwarming / koeling	lage temperatuur	Zon, omgeving	Onderzoek / ontwikkeling	Ruimteverwarming / SWW / koeling / regeneratie BEO	
Zonnekoeling	Koeling	lage temperatuur	Zon	Onderzoek / ontwikkeling	Koeling	Voldoende (dak)oppervlak noodzakelijk

Tabel 1: Overzicht van het andere thermische aanbod en toepassingscriteria

Lijst van tabellen

Tabel 1: Overzicht van het andere thermische aanbod en toepassingscriteria _____ 6
Tabel 2 : Instralingsterkte als functie van weersomstandigheden voor het Belgische klimaat.____ 25
Tabel 3: Kostprijs voor een particuliere zonnecollector installatie zoals opgegeven door IZEN. ___ 39
Tabel 4: Opbrengst, besparingen en terugverdientijden voor verschillende dekkingsgraden in een groter zonneboilersysteem. _____ 44
Tabel 6: Subsidiebonus tabel voor KMO en grote ondernemingen. (bron: Agentschap Ondernemen) _____ 50
Tabel 7: Afschatten van de totaalkost per vierkant meter voor een asfaltcollector met buizensysteem. (bron: ECN-BKM-2011) _____ 66
Tabel 8: Afschatten van de totaalkost per kWh voor de geproduceerde warmte van een asfaltcollector na seizoensopslag._____ 71
Tabel 9: Materiaaleigenschappen voor gewoon beton. _____ 72
Tabel 10: De jaarlijkse retributie op de captatie van oppervlaktewater uit bevaarbare waterlopen, kanalen en havens per schijf en per m³ _____ 80
Tabel 11: Technische specificaties van de warmtekrachtkoppeling. _____ 83
Tabel 12: Gegevens uit de bevraging over warmtenetten in Vlaanderen. _____ 91
Tabel 13: Gegevens over warmtenetten uit offertes en ramingen. _____ 92
Tabel 14: Kengetallen uit een haalbaarheidsstudie voor een warmtenet in Twente. [Hoogsteen, R., 2003] _____ 100
Tabel 15: Kostprijs warmtenetinstallaties in Hessen, Duitsland. [BEI] _____ 101
Tabel 16: Kostprijs warmtenet van installaties in Steirmark, Oostenrijk. [BEI] _____ 104
Tabel 17: Verschillende stadia en keuzemogelijkheden voor de toepassingen van zonnekoeling. [20] _____ 116
Tabel 18: Karakteristieken voor verschillende types van warmte aangedreven adsorptiekoelers van SorTech AG. (bron: SorTech AG) _____ 123
Tabel 19: Aantal installaties dat geteld werd binnen de EU op basis van een specifieke combinatie van warmtebron en koeltechniek. (excl. hybride systemen). (bron: IEA SHC task 38)_____ 128

Lijst van figuren

Figuur 1: (Links) Harpvorm vlakke plaatcollector (Midden) Slangvorm vlakke plaatcollector (Rechts) vacuüm buiscollector _____ 16
Figuur 2: Schematische voorstelling van de warmtepijpwerking. Condensatie en drukopbouw stuwen het verdampte medium van de warme naar de koude kant, waar het door condensatie en gravitatie terug kan vloeien en het proces herbegint._____ 18
Figuur 3: Incidence Angle Modifier (IAM) vergelijking tussen vlakke plaatcollectoren en vacuümbuiscollectoren. (bron: Apricus) _____ 19
Figuur 4: Dimark Solar geïntegreerde dakbedekking._____ 20
Figuur 5 : Lineair benaderde rendementscurve voor 4 verschillende types van zonnecollectoren bij constante instraling. Het snijpunt met de y-as geeft het optisch rendement weer: daar is T_M = T_U. _____ 26
Figuur 6: Rendement als functie van instraling (lineaire benadering) voor een onbedekte vlakke plaatcollector. Dit geeft het effect van zware bewolking (G=200W/m²) tot zonnige dagen (G=1000W/m²)weer._____ 27
Figuur 7: Rendement als functie van instraling (lineaire benadering) voor een vacuümbuiscollector. Dit geeft het effect van zware bewolking (G=200W/m²) tot zonnige dagen (G=1000W/m²)weer._____ 27
Figuur 8: Relatieve opbrengst voor zonneboilerinstallaties in België. Door het grote aandeel diffuse straling is een breed interval aan hellingshoeken beschikbaar. (bron: ODE) _____ 28
Figuur 9: Europese kaart voor de opbrengst van een zonnecollector geïntegreerd in de façade van stedelijke gebouwen. [11]_____ 29
Figuur 10: Jaarprofiel van de globale instraling per dag op dak- en façadecollectoren [12]._____ 30
Figuur 11: Directe en indirecte levering van zonnewarmte aan de verdamper van een warmtepomp in een gecombineerd systeem [17]. _____ 31
Figuur 12: Bepalende curven voor de omschakeling van een directe naar een indirecte zonnecollector voor verschillende COP waarden [18]._____ 32
Figuur 13: Instralinglimiet Glim waaronder de indirecte configuratie zorgt voor een verhoogd systeemrendement. De limiet is afhankelijk van warmtevraag, omgevingstemperatuur en temperatuursverschillen tussen de omgeving en de collector [18]. _____ 33
Figuur 14: Zonnecollectoren op het dak van een bejaardentehuis in Mol. _____ 50
Figuur 15: Maandelijkse instraling op de collectoren en warm water productie. _____ 51
Figuur 16: Maandelijkse dekkingsgraad voor de thermische zonnecollectoren. _____ 52
Figuur 17 : Werkingsprincipe van een asfaltcollector met seizoensopslag. In de zomer wordt de winterkoude gebruikt om het gebouw en het wegdek koel te houden. Het opgewarmde water dient dan in de winter om gebouw en wegdek te verwarmen. _____ 54
Figuur 18: Experimenteel temperatuursprofiel van een asfaltcollector. Gemeten over een periode van 3,5 weken in de zomer bij een gemiddelde luchttemperatuur van 14°C. De instroom- en uitstroomtemperatuur staan getoond._____ 57
Figuur 19: Simulaties voor (links) jaarlijkse warmteproductie in functie van buisdiepte en aanvoertemperatuur van het fluïdum en (rechts) uitgangstemperatuur in functie van aanvoertemperatuur. (bron: Loomans et al., 2003) _____ 58
Figuur 20: Aantal uren bepaalde uittreedtemperatuur in functie van de invoertemperatuur voor een asfaltcollector. _____ 59

Figuur 21: Vermogen van de asfaltcollector gerangschikt volgens aantal uren van voorkomen en invoertemperatuur. 60
Figuur 22: QuaWiDiS - testen om met betoncollectoren de wegen ijsvrij te houden. [bron: F. Clauss TU Darmstadt] 73
Figuur 23: Energie in het Nederlandse rioolsysteem. [bron: H. de Brauw, Tauw] 74
Figuur 24: Hydraulisch schema van de verwarmingsinstallatie te Herenthout. 82
Figuur 25: Totale productie van elektriciteit (boven) en warmte (onder) van de WKK-installatie. 84
Figuur 26: Overzicht warmtenetwerken, schaalniveaus en alternatieven. (bron: Daniëls et al., 2011) 88
Figuur 27: Richtwaarden voor de aanlegkosten van een warmtenet per diameter (in mm). [Leitfaden, 2000] 93
Figuur 28: Warmtenet MIROM voorziet grote verbruikers en huishoudens in de streek van Roeselare van warmte. 105
Figuur 29: Plattegrond van het MIROM warmtenet. 105
Figuur 30: Haalbaarheidsstudie restwarmtevalorisatie Antwerpse haven. 107
Figuur 31: Energieconcept volgens Kalz et al. [8] Regenwater opslag maakt deel uit van de verwarming en koeling. 109
Figuur 32: (links) Koeltoren met geforceerde koeling en (rechts) schematische werking van een koeltoren met geforceerde koeling. 110
Figuur 33: Prestatie coëfficiënt voor een RUWCT koeltoren (driehoek) en een klassiek systeem met elektrische naverwarming (cirkel) als functie van de koudevraag. [14] 111
Figuur 34: Schematische voorstelling van een Trombe muur. 112
Figuur 35: Mogelijke werkingen voor een zonneschouw. 113
Figuur 36: Voorstelling van een metalen zonnefaçade. Een metalen buitenschil met ventilatieopeningen zorgt voor aanvoer van verse lucht. 114
Figuur 37: Verdampingskoelte (boven) via een direct proces en (onder) via een indirect proces. [15] 115
Figuur 38: Een van de bekendste voorbeelden van een groen dak is de Californische Academie voor wetenschap. 118
Figuur 39: Overzicht van toepassingsmogelijkheden voor een adsorptiekoeler. 123
Figuur 40: Schema van een compressiekoeler (links) en een absorptiekoeler (rechts). 124
Figuur 41: Productie van koelwater en gemiddelde omgevingstemperaturen. 125
Figuur 42: Hoeveelheid warmte geleverd aan de absorptiekoelers. 125
Figuur 43: Maandelijkse prestatiecoëfficiënten van de absorptiekoelers. 126
Figuur 44: Consumptie van elektriciteit gedurende de meetcampagne. 126
Figuur 45: Onderverdeling volgens toepassing in het gebruik van kleine (<20kW) installaties voor zonnewarmte en zonnekoeling.(bron IEA SHC 38) 127
Figuur 46: Onderverdeling volgens toepassing in het gebruik van grote (>20kW) installaties voor zonnewarmte en zonnekoeling.(bron IEA SHC 38) 128
Figuur 48: Relatie tussen de inhoud van het buffervat en de oppervlakte van de collector gerangschikt volgens de techniek. 129

Lijst van afkortingen

WKK	Warmte-Kracht-Koppeling
COP	Coefficient of Performance - Prestatiecoëfficiënt
IAM	Incidence Angle Modifier
SWW	Sanitair warm water
MGW	Mechelse goedkope woning
KWO	Koude-Warmte Opslag
BEO	Boorput Energie Opslag
STEG	Stoom en Gasturbine
RUWCT	Reversibly used water cooling tower – omkeerbare watergekoelde toren
PCM	Phase Change Material – materiaal met een faseovergang
SHC	Solar Heating and Cooling
OT	Onrendabele Top
WKK	Warmte-Kracht-Koppeling

Lijst van symbolen

η	Rendement	
η_0	Optisch rendement	
Q	Warmte	[kJ, kWh]
U	Verliescoëfficiënt of isolatiekwaliteit	[W/m²K]
T_M	Gemiddelde vloeistoftemperatuur	[K, °C]
T_U	Omgevingstemperatuur	[K, °C]
G	Instralingniveau van de zon	[W/m²]
∞	Absorptiecoëfficiënt	
t	Transmissiecoëfficiënt	
ρ	Volumedichtheid	[kg/m³]
V	Volume	[m³]
c	Warmtecapaciteit	[kJ/kgK]
h_c	Convectiecoëfficiënt voor warmtetransport	[W/m²K]
v	Kinematische viscositeit	[m²/s]
μ	Dynamische viscositeit	[Pa s]

1 Inleiding

Dit werkpakket betreft de karakterisatie van het aanbod van thermische energie voor de geselecteerde gebouwtypes (cfr. subtaak 1.2), andere dan in vorige werkpakketten aangehaald. Het betreft hier thermische energie die zou kunnen worden aangewend zowel voor verwarming als voor koeling, die zowel in het eigen gebouw wordt opgewekt als die uit een lokaal net kan worden betrokken. Te behandelen voorbeelden zijn onder andere:

- Thermische zonne-energie met behulp van klassieke zonnecollectoren of niet afgedekte collectoren (vb. de zogenaamde zwembadcollectoren). Hierbij kan gerefereerd worden naar IEA Solar HP task 44, die zich echter beperkt tot toepassing voor eengezinswoningen.
- Asfaltcollectoren (wegen en pleinen), betoncollectoren
- Restwarmte uit WKK
- Afvalwarmte uit productieprocessen: wasserijen, ….
- Warmte uit stadsdistributienetten
- Neerslagwater (dat eventueel ook als alternatieve buffering kan worden gebruikt)
- Koeltoren die bij overmaat van koelvraag ook kan gebruikt worden om in de winter koude op te slaan in buffers.

Een beperkt aantal alternatieven, waarvoor de keuze zal gemotiveerd worden in deze taak, zal in de dynamische simulaties worden uitgewerkt. Dit bijkomend thermisch aanbod (zowel koude als warmte) vormt een extra vrijheidsgraad in het systeem om de **thermische balans in de bodem over lange termijn** te bewaren, en dus onevenwichten te herstellen veroorzaakt door het gebruik van geothermische systemen. Een thermische onbalans heeft immers een daling van de systeemprestatie als gevolg (zo zal een teveel aan warmte-extractie de bodem afkoelen, wat leidt tot een lagere brontemperatuur voor de warmtepomp en dus een lagere COP in verwarmingsmode). Om deze lange termijn aspecten te evalueren zullen de dynamische simulaties over meerdere jaren worden uitgevoerd. De karakterisatie omhelst vooreerst een korte technologische beschrijving van de diverse warmtebronnen. Het belangrijkste aspect betreft het identificeren van de karakteristieken die deel zullen uitmaken van de thermische modellering. Hierbij moeten we bijvoorbeeld (onder voorbehoud van de nog te selecteren alternatieven) zicht krijgen op:

- De tijdsgebonden profielen van de beschikbaarheid van energie:
    - Minimaal op uurbasis, om korte en langetermijneffecten (seizoensvariatie) te identificeren
    - Het temperatuurniveau waarop deze energie beschikbaar is

- Het aandeel van beschikbare energie:
    - Voor thermische zonnecollectoren wordt er meestal een zekere prioriteit gegeven aan de vraag naar warm water en wordt enkel het overschot

beschikbaar gesteld. Dit heeft ook te maken met de prioriteit: wordt die gegeven aan hoge temperatuur warmtevragers aan laag rendement of aan lage temperatuur warmtevragers aan hoog rendement.
- Sommige bronnen kunnen ook verbruiker worden; een asfaltcollector kan in de zomer warmte vragen, maar in de winter kan het gebruik van lage energie warmte benut worden voor het ijsvrij houden.
- Voor WKK: de draaitijd van dergelijke toepassingen is afhankelijk van de warmtevraag, voornamelijk voor verwarming. Buiten het stookseizoen is het normaal gezien niet zinvol om de WKK in werking te stellen, tenzij de warmte benut zou kunnen worden voor regeneratie van de bodem of aandrijven van een absorptiekoelmachine.
- Eventuele interactie met andere aspecten zoals gebouwkarakteristieken (vb. relatief beperkte dakoppervlakte voor thermische collectoren)
- Economische aspecten
- Duurzaamheidaspecten

Leeswijzer

De verschillende hoofdstukken in dit document hebben een analoge opbouw. Eerst wordt een state of art en een overzicht van de verschillende systemen gegeven. Vervolgens worden de belangrijkste parameters en karakteristieken toegelicht en, indien beschikbaar, gestaafd aan de hand van meetresultaten. Verder worden de economische aspecten geanalyseerd gevolgd door een casestudie.

2 Klassieke zonnecollectoren

2.1 State of the art

Een zonnecollector is een constructie die zonlicht omzet in warmte. Het principe is vrij eenvoudig: wanneer een voorwerp in de zon ligt, wordt het warm. Wanneer dat voorwerp in combinatie met een medium dat de warmte afvoert gebruikt wordt, spreekt men van een zonnecollector. De afgevoerde warmte kan gebruikt worden om grondwater op te warmen in de zomer of om een gebouw te verwarmen in de winter. In de literatuur bestaan bovendien studies die aantonen dat zonnecollectoren voor warm water en gebouwverwarming het goedkoopste hernieuwbare alternatief zijn [13].

Doordat zonnecollectoren principieel gezien erg eenvoudig zijn, bestaan er talloze varianten. Er zijn veel verschillende typen zonnecollectoren, zoals de vlakke plaatcollector, vacuümbuizen met reflectors, ondiepe zonnevijver, diepe zonnevijver, buizenregisters verwerkt in grote oppervlakken, CPC-collector (compound parabolic concentrator), cilindrische reflector, parabolische trog, fresnelreflector met brandlijn, parabolische kom, centrale ontvangers in een veld met spiegels en heteluchtcollectoren. Van deze typen worden vooral de vlakke plaatcollector en de vacuümbuizen met reflector gebruikt voor decentrale opwekking en de parabolische trog en heteluchtcollectoren voor centrale opwekking. Ook kunnen buizen gelegd worden in asfalt of beton of in de op het zuiden liggende muren van gebouwen. Het rendement per vierkante meter is dan lager, maar het rendement per euro veel hoger. De asfaltcollectoren worden in een volgend hoofdstuk afzonderlijk toegelicht.

De energie is in het zonlicht aanwezig onder de vorm van elektromagnetische straling, met golflengtes die van het ultraviolette (kort) naar het infrarode (lang) gebied gaan, veel meer dan wij visueel waar kunnen nemen. Afhankelijk van de weersomstandigheden, oriëntatie en geografische positie in België, valt gemiddeld 1000 Watt per vierkante meter aan energie in op het aardoppervlak.

In dit hoofdstuk worden de voornaamste types verduidelijkt. We lichten de voor- en nadelen toe op ecologisch en economisch vlak. Daartoe worden twee categorieën onderscheiden: *niet-concentrerende* en *concentrerende* zonnecollectoren. Bij niet-concentrerende collectoren is het oppervlak dat de zonnestraling vangt hetzelfde als het oppervlak dat de warmte absorbeert. De hele collector absorbeert dus het zonnelicht. Bij concentrerende collectoren wordt het invallende licht gebundeld op een te verwarmen oppervlak.

2.1.1 Vlakke plaatcollector

De meest populaire variant in onze contreien is de vlakke plaatcollector. Het hart ervan bestaat uit een zwarte plaat, de absorber. De absorber wordt in een isolerende omgeving

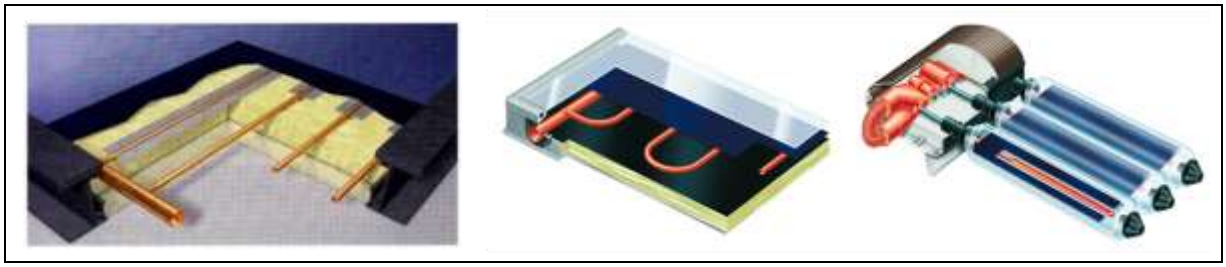
geplaatst zodat hij meer warmte opneemt dan er aan de omgeving afgegeven wordt. Als gevolg daarvan zal de temperatuur van de plaat stijgen en dus ook de warmtestroom van de plaat naar de omgeving. De warmtestroom naar de omgeving kan maximaal even groot worden als de hoeveelheid opgenomen warmte: dan zal de temperatuur van de absorber niet verder stijgen. Door de absorber te isoleren van de omgeving met een transparante bedekking, neemt de warmtestroom naar de omgeving af en kan de temperatuur dus verder toenemen.

Om de gewonnen warmte ook te kunnen gebruiken, worden aan de achterkant van de absorber leidingen gemonteerd waardoor water stroomt. De leidingen voeren het warme water naar een opslagvat, waar via een warmtewisselaar warmte afgestaan wordt aan het koude vat totdat de voorraad in het vat uiteindelijk dezelfde temperatuur bereikt als de absorber. Vanuit het opslagvat kan de warmte (al dan niet met naverwarming) gebruikt worden voor verschillende toepassingen.

Typisch worden voor de absorber metalen zoals aluminium, staal of koper gebruikt. Die worden mat zwart of met een speciale selectieve coating gekleurd. Die laatste hebben betere absorptie-eigenschappen en houden warmte ook beter vast. Metalen zijn goede warmtegeleiders en dat maakt hen zeer geschikt voor deze toepassing. Koper is het duurst, maar is ook de beste geleider en minder gevoelig aan corrosie dan de andere.

De waterleidingen op de achterwand kunnen ook volgens diverse schema's aangebracht worden:

- Harp-vorm: het traditionele design waar koud water onderaan instroomt en bovenaan afgevoerd wordt. Deze vorm wordt toegepast in pompsystemen en lage druk thermosifons. (Figuur 1, links)
- Slang-vorm: een continue S maximaliseert de temperatuur, maar niet de totale energiewinst over het traject. Meest gebruikt voor sanitair warm water, niet om gebouwen te verwarmen (Figuur 1, midden)
- Volledig ondergedompeld: twee platen die een vloeistoflaag insluiten en zo een circulatiezone creëren.



Figuur 1: (Links) Harpvorm vlakke plaatcollector (Midden) Slangvorm vlakke plaatcollector (Rechts) vacuüm buiscollector

Als alternatief op de metalen absorber worden tegenwoordig ook polymeer vlakke plaatcollectoren gebouwd. Polymeren zijn flexibel en dus vorstverdraagzaam: ze zetten uit zonder breken. Ze kunnen puur water bevatten in plaats van een water-glycol mengsel met antivries eigenschappen. Het grote voordeel hiervan is dat ze onmiddellijk geïntegreerd

kunnen worden in bestaande watercirculatiesystemen in gebouwen zonder gebruik te hoeven maken van warmtewisselaars die het rendement omlaag halen. Directe circulatiesystemen (één kringloop) hebben het voordeel dat er minder hoge temperaturen nodig zijn om de circulatie op gang te brengen, wat ze meer effectief maakt onder slechtere weersomstandigheden.

Metalen directe zonnecollectoren in gebieden waar vorst mogelijk is moeten ontworpen worden met regelsystemen zodat al het vocht uit de leidingen getrokken is (bvb via zwaartekracht) voordat schade ontstaat. Precies daarom wordt meestal geopteerd voor een gesloten circulatiecircuit waaraan dan antivries zoals propylene glycol toegevoegd wordt. Omgekeerd moet een systeem ook beveiligd worden tegen oververhitting: absorber temperaturen van 180°C zijn geen uitzondering.

Een zwembadcollector of open collector is een vereenvoudigde vorm van een vlakke plaatcollector waarbij de transparante afdekking achterwege gelaten wordt. Het systeem werkt goed als de gewenste uitgangstemperatuur hetzelfde moet zijn als de omgevingstemperatuur, maar verliest aan rendement met dalende temperaturen. Zoals de naam doet vermoeden worden ze meestal gebruikt om zwembaden te verwarmen.

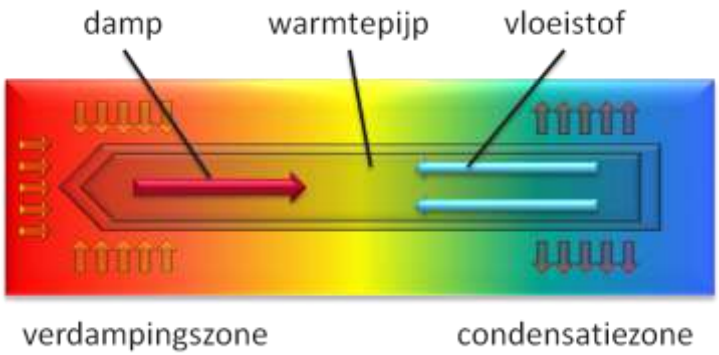
2.1.2 Vacuümbuis collector

Er bestaan verschillende soorten collector die vacuüm gebruiken: buizen met warmtepijpen, buizen met pompcirculatie, vlakke plaat vacuümcollector. Ze stoelen allemaal min of meer hetzelfde principe en hier wordt dan ook de meeste courante vorm doorgelicht.

In vergelijking met de vlakke plaatcollector gebruikt een vacuümbuis collector (Figuur 1, rechts) een warmtepijp als kern en vloeit er dus geen vloeistof rechtstreeks doorheen. De vacuümbuis collector bestaat uit verschillende luchtledige dubbelglazen buizen met daarin een absorber verbonden met een warmtepijp. De buizen zijn al dan niet nog eens bekleed met een absorptieverbeterende coating. De absorber aan de binnenkant is meestal gemaakt van koper om de thermische geleiding te bevorderen en bevat een kleine hoeveelheid medium voor warmtetransport (alcohol, aceton, …).

Een warmtepijp (Figuur 2) bestaat uit een aantal buizen voorzien van lamellen. De ene helft bevindt zich in een koud medium, de andere in een warm. In de buizen bevindt zich een vloeistof die door middel van verdamping en condensatie voor warmtetransport zorgt. De werking is er op berust dat er bij de verdamping van een vloeistof veel warmte opgenomen wordt en, omgekeerd, bij condensatie vrijgegeven wordt. In de warme zone van de warmtepijp die in de metalen kern steekt treedt verdamping van de vloeistof op waarmee de warmtepijp gedeeltelijk is gevuld. Door de sterke vergroting van het volume ontstaat plaatselijk een drukverhoging waardoor de ontstane damp naar het andere einde van de buis tracht te ontwijken. Dat deel wordt echter gekoeld waardoor de damp weer condenseert en een onderdruk ontstaat waardoor het drukverschil tussen het warme en het

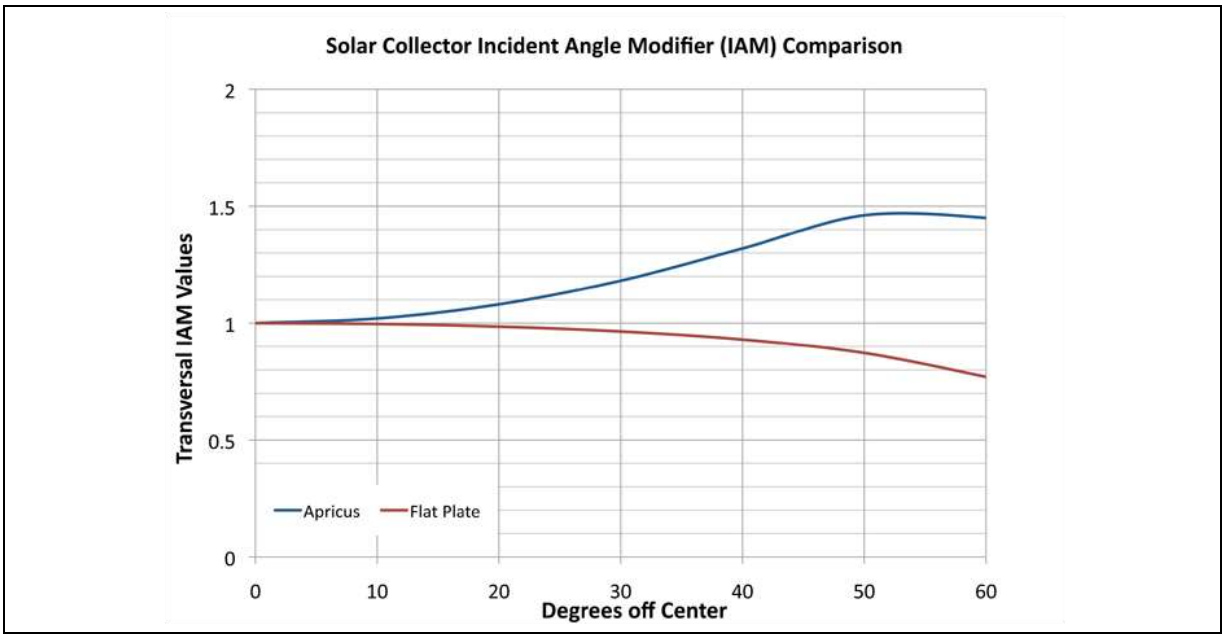
koude deel van de warmtepijp gehandhaafd blijft. Om de weer ontstane vloeistof tegen dit drukverschil in naar het warme deel te transporteren heeft men de warmtepijp inwendig bekleed met een poreuze laag. Door de capillaire werking van deze laag op de ontstane vloeistof wordt deze weer naar het warme einde gezogen waarna de beschreven cyclus zich herhaalt.



Figuur 2: Schematische voorstelling van de warmtepijpwerking. Condensatie en drukopbouw stuwen het verdampte medium van de warme naar de koude kant, waar het door condensatie en gravitatie terug kan vloeien en het proces herbegint.

Vacuüm is de beste manier om te isoleren, nog beter dan de glaswol of andere materialen warmee vlakke plaatcollectoren uitgerust worden. Vacuümcollectoren heb daarom minder verlies door geleiding; vooral bij hoge temperaturen is het verlies aanzienlijk minder. Een tweede voordeel is de minder kritische ligging. Door de ronde vorm van de buizen valt het licht er onder praktisch elke hoek goed op in. In technische termen wordt dit beschreven door de *IAM: Incidence Angle Modifier*.

De IAM is gelijk aan 1 voor een vlakke plaatcollector wanneer de straling er loodrecht op invallen en de instraling dus maximaal is. ‘s Ochtends en ’s avonds, of voor hoeken die afwijken van loodrechte inval is de IAM kleiner dan 1. Vacuümbuiscollectoren kunnen over langere periodes van de dag waarden halen die groter zijn dan 1, zeker wanneer helpende factoren zoals reflectiepanelen en reflectie van nabije buizen in rekening gebracht worden. Apricus, een Amerikaanse fabrikant van vacuümbuiscollectoren geeft een vergelijking tussen vlakke plaat- en vacuümcollectoren in Figuur 3.



Figuur 3: Incidence Angle Modifier (IAM) vergelijking tussen vlakke plaatcollectoren en vacuümbuiscollectoren. (bron: Apricus)

Dit mag echter niet verward worden met het optisch rendement. Vaak is het optisch rendement van een vacuümbuiscollector lager dan dat van een vlakke plaatcollector, waardoor bij kleine temperatuurverschillen het rendement lager zal liggen. Bij grote temperatuurverschillen hebben vacuümbuiscollectoren algemeen genomen een hoger rendement dan hun vlakke plaat tegenhangers. Alle opbrengsten van collectoren zijn gebaseerd op apertuur oppervlak (het effectieve oppervlak). Bij vacuümbuiscollectoren zit tussen de buizen onderling nog ruimte die niet effectief is en dus niet meegerekend kan worden. Het totale (bruto)oppervlak dat een vacuümbuiscollector nodig heeft om eenzelfde opbrengst te generen als een vlakke plaatcollector is groter.

Vlakke collectoren kunnen doorgaans dezelfde hitte produceren, maar dit enkel gedurende het piekmoment. Beschouwd over een gans jaar, ligt de geproduceerde hitte per m² (absorber area) van een vacuüm collector doorgaans 25% tot 40% hoger dan die van een vlakke collector.

2.1.3 Geïntegreerde collectoren

Een van de meest gehoorde argumenten tegen het plaatsen van zonnepanelen, collectoren of een zonneboiler is de visuele achteruitgang. Mensen geven vele honderdduizenden euro's uit aan een designhuis en twijfelen dan om een zwarte glimmende bak op hun dak te leggen.

Bij geïntegreerde systemen zijn het voorraadvat en de collector samengevoegd tot één geheel. Een pomp en een elektronische regeling zijn niet nodig en het systeem bespaart ruimte binnenhuis. Door integratie neemt het aantal componenten af waardoor de

aankoopprijs en de plaatsingskosten dalen. De collector is zwaarder; het dak moet dus sterk genoeg zijn. Een voorbeeld van een geïntegreerd systeem is de nokcollector.

De *nokcollector* is buisvormig en wordt, zoals de naam doet vermoeden, geplaatst op de nok van het dak. Een transparante kap bedekt een koperen mantel met een zwarte spectraal selectieve laag. Daaronder zit het roestvrijstalen voorraadvat omhult. De techniek van de nokcollector bestaat uit twee in elkaar gemonteerde buizen. De inhoud van de binnenste buis dient als voorraadvat voor het warme water. De buitenkant van de buitenste buis absorbeert de zonne-energie. In de ruimte tussen de binnen- en buitenbuis bevindt zich gedemineraliseerd water onder onderdruk. Door de zonnewarmte verdampt dit water. De damp condenseert tegen het voorraadvat. Het gebruikswater dat hierin zit, wordt daardoor verwarmd. Qua concept is dit dus een variant op de eerder beschreven vacuümbuiscollector.

Verschillende bedrijven zijn op zoek naar andere oplossingen, naast de nokcollector is een andere piste de geïntegreerde dakbedekking van het Nederlandse Dimark Solar, die zowel thermische als elektrische energie gaat opleveren, Figuur 4.

De holle modules van glasvezelmatten en thermoplastische kunststoffen vervangen dakpannen en verwarmen doorstromend water . Bovenaan liggen dan traditionele zonnepanelen voor het opwekken van elektrische zonne-energie. In de winter brengt dit systeem al snel het doorstromende water naar een hogere temperatuur en in de zomer gaat het water juist zorgen voor een koelend effect, waardoor de efficiëntie van de bovenliggende zonnepanelen verhoogt. Dimark Solar hoopt eind 2012 de eerste modules te gaan uitleveren.

Figuur 4: Dimark Solar geïntegreerde dakbedekking.

2.1.4 Thermosfles zonnecollectoren

Bij thermosfles zonnecollectoren gebruikt men een dubbelwandige glazen fles met dubbele wand. Tussen beide wanden heerst vacuüm. Bij invallende straling warmt de goed

geïsoleerde binnenkant snel op. De verzamelde warmte wordt dan via metalen vinnen afgeleid naar het warmtetransport middel. Via speciale coating kunnen de absorberende eigenschappen van de binnenschil nog versterkt worden. Rond of onder delen van de collector kunnen reflectoren geplaatst worden om de niet belichte delen te verwarmen. Ze lijken daarmee erg op vacuümbuiscollectoren, maar berusten niet op verdamping en condensatie om warmte over te brengen.

De voordelen zijn als volgt: de absorptieplaat bevindt zich in het luchtledige net als het absorber koelsysteem. Daardoor worden warmteverliezen geminimaliseerd. Typische afmetingen voor de fles zijn 1 à 2m lengte en een diameter van 10 à 15cm.

2.2 Karakteristieken

2.2.1 Inleiding

De efficiëntie van een zonnecollector wijzigt constant. Het weer, de omgevingstemperatuur, de vloeistoftemperatuur en het isolatieniveau zijn maar enkele van de factoren die een rol spelen in hoe goed een collector zonne-energie om kan zetten in warmte. Het principe van een zonneboiler mag dan wel eenvoudig zijn, het bepalen van de prestaties en energiebesparing is dat zeker niet. In de praktijk wordt vaak gebruik gemaakt van een extra ketel om bij te warmen. Daardoor is er naast de constante variaties in externe factoren ook nog eens de wisselwerking met fossiele/hernieuwbare brandstoffen. De plaatsing (en soort) van naverwarming speelt ook een rol. In een IWT-HOBU studie (project 980095) werden drie courant voorkomende systeemconcepten geanalyseerd: naverwarming geïntegreerd in het opslagvat, naverwarming door een klassieke boiler achter het vat en als doorstroom-naverwarming in de leiding na het vat. Energetisch gezien was de conclusie daar als volgt:

1. Concept 3: meest gunstig
2. Concept 2: marginaal minder energetisch voordeel dan concept 1
3. Concept 1: slechts iets beter dan concept 2

Wanneer ook rekening gehouden wordt met de voorschriften omtrent het voorkomen van de legionellabacterie, verdwijnt het voordeel van concept 3. Omdat er in grotere systemen, zoals ziekenhuizen, niet altijd voldoende verversing en spoeling is, moet de minimumtemperatuur op 60°C gehouden worden. In dat geval is de naverwarmingsenergie van de 3 concepten even groot.

Een zonneboilerinstallatie wordt meestal gedimensioneerd zodat ze instaat voor 50-65% (kleine installaties) of 30-40% (grote installaties) van het energieverbruik voor opwarming van sanitair water. Deze verhouding wordt de dekkingsgraad genoemd. Een hoge dekkingsgraad heeft een hogere besparing tot gevolg, maar veroorzaakt ook een hogere investeringskost omdat het collectoroppervlak ook moet toenemen. Bovendien gaat bij een hogere dekkingsgraad in de zomer mogelijk een deel van de opgevangen energie verloren doordat ze niet nuttig kan aangewend worden. Anderzijds, door gebruik te maken van een grotere collector en een groter voorraadvat kan het systeem in beperkte mate bijdrage aan de woningverwarming.

Op elke vierkante meter in België valt per jaar maximaal 1100 kilowattuur zonne-energie. Een zonnecollector haalt daar 400 kWh bruikbare warmte uit. De relatieve jaarlijkse bijdrage van de zon hangt af van de toepassing. Voor sanitair warm water kan de zon minstens de helft van de energie leveren, voor grotere systemen die woningverwarming ondersteunen is de bijdrage 15 à 25%.

2.2.2 Rendementscurve

De energetische kwaliteit van een zonnecollector wordt bepaald door de rendementscurve. Het is de verhouding tussen de nuttige hoeveelheid warmte die geleverd wordt en de invallende zonne-energie. In kwadratische benadering wordt het rendement uitgedrukt als:

$$\eta = \eta_0 - \alpha_1 \frac{\Delta T}{G} - \alpha_2 \frac{(\Delta T)^2}{G}$$

met ΔT [°C] het verschil in temperatuur tussen absorber en omgeving, G de ingestraalde energie [W/m²] en η_0 het optisch rendement. De overige parameters zijn afhankelijk van het type collector dat gebruikt wordt.

Zoninstraling en diffuus deel bij verschillende weersomstandigheden in België		
Weersomstandheden	Volledige straling [W/m²]	Diffuus deel (%)
Onbewolkt	600-1000	10-20

Licht bewolkt	200-400	20-80

Zwaar bewolkt	50-150	80-100

Tabel 2 : Instralingsterkte als functie van weersomstandigheden voor het Belgische klimaat.

In de praktijk wordt meestal met de lineaire benadering van het rendement gewerkt:

$$\eta = \frac{Q_n}{G} = \eta_0 - U\left(\frac{T_M - T_U}{G}\right)$$

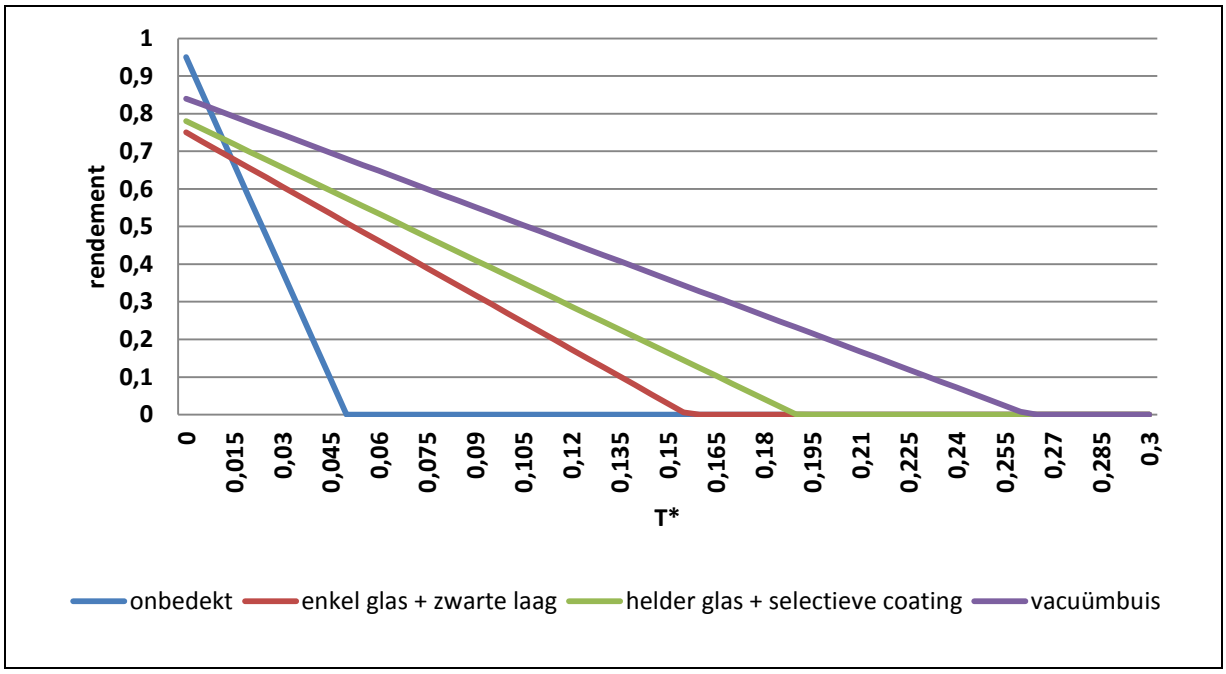
Daarbij zijn:

Q_n = nuttige warmte [W/m²]
G = invallende straling in het collectorvlak [W/m²]
$\eta_0 = t.\infty$ = het optisch rendement
t = transmissiecoëfficiënt
∞ = absorptiecoëfficiënt
U = verliescoëfficiënt of isolatiekwaliteit van de collector [W/m².K]
T_M = gemiddelde vloeistoftemperatuur van de absorber [°C]
T_U = omgevingstemperatuur

Binnen deze parameters liggen een aantal dingen vast met de installatie (soort bedekking, isolatie, oppervlakte, …). Deze specifieke parameters spelen dus geen rol bij het weergeven van het collectorrendement. De bepalende parameters bundelt men in functie van de bedrijfsomstandigheden:

$$T^* = \frac{T_M - T_U}{G}$$

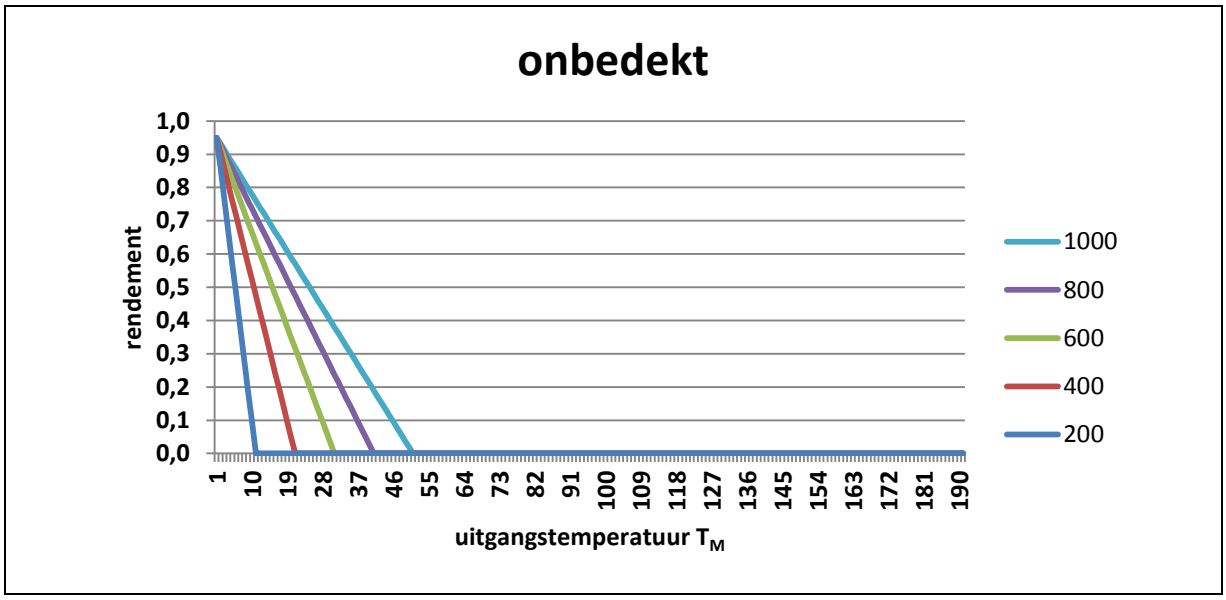
In Figuur 5 staat een rendementscurve die bepaald werd met de lineaire benadering voor 4 verschillende types van collectoren. Een onbedekte vlakke plaatcollector (zwembadcollector), een vlakke plaatcollector met enkel glas en zwart absorbeeroppervlak, een vlakke plaatcollector met helder (ijzerarm) glas en een absorptieverbeterende coating en een vacuümbuiscollector. [bron ODE]



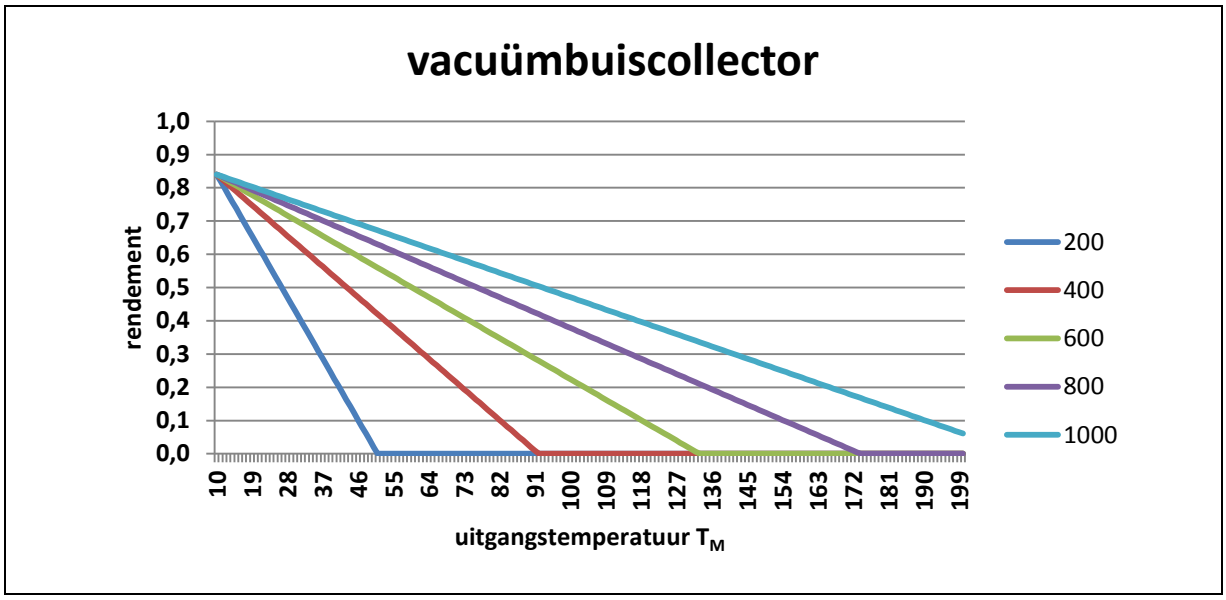
Figuur 5 : Lineair benaderde rendementscurve voor 4 verschillende types van zonnecollectoren bij constante instraling. Het snijpunt met de y-as geeft het optisch rendement weer: daar is $T_M = T_U$.

Uit Figuur 5 tot Figuur 7 volgt de *belangrijke conclusie dat het rendement van de zonnecollector toeneemt naarmate de gebruikstemperatuur lager is*. Dit maakt een installatie geschikt voor lage temperatuur afgiftesystemen en toont ook aan waarom vaak met naverwarming gewerkt wordt.

De vertaling van dergelijke rendementscurven naar jaaropbrengsten van het hele systeem is niet eenvoudig. In de praktijk wordt dit dan ook gedaan met simulatieprogramma's waarin talloze factoren in rekening gebracht worden: gebruikersprofiel, klimaatzone, systeemeigenschappen, hogere orde benaderingen...



Figuur 6: Rendement als functie van instraling (lineaire benadering) voor een onbedekte vlakke plaatcollector. Dit geeft het effect van zware bewolking (G=200W/m²) tot zonnige dagen (G=1000W/m²)weer.



Figuur 7: Rendement als functie van instraling (lineaire benadering) voor een vacuümbuiscollector. Dit geeft het effect van zware bewolking (G=200W/m²) tot zonnige dagen (G=1000W/m²)weer.

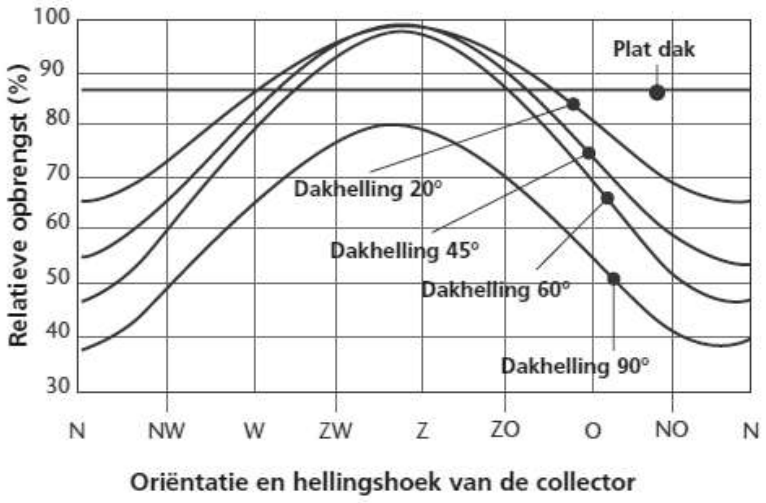
2.2.3 Opstelling van de collector

Behalve voor nokcollectoren speelt de oriëntatie en hellingshoek van de installatie een grote rol in de te verwachten jaaropbrengsten. Daar de zon maximaal schijnt als ze pal in het zuiden staat, is de grootste opbrengst te verwachten voor zuidwaarts gerichte

collectoren. Voor installaties die pal oost- of westwaarts gericht staan ligt de opbrengst tot 20% lager.

Wat betreft hellingshoeken presteert een zuidwaarts gericht systeem maximaal als die hoek tussen 20° en 60° met het horizontale vlak bedraagt. Ook systemen met kleinere of grotere hellingshoeken presteren nog behoorlijk, wat te verklaren is door het grote aandeel diffuse straling in ons land. Uiteraard is een volledig horizontale opstelling beter dan een volledig verticale. Een plat dak haalt nog 87% van de opbrengst van een optimale opstelling. De verticale positie presteert best in de winter, wanneer de zon minder hoog aan de hemel staat. Dit maakt dergelijke positionering aanvaardbaar voor woningverwarming. In Figuur 8 staan de relatieve opbrengsten weergegeven, geschaald ten opzichte van een optimaal geplaatste installatie.

Als laatste opmerkingen bij de positionering volgen enkele randvoorwaarden. Schaduwen van naburige gebouwen en voorwerpen verminderen de opbrengst, daar moet bij de planning zoveel mogelijk rekening mee gehouden worden. Bovendien moet de afstand tussen de collector, het voorraadvat, de naverwarming en de gebruikers zo kort mogelijk gehouden worden om warmteverliezen te beperken.



Figuur 8: Relatieve opbrengst voor zonneboilerinstallaties in België. Door het grote aandeel diffuse straling is een breed interval aan hellingshoeken beschikbaar. (bron: ODE)

2.2.4 Geïntegreerde collectoren

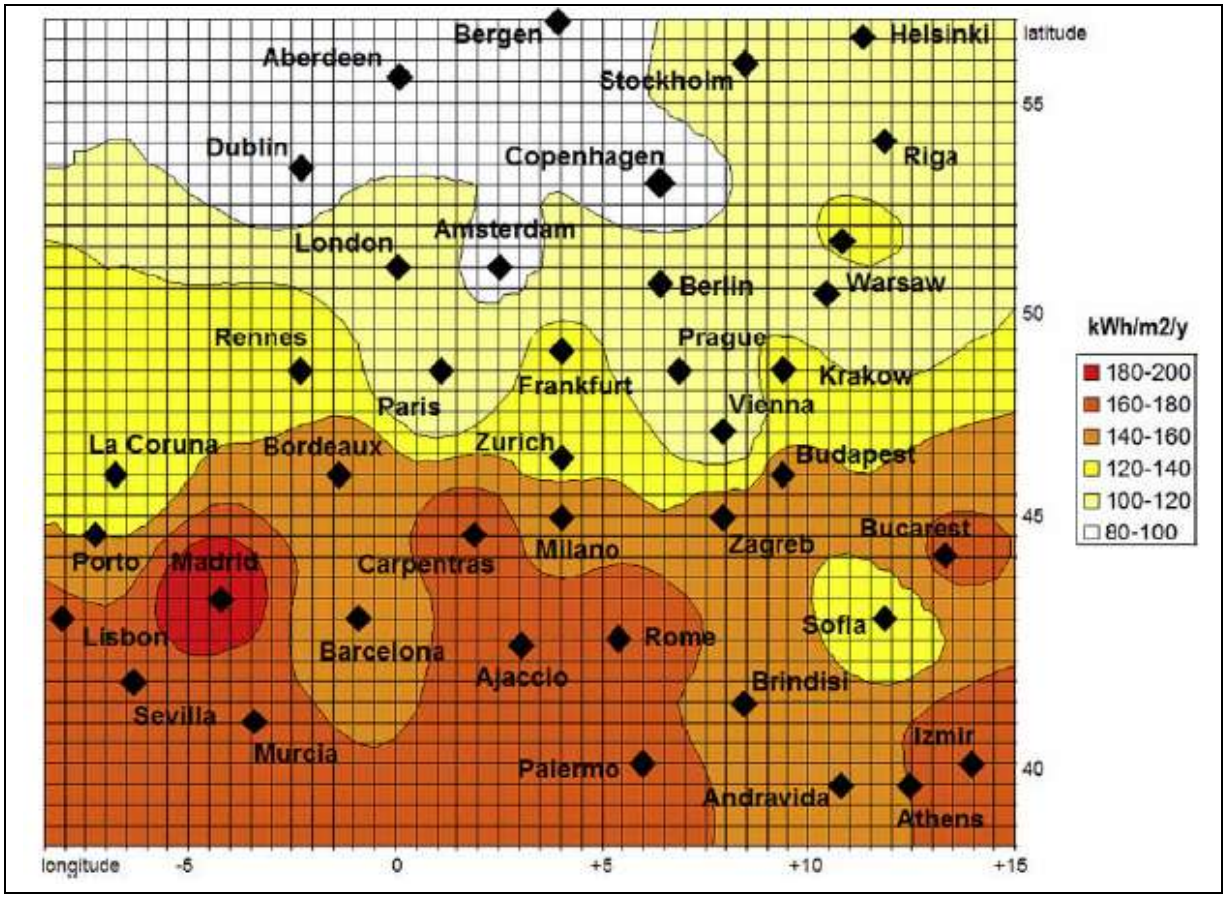
Bonhôte et al. [11] deden onderzoek naar de toepassingsmogelijkheden van een glasloze collector geïntegreerd in de façade van gebouwen. Dit kadert in het gedachteproces dat de integratie van energieproductie in de gebouwschil een meest belovende strategie is om de kosten te drukken en de architecturale aanvaarding te bevorderen.

Ze rapporteerden over de toepassing van gekleurde stalen platen die de stralingswarmte absorberen voor sanitair warm water en voor gebouwverwarming. Op die manier werden opbrengstkaarten opgesteld voor Europa. De algemene conclusie is dat façade collectoren best toepasbaar zijn om water voor te warmen in stedelijke, windvrije omgevingen. Het rendement voor sanitair warm water was vrij hoog, maar in verbindingen met het verwarmingssysteem waren de resultaten minder goed.

Toegepast om te voorzien in sanitair warm water worden waarden genoteerd tussen 100-300 kWha/m². De oriëntatie is niet echt kritiek: een azimut tussen -50° en 50° is aanvaardbaar. Beschutting tegen de wind is wel van belang. Bovendien is de verwachte opbrengst te berekenen via een simpele formule (zie referentie 11 en resultaat in Figuur 9).

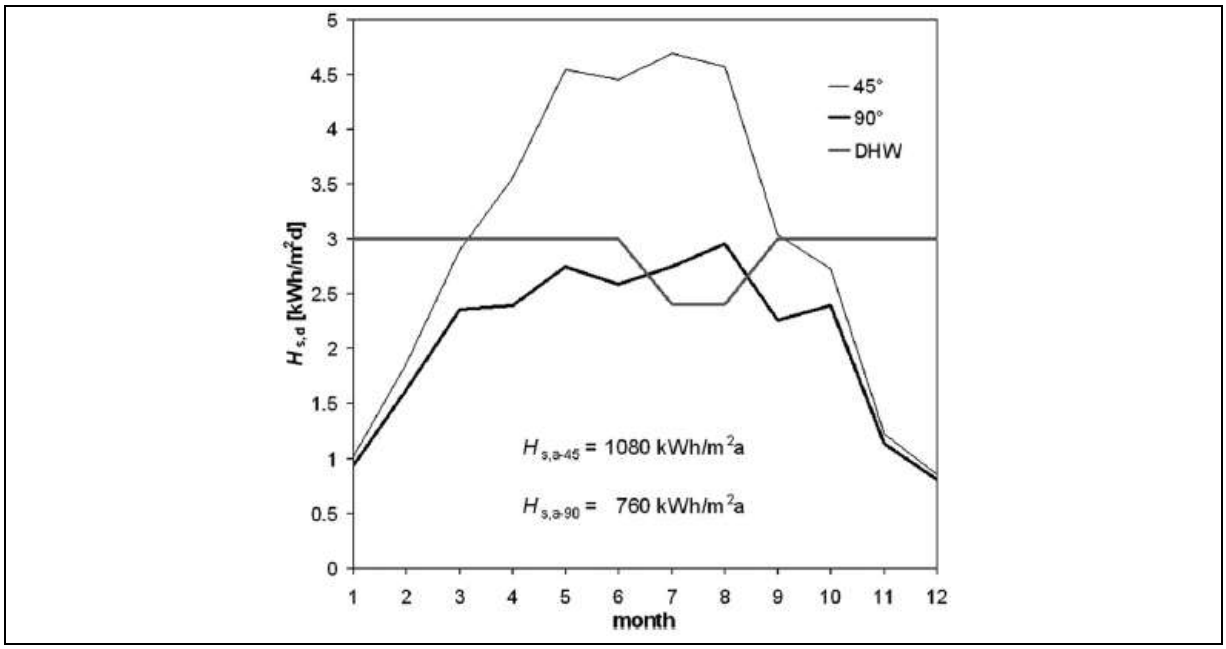
Toegepast als gebouwverwarming, met een bijkomende warmtewisselaar, liggen de geleverde energieën tussen 20-100kWha/m². De installatievoorwaarden zijn wel kritiek: zuidwaarts, hoge absorptie (> 0.8) en beschut tegen de wind zijn noodzakelijk.

Toegepast als combinatie van SWW en gebouwverwarming zijn er geen voordelen: meer dan 95% van de verzamelde energie wordt gebruikt voor het verwarmen van water voor huishoudelijk gebruik.



Figuur 9: Europese kaart voor de opbrengst van een zonnecollector geïntegreerd in de façade van stedelijke gebouwen. [11]

Matsuka et al. [12] vergeleken de opbrengsten van façade gemonteerde zonnecollectoren tegenover de klassieke dakinstallaties. Ze kwamen tot de conclusie dat het collectoroppervlak met 30% moet toenemen om eenzelfde opbrengst te krijgen als een daksysteem met 45° helling. Er werd bovendien aangetoond dat de warme panelen binnen nooit tot meer dan 1 graad temperatuursverhoging leidden en dus geen zware invloed hadden op het thermisch comfort mits afdoende geïsoleerd. In de winter kan zelfs sprake zijn van een positief effect.



Figuur 10: Jaarprofiel van de globale instraling per dag op dak- en façadecollectoren [12].

2.2.5 Zonnecollector in combinatie met warmtepomp

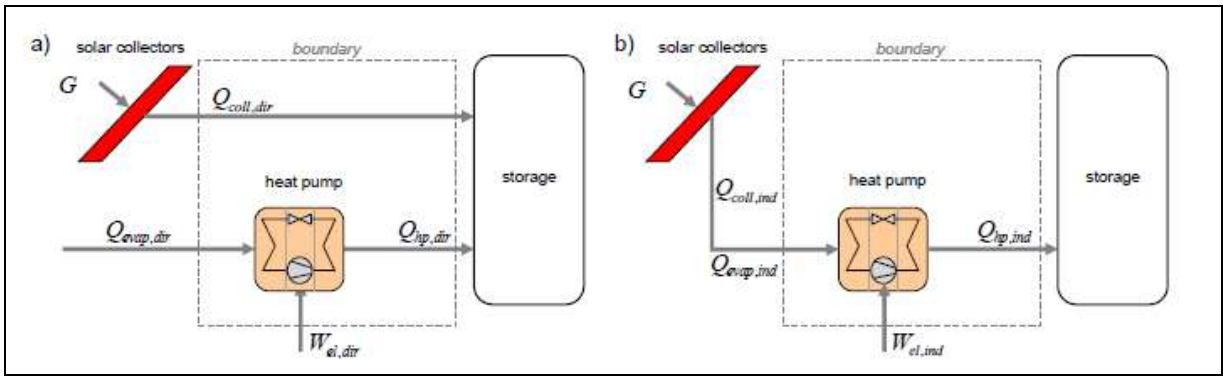
Zonnecollectoren worden wereldwijd al vrij vaak gebruikt voor het verwarmen van water, maar de toepassing in gebouwverwarming blijft beperkt. Voor een groot deel heeft dit te maken met het verschil in beschikbaarheid tijdens de zomer en vraag in de winter. Dit maakt warmteopslag in vele gevallen noodzakelijk. In koude gebieden of op koudere dagen, kunnen zonnecollectoren ook in combinatie met een warmtepomp toegepast worden om te voldoen in de warmtevraag voor gebouwverwarming en sanitair warm water. Daarvoor bestaan verschillende concepten, sommige ervan laten zelfs toe om te schakelen tussen directe en indirect aanbod van de warmte (Figuur 11).

Bij direct aanbod levert de collector meestal laagwaardige warmte rechtstreeks aan het lokale systeem. Bij een indirect aanbod wordt de warmte van de collector aan de warmtepomp geleverd die de temperatuur vervolgens verder oppompt tot ze toegepast kan worden voor bijvoorbeeld gebouwverwarming.

Wanneer de warmte naar de warmtepomp gevoerd wordt, stijgt de prestatiecoëfficiënt (COP) van de laatste omdat collector een hogere ingangstemperatuur voorziet dan

bijvoorbeeld de omgevingstemperatuur. Tegelijkertijd kan het rendement van de collector zelf stijgen (sectie 2.2.2) omdat de gevraagde uitgangstemperatuur over het algemeen lager ligt dan wanneer die moet rechtstreeks voor verwarming aangewend wordt.

Toch is het niet altijd zo dat een hoger rendement van de zonnecollector en een hogere prestatiecoëfficiënt leiden tot een hoger systeemrendement. Citherlet et al. [16] presenteerden in 2008 resultaten van jaarsimulaties voor systemen waar de verdamper van de warmtepomp gevoed werd door een zonnecollector. Ze constateerden slechts een kleine toename in het algemene rendement in termen van geleverde warmte als functie van verbruikte elektriciteit. Karagiorgas et al. [17] kwamen tot gelijkaardige conclusies in 2010; het rendement van een combinatiesysteem verhoogt enkel tijdens de ochtend en avonduren. Op basis daarvan stelden ze een systeem voor dat schakelbaar is: direct op het warmste punt van de dag en indirect tijdens de daluren.

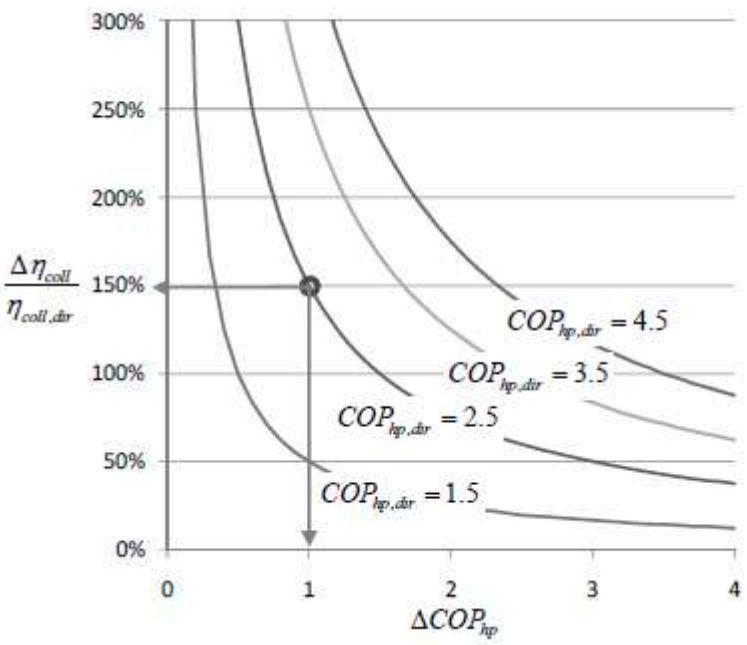


Figuur 11: Directe en indirecte levering van zonnewarmte aan de verdamper van een warmtepomp in een gecombineerd systeem [17].

Haller et al. [18] onderzochten de voorwaarden waaraan voldaan moet worden om een hoger systeemrendement te bekomen op dagen dat de warmtevraag hoger is dan geleverd kan worden door de zonnecollectoren alleen. Enkel dan is de hoeveelheid en de temperatuur van de geleverde warmte identiek voor beide schema's. De voorwaarde voor een groter algemeen rendement bij indirecte aanwending van de zonnewarmte kan dan geschreven worden als:

$$\frac{\Delta COP_{hp}}{COP_{hp,dir} - 1} \cdot \frac{\Delta\eta_{coll}}{\eta_{coll,dir}} > 1$$

met $\Delta COP_{hp} = COP_{hp} - COP_{hp,dir}$ en $\Delta\eta_{coll} = \eta_{coll} - \eta_{coll,dir}$.



Figuur 12: Bepalende curven voor de omschakeling van een directe naar een indirecte zonnecollector voor verschillende COP waarden [18].

Figuur 12 toont voor verschillende prestatiecoëfficiënten van de directe zonnecollector de minimale toename die nodig is in het collectorrendement en de prestatiecoëfficiënt van de warmtepomp om een toenemend systeemrendement te bekomen bij indirecte toepassing.

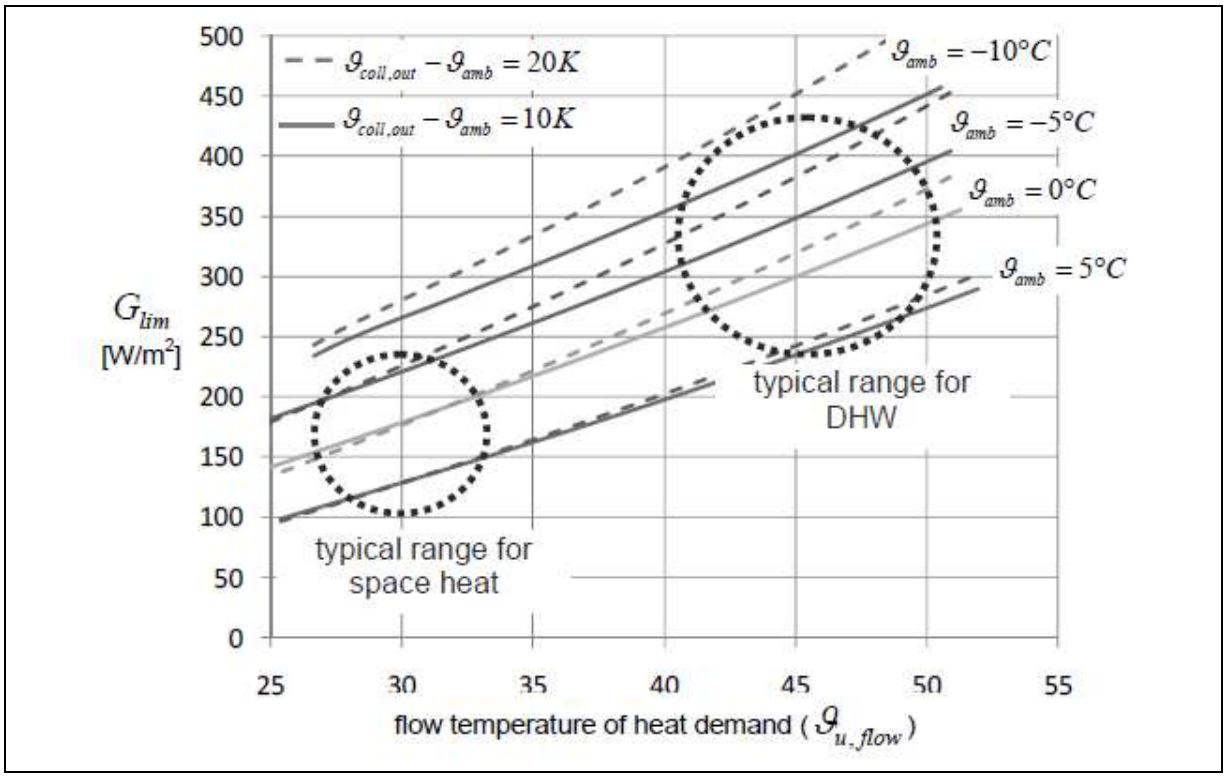
Een direct gevolg van die voorwaarde is dat er een onderlimiet bestaat voor de instraling G_{lim} van de zon waaronder indirect toepassing een positief effect heeft op het systeemrendement (Figuur 13). De limiet is afhankelijk van de eigenschappen van de collector, de warmtepomp en de temperatuursafhankelijke warmteverliezen.

$$G_{lim} = \frac{\Delta COP_{hp}}{COP_{hp,dir} - 1} \cdot \frac{x_{dir} - x_{ind}}{\eta_0} + \frac{x_{dir}}{\eta_0}$$

Waarbij x de warmteverliezen voorstellen[W/m²].

$$x = a_1 \cdot \Delta T_m + a_2 \cdot \Delta T_m |\Delta T_m|$$

$$\Delta T_m = \left(\vartheta_{coll,in} - \vartheta_{coll,out}\right)\Big/_2 - \vartheta_{omgeving}$$



Figuur 13: Instralinglimiet Glim waaronder de indirecte configuratie zorgt voor een verhoogd systeemrendement. De limiet is afhankelijk van warmtevraag, omgevingstemperatuur en temperatuursverschillen tussen de omgeving en de collector [18].

Verder volgt uit het onderzoek dat de toename in het algemene rendement het grootst is bij hoge vraagtemperaturen en lage bron- en omgevingstemperatuur; het rendement hangt vooral af van hoeveel uren het systeem extra kan draaien in de indirecte configuratie. Een uitbreiding, waarbij ook warmte opgeslagen wordt, werd nog niet onderzocht.

2.3 Economische aspecten

2.3.1 Kostprijs

<u>Voor particulieren:</u>

Voor particulieren werd een typische installatie afgeschat op basis van een brochure van een fabrikant en een gemiddeld huishouden.

Zonneboiler	
Collectoroppervlak	5 m²

Opslagvat	250 liter

Systeemprijs [bron: IZEN]	€ 5900

Gemeentesubsidies (gemiddeld)	€ -250

Gezinsbondkorting	€ -430

Netbeheerder subsidie (bestaand, 2012)	€ -1000

Netto investering	€ 3970

Tabel 3: Kostprijs voor een particuliere zonnecollector installatie zoals opgegeven door IZEN.

Voor KMO en bedrijven:

Literatuur vermeldt geen prijzen voor grote projecten. Als voorbeeld wordt daarom een projectstudie aangehaald die uitgevoerd werd door VITO Dit project was een screening voor de toepassingsmogelijkheden voor hernieuwbare energie in een nieuwbouw project van MGW. De Mechelse Goedkope Woning (MGW) is een sociale maatschappij voor huisvesting in Mechelen en heeft concrete plannen om belangrijke nieuwbouwprojecten uit te voeren de komende jaren. Ze willen dit op een duurzame manier aanpakken.

In de studie werd het gebruik van een zonneboiler onderzocht om te voorzien in sanitair warm water en dat als functie van de totale dekking. De afnamepatronen voor SWW zijn afkomstig van praktische metingen door Vito uitgevoerd, de grootte van de collectoren en de opbrengst werden geschat via vuistregels.

Doorgerekend tegenover een klassieke installatie, gaf dit terugverdientijden die varieerden tussen 17 en 23 jaar. Een samenvatting van de economische studie staat gegeven in onderstaande Tabel 4. Daarbij werd geen rekening gehouden met de meerkost voor buffervaten, omdat deze ten opzichte van een referentiesituatie reeds voorzien zijn. Indien de buffervaten meegerekend worden, stijgt de terugverdientijd gemiddeld met 2 jaar.

Samenvatting	
Dekkingsgraad	Terugverdientijd [jaren]
30%	17

40%	19	

50%	23

Tabel 4: Opbrengst, besparingen en terugverdientijden voor verschillende dekkingsgraden in een groter zonneboilersysteem.

Als de gasprijzen in de toekomst gevoelig zouden toenemen, wordt het plaatsen van een (collectief) zonneboilersysteem veel interessanter omdat de terugverdientijden dan substantieel zullen afnemen.

2.3.2 Subsidies

Zonthermische waterverwarming dient niet aanzien te worden als een 100% volwaardig alternatief voor gas of elektriciteit, maar eerder als een supplementaire bron van energie. Zonne-energie alleen kan niet voldoen aan de totale nood aan energie. Er zijn immers dagen waarop de zon weinig of niet schijnt. Daarom zijn de meeste systemen voorbereid op 'naverwarming' waarbij, wanneer er onvoldoende zonlicht is en er toch water dient opgewarmd te worden, overgeschakeld kan worden op een secundaire warmtebron. Gemiddeld gezien kan een correct berekend en geïnstalleerd systeem op jaarbasis voorzien in 30 à §(% van de warm waterbehoefte.

Voor particulieren:

Door het wegvallen van de federale belastingaftrek voor energiebesparende maatregelen eind 2011 steeg de terugverdientijd van zonneboilers. De Vlaamse regering heeft begin maart 2012 echter bekend gemaakt (via Freya Van den Bossche Vlaams minister van energie) dat ze alvast tegemoet gaat komen voor wie een zonneboiler wilt plaatsen. De installatiepremie voor een zonneboiler stijgt namelijk van 200 €/m² naar 550 €/m². Op deze manier wordt de terugverdientijd van een zonneboiler teruggebracht van 20 naar 10 jaar. Daarnaast stijgt het maximum premiebedrag van € 1500 naar € 4125 om de weggevallen fiscale voordelen op te vangen. Deze wijzigingen gingen retroactief in vanaf 1 januari 2012.

Een andere premie die niet vergeten mag worden is de gemeentelijke subsidie. Er zijn verschillende gemeenten die premies aanbieden tot €500.

Voor KMO en bedrijven:

Voor de installatie van een zonneboiler zijn er verschillende subsidiemaatregelen voorzien. De federale overheid voorziet in een verhoogde investeringsaftrek voor energiebesparende investering, de Vlaamse overheid voorziet een ecologiepremie, de netbeheerders voorzien ook premies (incl. premie voor zonneboilers in niet-woongebouwen), en de gemeenten zelf geven ook subsidies.

- Federaal: Het energetisch rendement van bestaande installaties verbeteren en het gebruik van hernieuwbare energiebronnen bevorderen en stimuleren. Artikel

69 van het Wetboek der Inkomstenbelasting (W.I.B.) biedt bedrijven de mogelijkheid hun belastbare winst te verminderen met een verhoogde investeringsaftrek voor energiebesparende investeringen. De aftrek wordt verricht op de winst van het belastbaar tijdperk tijdens hetwelk de vaste activa zijn verkregen of tot stand zijn gebracht. Voor de energiebesparende investeringen, gedaan tijdens het belastbaar tijdperk dat aan aanslagjaar 2013 (inkomsten 2012) verbonden is, is er een verhoogde aftrek van 15,5%.

- Vlaams: Vanaf februari 2011 werd de ecologiepremie grondig gewijzigd. Het callsysteem werd afgeschaft en vervangen door een open systeem met strikte ontvankelijkheidcriteria. Dit wil zeggen dat u steun krijgt wanneer uw project aan de minimum vereisten voldoet. De technologieënlijst van investeringen die in aanmerking komen voor de ecologiepremie blijft bestaan, maar voortaan wordt aan elke technologie een ecoklasse toegekend, afhankelijk van het milieu- en of energievoordeel van de technologie. Er zijn 4 ecoklassen (A tot en met D); hoe hoger de ecoklasse, hoe hoger de steun voor de technologie. Het totale bedrag aan toegekende subsidies aan een onderneming bedraagt maximaal 1.000.000 euro over een periode van 3 jaar te rekenen vanaf de indieningdatum van de eerste positief besliste steunaanvraag. (Tabel 5)

Kleine en middelgrote ondernemingen die een inspanning leverden om een eerstelijns energie-, milieu- of eco-efficiëntiescan te ondergaan en beschikken over een geldige scan op datum van indiening van de steunaanvraag kunnen genieten van een subsidiebonus. Ondernemingen die op de datum van indiening van de steunaanvraag beschikken over een geldig milieucertificaat (erkenninglogo) of een gecertificeerd milieumanagementsysteem hebben recht op een subsidiebonus. (Tabel 6)

Ecoklasse	Ecologiegetal	Subsidiepercentage kmo	Subsidiepercentage go
A	9	30%	15%

B	6	20%	10%

C	4 – 3	10%	5%

D	2 – 1	5%	-

Tabel 5: Ecologiepremie van het Vlaamse Gewest. Technologieën worden ingedeeld in klassen met bijhorende steunpercentages.(bron: Agentschap Ondernemen)

Subsidiebonus		
	KMO	**GO**
Eerstelijns milieu- / energie- / eco-efficiëntiescan	3%	-

Milieucertificaat	5%	-

Milieumanagementsysteem: ISO 14001 / EN 16001 / EMAS	10%	5%

Tabel 6: Subsidiebonus tabel voor KMO en grote ondernemingen. (bron: Agentschap Ondernemen)

- Netbeheerder: Ook in 2012 geven de netbeheerders heel wat premies voor de doelgroep bedrijven, overheden en scholen. Eandis geef bijvoorbeeld een premie van €200/m² met een maximum van €3750. De premie kan nooit hoger zijn dan het factuurbedrag exclusief BTW en is van toepassing voor bestaande gebouwen andere dan woning, wooneenheid of woongebouw, aangesloten op het distributienet van Eandis vóór 01/01/2006, alsook voor nieuwbouw. De collectoren moeten voldoen aan bepaalde normen: De collector is getest door een geaccrediteerd instituut volgens EN-12975, heeft een systeemtest (volgens EN12976 of volgens EN/TS 12977) ondergaan of bezit een Solar KeyMark. Het systeem is gemarkeerd conform EN 12976-1.
- Gemeente: Sommige gemeenten geven een premie variërend tussen 200 en 1000 euro.

2.4 Demonstratieproject Molse bouwmaatschappij

In een meetcampagne van VITO werd gedurende een jaar een systeem met zonnecollectoren opgemeten. Op het dak van een bejaardentehuis in Mol werd een 33 m² grote installatie geplaatst van vlakke plaat collectoren om te voorzien in de productie van sanitair warm water voor 28 appartementen. Er is een klassieke boiler voorzien om bij te springen als de warmtevraag te groot wordt.

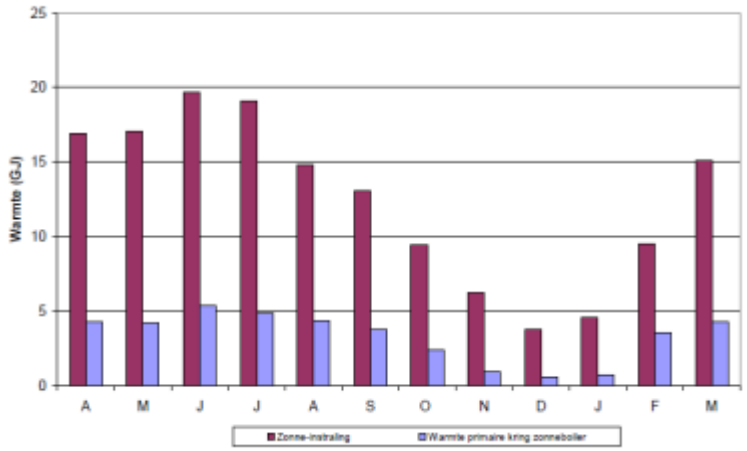
Figuur 14: Zonnecollectoren op het dak van een bejaardentehuis in Mol.

De installatie bestaat uit volgende componenten:

- 33m² vlakke plaat collectoren (IZEN)
- Condensatie boiler (122 kW)
- Hoogrendement boiler (122 kW)

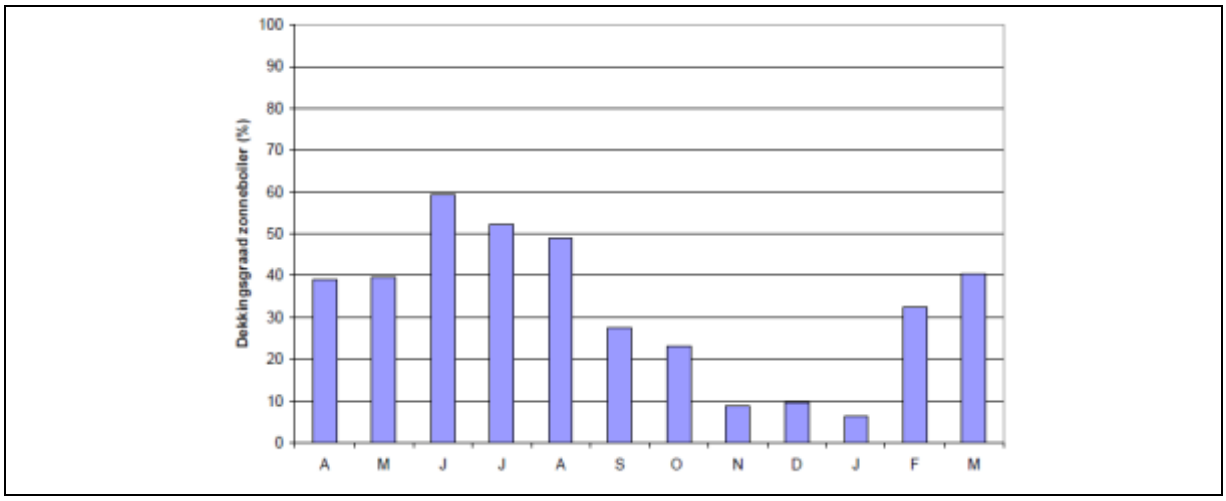
- 28 appartementen met 1804m² vloeroppervlak en 117m² lobbyruimte
- 2x800 liter buffervat

Gedurende het meetjaar werd in totaal 33.750 kWh aan warmte geproduceerd, waarvan 10.867 kWh (32.2%) door de collectoren op het dak en 22.883 kWh (67,8%) door de twee boilers. Slechts 8060 kWh (23,9%) van de geleverde warmte werd gebruikt voor de aanmaak van sanitair warm water. De behoefte aan SWW is vrij constant doorheen het jaar, in tegenstelling tot de seizoensafhankelijkheid van het aanbod uit de collectoren.



Figuur 15: Maandelijkse instraling op de collectoren en warm water productie.

Deze seizoensafhankelijk zorgt voor een variatie in de dekkingsgraad van de collectoren. In totaal bedroeg de instraling op de zonnecollectoren op jaarniveau 41.436 kWh, waarvan 10.867 kWh omgezet werd in warmte, de collectorefficiëntie bedraagt dus 26,2%. Van de 33.750 kWh warmte geleverd aan de opslagtanks werd uiteindelijk 8060 kWh gebruik voor warm water, de buffervatefficiëntie bedraagt dus 23,9%. Het globale systeemrendement voor de productie van sanitair warm water met thermische zonnepanelen komt daarbij uit op net geen 8%. De primaire energiebesparingen komen jaarlijks op 46GJ neer, de reductie in CO2 uitstoot bedraagt 2.6 ton.



Figuur 16: Maandelijkse dekkingsgraad voor de thermische zonnecollectoren.

Voor het installatiejaar (2002), exclusief btw en subsidies, bedroeg de totale installatiekost 26.141 euro. Met een fossiele brandstofprijs gerekend aan 48,8 €/MWh is de jaarlijkse winst uit te rekenen op 624 euro en dus een terugverdientijd van 42 jaar. In de realiteit zijn er uiteraard diverse steunmaatregelen die deze terugverdientijd sterk verminderen, zoals aangetoond in eerdere secties.

3 Asfaltcollectoren

3.1 State of the art

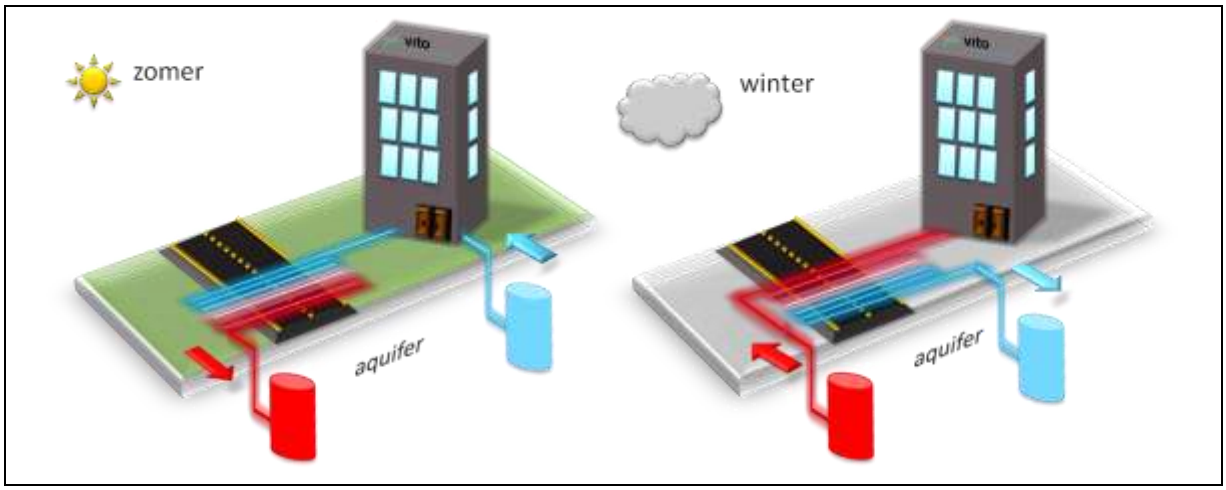
Asfaltwegen bedekken in totaal een gigantisch oppervlak dat per definitie vrij moet blijven. In de zomer warmt het asfaltoppervlak al snel op tot temperaturen van 70°C. Een systeem dat die zonnewarmte kan opvangen en stockeren is dus bijzonder interessant. De warmte kan voor verschillende doeleinden gebruikt worden zoals het ijsvrij maken van het wegdek en energiewinning voor klimaatregeling in nabije gebouwen.

De voordelen zijn dan ook navenant. Gewestwegen en snelwegen hebben zeer hoge onderhoudskosten die aanzienlijk kunnen verlaagd worden. Dat kan ten eerste omdat het wegdek zelf energie produceert en ten tweede omdat door temperatuurscontrole van het oppervlak het onderhoudsinterval verlengd kan worden. Bovendien is er de economische impact door een vermindering van files en ongevallen. Ook ecologisch biedt het sparen van primaire (fossiele) brandstoffen veel voordelen als de geproduceerde warmte aangesproken wordt. Het milieu ondervindt ookminder last van de vele tonnen strooizout die gebruikt worden.

Het systeem van asfaltcollectoren ontstond in eerste instantie uit het omgekeerde denkpatroon als die hier beoogde toepassing voor gebouwverwarming. In landen met overvloedige regen- en sneeuwval werd vroeger het wegdek drooggestookt met bijzonder prijzige elektrische verwarmingssystemen. Een opkomend alternatief is het aanbrengen van een buizenregister voor watercirculatie of een ander fluïdum. De warmte die gebruikt wordt om te drogen of smelten wordt dan geleverd door centrales (restwarmte), grondwater of de zon.

Als de zon de warmte levert, wordt meestal gebruik gemaakt van seizoensopslag. In de zomer warmt het water in de buizen op en wordt die warmte gestockeerd. In de winter gebeurt het proces in omgekeerde volgorde en geeft het water warmte af aan het wegdek. Voor een illustratie van dit proces, zie Figuur 17.

Het realiseren van wegdekkoeling impliceert de opwarming van een doorstromend fluïdum, m.a.w. een thermische energiewinning. Deze energie manifesteert zich echter niet op een hoog temperatuurniveau. Hoewel de asfalttemperatuur in de zomer kan oplopen tot 70°C, zal de uitgaande fluïdumtemperatuur beduidend lager liggen. Deze warmte kan tijdens de zomer niet echt nuttig besteed worden, zodat deze best bewaard wordt. Lage temperatuurswarmte kan immers prima aangewend worden in de winter.



Figuur 17 : Werkingsprincipe van een asfaltcollector met seizoensopslag. In de zomer wordt de winterkoude gebruikt om het gebouw en het wegdek koel te houden. Het opgewarmde water dient dan in de winter om gebouw en wegdek te verwarmen.

De eenvoudigste manier om grote hoeveelheden warmte te bewaren is door deze in de grond te stoppen (zonder gesloten opslagvat of –tank). Zand- en kleiformaties in de ondergrond houden immers de warmte goed vast voor langere periodes. Een eerste toepassing van deze warmte is uiteraard het berijdbaar houden van het wegdek tijdens de winterperiode. Het blijkt dat periodes van ijzel en sneeuw zeer makkelijk kunnen overbrugd worden met de opgeslagen hoeveelheid energie. Slechts 20% van de gestockeerde energie zal in de praktijk aangesproken moeten worden. De overschot aan energie kan op verschillende manieren benut worden voor bv. klimaatregelingdoeleinden en verwarming van gebouwen.

In combinatie met een warmtepomp kan een zeer energiezuinige installatie opgezet worden. Door het kleine temperatuurverschil tussen verdamper en condensor zal een per seizoen gebonden prestatiecoëfficiënt (COP, verhouding elektrisch tot nuttig vermogen) van 3 tot 8 mogelijk worden (tegenover 2 à 4 voor de klassieke warmtepomptoepassingen). Ook directe benutting van de warmte is mogelijk door middel van "free heating / cooling". Hierbij wordt in een luchtbehandelingkast koude buitenlucht eerst voorverwarmd door de onttrokken warmte uit het opslagveld vooraleer verdere conditionering plaats heeft. Op deze manier wordt de winterkoude via de luchtbehandelingkast in de grond gebracht, het omgekeerde proces zal in de zomer plaatsvinden. Tijdens warme periodes wordt de opgeslagen koude eerst naar het gebouwcircuit gebracht, waarna het verder opgewarmd wordt door de asfaltcollector, om alzo op een verhoogd temperatuur niveau terug gestockeerd te worden. Dit resulteert in een continu proces van opwarmen en afkoelen van de bodem met telkens een volledige cyclus in één jaar. Belangrijk bij het dimensioneren is het bewaren van een energiebalans in de ondergrond, zoniet zal één van beide processen (koelen of verwarmen) verstoord of zelfs onmogelijk worden.

3.1.1 Wegdekcollectoren

Een belangrijk onderdeel van de volledige installatie is de keuze voor het collectorsysteem. Er bestaan verschillende mogelijkheden om de warmte van de zon te onttrekken aan het wegdek.

- Buizensysteem in de asfaltlaag
  Als voordeel heeft dit systeem voor de plaatsing van de buizen: die kunnen heel dicht bij het oppervlak zodat meer warmte onttrokken kan worden. Tegelijk is die een nadeel bij intensief verkeer wat stabiliteit van het wegdek betreft. Bijkomend nadeel is de moeilijke (en dus dure) installatie: het hete asfalt en de zware machines maken het niet eenvoudig.

- Buizensysteem in een betonlaag
  De bovenstaande nadelen van het buizensysteem rechtstreeks in de asfaltlaag kunnen vermeden door gebruik te maken van een betonlaag onder het asfalt. Ze liggen mogelijk wel iets verder van het oppervlak vandaan.

- Vrij fluïdum
  Het kan een stukje eenvoudiger door het buizensysteem helemaal achterwege te laten. De vloeistof stroomt in dat geval door een laag zeer open asfalt (ZOA, fluisterasfalt) ingesloten tussen lagen gesloten asfalt. Zo is er een direct contact tussen warmtedrager en warmtetransporteur. De voordelen zijn evident: makkelijke installatie en goede warmtewisseling. De nadelen helaas ook: moeilijke aan- en afvoer van het fluïdum en een noodzakelijk verval van het wegdek.

3.2 Karakteristieken

In de zomermaanden kan de temperatuur van het asfaltdek oplopen tot wel 70°C. Asfaltcollectoren kunnen zich qua temperaturen dus meten met de eenvoudigste ontwerpen voor zonnecollectoren (open, onbeglaasd). In combinatie met het enorme oppervlak aan beschikbaar asfalt, lijkt het potentieel aan thermische energie weleens eindeloos.

De eerste vraag is dan ook wat nu precies het thermische potentieel van een asfaltcollector is en welke parameters daar kritisch toe bijdragen. Dat brengt een onderzoek meteen op het rendement van de collector binnen het hele energiesysteem zoals (zie voorbeeldsysteem afgebeeld in Figuur 17).

Er bestaan in de literatuur artikelen die deze vraag beantwoorden. Hieronder wordt kort één toegelicht aan de hand van de behaalde resultaten [Loomans et al., 2003]. Zoals vaak worden daarbij aannames gedaan die leiden tot een simulatie model dat getoetst wordt aan proefmetingen. Indien bevredigend, dan kan het model gebruikt worden om nieuwe ontwerpen te realiseren en verbeteringen te implementeren. De gesimuleerde asfaltcollector werd onderverdeeld in 3 verschillende laagtypes. (1) het oppervlak (2) de

laag met buizen en (3) de lagen die de rest van het wegdek vormen. In elk van die lagen werden dan vergelijkingen voor warmtebalans opgelost.

Oppervlaktelaag: $\square\square\square\frac{\square\square}{\square\square} = \square_{\square\square\square} + \square_{\square\square\square\square\square\square\square\square\square} + \square_{\square\square\square\square\square\square\square\square\square\square} + \square_{\square\square\square\square\square\square\square\square\square\square}$

Collectorlaag: $\square\square\square\frac{\square\square}{\square\square} = \square_{\square\square\square\square\square\square\square\square\square\square} + \square_{\square\square\square\square\square\square\square\square\square\square}$

Onderlaag: $\square\square\square\frac{\square\square}{\square\square} = \square_{\square\square\square\square\square\square\square\square\square\square}$

waarbij Q_{zon} de hoeveelheid warmte afkomstig van de zon is, $Q_{radiatie}$ de stralingsverliezen van het asfalt aan de lucht, $Q_{convectie}$ de convectieverliezen aan de lucht en $Q_{conductie}$ de warmte die door het asfalt vervoerd wordt. $Q_{collector}$ is de hoeveelheid warmte opgenomen wordt.

Voor Q_{zon} is vooral de absorptiecoëfficiënt van de oppervlaktelaag van belang. Factoren zoals kleur en leeftijd achterwege gelaten, is deze coëfficiënt voor zuiver asfalt vrij hoog: α_{asfalt} = 88% tot 93% [Bondt en Steenvoorden, 1995].

Voor de radiatieverliezen $Q_{radiatie}$ zijn de helderheid van de lucht, de luchttemperatuur en de temperatuur van objecten in de omgeving van belang.

$Q_{convectie}$, het convectieverlies, wordt beschreven door de convectiecoëfficiënt voor warmtetransport h_c. Die bevat een vrij en een gebonden deel, waarbij de windsnelheid van belang is.

Voor het buizensysteem en de daardoor opgenomen warmte $Q_{collector}$ is vooral de totale warmteoverdracht coëfficiënt $U_{collector}$ van belang. Die bevat de interne overdracht van warmte aan het fluïdum, het warmtetransport door de buis en het warmtetransport van het omliggende asfalt naar de buis. De interne overdracht aan het fluïdum worden bepaald door het Reynolds getal en het Prandtl getal van de vloeistofstroom. De overdracht van asfalt naar buis wordt beïnvloed door de grootte van het contactoppervlak en de gemiddelde grootte van de holtes in het asfalt rond de buis.

Het *Getal van Reynolds* is het belangrijkste dimensieloze getal uit de stromingsleer. Het wordt gebruikt om te bepalen of een stroming laminair is of turbulent, maar ook om overeenkomsten tussen twee verschillende stromingen weer te geven. Dit kan nuttig zijn als men het gedrag van een vliegtuigvleugel of een waterstelsel wil onderzoeken met een schaalmodel. Het Reynoldsgetal *Re* is vernoemd naar Osbourne Reynolds en luidt:

$$Re = \frac{V * L * \rho}{\pi} = \frac{V * L}{\nu}$$

waarbij

V = Karakteristieke snelheid (in het geval van stroming door een buis is dit de doorsnedengemiddelde stroomsnelheid) [m/s]

L = Karakteristieke lengte (in het geval van stroming door een buis is dit de diameter) [m]

ρ = Soortelijke massa (dichtheid) van het stromende medium [kg/m^3]
μ = Dynamische viscositeit van het stromende medium [Pa·s]
v = Kinematische viscositeit van het stromende medium [m^2/s]

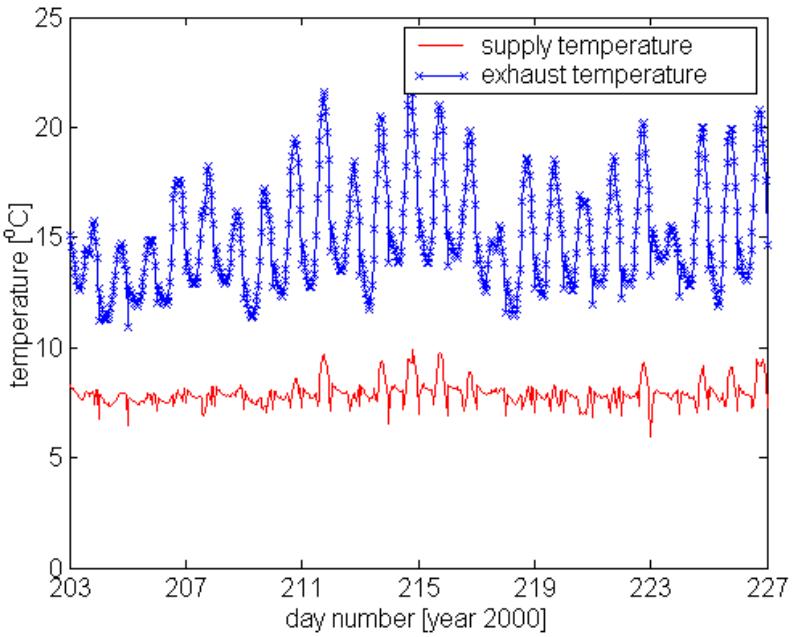
Het *Getal van Prandtl,* genoemd naar Ludwig Prandtl, is een dimensieloos getal dat de verhouding tussen impulsoverdracht en warmteoverdracht weergeeft in een ratio.

$$\mathrm{Pr} = \frac{\mu * c_p}{k}$$

waarbij
c_p = Warmtecapaciteit bij constante druk [J K^{-1} kg^{-1}]
k = Warmtegeleidingcoëfficiënt [W K^{-1} m^{-1}]

Om echt correct te werk te gaan zou het model ook nog warmteverliezen moeten inrekenen die afkomstig zijn van regen of variaties in het grondwater. De eerste beïnvloedt de oppervlaktelaag, de tweede de temperatuur van de grond.

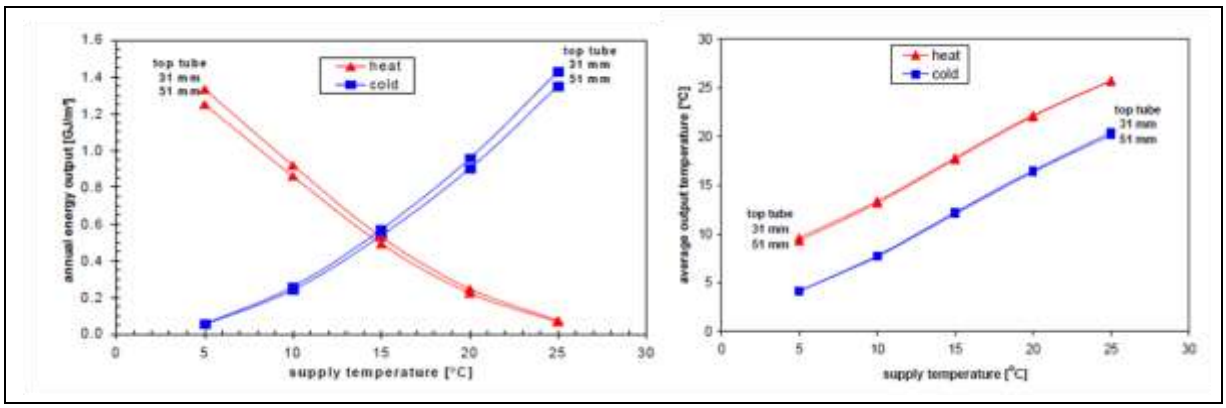
Om het model te testen werden ook warmteprofielen (zie Figuur 18) van het asfalt opgemeten in de zomer. Daarbij was de instraling, gemiddeld over een periode van 3,5 weken, hoger dan 500 W/m², de gemiddelde luchttemperatuur 14°C en de gemiddelde windsnelheid 1.7 m/s. De gemiddelde warmteopbrengst bedroeg dan 4.7 MJ per dag per vierkante meter, wat over de hele periode vertaald kan worden naar een gemiddeld rendement van 30%. Omgezet naar kWh is dit overigens 1,3 kWh per dag per vierkante meter.



Figuur 18: Experimenteel temperatuursprofiel van een asfaltcollector. Gemeten over een periode van 3,5 weken in de zomer bij een gemiddelde luchttemperatuur van 14°C. De instroom- en uitstroomtemperatuur staan getoond.

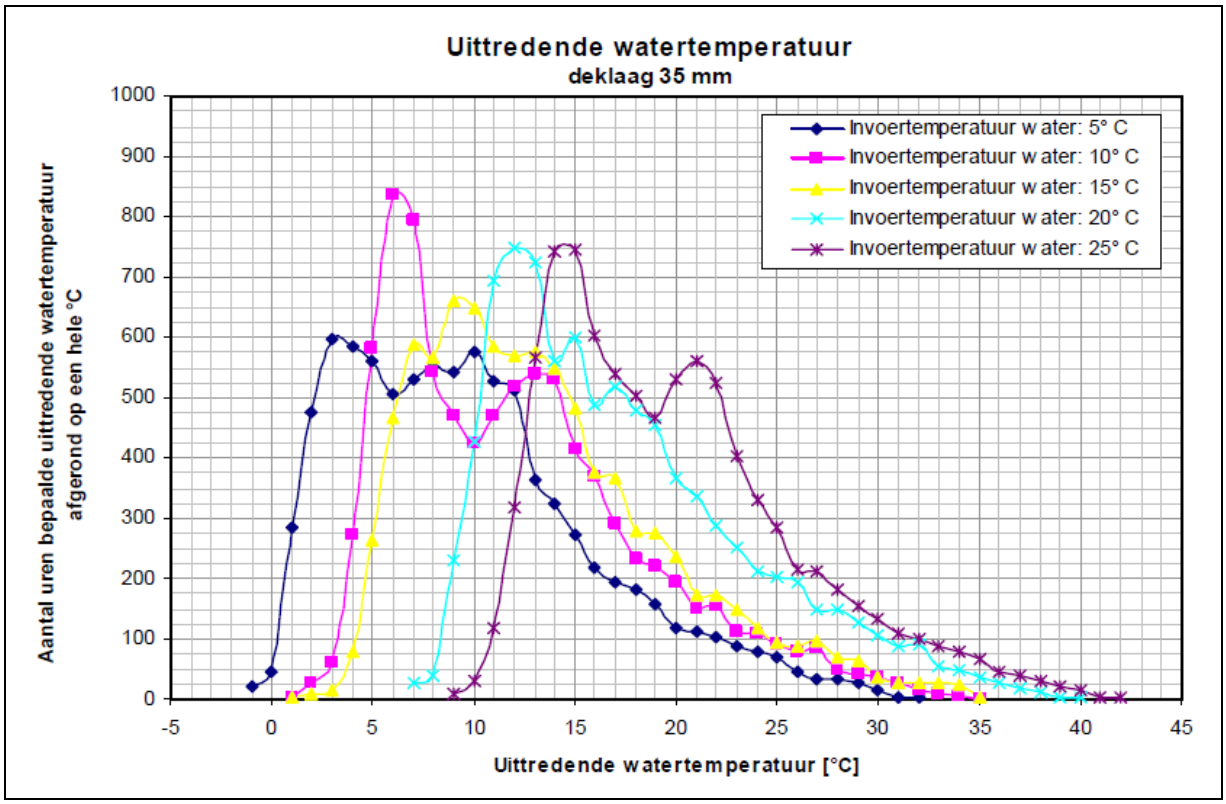
Simulaties met het ontwikkelde model in de literatuur geven meer inzicht in de opbrengst op jaarbasis en het effect van parameters zoals buisdiepte. In de conclusie van het onderzoek volgde dat de jaaropbrengst voor het onderzochte buismodel 25 % bedroeg van een normale (referentie) zonnecollector. Dit getal stijgt lichtjes als ook het verlies in de winter positief meegeteld wordt. Een duidelijk verschilpunt met de klassieke zonnecollector is echter dat een asfaltcollector continu in bedrijf is, terwijl een zonneboiler slechts opereert als de omstandigheden gunstig zijn.

De uitgangstemperatuur ligt rond de 20°C en dus levert de collector laagwaardige energie. Er is een schijnbaar lineair verband tussen instroomtemperatuur en uitstroomtemperatuur zichtbaar in Figuur 19(rechts). Wanneer de uitgangstemperatuur verhoogd wordt gaat dit ten koste van de totale energieproductie. Samengevat betekent dit dat er vaak nood zal zijn aan een verhoging van de energiekwaliteit met behulp van warmtepompen wanneer gebouwverwarming als toepassing beoogd wordt. Toch blijven de temperaturen in het onderzochte systeem gunstig voor lange termijn bodemopslag.



Figuur 19: Simulaties voor (links) jaarlijkse warmteproductie in functie van buisdiepte en aanvoertemperatuur van het fluïdum en (rechts) uitgangstemperatuur in functie van aanvoertemperatuur. (bron: Loomans et al., 2003)

In de literatuur wordt een energieopbrengst vermeld tussen 0,5 en 1,6 GJ/m² of 444 kWh/m². Gemiddeld per jaar houdt men het op 1,0 GJ/m² of dus 277 kWh/m². Deze opbrengsten aan laagwaardige warmte hangen (o.a.) af van het type collector, kleur van het asfalt, diepte van de warmtewisselaar (of de dikte van de asfaltafdeklaag), de hoeveelheid water door het collectorsysteem, de hoeveelheid zonne-instraling ter plaatse, omgevingstemperatuur en de uitgangstemperatuur.

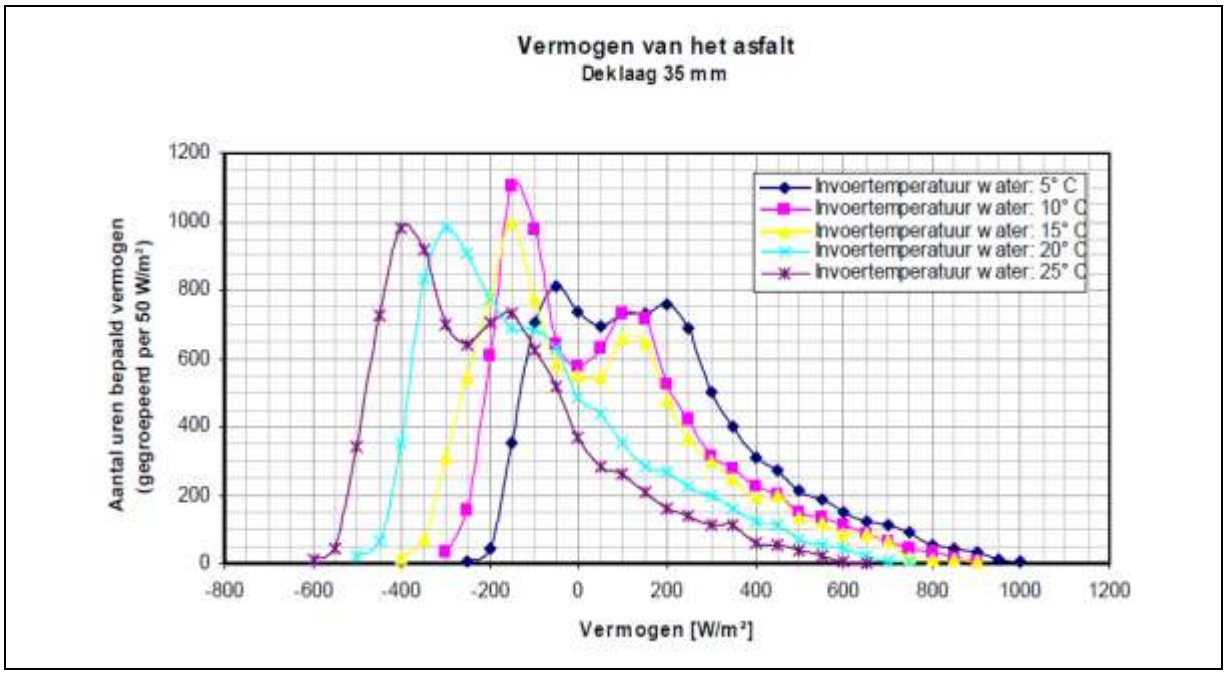


Figuur 20: Aantal uren bepaalde uittreedtemperatuur in functie van de invoertemperatuur voor een asfaltcollector.

Zoals eerder vermeld, levert een PV-paneel van 1 m² per jaar gemiddeld 800 kWh/m². Dit is weliswaar minder dan een asfaltcollector, maar het is wel (hoogwaardige) elektrische energie, d.w.z. dat deze zonder veel verlies omgezet kan worden in een andere vorm van energie i.t.t. de laagwaardige energie opgewekt door de asfaltcollector. Het omzetten van deze warmte in elektriciteit is uiterst inefficiënt. Zelfs met een perfecte technologie kan maar hooguit 5% van de warmte uit de collector omgezet worden in elektriciteit (dit is de zgn. Carnot-limiet).

Er zijn natuurlijk nog meer 'opbrengsten', zoals de reeds genoemde langere levensduur van het asfalt. Dit betekent minder wegwerkzaamheden (en minder files) en door een sneeuwvrij wegoppervlak een grotere verkeersveiligheid. Bij verwarming van het wegdek in de winter is ook geen strooizout meer nodig. Als de warmte (koude) afkomstig van de collector gebruikt wordt voor verwarming (koeling) van gebouwen, zijn er minder energiekosten dan voor de traditionele manieren van verwarmen (of koelen). Voor verwarmen wordt een reductie van 20 tot 40% genoemd en voor koeling wordt een reductie van 60 à 80% ten opzichte van de conventionele systemen.

En dan is er natuurlijk de winst voor het milieu, er wordt immers op duurzame wijze warmte gegenereerd (maar hier kan moeilijk een exacte waarde aan gekoppeld worden).



Figuur 21: Vermogen van de asfaltcollector gerangschikt volgens aantal uren van voorkomen en invoertemperatuur.

Elk wegoppervlak van asfalt is bruikbaar voor het aanbrengen van een asfaltcollector. Inclusief de snelwegen is het potentieel in theorie enorm, maar de implementatie wordt vooral beperkt door de mogelijkheden voor opslag en gebruik van de verkregen warmte. In de praktijk komen dan ook alleen locaties in aanmerking waar wegen en bebouwde omgeving bij elkaar in de buurt zijn. Het meest kansrijk voor toepassing lijken nieuwbouwprojecten, in het bijzonder geldt dit voor nog aan te leggen bedrijventerreinen. Toepassingen in snelwegen komen minder in aanmerking omdat deze juist op afstand van bebouwing worden gehouden.

3.3 Economische aspecten

De wegdekcollector kan beschouwd worden als een goedkope zonnecollector, terwijl het qua opbouw vergelijkbaar is met een klassiek vloerverwarmingsysteem. In de literatuur echter zijn heel weinig gegevens voorhanden om een betrouwbare kosten en baten analyse te maken. Men stelt dat het totale systeem de kosten van nieuwbouw met 12% zouden verhogen.

Voor de kosten voor het aanbrengen van een asfaltcollector met buizen in een weg worden bedragen genoemd tussen 80 en 120 €/m². Gegevens die de totaalkost in rekening brengen zijn er niet. Een schatting voor de aanlegkost van de transport- en distributieleidingen naar de opslagplaats, materiaal en manuren inclusief, varieert tussen 100 en 200 € per lopende meter.
Een fictief voorbeeld zou dan kunnen zijn:

Parameter	Bedrag

Lengte weg [m]	100

Breedte weg [m]	10

Lengte distributiesysteem [m]	250

Collectorkost [€/m²]	100

Overige kosten (manuren, …) [€/m]	150

Totaalkost [€/m²]	137,5

Tabel 7: Afschatten van de totaalkost per vierkant meter voor een asfaltcollector met buizensysteem. (bron: ECN-BKM-2011)

Het aangebrachte buizenregister heeft een verwachte levensduur van 30 jaar, veel langer dan de verwachte levensduur van het asfalt. De geschatte verlenging op de levensduur van het asfalt bedraagt 7 a 8 jaar. De toplaag van het asfalt kan indien nodig vervangen worden zonder extra moeilijkheden. Deze feiten zijn van belang in het schatten van de mogelijke opbrengsten van een asfaltcollector installatie. Opnieuw speelt het gebrek aan harde gegevens hier parten en wordt een rekenvoorbeeld gehanteerd met afgeschatte (gemiddelde) data uit verschillende bronnen. Daarbij zijn de bedragen uit Tabel 7 gebruikt.

Parameter	Bedrag
Aanlegkost [€]	137,5

Levensduur [jaar]	30

Jaaropbrengst [kWh/m²]	8.333

Totaalkost duurzame warmte [€/kWh]	0,016

Verlies door opslag en terugwinnen [%]	30

Totaalkost laagwaardige warmte [€/kWh]	0,024

Tabel 8: Afschatten van de totaalkost per kWh voor de geproduceerde warmte van een asfaltcollector na seizoensopslag.

Uit Tabel 8 volgt een totaalkost van 2,4 cent per geproduceerd kWh laagwaardige warmte. Dit is een ondergrens bij gebrek aan informatie, waarbij geen rekening gehouden is met de kosten voor exploitatie en specifieke omstandigheden zoals klimaat, schaduw, zout strooien, traditionele verwarming, …

3.4 Duurzaamheidsaspecten

Volgens Road Energy Systems® is de potentiële milieuwinst met hun systeem als volgt:

"Met een asfaltcollector van 10.000 m² kan 300.000 m³ gas per jaar bespaard worden, waarmee een CO_2 reductie van ca 140.000 kg/jaar behaald wordt. Met dit oppervlak kan ca 50.000 m² kantoorruimte of 400 woningen van energie worden voorzien ten behoeve van koeling en verwarming."

Ze geven evenwel geen specifieke details vrij wat betreft de berekening of de eigenschappen van hun systemen.

4 Betoncollectoren

4.1 State of the Art

Analoog aan de asfaltcollector kunnen grote oppervlaktes beton ingeschakeld worden voor het verzamelen van warmte/koude. De technische principes zijn heel gelijkaardig aan die van betonkernactivering.

Betonkernactivering (BKA) is het verwarmen of koelen van een ruimte door een vloeistof, meestal water, te pompen door diffusiedichte leidingen die in de kern van de betonnen vloer of het betonnen plafond zijn aangebracht en niet in de dekvloer. Met maakt dus gebruik van de gebouwmassa met als doel een aangenaam en behaaglijk binnenklimaat te creëren.

De betoncollector zelf bevindt zich in de dekvloer en wordt blootgesteld aan zonnewarmte. Hij maakt dus gebruik van de zon om warmte te verzamelen en af te voeren naar het verbruikspunt. De toepassingen, de technische uitwerking en de kostprijzen van het systeem zijn heel gelijkaardig aan die van de asfaltcollector uit het vorige hoofdstuk en er wordt dan ook niet veel dieper op ingegaan.

Zowel de asfaltcollector als betoncollectoren zijn uitwerkingen van een proces dat *warmteaccumulatie* wordt genoemd. Warmte van een *warmtebron* wordt opgeslagen in een *medium* om die op een later moment te gebruiken. Het medium dat hiervoor geschikt is, is o.m. water, beton, baksteen, speksteen, paraffine, vaak gewoon benoemd als constructie. Bepalende eigenschap is de warmtecapaciteit van de constructie.

Soortelijke dichtheid ρ [kg/m³]	Soortelijke warmte c [kJ/kgK]	Soortelijke warmtecapaciteit C [kJ/m²K]	Warmtegeleidings-coefficïent λ [W/mK]
2400	0,92	2210	2,00

Tabel 9: Materiaaleigenschappen voor gewoon beton.

4.2 Voorbeelden

4.2.1 Omnisportbaan Apeldoorn

Het skeeler- en ijsbaan complex van Apeldoorn is voorzien van een Warmte/Koude-installatie met twee bronnen (WKO). De koude en warme bron liggen 200 m uit elkaar op een diepte van 190 m. De koeling van de sporthallen verloopt via de luchtbehandeling met koude uit de ondergrondse koudebron. Tijdens de wintermaanden wordt die koudebron ‘opgeladen’, waardoor koeling van Omnisport gegarandeerd is zonder inzet van een energetisch ongunstige koelmachine.

Tijdens de zomermaanden wordt via een collector in het beton van de 400m skeelerbaan (5200 m²) zonnewarmte opgevangen en afgevoerd naar de ondergrondse warmtebron. Gemeente Apeldoorn greep de aanwezigheid van de betoncollector aan voor het realiseren van een ijsbaan.

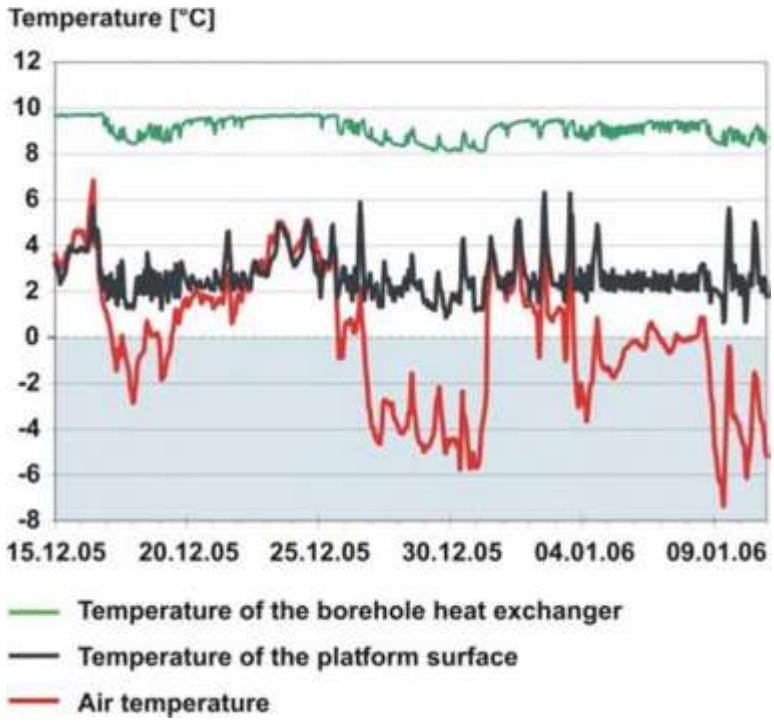
Het is nu mogelijk al bij een buitentemperatuur van +6 C, afhankelijk van de windkracht en neerslag, water op het asfalt van de skeelerbaan te spuiten om een 400 m openluchtijsbaan aan te leggen. Om dit te bereiken wordt het betonoppervlak dan met glycol van -12 C gekoeld.

4.2.2 Academy of Engineering in Delft

Het 4000m² grote dak van het nieuwe gebouw vervult naast parkeerplaats ook nog een andere rol. In het beton zijn kunststof buizen ingewerkt die zorgen voor de uitwisseling van koude en of warmte met de opslag in een ondergrondse bron

4.2.3 QuaWiDis

Het laboratorium voor Geotechnieken van de Technische universiteit van Darmstadt test een systeem voor het verwijderden van ijs op wegen op basis van boorput energie en betoncollectoren.

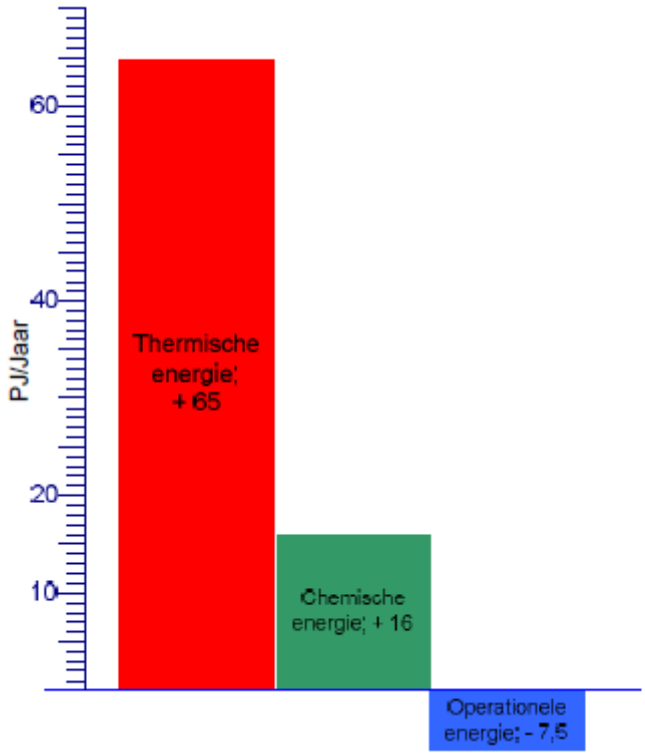


Figuur 22: QuaWiDiS - testen om met betoncollectoren de wegen ijsvrij te houden. [bron: F. Clauss TU Darmstadt]

5 Warmte uit rioleringen

5.1 State of the Art

Een vaak vergeten bron van warmte is ons afvalwater. Een modern huishouden verliest 30% tot 40% van zijn warmte via het rioolputje: afwaswater, douchewater, vaatwasmachine, wasmachine... Dat betekent dat er door de rioolbuizen veel energie vloeit, die bovendien vaak nog een vrij hoge temperatuur heeft. Een bijkomend voordeel is de beperkte afstand tussen aanbod en consument. Figuur 23 toont een schatting van de energie inhoud op jaarbasis voor het Nederlandse rioleringssysteem.



Figuur 23: Energie in het Nederlandse rioolsysteem. [bron: H. de Brauw, Tauw]

Rioolwarmtewisselaars zijn systemen waarbij de collectorbuizen in de onderste helft van de betonnen rioolbuis ingebouwd zitten. Dit kan geïntegreerd zijn bij installatie, of later toegevoegd worden als inbouw. Tauw België nv rapporteert dat de kosten van een rioolbuis met warmtewisselaar tot 500% hoger liggen dan een standaardbuis en dat de gewonnen warmte kan oplopen tot 2kW/m. Betonnen rioolwarmtewisselaars kunnen vrij verval systemen zijn of gebruik maken van persleidingen.

Een andere optie is de integratie van de warmtewisselaar in een HDPE buis (high density poly ethylene). De kosten van dergelijke buizen liggen slechts 30% boven die van een standaard betonbuis, maar men rapporteert ook lagere opbrengsten: 0,5kW/m.

Het aanbrengen van warmtewisselaren in de bodemhelft van rioolbuizen brengt enkele technische complicaties met zich mee. Rioolwater is vaak vervuild en de sedimentatie of aangroei van biofilm als gevolg daarvan, doet afbraak aan de performantie van het systeem. Een mogelijke oplossing hiervoor is de installatie van een externe rioolwarmtewisselaar met mechanische en biologische filtering/beluchting om de vorming van sedimentatie en biofilm tegen te gaan. Tauw rapporteert opbrengsten hoger dan 150kW voor dergelijke systemen.

6 Oppervlaktewater

6.1 State of the Art

Met een hoge soortelijke warmtecapaciteit lijkt water het ideale opslagmedium te zijn. Een kubieke meter oppervlakte water heeft over een gemiddeld seizoen 10 kWht aan potentiële warmte energie. Voor een land als Nederland, met 7500 km² aan oppervlaktewater en een gemiddelde diepte van 2m, betekent dit 150.000 GWht beschikbare warmte.

Oppervlaktewater inschakelen als primaire energiebron lijkt dus heel wat troeven te hebben. [bron: IFtechnology]

<u>Voordeel tov WKO:</u>
40% minder grondwaterverplaatsing
Lagere investeringskosten
Lagere exploitatiekosten
20% energie/CO2 reductie

<u>Voordelen tov BWWS:</u>
30% minder luslengte en dus
Lagere investeringskosten
Lagere exploitatiekosten
> 20% energie/CO2 reductie

Bij intensiever gebruik van oppervlaktewater kunnen er zelfs bijkomende voordelen zijn voor de waterkwaliteit. Het introduceren van stroming in dode stukken, het afkoelen van water in de zomerperiode en de toenemende beluchting (bij een waterval uitlaat bvb) zorgen voor meer zuurstofgehalte en een verminderde kans op botulisme, blauwalg, stank, ... Bovendien heeft de stroming een lopende band effect en wordt zwerfvuil verzameld.

Uit de brochure voor warmtepompen van VEA en ODE halen we tot slot nog volgende tekst:

“Bij het gebruik van oppervlaktewater als warmtebron dient men vooral rekening te houden met de kwaliteit en de temperatuur van het water. De temperatuur zal tijdens de winter duidelijk dalen waardoor een groter volume aan water over de verdamper moet worden geleid. Na hoogwaterstand kan er ernstige vervuiling optreden. Een aftakking van het oppervlaktewater met hierin een horizontaal captatienet, zoals een grondwarmtewisselaar, biedt hier een oplossing. Deze warmtebron wordt weinig toegepast omdat een voldoende grote hoeveelheid water zelden beschikbaar is.”

Omdat warmtewinning uit grondwater dus niet vaak toegepast wordt, gaat deze sectie er ook niet veel dieper op in.

6.2 Regelgeving en heffingen

Bron: Landbouw en Visserij – Vlaamse Overheid

6.2.1 Bevaarbare waterlopen

De captatie van water uit bevaarbare waterlopen, kanalen en havens gelegen in het Vlaams gewest is geregeld in:

- het decreet van 21 december 1990 dat begrotingstechnische bepalingen en bepalingen tot begeleiding van de begroting van 1991 bevat, en alle latere wijzigingen;
- het besluit van 3 mei 1991 van de Vlaamse executieve dat meer informatie verschaft over de aflevering van vergunningen voor de captatie van water uit bevaarbare waterlopen, kanalen en havens gelegen in het Vlaams gewest.

Voor minder dan 500 m³/jaar is er een meldingsplicht, voor grotere volumes is er een vergunningsplicht van toepassing, aan te vragen bij de waterwegbeheerder. Dit geldt niet voor onbevaarbare waterlopen.

De vergunninghouder moet op de constructie van de watervang en waterlozing een apart debietmetingssysteem of tijdopnamesysteem plaatsen dat toelaat de gecapteerde en terug geloosde waterhoeveelheden vast te stellen.

Jaarlijkse retributie	
Waterafname in m³/jaar	**Kanalen en havens**
schijf van minder dan 1.000.000 m³	0,063149 EUR/m³

schijf van 1.000.000 tot 9.999.999 m³	0,036626 EUR/m³

schijf van 10.000.000 tot 99.999.999 m³	0,019336 EUR/m³

schijf boven 99.999.999 m³	0,003820 EUR/m³

Tabel 10: De jaarlijkse retributie op de captatie van oppervlaktewater uit bevaarbare waterlopen, kanalen en havens per schijf en per m³

Het totaal verschuldigde bedrag kan maximaal met de helft worden verminderd bij teruglozing van het gecapteerde water in dezelfde waterweg. Deze bedragen worden jaarlijks gekoppeld aan de schommelingen van het indexcijfer van consumptieprijzen en zijn exclusief 21% btw.

Er geldt een retributievrijstelling voor watercaptaties van minder dan 500 m³/jaar. In de Kempen is er een minimumrecht van 181,96 euro verschuldigd voor watercaptaties voor landbouwdoeleinden.

6.2.2 Onbevaarbare waterlopen

De captatie van water uit onbevaarbare waterlopen is niet meldings- en ook niet vergunningsplichtig zolang de oevereigenaar het water uit de onbevaarbare waterloop haalt zonder daarvoor vaste constructies of bouwwerken op te richten. Voor constructies of bouwwerken moet een machtiging van de waterbeheerder en een bouwvergunning bekomen worden.

7 Restwarmte uit WKK

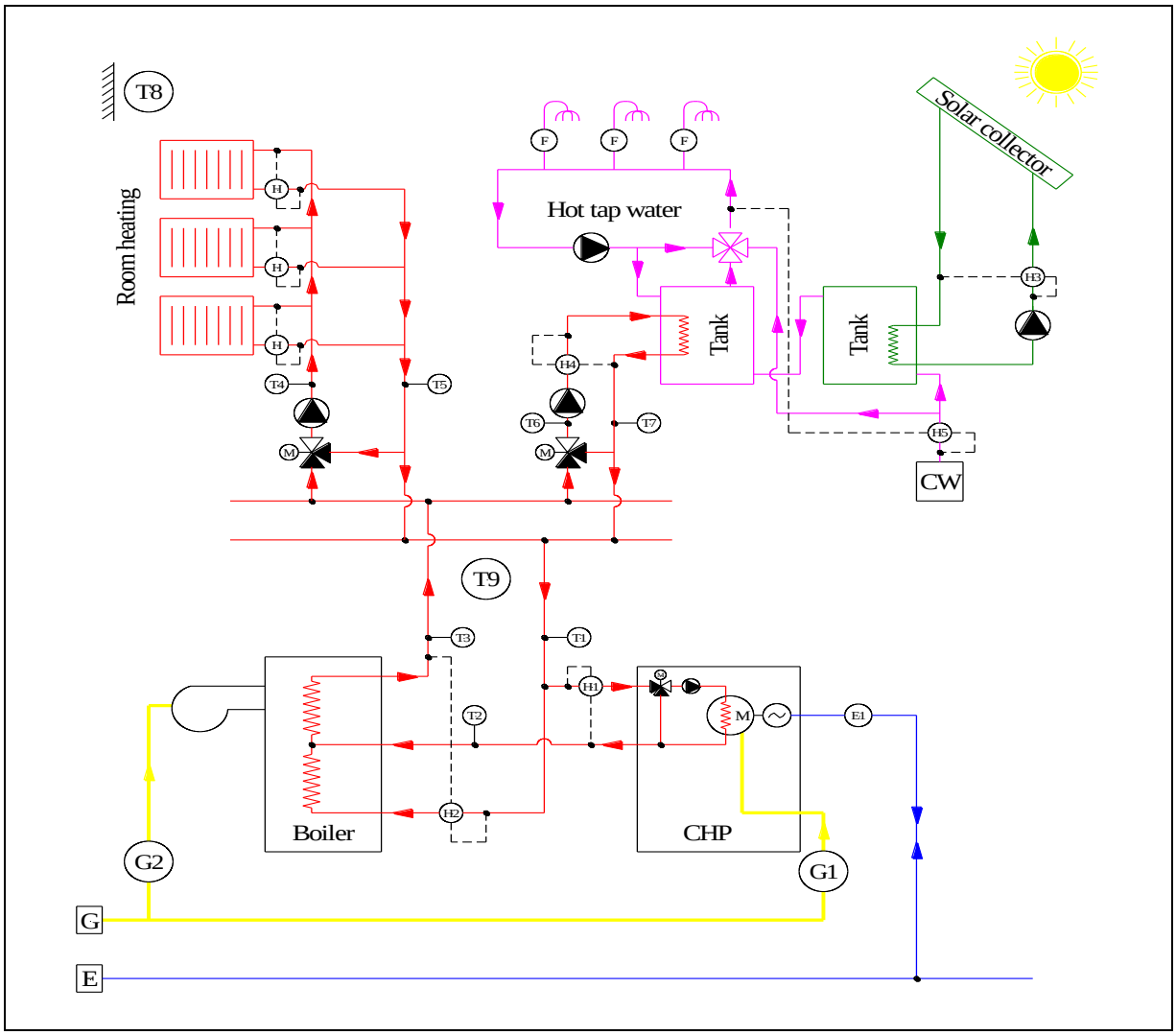
De term warmtekrachtkoppeling (WKK) wordt gebruikt voor processen waarin simultaan warmte en elektriciteit wordt opgewekt. Deze gecombineerde productie geeft extra voordelen. Vaak wordt door de eindgebruiker enkel laagwaardige warmte gevraagd, bijvoorbeeld voor sanitair warm water of verwarming. Ideaal wordt dan door een WKK hoogwaardige warmte eerst omgezet naar mechanische energie en vervolgens via een generator omgezet in elektriciteit, waarna de resterende warmte voor de gevraagde toepassingen benut kan worden.

De installatie dicht bij de eindgebruiker plaatsen heeft het voordeel dat de thermische en in mindere mate elektrische verliezen beperkt blijven. Elektriciteit kan dan wel vrij eenvoudig getransporteerd worden, warmte vraagt een grote inspanning en gaat gepaard met grotere verliezen. Eerder werden kostprijzen aangehaald voor warmtenetten, waar de hoofdbijdrage kwam van de geïsoleerde transportbuizen. Algemeen ligt het totale rendement van een warmtekrachtkoppeling hoger dan de rendementen voor afzonderlijke productieprocessen.

Voor een gedetailleerde bespreking van warmte (en elektriciteit) uit WKK wordt verwezen naar **WP2, subtaak 2.5, Ander Elektrisch Aanbod**. Daar staat een beschrijving met de state of the art en een beschrijving van de voornaamste karakteristieken. Hier wordt een in situ opgemeten installatie beschouwd.

7.1 WKK voor 12 woningen in Herenthout

Een appartementsgebouw met 12 woningen in Herenthout maakt gebruik van een WKK met interne verbrandingsmotor om stroom en warmte te produceren. Zonnecollectoren in combinatie met een klassieke boiler worden gebruikt als back-up voor de aanmaak van sanitair warm water. De WKK heeft een elektrisch vermogen van 5,5 kWe en een thermisch vermogen van 12,5 kW. De installatie treedt in werking bij voldoende hoge warmtevraag (typisch wanneer de buitentemperatuur onder 12°C zakt). De geproduceerde elektriciteit wordt aan het elektriciteitsnet geleverd.



Figuur 24: Hydraulisch schema van de verwarmingsinstallatie te Herenthout.

Technical data	Dachs - G5.5
Fuel	Natural gas
Electrical output	5,5 kW
Thermal output	12,5 kW
Fuel input	20,5 kW
Auxiliary demand	120W
Max. water flow temperature	83°C
Max. water return temperature	70°C
Voltage/frequency	3 x 230V/400V 50Hz
Electrical efficiency	27%
Thermal efficiency	61%
Fuel efficiency	88%
Noise level DIN45635-04	52 - 56dB
Service intervals	3500h
Min. methane number	35%
Dimensions	WxLxH 72cm x 107cm x 100cm
Weight	530 kg

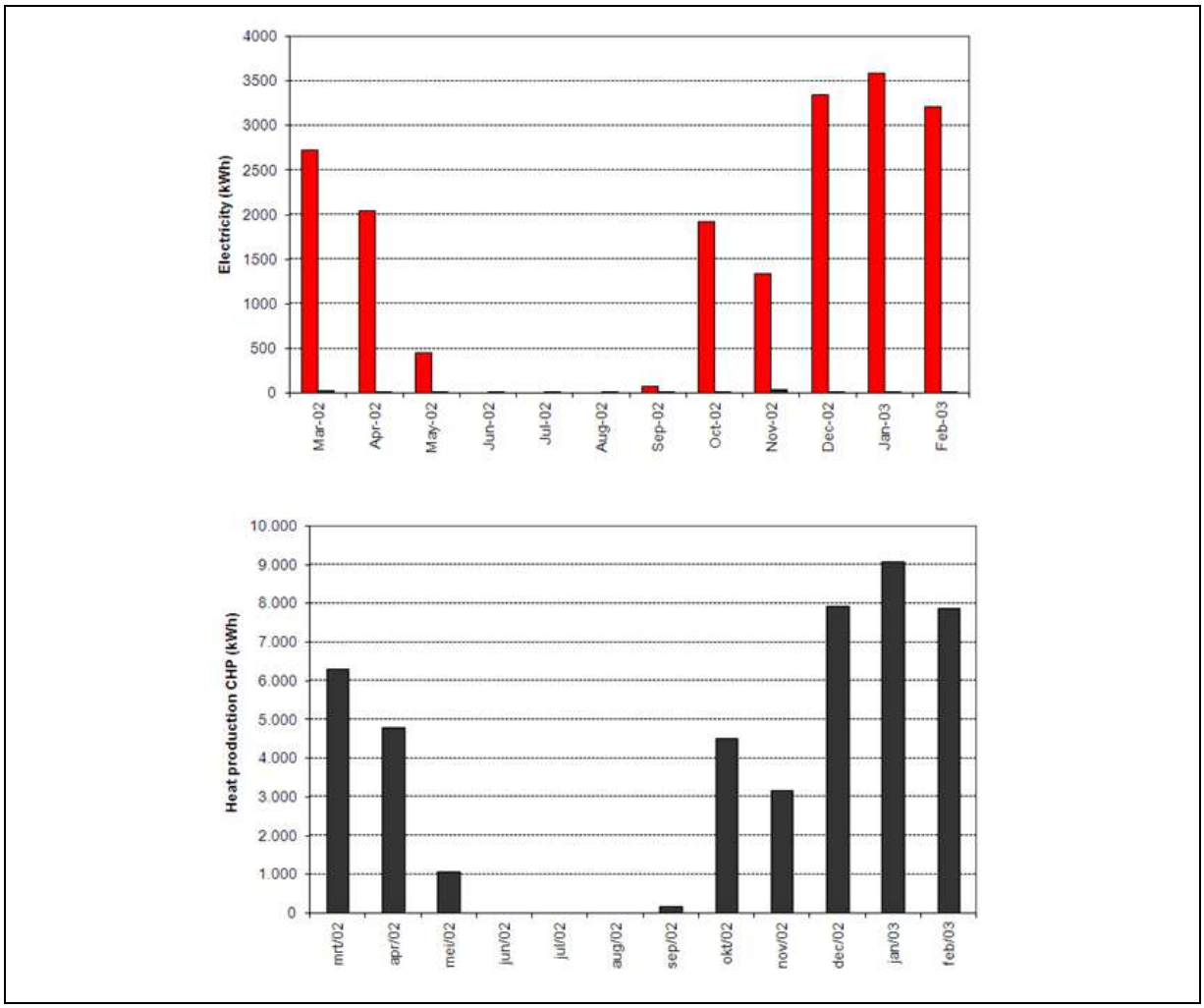
Tabel 11: Technische specificaties van de warmtekrachtkoppeling.

In totaal werden de energiestromen gedurende een jaar opgemeten door VITO, van 1 maart 2002 tot 28 februari 2003. Hieronder staan de maandelijkse gegevens grafisch weergegeven. De installatie draaide in totaal 6645 uren en verbruikte daarbij 8201 m³ aan aardgas. Met die hoeveelheid gas werd 18.700 kWh aan elektriciteit en 45.014 kWh aan warmte geproduceerd. Het elektrisch en thermisch rendement bedragen respectievelijk 24,3% en 58.6%, wat neerkomt op 83% benutting van de brandstof. Het eigenverbruik aan elektriciteit bedraagt op jaarbasis 344 kWh en 44% of 45.014 kWh van de totale warmtevraag, 102.279 kWh, wordt door de WKK ingevuld.

Op die manier bespaart de implementatie van een WKK-installatie jaarlijks 276,5 GJ aan primaire energie en wordt de CO2 uitstoot met 7.7 ton vermindert op jaarbasis.

De investeringskosten bedroegen in het jaar 2002 (zonder taksen of subsidies) € 12.169. De geproduceerde elektriciteit kon aan 42 €/MWh verkocht worden, wat per jaar neerkomt op € 780 voordeel. De warmte wordt rechtstreeks aan de gebruikers geleverd zonder tussenkomt van de sociale huisvestingsdienst en hoeft dus niet meegerekend te worden. Onderhoudskosten werden op jaarbasis geschat op € 241. Alles samen komt dit neer op een terugverdientijd van 22 jaren.

Gesteld dat alle geproduceerde stroom en warmte aan de gebruikers verkocht zou worden (fictief) dan zou de terugverdientijd teruglopen tot 7.9 jaar. Dit kan echter niet door verschillende belemmeringen en regelingen op organisatorisch niveau.



Figuur 25: Totale productie van elektriciteit (boven) en warmte (onder) van de WKK-installatie.

8 Afvalwarmte uit productieprocessen

8.1 State of the art

Bij de elektriciteitsopwekking, industriële processen en afvalverbranding komen grote hoeveelheden warmte vrij die geloosd worden omdat ze voor de betreffende partij geen waarde meer hebben. In Nederland bijvoorbeeld wordt door industriële partijen meer dan 100 PJ (28 TWh) aan warmte actief weggekoeld en daarnaast bestaan er nog andere grote restwarmtestromen. De vrijgekomen warmte is nuttig aan te wenden in het eigen productieproces, in de gebouwde omgeving of bij een ander bedrijf. De mogelijke toepassing wordt beperkt door hoge kosten, technische beperkingen, barrières voor samenwerking tussen leveranciers en afnemers en een gebrek aan afzetmogelijkheden voor warmte.

Belangrijke leveranciers van restwarmte zijn de elektriciteitsproducenten, de industrie en de afvalverbrandingsinstallaties. Vooral de chemische industrie en de raffinagesector produceren veel restwarmte. Een zeer groot deel daarvan heeft een te lage temperatuur om opnieuw bruikbaar te zijn in processen bij hetzelfde bedrijf. Ook bij de elektriciteitsproductie komt veel warmte vrij. Bij bepaalde installaties kan ervoor gekozen worden om extra warmte (aftapwarmte) te leveren ten koste van enig rendementsverlies. Basislasteenheden zijn hiervoor geschikter dan pieklasteenheden. Uit de rookgassen van WKK-installaties kan vaak nog laagwaardige warmte worden gewonnen.

De restwarmte van bepaalde industriële processen kan gerecupereerd en gebruikt worden voor een aantal toepassingen. Hieronder staan een aantal voorbeelden opgesomd.

- Restwarmte met een temperatuur van 30-40 °C kan gebruikt worden voor lage temperatuur verwarming zoals vloer- of wandverwarming.
- Restwarmte van een procesvloeistof of afvalwater kan gebruikt worden om een andere procesvloeistof of water voor te verwarmen.
- Restwarmte kan gebruikt worden voor de productie van koeling via het systeem van absorptiekoeling. Absorptiekoeling is niet geschikt voor de productie van ijswater of voor temperaturen onder nul.
- De warmte van de condensors van koelgroepen kan gebruikt worden bij de productie van warm water voor verwarming en kan afgestaan worden aan voedingswater voor stoomproductie of aan reinigingswater.
- De warmte geproduceerd door de persluchtcompressoren kan gerecupereerd worden voor ruimteverwarming.
- De warmte van verbrandingsgassen van een oven of verbrandingstoestel kan gebruikt worden bij voorverwarming van producten of het voorverwarmen van de ingaande lucht in het verbrandingstoestel.

De temperatuur van de restwarmte kan met een warmtepomp naar een hoger temperatuurniveau gebracht worden. Indien men in staat is deze warmte op te waarderen tot proceswarmte van hoge kwaliteit, bijvoorbeeld als middendrukstoom van 230°C, zijn grote besparingen mogelijk. Let wel, voor dergelijke toepassingen is het niet mogelijk om de vereiste temperatuurlift (circa 100°C) met conventionele warmtepompen te bereiken.

Dorset GM is een fabrikant die restwarmte gebruikt om een breed scala aan producten te drogen. De warme lucht is daarbij bijvoorbeeld afkomstig van een pluimveestal. In diezelfde agrarische sectoren geniet het produceren van energie uit de vergisting van mest veel belangstelling. Bij het proces ontstaat biogas dat kan dienen voor de opwekking van elektriciteit in een WKK. Het Nederlandse project EnergieRijk focust op dit thema. Doel is het gas uit de vergisten te kunnen gebruiken in de productie van bio-ethanol en algen.

Omdat restwarmte uit productieprocessen indirect aan bod komt bij de overige topics van het werkpakket, vooral als bron voor warmtenetten, wordt er hier niet dieper op ingegaan.

8.2 Technische voorwaarden

Om restwarmte te kunnen benutten moet er in de nabijheid van de bron behoefte zijn aan die warmte. De warmtebehoefte sluit bovendien best aan in volume, temperatuur- en drukniveau.

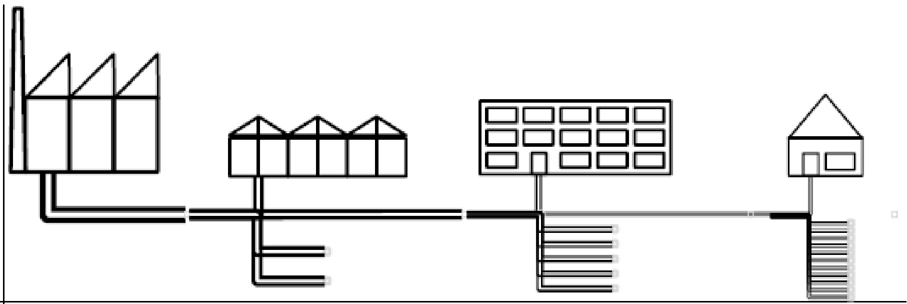
Gelijktijdigheid
Hoewel voor toepassingen binnen dit project de warmte naar een opslag zal worden, is het in het algemeen noodzakelijk dat de warmtebehoefte samenvalt met de tijd waarin restwarmte wordt geproduceerd. In veel gevallen is de vraag naar warmte bijvoorbeeld geconcentreerd in de ochtenduren en in de winter, terwijl de restwarmte continu vrijkomt. In een geoptimaliseerde bedrijfsvoering is warmtelevering aan de gebouwde omgeving slechts voor 2500-3000 vollasturen mogelijk (van Melick *et al.*, 2007). Bij glastuinbouwbedrijven vindt vaak warmteopslag in warmtebuffers plaats. Dit stelt de bedrijven in staat elektriciteit en CO_2 te produceren op het moment dat dit economisch het meeste oplevert. Warmteopslag wordt ook bij WKK-installaties in de gebouwde omgeving toegepast. Voor warmte van hoge temperatuur en druk (in de industrie) is opslagtechnologie niet commercieel beschikbaar, tenminste toch wanneer enkele rendabele technologieën beschouw worden.

Hoogwaardigheid (temperatuur- en druk)
Voor ruimteverwarming en voor de verwarming van glastuinbouwkassen volstaat warmte van lage temperatuur (< 100°C). Voor veel industriële processen is directe warmte of stoom van hoge temperatuur en druk vereist. In dat geval kan het probleem vaak lokaal verholpen worden met warmtepompen. Dit wordt succesvol toegepast in de gebouwde omgeving. In de industrie is veel warmte beschikbaar in het gebied van 50 tot 100 graden, maar technieken om deze temperatuur tot de gewenste temperaturen van boven de 100 graden te verhogen zijn nog niet beschikbaar.

Nabijheid
Warmte kan worden getransporteerd in de vorm van warm water of stoom. Transport gaat gepaard met verliezen en vereist extra kosten voor infrastructuur. Dit beperkt de afstand waarover warmte getransporteerd kan worden. De kosten en verliezen nemen toe

naarmate de transportafstand groter wordt en een transportafstand van 15 km wordt praktisch nergens overschreden (van Melick *et al.* ,2007). Warmteverliezen zijn te beperken door warmte te transporteren op een lager temperatuurniveau of met grotere volumes. De vereiste schaalgrootte is bij veel grote restwarmteleveranciers, zoals elektriciteitscentrales, niet te realiseren bij gebrek aan potentiële afnemers in de nabije omgeving.

Figuur 26 geeft een schematisch overzicht van mogelijkheden om de warmtevraag in te vullen, met en zonder warmtenetwerken. Het schaalniveau aan de rechterkant is het kleinst (individuele woningen) en aan de linkerkant het grootst (grootschalige warmtebronnen). Tevens weergegeven zijn mogelijke alternatieven per schaalniveau, zowel qua warmteaanbod als warmtevraag.



Schaal	>10MW	1-10MW	100kW-1MW	<100kW
Aanbod/vraag bij warmtedistributie	<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<Aanbod			
		Vraag>>>		
Sectoren	-Industrie -Raffinaderijen -Centrales -AVI's	-Glastuinbouw -Kleine industrie -Zeer grote utiliteits-bouw	-Grote utiliteitsbouw -Flatgebouwen	-Huizen nieuwbouw -Huizen bestaande bouw -Kleine utiliteits-bouw
Temperatuurniveaus	Hoog-Laag	Laag	Laag	Laag
Alternatieven: vraagbeperking	-Besparing -Procesintegratie		-Isolatie	-Isolatie -Passiefhuizen
Alternatieven: warmtetoepassing	-CCS			
Alternatieven: collectief warmte aanbod		-Geothermie -Biomassa	-Geothermie -Ketel -Biomassa	-Geothermie -WKO -WKK -Biomassa
Alternatieven: Individueel warmte aanbod	-WKK -Ketel -Proceswarmte	**-WKK** -Geothermie -WKO	**-Ketel** -WKK -WKO	**-HR-ketel** -Warmtepomp -Zonneboiler -Micro-WKK -Hout(pellet)kachel
Relatieve warmte-distributieverliezen		Zeer klein	Klein	Middelgroot – groot
Energiebelasting op brandstofinzet	Laag Centrales/WKK: geen	Laag WKK: geen	Middel/Hoog WKK: geen	Hoog
ETS/Niet-ETS	Meestal ETS (>20 MW)	Meestal geen ETS		

Figuur 26: Overzicht warmtenetwerken, schaalniveaus en alternatieven. (bron: Daniëls et al., 2011)

9 Warmte uit stadsdistributienetten

9.1 State of the art

Warmtenetten zijn het analoge concept aan het elektriciteitsnet: het net transporteert warmte van het productieproces naar de gebruiker. Daarvoor worden buizen gebruikt waarin warme vloeistof (meestal water) of stoom (onder hoge druk) getransporteerd wordt. Die buizen kunnen al dan niet ondergronds begraven liggen en moeten voldoende geïsoleerd zijn om de warmteverliezen te beperken.

In de literatuur is niet zo veel informatie terug te vinden over de opbouw en kostprijs van warmtenetten. Eigen aan warmtenetten is dat centrale opwekking in vele gevallen niet concurrerend is met decentrale opwekking omwille van de hoge kosten voor de warmteverdeling (beperken verliezen). In het bijzonder geldt dat voor biomassa-installaties, die bij huidige prijzen al met hogere kosten kampen dan installaties die stoken op olie of gas. Voor dergelijke bedrijven is uit ervaring vastgesteld dat die een warmtelijndichtheid (warmtevermogen per tracé) van minstens 2MWth/km nodig hebben om economisch rendabel te zijn.

In de 20/20/20 doelstellingen stelt de Europese Unie nochtans dat warmtenetten één van de zeven dringende infrastructuurprioriteiten zijn. Dit is noodzakelijk om ten volle decentrale energiebronnen en restwarmte te kunnen inschakelen. In het buitenland lopen al verschillende projecten. Recente successen in Scandinavië (62% van de Deense woningen zijn aangesloten op een warmtenet) zorgden voor een rijpe(re) technologie en doen bovendien de belangstelling ook nationaal terug aanwakkeren. Naast restwarmte kunnen warmtenetten ook groene warmte leveren wanneer ze verbonden worden met geothermische centrales of warmtekrachtinstallaties op biobrandstoffen.

In januari 2012 kwamen lokale besturen, netbeheerders, installateurs en bedrijven samen op een symposium over warmtenetten in Vlaanderen. Het hoofddoel was de voorbereiding op de aankoppeling van nieuwe industrie in warmtenetten, maatregelen ter bevorderingen van de ontwikkeling en het in kaart brengen van het potentieel aanbod. Voorlopig zijn er een aantal projecten die zich voornamelijk in de haalbaarheidstudie fase bevinden.

9.1.1 Soorten installaties

Naast het eigenlijke warmtenet, dus de buizen met warmte, omvat een verdelingsnet voor warmte ook de nodige installaties bij producent en afnemer. Het transportmedium is meestal water, aangevoerd met temperaturen tussen 70°C en 130°C en met een gecontroleerde terugvoertemperatuur die tussen 20°C en 30°C ligt.

Hoge aanvoertemperaturen zijn gebruikelijk bij uitgedijde oudere centrale warmtenetten of bij industriële netwerken. Bij nieuwere netten, vooral netten voor korte afstandsverwarming

bij woonwijken, wordt de aanvoertemperatuur meer en meer tot 70 °C beperkt waardoor warmteverliezen, en daaraan gekoppeld de investeringskosten voor isolatie van de leidingen, aanzienlijk verminderd wordt. In geval van commerciële of industriële netwerken is vaak warmte op een hogere temperatuur nodig (meer dan 130 °C). Naast warm water wordt hier thermische olie of stoom als transportmedium ingezet. De met dergelijke systemen verbonden bijzonderheden worden in het vervolg niet gedetailleerd weergegeven omdat de uitbouw van dergelijke netten sterk van individuele parameters afhangt (temperatuursniveau, warmtetransporterend medium, soort warmteverbruikers,enz.). We merken op dat het onderscheid tussen nabije warmte- en afstand warmtenet in hoge mate willekeurig en niet door technische verschillen begrensd worden. In dit kader wordt voor netwerken met een vermogen tot en met 10 MW het begrip nabije warmte gebruikt.

9.1.2 Opbouw van een installatie

Waterbehandeling is cruciaal: de pijpleidingen maken een groot deel van de investering uit en dus moet de levensduur ervan zo lang mogelijk zijn. Behandeling omvat zuurstofgehalte (tegen corrosie), kalkgehalte (tegen kalkafzetting), geleidbaarheid door zoutgehalte (tegen corrosie), …

Drukregeling verzekert op elk moment en elke plaats de gewenste druk. De druk moet zo geregeld worden dat het kringloopwater duidelijk boven de verzadigingsdampdruk ligt. In de praktijk is deze regeling afhankelijk van het volume en andere technische randvoorwaarden. Voor de decentrale warmtenetten volstaan eenvoudige membraanexpansievaten. Bij plaatsbeperking of bij grotere netten kunnen drukpompen en geregelde overloopventielen ingezet worden.

Circulatiepompen zijn noodzakelijk om de warmtedrager te transporteren.

Het warmtenet bepaalt in grote mate de investeringskosten. De gepaste keuze van pijpleiding en traject moet dus besproken worden. Daarbij spelen tal van bemerkingen een rol: positie van de productie, afstand en evolutie van verbruikers, grondwerken, materiaalkeuze.

9.2 Economische parameters

Resultaten die in deze sectie gerapporteerd werden, zijn gebaseerd op een studie over onrendabele toppen uitgevoerd in 2009 door VITO in opdracht van VEA [Moorkens, I. en Briffaerts, K., 2009]. De opdracht onrendabele toppen groene warmte kadert binnen het actieplan Groene Warmte dat door VEA opgesteld wordt en deel uitmaakt van het Nationaal Actieplan voor hernieuwbare energie van België. De onrendabele top (OT) van een investering is het productieafhankelijk gedeelte van de inkomsten dat nodig is om de netto-contante waarde van een investering op nul te doen uitkomen. De huidige steunmechanismen worden in de OT berekeningen in acht genomen. De OT geeft een indicatie over de extra steun die nodig is om dit soort investeringen aantrekkelijk te maken.

9.2.1 Bevraging bestaande netten in Vlaanderen

Om een zicht te krijgen op de kostprijs werden bestaande netten die ook voor de studie rond wetgeving warmtenetten bevraagd werden en hun medewerking hiervoor verleend hebben, bevraagd naar de opbouw en kostprijs. De meeste warmtenetten zijn ouder of zeer specifiek (bv. afvalverbrandingsoven).

Uit de contacten blijkt dat best een onderscheid wordt gemaakt tussen de bouwtechnische en installatietechnische kosten. Onder bouwtechnische kosten worden graafwerken, boringen, stabilisatie enz. verstaan. Onder installatietechnisch zitten vervat: de leidingen al dan niet met lekdetectie en zwerfstroombewaking, warmtewisselaars, pompen, inrichtingen aan de verbruikerszijde. De bouwtechnische kosten kunnen enorm variëren afhankelijk van de af te leggen weg. Belangrijke variaties worden veroorzaakt door de ondergrond, of er al dan niet over bestaande wegen moet aangelegd worden,….

warmtevoerend medium	**warm water**				**stoom**
warmte opwekking	biogas/ppo dual fuel	WKK aardgas; ketels aardgas, ketels zware SO	HVI	HVI	
Δ T of druk	ΔT 30°C	ΔT 45°C	ΔT 40°C	ΔT 30°C	60bar
getransporteerd (kW)	200 - 800 kW	piek 30 MW	39,3 MWh	153 MWh	
lengte (m)	1200	11000	8000	200	
diameter DN	110				200
back up	dual fuel motor producentkant en bestaande ketel bij klant	full back up vanuit centrale + mobiele SO ketel, net redundant want in lus	twee gasgestookte ketels	ketel stookplaats klant, ten laste klant	
buffer	leiding is buffer	geen buffer	geen voor warmte		
leidingen	geïsoleerde stalen leidingen, 10 cm PUR	oud: staal buiten + isolatie +staal binnen; nieuw: buitenbuis kunststof (PE)	staal + PU + PE isolatiemantel	geïsoleerde stalen leidingen	
isolatie leiding (cm)	10	5	5	4	
materiaal isolatie	PUR	PU	PU-schuim	PU-schuim	
lekdetectie	ja	ja	oorspronkelijk	nee	
verliezen		beperkt	~ 3%	50 W/m	
kostprijs		richtwwaarden			
materiaal	250000			geen idee	
graafwerk	9600	900			
plaatsing en laswerk +warmtewisselaars aan beide zijden met pomp	395000				
permanante lekdetectiebewaking	15000				
taksen		500			
overhead (engineering,…)		100			
onderhouds- en uitbatingskost					
onderhoud (jaarlijks)	~ 10000	< 1% van de investeringskost jaarlijks	5% opbrengst	weinig, tenzij lekken	
uitbatingskost / hulpenergie	~ 5000				
totaal investeringskost	**669600**				
inv kost/m (€/m)	**558**				
inv kost/m (€/m) schatting		**1500**	**350 - 400 (kort) 250 - 300 (lang)**		**2000**

Tabel 12: Gegevens uit de bevraging over warmtenetten in Vlaanderen.

Tabel 12 bevat gegevens van vier netten op warm water en één stoomnet. Vermits de bestaande netten meestal oudere netten zijn, is de kostprijs hiervoor niet meer exact op te geven. De uitbaters hebben soms toch geprobeerd de kostprijs van een nieuw te installeren net in te schatten. De (geraamde) kostprijzen variëren sterk. Het is niet steeds duidelijk welke kosten meegenomen worden. Voor de eerste uitbater is een gedetailleerde

kostprijs beschikbaar. Het betreft dan ook een recent opgestart net. De derde raming (HVI) zit een stuk lager dan de kosten van dit bestaande netwerk. Vermoedelijk zijn hier geen kosten voor warmtewisselaars meegenomen. De tweede raming (WKK en ketels aardgas en zware SO) springt er uit aan de bovenkant (1500 €/m). Hier zijn wel taksen (500 €/m) en engineering kosten (100 €/m) meegerekend die bij de andere ramingen vermoedelijk niet ingecalculeerd zijn.

warmtevoerend medium	**warm water**	
warmte opwekking	biogas/ppo dual fuel	biobrandstoffen
Δ T of druk	ΔT 30°C (110 - 80)	90 - 50/60
getransporteerd (kW)	600 kW (1200 kW op termijn)	24 MW
lengte (m)	1000	~8000
diameter DN	100 (PN10)	506
back up	dual fuel motor producentkant en bestaande ketel bij klant	stookolieketel bij klant
buffer	leiding is buffer	
leidingen	staal in voorgeïsoleerde leidingen	
isolatie leiding (cm)		
materiaal isolatie		
lekdetectie	ja	ja
verliezen		
kostprijs		
aansluiting aan productiezijde (aansluiting, isolatie, installatie van pomp, warmtewisselaar, expansievat)	31840	
transportleiding, installatie, engineering, lekdtectie	253595	2328000
graafwerken	15000	1424000
aansluiting aan verbruikerszijde (aansluiting, isolatie, installatie van pomp, warmtewisselaar, expansievat)	36885	
warmtewisselaars productie- en verbruikerskant		451200
pompen en waterbehndelingssysteem		262800
elektrotechniek, sturingen, expansie installetie		512337
gebouw		288000
ontwerp, project ontwikkeling		500000
onderhouds- en uitbatingskost		
totaal investeringskost	337320	5766337
inv kost/m (€/m)	337	~680

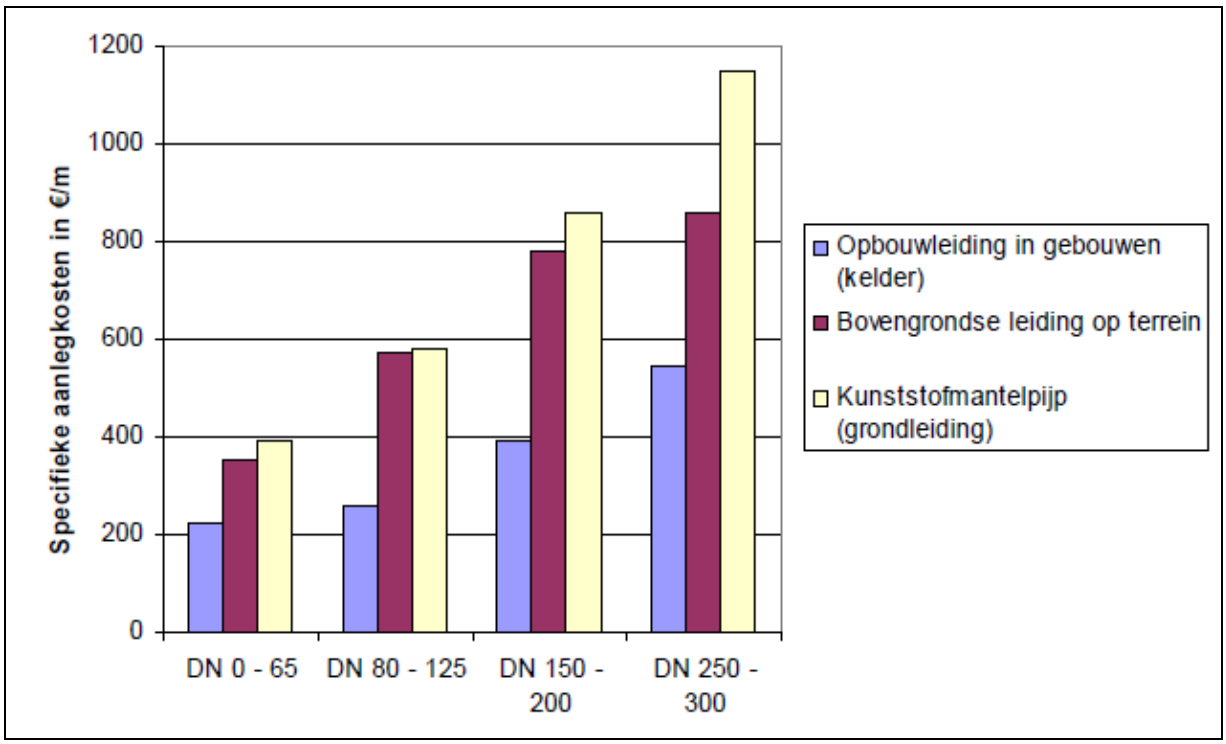
Tabel 13: Gegevens over warmtenetten uit offertes en ramingen.

Bij de bevraging werden aanvullende gegevens verkregen uit offertes en ramingen. Het betreft hier dus geen installaties die al in de praktijk gerealiseerd werden. De gegevens worden weergegeven in Tabel 13. Het betreft hier ramingen voor het transport van een kleiner en groter vermogen.

9.2.2 Richtwaarden en kostprijzen uit de literatuur

Tot slot geven we nog even een aantal richtwaarden uit de literatuur mee.

Leitfaden [4] gaf richtwaarden op voor de volledige aanlegkosten van een warmtenet. Ze zijn exclusief de noodzakelijk installaties voor warmteopwekking en de installaties aan de verbruikerszijde. Wel inclusief zijn de pijpleidingen, de montage, de bouw- en graafwerken. In hun overzicht was 40 tot 60% van de kosten bestemd voor de bouw- en graafwerken. De specifieke kostprijs van een project zal dan ook sterk afhangen van de specifieke omgeving waar het netwerk aangelegd zal worden. In Figuur 27 staan de richtwaarden gerangschikt in prijs per lopende meter en voor verschillende diameters van buizen.



Figuur 27: Richtwaarden voor de aanlegkosten van een warmtenet per diameter (in mm). [Leitfaden, 2000]

In een studie over de haalbaarheid van een warmtenet in de regio Twente zijn volgende kengetallen gebruikt voor de bepaling van de financiële kosten:

Transportleidingen	€/km
Groene weide	500.000

Matige bebouwing/industrie	800.000

Stedelijk gebied	1.500.000

Distributieleidingen en afleverset	**€/aansluiting**

Woonwijk nieuwbouw	2400

Woonwijk uitbreiding	6000

Bedrijventerrein nieuw	30.000

Bedrijventerrein bestaand	80.000

Tabel 14: Kengetallen uit een haalbaarheidsstudie voor een warmtenet in Twente. [Hoogsteen, R., 2003]

Een derde en laatste studie die aangehaald wordt bevat richtprijzen afkomstig van concrete projecten in Duitsland en Oostenrijk: 'Biomasseheizungen für Wohngebäude mit mehr als 1000 m²
Gesamtnutzfläche' van het Bremer Energie Institut. Het gaat hier bovendien om kleinere vermogens zoals toegepast in wooneenheden en gebouwen uit de dienstensector. Ze zijn dus toepasselijk voor het Smart Geotherm project.

Kostprijs warmtenet [€/kW[	Gemiddeld vermogen	Bron
53	255	BEI, 8 pelletinstallaties Hessen

120	467	BEI, 51 houtsnipperinstallaties

Tabel 15: Kostprijs warmtenetinstallaties in Hessen, Duitsland. [BEI]

10	Enkel warmtenet	Warmtenet + warmtewisselaar	Warmtenet + warmtewisselaar + electro- en verwarmingsinstallatie
Kostprijs [€/kW]	35	202	279

Gemiddeld vermogen [kW]	130	125	97

Kostprijs [€/m]	69	106	252

Gemiddelde lengte	60	238	122

Tabel 16: Kostprijs warmtenet van installaties in Steirmark, Oostenrijk. [BEI]

De prijs per meter warmtenet voor kleinere vermogens ligt aanzienlijk lager dan de prijzen voor grote vermogens, zie bijvoorbeeld het verschil tussen Tabel 13 en Tabel 16.

10.1 Voorbeelden in Vlaanderen

10.1.1 SPE-elektriciteitscentrale op de site Ham te Gent

De hoofdactiviteit van SPE site Ham bestaat uit de productie van zowel elektriciteit voor de Belgische markt, als warmte voor het stadsverwarmingnet. SPE biedt zowel particulieren, kleine bedrijven als grote ondernemingen een waaier van elektriciteits- en gasproducten aan. Dit is mogelijk dankzij de eigen productie van elektriciteit en de strategische samenwerkingsverbanden op de vrijgemaakte energiemarkt. Luminus is het handelsmerk van alle SPE producten. Daarnaast recupereert SPE op de site Ham warmte onder de vorm van oververhit water voor de voeding van het stadsverwarmingsnet in de stad Gent.

De SPE-centrale gebruikt voor de productie een STEG (stoom- en gasturbine) met warmterecuperatie voor een stadsverwarmingsnet met oververhit water (90°C a 130°C). Deze warmtekrachtinstallatie met een totaal thermisch vermogen van 102 MWth fungeert als basislasteenheid en produceert gedurende 7.500 à 8.000 uren per jaar elektriciteit.

De STEG-installatie bestaat dus uit volgende onderdelen:

- Eén gasturbine van 42 MWe, gestookt op aardgas.
- Eén recuperatieketel (K20) van 15,6 MWth voor stoomproductie en warmterecuperatie
  onder de vorm van oververhit water voor het stadsverwarmingnet.
- Eén condensatiestoomturbine van 13 MWe met twee stoomaftappen (van respectievelijk 10 MWth en 7,6 MWth).

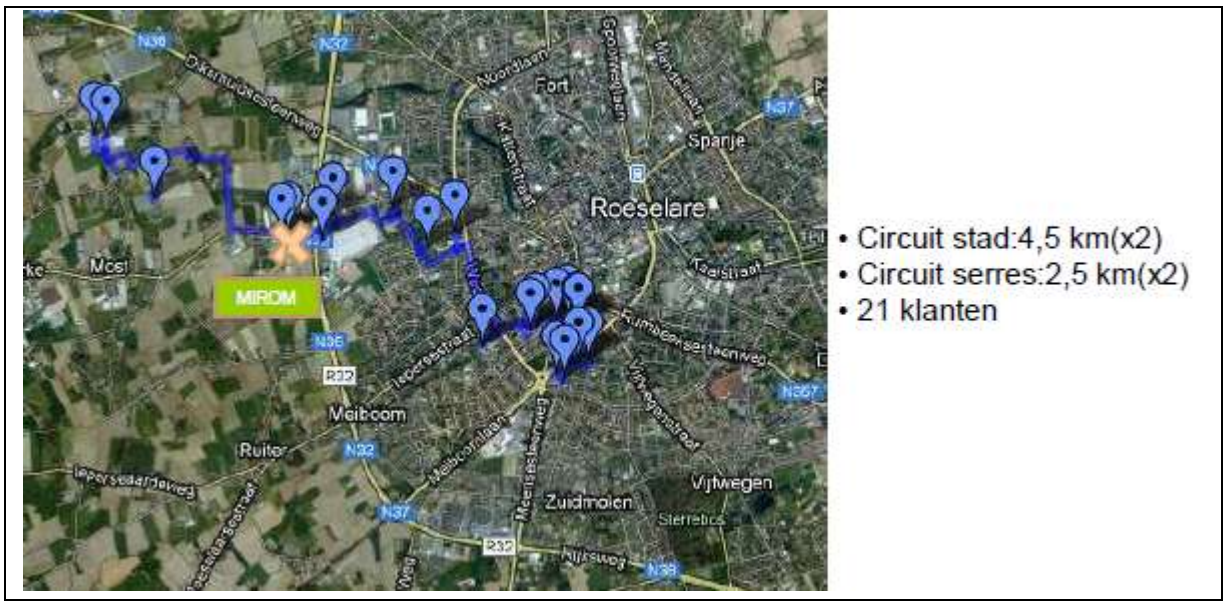
Om bij stilstand van de STEG-installatie aan de warmtevraag van het stadsverwarmingnet en aan de interne warmtebehoefte van de centrale te kunnen voldoen, staan op de site vijf stoomketels opgesteld die samen de strengste winterpiek kunnen dekken door stoomlevering aan het 5 bar stoomnet.

De restwarmte voorziet 72 afnemers, inclusief het AZ en Ugent, in een groot deel van hun behoefte naar warmte. Het totale netwerk is om en bij de 15km lang.

10.1.2 MIROM – Roeselare

In Roeselare zijn 21 grote verbruikers en 72 huishoudens aangesloten op een warmtenet van MIROM (Milieuzorg Roeselare en Menen). Het 15km netwerk wordt geïllustreerd in Figuur 28 en Figuur 29.

Figuur 28: Warmtenet MIROM voorziet grote verbruikers en huishoudens in de streek van Roeselare van warmte.



Figuur 29: Plattegrond van het MIROM warmtenet.

10.1.3 IVBO – Brugge

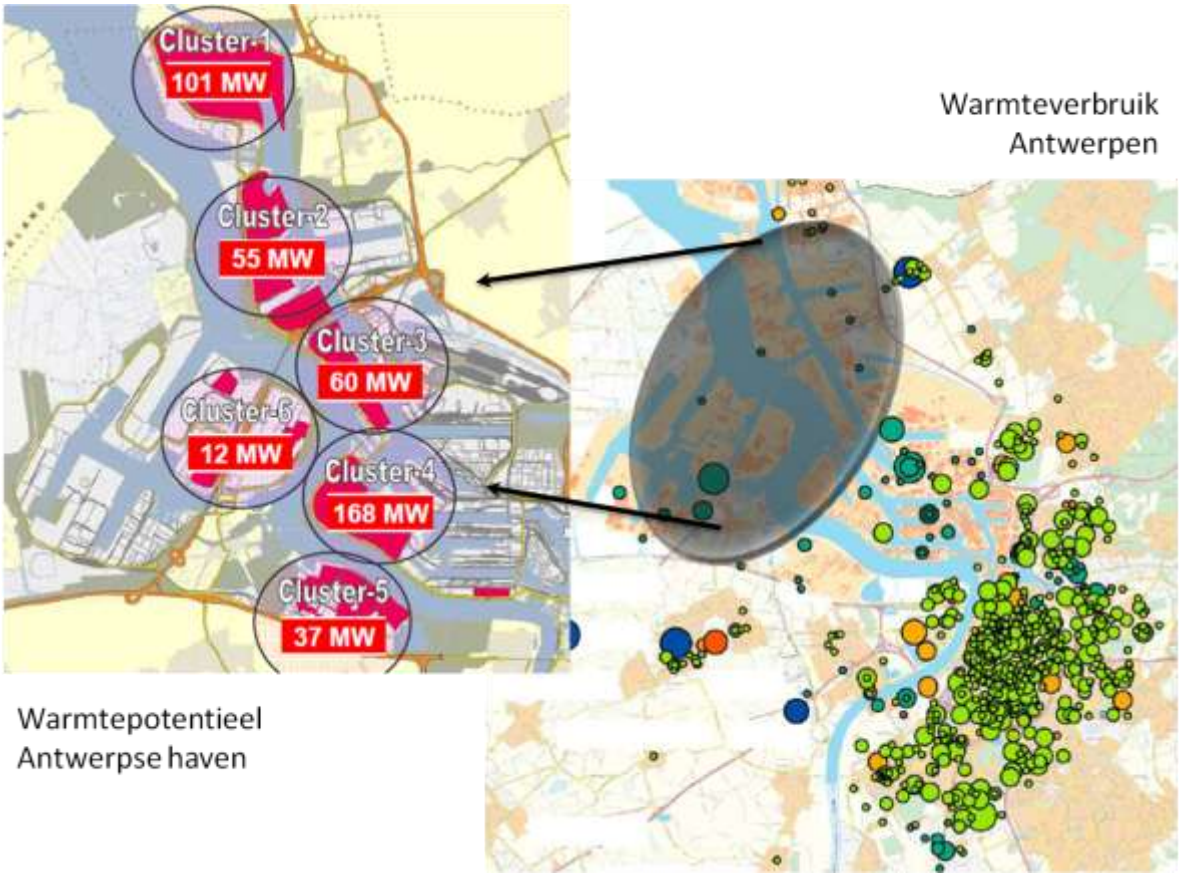
Het Intergemeentelijk samenwerkingsverband voor Vuilverwijdering en -verwerking in Brugge en Ommeland, kortweg IVBO, zorgt in de eerste plaats voor de inzameling en verwerking van huishoudelijk en bedrijfsafval van Brugge en omstreken. In totaal wordt het afval van ongeveer 230.000 inwoners opgehaald. De vennootgemeenten zijn Beernem, Blankenberge, Brugge, Damme, De Haan, Jabbeke, Oostkamp, Zedelgem en Zuienkerke.

Qua energierecuperatie levert IVBO onder andere warmte aan het Ziekenhuis AZ St Jan en de gevangenis van Brugge. En met de geproduceerde stroom wordt elektriciteit gemaakt die grotendeels dient voor eigen verbruik. Het warmtenet is in totaal 22km lang en bedient grote verbruikers met 12MW aan restwarmte.

10.1.4 Andere voorbeelden

Brussel – Bervoets: 240 wooneenheden – 2.4km netwerk – GasWKK 207kW en 3 Gasboilers van 720kW
Louvain-la-Neuve: universiteitscampus – WKK op gas (3x3,3MW) en gasboiler 29MW.
Luik – Sart Tilman: universiteitscampus – 22km netwerk - gasboiler 74MW
Libin: 10 publieke en 13 privé gebouwen – 713m netwerk – biomassaketel 550kW
Attert: publieke gebouwen – biomassaketel 220kW

In aanvangsfase: valorisatie van de industriële restwarmte in de haven van Antwerpen. (Figuur 30) Het havenbedrijf onderzoekt de mogelijkheden voor warmtelevering aan de stad vanuit één of meerdere raffinaderijen. Optimale restwarmtevalorisatie is een sleutelelement in de transitie naar een duurzame en competitieve wereldhaven. Men zoekt in eerste instantie een antwoord op hoe groot het potentieel is dat kan worden aangeboord en welke hinderpalen er nog zijn.



Figuur 30: Haalbaarheidsstudie restwarmtevalorisatie Antwerpse haven.

11 Neerslagwater

Actieve koeling in klassieke systemen wordt al vaak vervangen door systemen die werken met geothermische energie, grondwater of omgevingstemperatuur. Onder bepaalde omstandigheden is dan ook verwarming mogelijk.

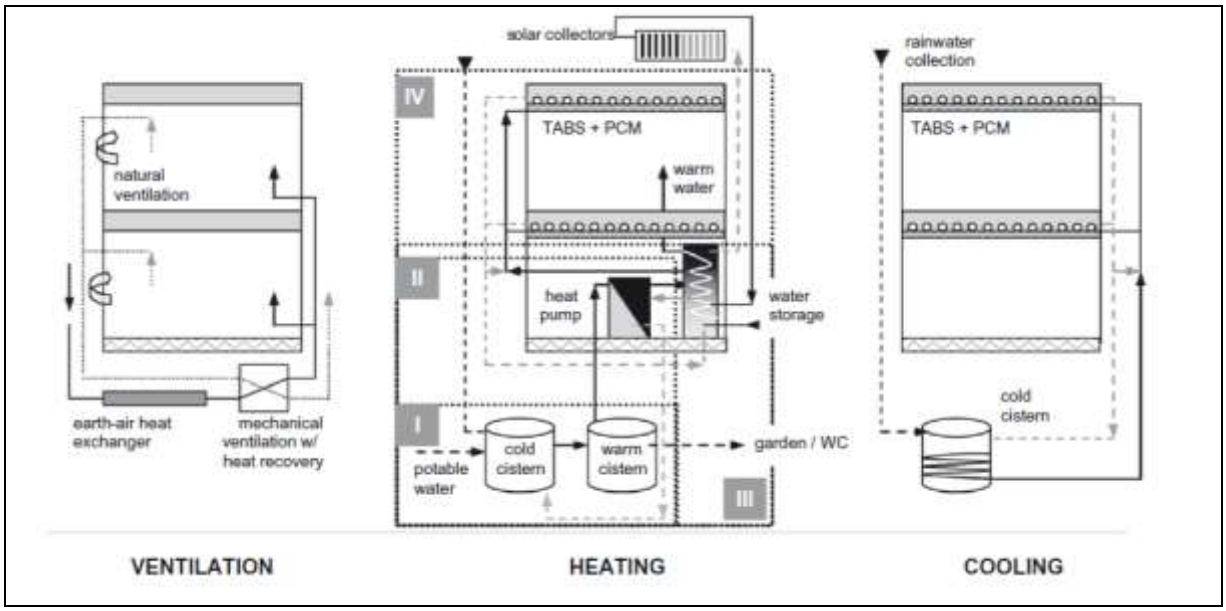
Koeling en verwarmen van gebouwen (door gebruik te maken van respectievelijk lage temperatuur warmtebronnen of hoge temperatuur koeltebronnen) werkt optimaal wanneer gebruik gemaakt wordt van grote oppervlaktes voor warmte uitwisseling.

Een mogelijke methode die onderzocht werd is het gebruiken van regenwater als warmte- of koudebron. Opslag in regenwater heeft als voordeel dat het thermisch stabieler is dan de omgevingstemperatuur. Nadeel is de grote afhankelijkheid van lokale grondcondities en klimaat, in het bijzonder de hoeveelheid neerslag.

In de literatuur zijn weinig toepassingen te vinden die rapporteren over warmterecuperatie uit regenwater. Voor zover nagegaan kon worden, werden bijvoorbeeld nog geen resultaten gerapporteerd die de prestaties van een regenwatersysteem in een operationeel gebouw beschreven. Verder werden slechts een 2tal cases beschreven die een mogelijk systeem onderzochten op laboratoriumschaal.

Büttner *et al.* [6] beschreven een experimenteel gebouw in Duitsland dat een regenwaterput gebruikt van 40m³ op 3,5 meter diepte om er overtollige warmte in kwijt te kunnen. ’s Nachts wordt het opgevangen regenwater via een open circuit op het dak gespoten om daar passieve koeling te voorzien via radiatie, convectie en verdamping. Het opgevangen water wordt terug naar de tank gebracht. Temperaturen in de tank variëren tussen 13°C en 18°C en het rendement van het systeem (tank + sturing) ligt tussen een prestatie factor *(COP)* van 5 tot 15.

Gan *et al.* [7] onderzochten de prestaties van een warmtepomp die regenwater en de grond als warmtebronnen gebruikt (onder laboratoriumomstandigheden). Via een gesloten circulatiesysteem (Figuur 31) met warmtewisselaar vloeit koelmiddel vanuit de regenput naar de warmtepomp en terug. De regenput zelf staat via een additionele warmtewisselaar in contact met de bodem.



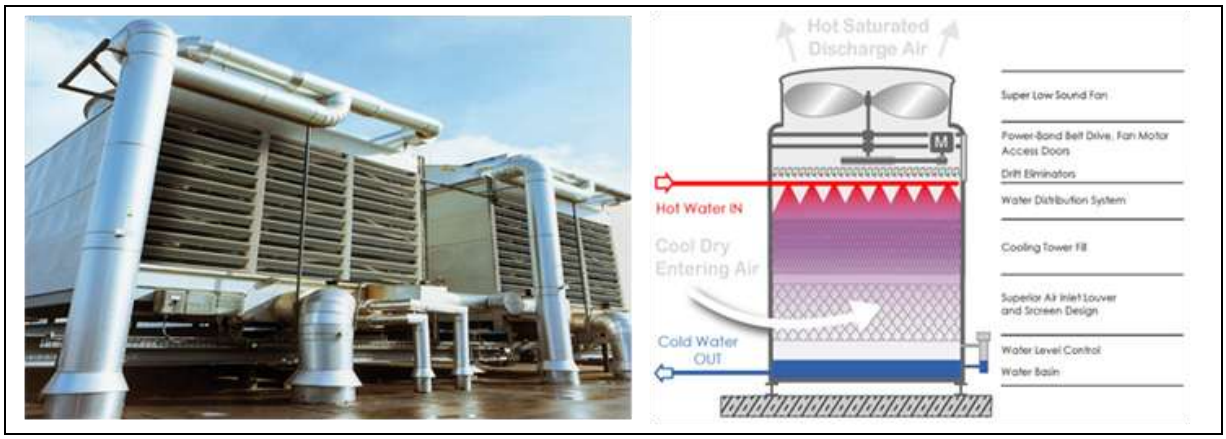
Figuur 31: Energieconcept volgens Kalz et al. [8] Regenwater opslag maakt deel uit van de verwarming en koeling.

Een derde bron onderzoekt de toepassing van regenwateropslag in een thermisch actief passiefhuis [8]. De muren en wanden dragen bij aan het energiebeheer in de woning. Het beschreven systeem maakt gebruik van 2 regenputten (22m³ totaal), respectievelijk als warmte en koudebron. Een klassieke zonnecollector (12m²) zorgt voor sanitair warm water, een warmtepomp met een thermisch vermogen van 6.7 kW_{th} gekoppeld aan de regenputten biedt verwarming.

Qahtan et al. [10] onderzochten experimenteel het thermisch effect van een continue waterfilm op een glazen façade. Ze gingen het effect van watersnelheid, type beglazing en zonne-intensiteit na. Het raamoppervlak ondervond een gemiddelde temperatuurdaling van 7.2-14°C en de geabsorbeerde hoeveelheid straling zorgde voor een daling van de binnentemperatuur met 2.2-4.1°C. Hoe intenser de zon, hoe hoger het rendement van het systeem. De warmte in het water kan vervolgens voor andere doeleinden gebruikt worden.

12 Koeltoren

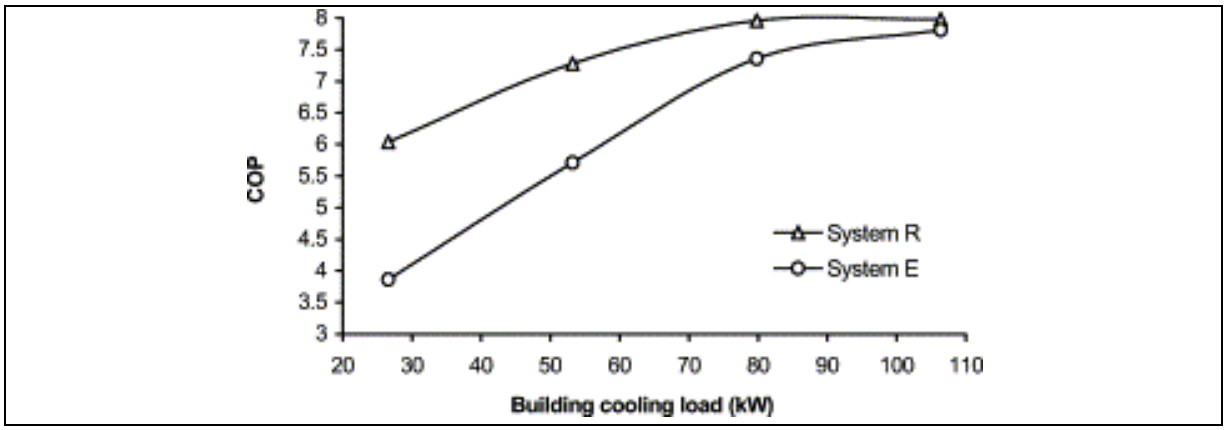
Een koeltoren dient om warmte af te voeren. In combinatie met warmte-koude-opslag kan een koeltoren gebruikt worden om in de zomer warmte in de bodem te stokkeren via een warmtewisselaar. Meestal wordt de koeltoren in de winter gebruikt om de warme bron af te koelen en zo de warmtebalans te herstellen. Dit is vooral van toepassing voor systemen met een grote koelvraag, waar de warme bron anders te groot zou worden. Het warme water wordt langs boven aangevoerd en stroomt naar beneden. Het water koelt af naarmate het de onderkant van de toren bereikt, onder invloed van een koude opwaartse luchtstroom, en kan vervolgens geïnjecteerd worden in een koude bron. Het koudwater basin onderaan de toren bevat meestal chemische toevoegingen om het ontstaan van legionella tegen te gaan. Bij koeltorens is het eveneens belangrijk dat er geen vervuilingen voorkomen in de leidingen. Vaak worden problemen hieromtrent niet opgemerkt aangezien dit niet direct te merken is aan de prestaties van de energievoorziening.



Figuur 32: (links) Koeltoren met geforceerde koeling en (rechts) schematische werking van een koeltoren met geforceerde koeling.

In een koeltoren wordt het warme water bovenaan verneveld ingespoten. In hun val geven de waterdruppels hun warmte af aan de ventilatielucht die van onderaf wordt aangezogen. Uiteindelijk wordt de vochtige warme lucht bovenaan weggevoerd. Aan de hand van de verdampingswarmte van water (ca. 2500 kJ/kg) kan een schatting gemaakt worden voor het verbruikte water. Het schema in Figuur 32 laat ook zien dat vuil zich in het resterende circulerende water kan ophopen, een correct onderhoud met regelmatige verversing van het circulerend water is noodzakelijk

In warme, subtropische gebieden kan een standaard water koeltoren omgekeerd ingezet worden. In de koudere periode van het jaar is de vraag naar koeling in het gebouw minder groot. Warmte kan dan uit de buitenlucht gehaald worden met behulp van een warmterecuperatie systeem om te voorzien in sanitair warm water. Het water wordt dan in een zogeheten RUWCT (reversibly used water cooling tower) gecirculeerd waar het opwarmt door contact met de warme buitenlucht. Studies wijzen uit dat de implementatie van een RUWCT een hogere efficiëntie heeft dan naverwarmen met elektriciteit [14, Figuur 32].



Figuur 33: Prestatie coëfficiënt voor een RUWCT koeltoren (driehoek) en een klassiek systeem met elektrische naverwarming (cirkel) als functie van de koudevraag. [14]

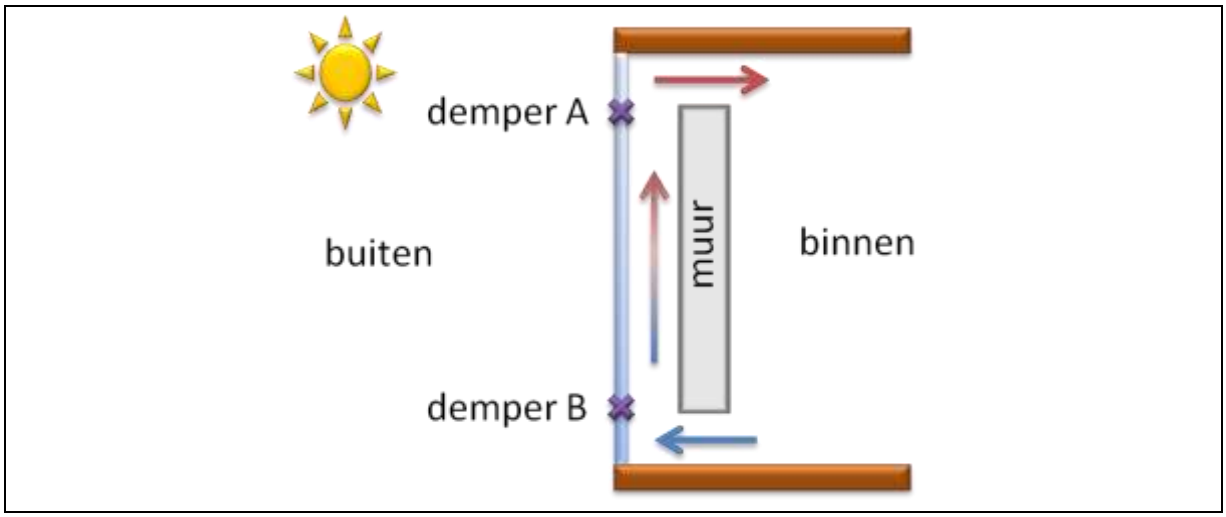
Figuur 33 toont de prestatie coëfficiënt (COP) van een aangepaste RUWCT koeltoren in vergelijking met een elektrisch systeem voor naverwarming. De COP van de koeltoren is hoger over het volledige werkingsgebied, wat aangeeft dat dit systeem hogere energetische rendementen kan behalen en dus kan zorgen voor een besparing op de werkingskost. In het bijzonder, als de koeltoren op 25% van zijn maximale capaciteit werkt, bedraagt het verschil in COP met de elektrische naverwarming 44%. Dit geeft aan dat wanneer de koeltoren functioneert bij een kleinere koelvraag (typisch een wintersituatie waar de vraag naar warm water groter is), er een grote energiebesparing mogelijk is

13 Passieve verwarming en koeltechnieken

Algemeen geschat beslaat de gebouwensector ongeveer 35% van de totale energievraag. Het grootste deel daarvan gaat op in verwarming, afkoeling en ventilatie. Passieve systemen trachten hier op in te spelen door te voorzien in de warmte- en koudevraag zonder externe inbreng van energie. We geven een kort overzicht van enkele technieken.

13.1 Trombe muren

Trombe muren maken gebruik van dichtheidsveranderingen die ontstaan onder invloed van een temperatuursverandering: warme lucht stijgt, koude lucht daalt. De klassieke variant op een Trombe muur bestaat uit een massief muurgedeelte met openingen bovenaan en onderaan. Daarvoor wordt een transparante plaat aangebracht. De lucht in de spouw warmt op door de zon. De drijfstroom die hierbij ontstaat zuigt koude lucht aan uit de binnenomgeving. De lucht gaat door opwarming stijgen in de spouw en wordt vervolgens bovenaan opnieuw naar de binnenomgeving geleid. Verschillende factoren beïnvloeden de prestaties van een Trombe muur. De hoeveelheid zonne-energie, de luchttemperatuur binnen en buit, de temperatuur van het massieve muurgedeelte, warmteverliezen naar buiten, …

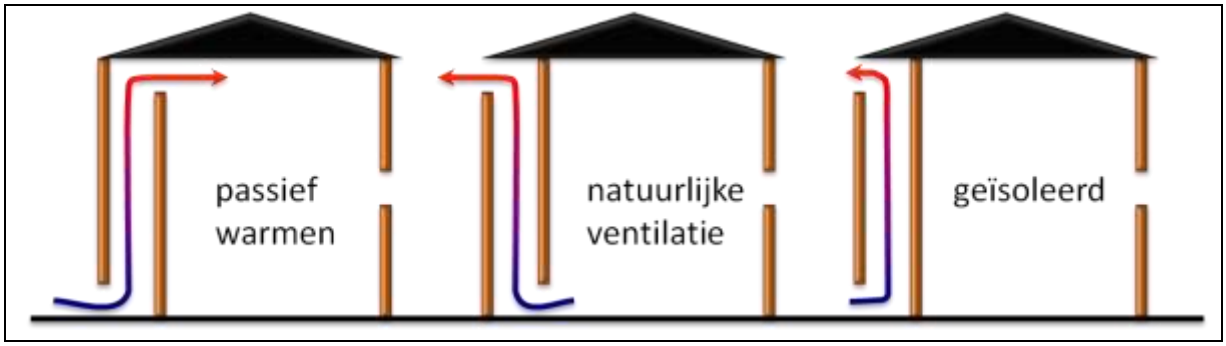


Figuur 34: Schematische voorstelling van een Trombe muur.

Het klassieke schema kan verbeterd worden op 3 verschillende aspecten: in- en uitlaat openingen, thermische isolatie en het luchtkanaal. Om toepasbaar te zijn voor zowel verwarming als koeling worden 2 dempers geïnstalleerd die een verbinding met de buitenlucht toelaten (Figuur 34). In de winter bijvoorbeeld, zijn beide dempers dicht en beide ventilatieopeningen open. De lucht circuleert dan door de spouw. Andere combinaties laten toe om koude/warme buitenlucht naar binnen te sturen als warme/koude binnenlucht.

Er bestaan varianten op het klassieke schema. Zo kan de spouw in twee secties gesplitst worden door een massieve muur of kan men een wand van PCM (phase change materials) toevoegen die als buffer voor latente warmte kan dienen. Voor meer varianten verwijzen we naar referentie [15].

13.2 Zonneschouw



Figuur 35: Mogelijke werkingen voor een zonneschouw.

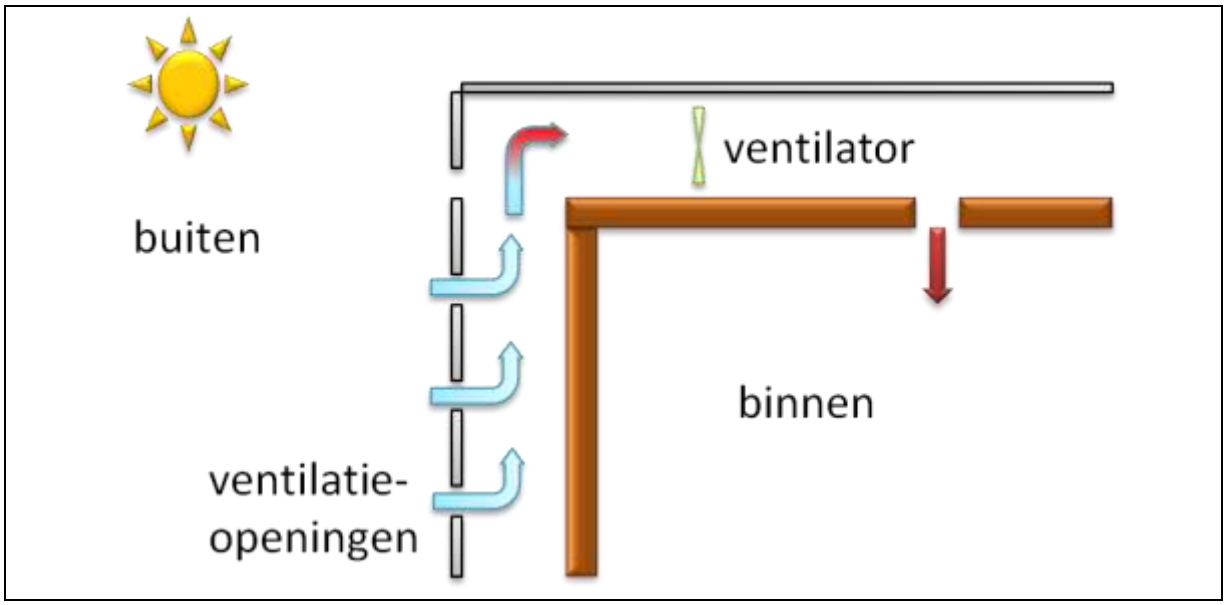
Een zonneschouw heeft als doel om een luchtstroom te generen in een gebouw en steunt daarbij op dezelfde principes als een Trombe muur. De drijvende kracht achter de luchtstroom zijn de dichtheidsverschillen geïnduceerd door een temperatuurverschil. Het passief warmen is technisch gezien een variant van de Trombe muur (links Figuur 35), maar wanneer het buiten koeler is dan binnen zorgt een zonneschouw voor passieve koeling door natuurlijke ventilatie (midden Figuur 35). Wanneer het buiten warmer is dan binnen, dan zorgt de isolatie-configuratie voor een afvoer van de warmte van de buitenmuur (rechts Figuur 35).

Saelens [19] rapporteerde in een thesis over de energetische prestaties van kantoorgebouwen die gebruik maken van zonneschouw systemen. Meer bepaald werden er double-skin façades (DSF) en mechanisch geventileerde multiple-skin façades bestudeerd voor het typisch Belgische klimaat en vergeleken met conventionele vensters met rolluiken. De resultaten bleken sterk afhankelijk van de gekozen configuratie en de instellingen. Dergelijke systemen waren in staat om het algemene energieverbruik te verbeteren, maar slaagden er nooit in simultaan de warmte- en koudevraag te verminderen. Als conclusie kon gesteld worden dat de impact van een systeem met meerdere lagen minimaal tot zelfs negatief was en zeker te verwaarlozen viel in vergelijking met de winsten die behaald kunnen worden door gepaste keuze van verlichting en verluchting.

13.3 Zonnefaçade zonder glas

Het Internationaal Energie Agentschap (IEA) definieert een andere mogelijkheid in hun Solar Heating and Cooling (SHC) Task 14. Een metalen geperforeerde buitenschil

absorbeert zonne-energie. De warme lucht stijgt en wordt door ventilatoren het gebouw in geblazen. Dergelijke technologie wordt al veelvuldig toegepast in Canada.



Figuur 36: Voorstelling van een metalen zonnefaçade. Een metalen buitenschil met ventilatieopeningen zorgt voor aanvoer van verse lucht.

13.4 Zonnedak

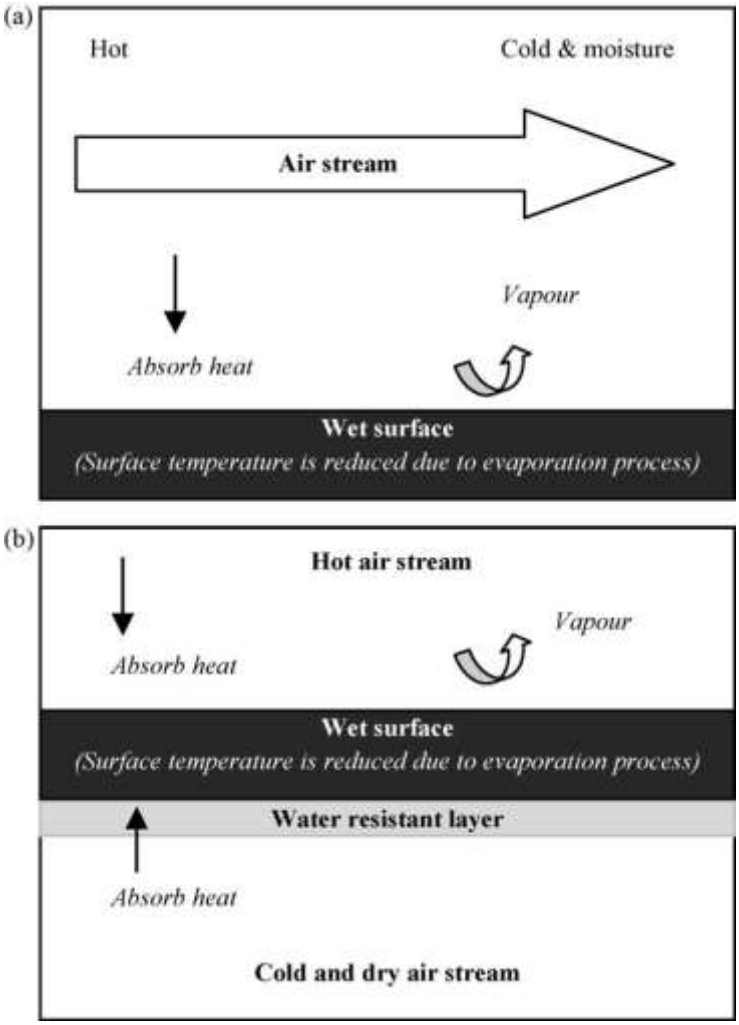
In streken waar de zon hoofdzakelijk hoog aan de hemel staat kan passieve koeling door het dak ook een toepassing vinden. Een combinatie van een horizontale Trombe muur met zonnecollectoren, een open vat voor verdamping van water, …

In de winter hebben dergelijke toepassingen weinig nut, maar tijdens de zomer kan de opwarming van het interieur sterk beperkt worden door het toevoegen van tussenliggende barrières aan de gebouwschil. Omdat een zonnedak in brede zin elk systeem inhoudt dat gebruik maakt van zonne-energie, wordt hier niet dieper op ingegaan.

13.5 Verdampingskoelte

Het is aantoonbaar dat koeling door verdamping het meeste effect heeft. Men kan gebruik maken van het feit dat water warmte opneemt uit de omgeving als het verdampt. Op die manier kan de binnentemperatuur met bijna 10°C verlaagd worden in warme gebieden.

Men maakt een onderscheid tussen directe en indirecte verdampingsprocessen.



Figuur 37: Verdampingskoelte (boven) via een direct proces en (onder) via een indirect proces. [15]

14 Zonnekoeling

De warmte geleverd door de zon kan ook aangewend worden om koude te produceren. Conventionele koeltechnieken zorgen voor piekbelastingen door hun hoge elektriciteitsverbruik en maken daarbij vaak gebruik van schadelijke koelmiddelen. Het gebruik van zonnewarmte om te koelen kan daar handig op inspelen aangezien de vraag naar koeling stijgt wanneer het aanbod van zonnewarmte groter wordt.

Het fluctuerende karakter van de zoninstraling maakt de combinatie met thermische opslag noodzakelijk. De laatste jaren is er dan ook een toenemende mate van interesse naar dergelijke gecombineerde systemen. Dit hoofdstuk bespreekt de meest recente ontwikkelingen op het vlak van koeling met zonnewarmte.

14.1 State of the art

Stages and options in solar cooling techniques.

Source	Conversion	Thermal storage (hot energy)	Production of cool energy	Thermal storage (cool energy)	Applications
Sun	Solar Thermal 1. Flat plate collector 2. Evacuated tube collector 3. Concentrated collector	1. Sensible 2. Latent 3.Thermo chemical	1. Absorption (i) Half effect (ii) Single effect (iii) Double effect (iv) Triple effect 2. Adsorption 3. Desiccant 4. Ejector	1.Sensible 2.Latent 3.Thermo chemical	1. Air conditioning (i) Office (ii) Hotel (iii) Building (iv) Laboratory 2.Food preservation (i) Vegetables (ii) Fruits (iii) Meat and Fish 3. Process industries (i) Dairy (ii) Pharmaceutical (iii) Chemical
	Solar PV (electrical)		Vapor compression Thermoelectric		

Tabel 17: Verschillende stadia en keuzemogelijkheden voor de toepassingen van zonnekoeling. [20]

Er is een grote variëteit aan beschikbare technieken. Sommige zijn gebaseerd op een thermisch aangedreven cyclus, andere op het verbruik van elektriciteit geproduceerd door fotovoltaïsche panelen en nog andere zijn passief. Stuk voor stuk zijn ze voor een groot deel afhankelijk van het thermische opslagsysteem waarmee ze gecombineerd worden. De verschillende opties en beoogde toepassingsgebieden voor een koelsysteem staan opgelijst in Tabel 17.

In de literatuur [20] werden vergelijkende studies uitgevoerd tussen de verschillende productiemethodes voor koude (kolom 4 in Tabel 17). Op basis daarvan komen absorptie en adsorptie naar voor als gelijkwaardig in prestaties en goedkoper dan de andere methodes. Van deze twee heeft absorptie op dit moment de grootste marktpenetratie.

14.1.1 Open lus met drogende materialen

Luchtdrogende systemen (op basis van silica gel of zeoliet) halen hun verkoelende eigenschappen uit het feit dat ze vocht onttrekken uit de lucht. De drogere lucht zorgt voor een verbeterde verdamping verder in de cyclus. De van vocht verzadigde onttrekkers kunnen dan met behulp van zonnewarmte terug gedroogd worden in een eenvoudig herhaalbaar proces. De circulatie van de vochtige lucht over de onttrekkers kan gebeuren door een ventilator aangedreven door zonne-energie.

14.1.2 Passieve keeling

Deze methode maakt geen rechtstreeks gebruik van de thermische energie geleverd door de zon. Ze is erop gericht om het indringen van warmte te verhinderen en het afvoeren van ongewenste warmte te optimaliseren. Voorbeelden hiervan zijn een ‘koel dak’ of een ‘groen dak’.

Een *koel dak* is bedekt met speciale materialen die een hoge reflectiegraad hebben. Doordat het grootste deel van de zichtbare, ultraviolette en infrarode straling weerkaatst wordt, dringt er minder warmte door in het gebouw. Bovendien worden de bedekkingen zo gekozen dat ze ook een grote thermische uitstraling garanderen. Daarmee verwijderen ze het gedeelte zonlicht dat in eerste instantie niet weerkaatst werd. Een typevoorbeeld zijn de witte huisjes in mediterrane landen, alhoewel lang niet alle koele daken wit van kleur hoeven te zijn.

Door de verminderde warmteopname, zorgt een koel dak er typisch voor dat de temperatuur binnen slechts een 10tal graden toeneemt in vergelijking met de buitentemperatuur. Deze vermindering vertaalt zich in een besparing van 15% op de werkingskosten van een conventioneel aircosysteem. Daarnaast hebben de materialen een bijkomend voordeel dat ze de levensduur van het dak kunnen verlengen: onderzoek toonde aan dat de degradatie van dakbedekking het meest beïnvloed wordt door hoge temperaturen.

Een *groen dak* is een dak dat gedeeltelijk of helemaal bedekt is met vegetatie. De beplanting en bijhorende ondergrond zorgen voor isolatie en opname van regenwater. Door de verdamping van het water dat in de grond aanwezig is, koelt het gebouw eronder af en daalt de koelvraag typisch met 50% tot 90%, afhankelijk van de dikte. Groene daken dragen bij aan het zuiveren van de lucht en hebben ook een grote esthetische waarde in stedelijke gebieden. (Figuur 38)

Figuur 38: Een van de bekendste voorbeelden van een groen dak is de Californische Academie voor wetenschap.

14.1.3 Adsorptie en absorptive

Adsorptie en absorptie zijn fysico-chemische processen waarbij een gas of damp (sorbaat) wordt opgenomen in een vloeistof of een vaste stof (sorbent). Tijdens de adsorptie of absorptie van het sorbaat in het sorbent komt een bepaalde hoeveelheid warmte vrij (exothermisch). Nadien kan men de stoffen opnieuw van elkaar scheiden door er warmte aan toe te voegen (endothermisch). Dit laatste proces wordt desorptie genoemd.

Een koelsysteem gebaseerd op sorptie levert koeling tijdens de verdamping van het sorbaat, dat voorafgaat aan de eigenlijke sorptiereactie. Zonnewarmte uit bijvoorbeeld zonnecollectoren kan nuttig aangewend worden voor de desorptie van de reactiecomponenten.

Een typische absorptiecyclus bestaat uit 4 delen: verdamping, absorptie ,desorptie en condensatie.

1) Koelvloeistof (absorbaat) wordt via een warmtewisselaar in contact gebracht met warmte afkomstig van de te koelen omgeving. De vloeistof zal gedeeltelijk verdampen en op die manier wordt warmte aan de omgeving onttrokken.
2) De ontstane damp wordt vervolgens geabsorbeerd in het absorbent, meestal ook een vloeistof. Door de verlaagde dampspanning kan nog meer koelvloeistof verdampen.
3) Desorptie van het absorbaat uit het absorbent kan gebeuren door warmte toe te voegen aan het proces. De koelvloeistof gaat verdampen (uitkoken) uit de samenstelling.

4) Via een warmtewisselaar kan de damp terug condenseren naar vloeibaar koelmiddel.

Wanneer de warmte voor desorptie afkomstig is van zonnewarmte, spreekt men van zonnekoeling. Er bestaan verschillende uitbreidingen op de voorgestelde cyclus die het rendement verhogen, het geluidsniveau verlagen en bovendien ook simultaan warmte en koude kunnen leveren. Er zijn enkelvoudige, dubbele en meervoudige iteratie absorptie machines, die per toegevoegde cyclus een stijgend rendement kennen.

Volgende koppels worden vaak gebruikt in sorptietechnieken:

- Absorptie: NH_3/H_2O of Ammoniak/Water
- Absorptie: Water/Lithium Bromide
- Absorptie: Water/Lithium Chloride
- Adsorptie: Water/Silica Gel of Water/Zeoliet
- Adsorptie: Methanol/Actieve Koolstof

Om het uitkoken in een cyclus die gebruik maakt van water efficiënt te maken, moet de watertemperatuur minstens 88°C bedragen. Dit legt bepaalde constructie-eisen op aan het bijhorende zonnecollector systeem. De goedkopere collectoren zullen deze temperaturen niet behalen.

Voor grootschalige projecten is de technische en economische haalbaarheid al aangetoond. Zo ligt er op het hoofdkantoor van Caixa Geral de Depositos in Lissabon 1579 m² aan collectoroppervlak dat in totaal een koelvermogen van 545kW heeft. Het systeem levert dus in zijn geheel een koelvermogen van ongeveer 345 W/m².

Bij adsorptie hechten moleculen van de verdampte koelvloeistof zich aan het oppervlak van een adsorbent. Door de temperatuur te verhogen kunnen ze weer losgekoppeld worden, in een cyclus die analoog is aan die van de absorptiecyclus.

Als voorbeeld van een adsorptiekoeler aangedreven door warmte wordt data van SorTech AG geciteerd:

Prestatie gegevens	**ACS 08**	**ACS 15**
Koelcapaciteit, max.	11 kW	23 kW

COP thermisch, max.	0,65	0,65

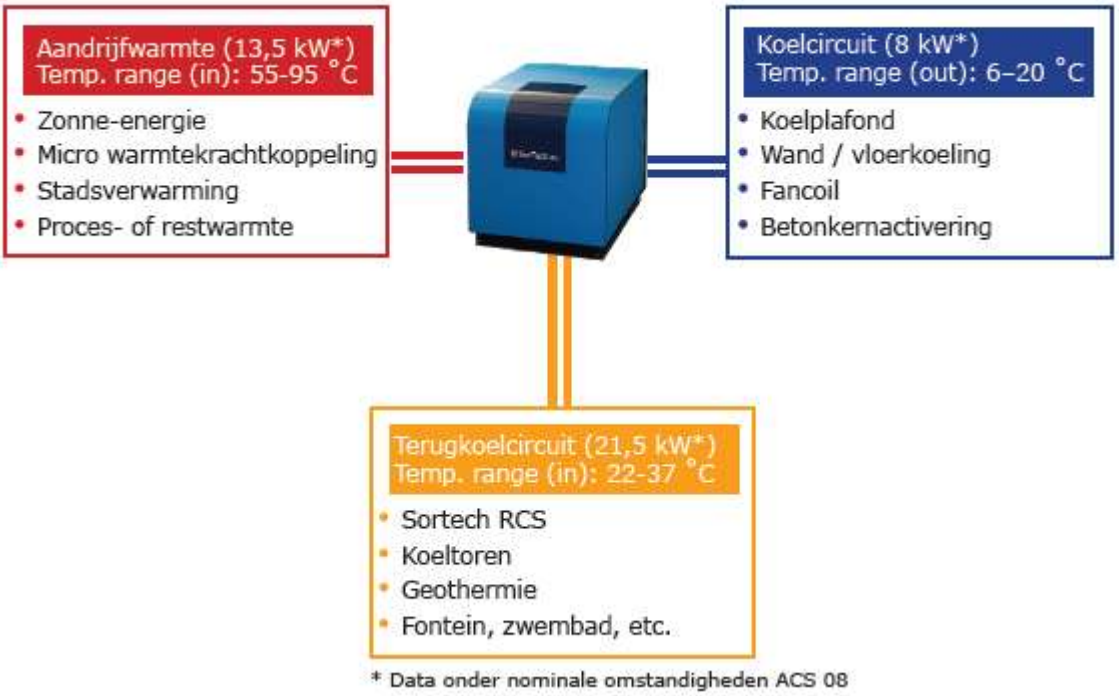
Koelcapaciteit, nom.	8 kW	15 kW

COP thermisch, nom.	0,60	0,60

Elektriciteitsverbruik, nom.	7 W	14 W

Tabel 18: Karakteristieken voor verschillende types van warmte aangedreven adsorptiekoelers van SorTech AG. (bron: SorTech AG)

De elektrische regelunit en regelventielen gebruiken een elektrisch vermogen van slechts 7 of 14W. Bij toepassing van de SorTech RCS terugkoeler in het terugkoelcircuit kan een elektrische input/output verhouding (COP) van 10 of meer bereikt worden.



Figuur 39: Overzicht van toepassingsmogelijkheden voor een adsorptiekoeler.

14.2 Toepasbaarheid

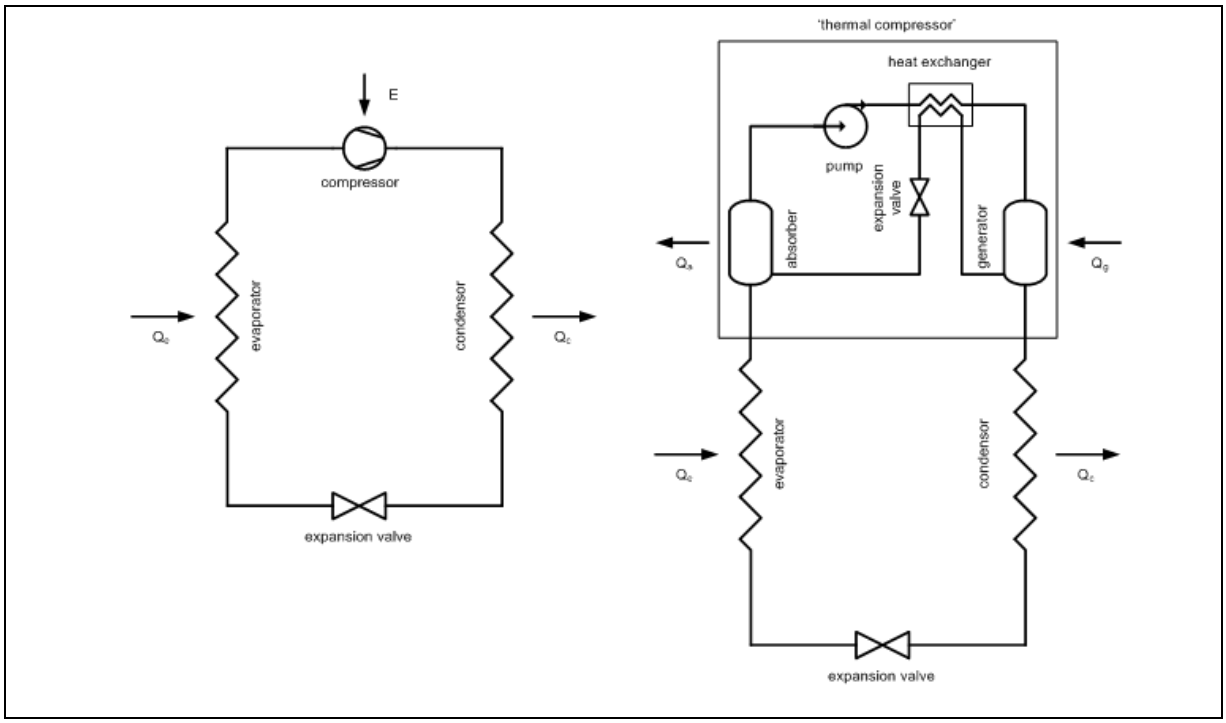
Er zijn verschillende marktsegmenten waarin koeling met warmte een belangrijke rol kan spelen. Doordat koeling vaak gevraagd wordt tijdens periodes van warmte, lijkt de toepassing ideaal. In warme periodes is er vaak een overschot aan warmte door de matige warmtevraag. Zo zouden tijdens de zomer zonnecollectoren, die dan veel warmte genereren maar weinig dienst kunnen doen, en ook overtollige stadswarmte nuttig aangewend worden in koelprocessen.

Er is ook de mogelijkheid om dergelijke koelmachines in te zetten bij WKK-installaties. Een (micro-)wkk levert doorgaans elektriciteit en warmte voor verwarming van tapwater en ruimteverwarming. Dat laatste wordt in de zomermaanden nauwelijks gevraagd wat het aantal draaiuren niet ten goede komt. Zodra de sorptiemachine hieraan wordt toegevoegd, is er sprake van zogenaamde trigeneratie: de productie van warmte, koude en elektriciteit met één systeem.

14.3 Meetcampagne AZ Sint Jan, Brugge

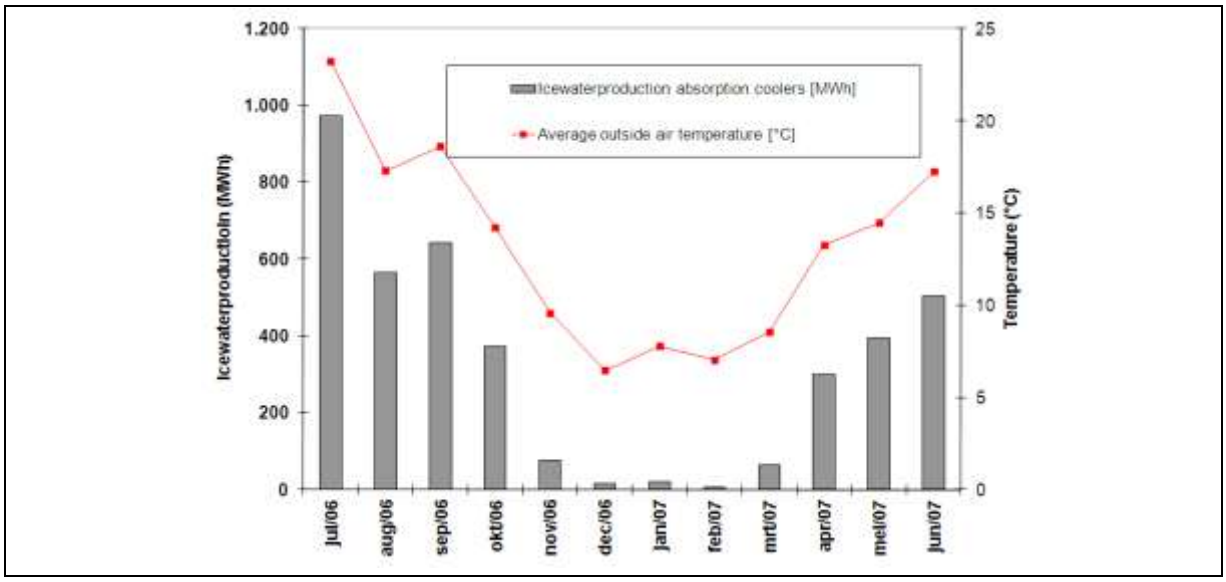
In het AZ Sint-Jan ziekenhuis in Brugge werd een absorptie koelinstallatie geplaatst met een totale koelcapaciteit van 3200 kWth (2x1600 kWth) en water/lithium bromide als werkingsstoffen. De warmte wordt geleverd door een warmtenet, besproken in sectie 10.1.3, maar er staat ook een standaard boiler als reserve. VITO deed er een meetcampagne tussen 1 juli 2006 en 30 juni 2007.

Om economisch rendabel te zijn moet de warmte veel goedkoper aangekocht kunnen worden dan elektriciteit. De efficiëntie van een absorptiekoeler ligt immers lager dan die van reguliere compressiekoelers.



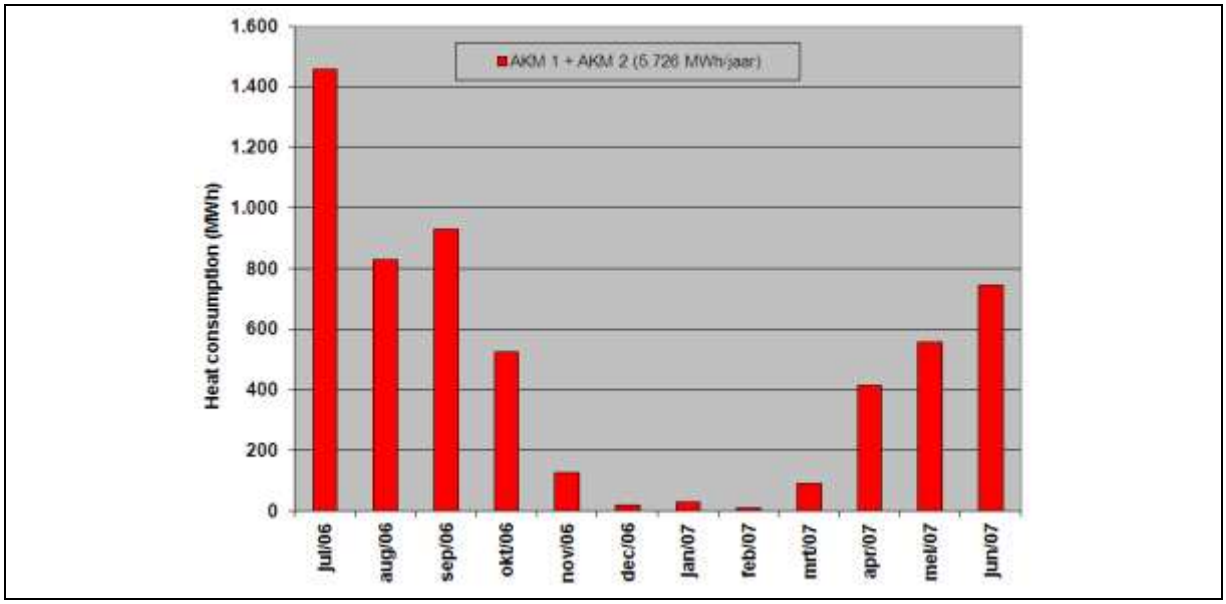
Figuur 40: Schema van een compressiekoeler (links) en een absorptiekoeler (rechts).

De totale hoeveelheid koude die tijdens de campagne geleverd werd bedroeg 3938 MWh per jaar. De gemiddelde levertemperatuur bedroeg 6°C en de terugkeertemperatuur bedroeg gemiddelde 10°C.

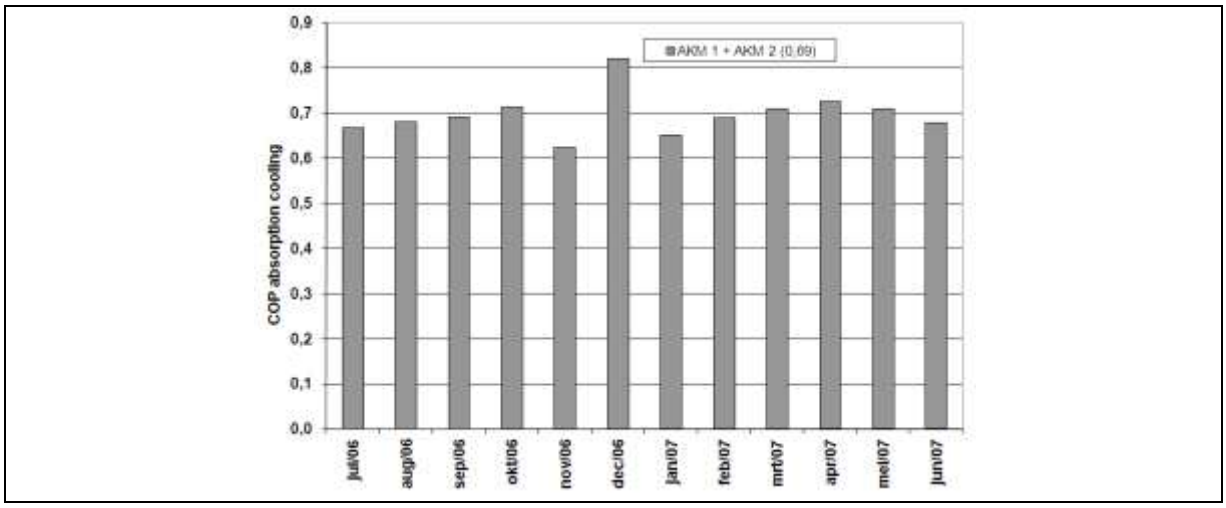


Figuur 41: Productie van koelwater en gemiddelde omgevingstemperaturen.

De totale hoeveelheid warmte door het net geleverd bedroeg 6072 MWh per jaar. Daarvan werd 5726 MWh door de absorptiekoeling verbruikt, wat inhoudt dat 349 MWh of 6% aan warmte verloren ging tijdens het transport. De warmte wordt geleverd aan een gemiddelde temperatuur van 115°C, de terugkeertemperatuur is 70°C en de gemeten temperatuur aan de generator bedraagt 105°C.

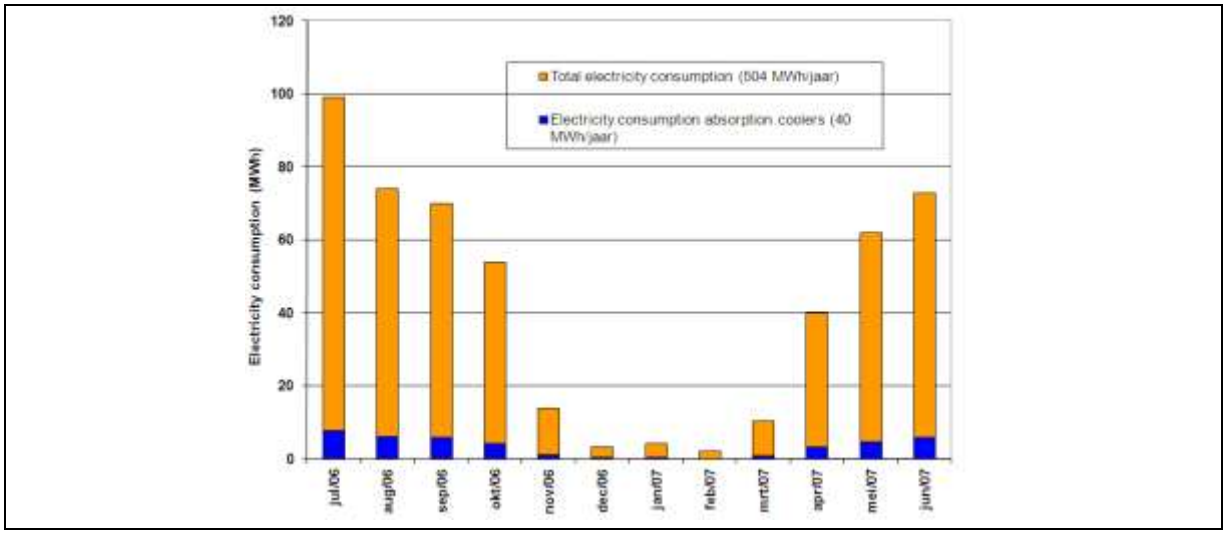


Figuur 42: Hoeveelheid warmte geleverd aan de absorptiekoelers.



Figuur 43: Maandelijkse prestatiecoëfficiënten van de absorptiekoelers.

Hoewel de compressor vervangen werd door een warmtecompressor, verbruiken de geïnstalleerde koelers nog steeds elektriciteit, onder andere door de circulatiepomp. Het totale elektrisch verbruik komt uit op 377 MWh per jaar.



Figuur 44: Consumptie van elektriciteit gedurende de meetcampagne.

De totale hoeveelheid besparing aan primaire energie werd berekend op 6737 GJ per jaar. De maximale terugverdientijd bedraagt 58 jaar. In de huidige economische situatie zouden de terugverdientijden lager moeten liggen doordat de energieprijzen gestegen zijn en de investeringskosten verder blijven dalen. Daarnaast zijn er ook de steunmaatregelen voor groene energie.

14.4 IEA SHC Task 38 Solar Air-Conditioning and Refrigeration

In November 2009 publiceerde het Internationaal Energie Agentschap een rapport over de bestaande verwarming- en koelsystemen op basis van zonnewarmte. Uit de verzamelde informatie had men het doel om oplossingen en wijzigen te bedenken in termen van een

betere toepassing van de technologie. De praktijkervaring kon op die manier leiden tot een betere identificatie van het optimale systeem.

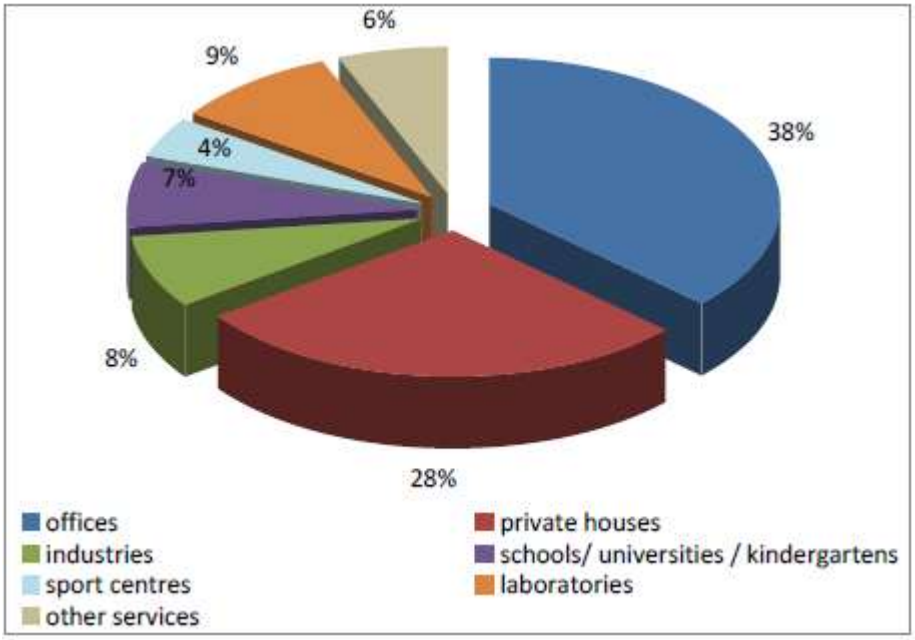
Zowel op grote, als op kleine schaal kwam het rapport tot de conclusie dat zonnewarmte en zonnekoeling het meest toegepast worden in kantoorgebouwen, zie Figuur 45 en Figuur 46. Het overgrote deel van de 269 opgenomen installaties maakt gebruik van het absorptie principe. Voor heel grote toepassingen wordt ook gebruik gemaakt van DEC systemen (Dessicant Evaporative Cooling -droging met ontvochtigers).

Toegepaste technologie voor kleine systemen:

- 90% absorptie
- 10% adsorptie
- 0% overige

Toegepaste technologie voor grote systemen:

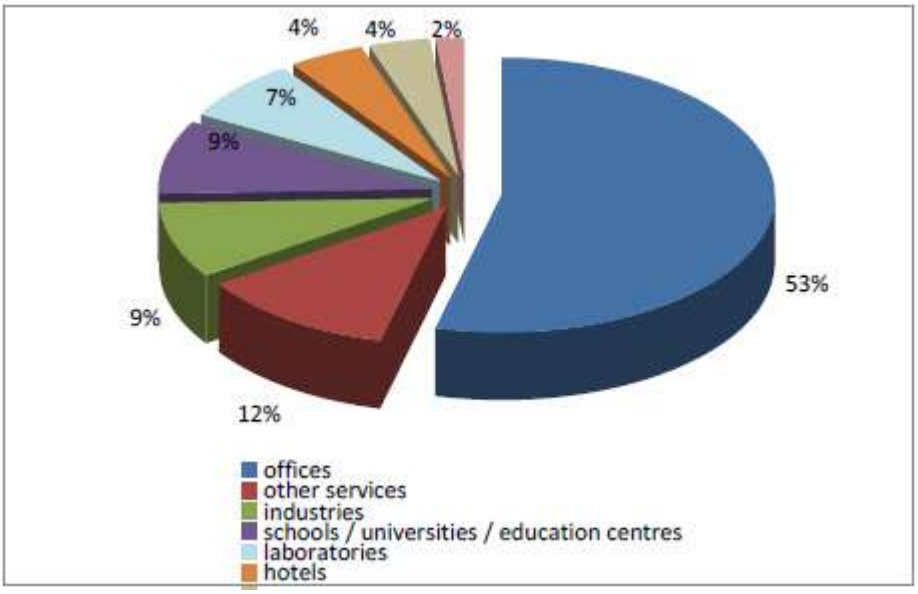
- 71% absorptie
- 13% adsorptie
- 14% DEC vast
- 2% DEC vloeibaar



Figuur 45: Onderverdeling volgens toepassing in het gebruik van kleine (<20kW) installaties voor zonnewarmte en zonnekoeling.(bron IEA SHC 38)

Voor grote systemen (>20kW) werd er ook een onderverdeling gemaakt op basis van het soort zonnecollectoren dat gebruikt werd om de nodige warmte te leveren:

- Vlakke plaatcollector: 46%
- Vacuümbuiscollector: 40%
- Parabolische collector: 10%
- Luchtcollector: 4%

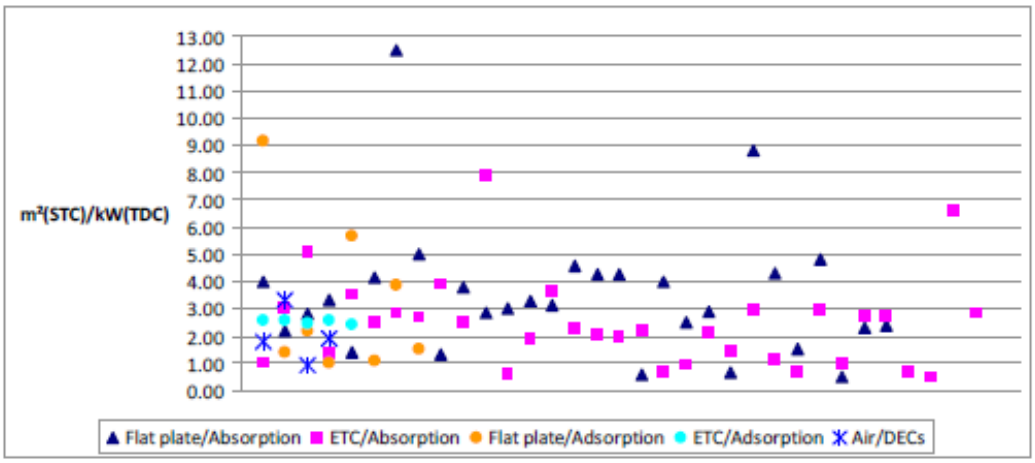


Figuur 46: Onderverdeling volgens toepassing in het gebruik van grote (>20kW) installaties voor zonnewarmte en zonnekoeling.(bron IEA SHC 38)

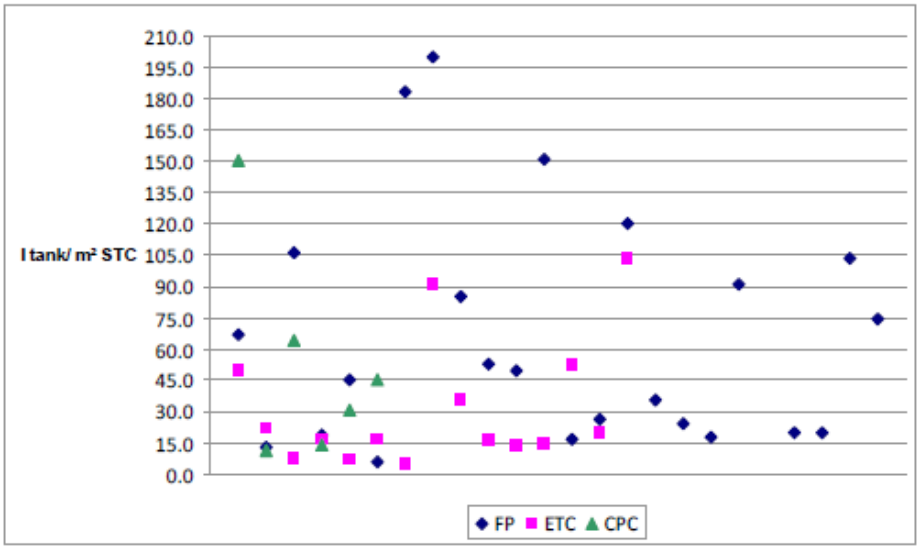
Tot slot geeft onderstaande Tabel 19 nog een overzicht van het aantal installaties dat geteld werd voor elke specifieke combinatie van koeltechniek en warmtebron.

combinatie	Absorptie	Adsorptie	DEC vast	DEC vloeibaar
FP	32	8	6	2
ECT	35	5	1	0
CPC	4	2	3	0
AIR	0	0	5	0
PTC	3	0	0	0

Tabel 19: Aantal installaties dat geteld werd binnen de EU op basis van een specifieke combinatie van warmtebron en koeltechniek. (excl. hybride systemen). (bron: IEA SHC task 38)



Figuur 47: Relatie tussen het collector oppervlak en het geïnstalleerde vermogen aan koeling in kW. (bron: IEA SHC task 38)



Figuur 48: Relatie tussen de inhoud van het buffervat en de oppervlakte van de collector gerangschikt volgens de techniek.

15 Besluit

Dit werkpakket betreft de karakterisatie van het aanbod van thermische energie voor de geselecteerde gebouwtypes (cfr. subtaak 1.2), andere dan in vorige werkpakketten aangehaald. Het betreft hier thermische energie die zou kunnen worden aangewend zowel voor verwarming als voor koeling, die zowel in het eigen gebouw wordt opgewekt als die uit een lokaal net kan worden betrokken.
Om te voorzien in extra warmte, als extra vrijheidsgraad in het systeem of als middel om de thermische balans in de bodem over lange termijn te garanderen, werden een aantal technieken besproken.

- Thermische zonne-energie met behulp van klassieke zonnecollectoren of niet afgedekte collectoren
- Asfaltcollectoren
- Restwarmte uit WKK
- Afvalwarmte uit productieprocessen
- Warmte uit stadsdistributienetten
- Neerslagwater
- Koeltoren
- Passieve koel- en verwarmingstechnieken
- Koude uit zonnewarmte

Elk van de technieken werd doorgelicht op de belangrijkste eigenschappen: rendement, toepasbaarheid, mate van ontwikkeling, marktrijpheid, … Op basis van de geselecteerde technieken en de gevonden resultaten in dit werkpakket kan de conclusie gemaakt worden dat thermische zonne-energie en restwarmte uit WKK de beste keuze vormen. Van beide technieken is in de literatuur heel wat informatie beschikbaar. Daarnaast is er ook al praktijkervaring opgedaan.
Via groenestroomcertificaten, subsidies voor KMO's en warmtekrachtcertificaten is een interessant kader gecreëerd om de economische haalbaarheid van de gekozen technologieën een boost te geven. Op die manier kan de terugverdientijd terug lopen van meer dan 40 jaar tot minder dan 10 jaar. Dat maakt de drempel tot een grootschalige toepassing heel wat lager.
Wanneer warmteopwekking met behulp van zonne-energie overwogen wordt, moet ook gedacht worden aan een gepast buffersysteem om het wisselvallige karakter van het aanbod op te vangen. De warmteproductie is immers vaak maximaal wanneer de warmtevraag laag is. Maar met de productie van koude uit zonnewarmte via absorptiekoelers is ook daar een oplossing voor.

Simulaties op basis van de verzamelde informatie zullen moeten uitwijzing welke techniek het best toepasbaar blijkt te zijn voor een bepaald gekozen gebouwtype.

Literatuurlijst

1] *Design tool for the thermal energy potential of asphalt pavements*, Loomans, M. and Oversloot, H. and de Bondt, A. and Jansen, R. and van Rij, H., Eight International IBPSA Conference, 2003

[2] *Theoretical Analysis of Temperatures in Pavements, de* Bondt, A.H. and Steenvoorden, M.P. , 1995, Delft University of Technology, report 7-95-203-21

[3] *Onrendabele toppen groene warmte*, Moorkens, I. and Briffaerts, K., rapport VITO, 2009

[4] FNR, *Leitfaden Bioenergie Planung, Betrieb und Wirtschaftlichkeit von Bioenergieanlagen*. 2005: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.

[5] *Haalbaarheid warmtenet regio Twente*, Hoogsteen, R. and Braber, K.J. and Smit, R.W. , 2003

[6] Büttner D, Kranl D, Schäfer M, Weinläder H, Hellmann M, Niewienda A.,Kühlkreislauf mit passiver Kälteerzeugung durch Strahlungskühlung.Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V. Final report Az.,14890 funded by the Deutschen Bundesstiftung Umwelt, Würzburg; 2003 [duitstalig].

[7] *A novel rainwater–ground source heat pump –measurement and simulation,* Gan G, Riffat S, Chong C. Appl Therm Eng 2007;27(2–3):430–41.

[8] *Novel heating and cooling concept employing rainwater cisterns and thermo-active building systems for a residential building*, Kalz, D. and Wienold, J. and Fischer, M. and Cali, D., Applied Energy, 87 (2010) 650-660

[9] *Restwarmtebenutting, potentiëlen, besparing en alternatieven*, Daniëls, B.W. and Wemmers, A.K. and Tigchelaar, C. and Wetzels, W., Energy Research Centre of the Netherlands (ECN), 2011

[10] *Experimental determination of thermal performance of glazed façades with water film, under direct solar radiation in the tropics*, Qahtan, A. and Keumala, N. and Roa, S.P. and Abdul-Samad, Z., Building and Environment, 46 (2011) 2238-2246

[11] *Unglazed coloured solar absorbers on façade: Modelling and performance evaluation*, Bonhôte P. and Eperon, Y. and Renaud, P., Solar Energy 83 (2009) 799-811

[12] *Facçade solar collectors*, Matuska, T. and Sourek, B., Solar Energy 80 (2006) 1443-1452

[13] *Renewable energy options for building: case studies*, Rezaie, B. and Esmailzadeh, E. and Dincer, I., Energy and Buildings 43 (2011) 56-65

[14] *A simulation study on a water chiller complete with a desuperheater and reversibly used water cooling tower for service hot water generation*, Tan K. and Deng, S., Building and environment 37 (2002) 741-751

[15] *Review of passive solar heating and cooling technologies,* Chan, Y.H. , Renewable and Sustainable Energy Reviews 14 (2010) 781-789

[16] *Analyse des performances du couplage d'une pompe à chaleur avec une installation solaire thermique pour la renovation*, Citherlet, S. and Bony, J. and Nguyen, B., 2008 SOL-PAC, Rapport final Swiss Federal Office of Energy (SFOE)

[17] *Solar assisted heat pump on air collectors: A simulation tool.* Karagiorgas, M. and Galatis, K. and Tsagouri, M. and Tsoutsos, T. and Botzios-Valaskakis, A., Solar Energy 84 (2010) 66-78

[18] *On the potential of using heat from solar thermal collectors for heat pump evaporators.* Haller, M.Y. and Frank, E., ISES Solar World Congress, 2011

[19] *Energy Performance assessment of single story multiple-skin façades,* Saelens, D., PhD thesis 2002, KUL

[20] *Review of solar cooling methods and thermal storage options*, Chidambaram, L.A. and Ramana, A.S. and Kamaraj, G. and Velraj, R., Renewable and Sustainable Energy Reviews *15 (2011) 3220– 3228*