

De thermische werking van begroeide daken in de winter



Student:

Erik Cheng Xi Huang
0554383

Opleiding:

Bouwkunde

Document:

Afstudeerscriptie

Datum:

10-01-2013

Colofon

Project: De thermische werking van begroeide daken in de winter

Document: Eindrapportage
Versie: Afstudeerscriptie 1.0
Datum: 10-01-2013

Uitvoerende partij:

Naam: Erik Cheng Xi Huang
Student: 0554383
E-mail: ecxhuang@hotmail.nl
Adres: Kareldoormanstraat 293A
3012 GH Rotterdam

Onderwijsinstelling:

Onderwijs: Hogeschool Rotterdam
Studie: Bouwkunde
Studiejaar: 2012-2013
Adres: Instituut voor Bouw- en Bedrijfskunde
G.J. de Jonghweg 4-6
3015 GG Rotterdam

Afstudeerbegeleider: F. Krabbendam
E-mail: p.krabbendam@hr.nl

Tweede lezer: P.H.A.W. van Riel-Jacobs
E-mail: p.h.a.w.van.riel-jacobs@hr.nl

Opdrachtgever:

Naam: C.M. Ravesloot – Lectoraat IB&D
E-mail: christophmaria@ravesloot.nl

Gedetacheerd bij:

Naam: Zinco Benelux B.V.
Adres: Morsestraat
2652 XG Berkel en Rodenrijs

Afstudeerbegeleider: P. Koop
Email: pkoop@zinco.nl

Referaat

Huang E.C., Lectoraat Innovatie Bouwproces en Duurzaamheid Hogeschool Rotterdam,
Ingenieursbureau Gemeentewerken Rotterdam, Rotterdam, 10 januari 2013

Dit verslag beschrijft de resultaten van het onderzoek verricht op de thermische werking van begroeide daken in de winter. Dit in het kader van een afstudeeropdracht uitgevoerd voor de opleiding Bouwkunde aan de Hogeschool Rotterdam.

Descriptoren:

Begroeide daken
Thermische werking
Winter
Dakeigenschappen

Voorwoord

In deze scriptie “ thermische werking van begroeide daken in de winter” wordt een deelonderzoek beschreven binnen het brede onderzoeksgebied van het lectoraat Innovatie Bouwproces en Duurzaamheid in samenwerking met de gemeente Rotterdam en het bedrijfsleven (RAAK-mkb). Deze scriptie is geschreven in het kader van mijn afstuderen aan de Hogeschool Rotterdam (HR), aan de opleiding Bouwkunde.

Het onderzoeksperiode is van februari 2012 tot en met januari 2013. Mijn begeleider bij Van der Tol B.V. was de heer P. Koop en mijn begeleider bij de HR was de heer P. Krabbendam. Hierbij wil ik beiden hartelijk bedanken voor hun fijne begeleiding en voor deze leerzame periode.

Verder gaat mijn dank uit naar mevrouw P.H.A.W. van Riel-Jacobs en de heer L. Remijn van de Hogeschool Rotterdam voor hun kritische kijk op mijn onderzoek en voor hun behulpzaamheid.

Tot slot wil ik de heer C.M. Ravesloot (Lector Innovatie Bouwproces en Duurzaamheid van de Hogeschool Rotterdam) bedanken voor de mogelijkheid om het onderzoek te mogen doen en voor de begeleiding tijdens dit afstudeertraject.

Rotterdam, januari 2013

Erik Chengxi Huang

Samenvatting

Begroeide daken zijn niet alleen esthetisch fraai, maar hebben ook andere voordelen zoals waterbuffering en watervertraging, verbetering van de luchtkwaliteit, vermindering van geluidsoverlast, bescherming van de dakbedekking, waardeverhoging van de vastgoed en energiebesparing. De laatste eigenschap is afhankelijk van diverse factoren zoals onder andere het klimaat, de weersomstandigheden, de isolatie van het gebouw en de eigenschappen van het begroeid dak. Dit is een van de redenen waarom verschillende onderzoeken elkaar tegen spreken.

Literatuur onderzoek laat zien dat een begroeid dak energiebesparend kan werken tot wel 48% bij ongeïsoleerde gebouwen in een bepaalde klimaat. Er is nauwelijks energie voordeel bij gebouwen met dakisolatie vanaf $1 \text{ m}^2\text{K/W}$. Energiebesparing is minimaal in goed geïsoleerde gebouwen bij een gematigde klimaat zoals in Nederland.

Bepaalde dakeigenschappen zoals de type begroeiing, het wateropslag capaciteit en de dekkingsgraad hebben een significante invloed op de thermische werking van begroeide daken.

In de literatuur worden verschillende gevalideerde modellen gebruikt om de thermische effecten van een begroeid dak te voorspellen. Het ideale model heeft alle factoren opgenomen die invloed hebben op de thermische eigenschappen van een begroeid dak. Zo'n model moet gevalideerd zijn. Uit de analyse van de meest recente modellen is het gevalideerde model van Djedig et al. het meest compleet. Dit model is uitgewerkt en in een rekenkundige tool verwerkt. Met behulp van deze tool kan de invloed van bepaalde dakeigenschap op de thermische werking van een begroeid dak worden berekend. Een lage dekkingsgraad van het dak en dakeigenschappen die zorgen voor een lage korte golfstraling transparantie coëfficiënt van de begroeiing, een lage korte golfstraling reflectiecoëfficiënt van de begroeiing en het substraat, een lage emissiecoëfficiënt van de begroeiing en substraat, een hoge massa warmtetransportweerstand van het begroeiingsoppervlak en het substraatoppervlak, een hoge bladstomata massa warmtetransportweerstand en een hoge damptransportweerstand van de substraatoppervlak hebben allen een positief effect op de thermische werking van een begroeid dak in de wintersituatie.

Wat is de energiebesparing van een woning met een begroeid dak vergeleken met een woning met een plat dak? Om het energieverbruik te berekenen is een R-waarde van een dak nodig. De R-waarde van een begroeid dak wordt berekend uit de proefmetingen van een casestudie uitgevoerd in België. De energiebesparing van een begroeid dak is maximaal bij ongeïsoleerde gebouwen. Voor de wintermaanden is dat 11 kWh/m^2 . Vanaf een isolatieniveau van $1,50 \text{ m}^2\text{k/W}$ is er nauwelijks besparing. Het aantal woonlagen bij een woning met of zonder begroeid dak met een isolatieniveau van $1,50 \text{ m}^2\text{k/W}$ speelt geen rol in energiebesparing.

Inhoudsopgave

Colofon

Referaat

Voorwoord

Samenvatting

1. Inleiding	8
1.1 Probleemschets	8
1.2 Belanghebbenden	9
1.3 Onderzoeksvragen	9
1.4 Afbakening	10
2. Wat zijn begroeide daken en welke types zijn er?	12
2.1 Inleiding	12
2.2 Verschillende typen begroeide daken	13
2.2.1 Extensieve begroeide daken	13
2.2.2 Intensief begroeide daken	14
2.3 Opbouw van begroeide daken	15
3. Wat zijn de voor-en nadelen van begroeide daken?	18
3.1 Inleiding	18
3.2 Voordelen begroeide daken	18
3.2.1 Waterbuffering en watervertraging	18
3.2.2 Stadsklimaat verbetering	18
3.2.3 Multifunctioneel ruimtegebruik	19
3.2.4 Biodiversiteit	19
3.2.5 Psychologie	20
3.2.6 Geluidsisolatie	20
3.2.7 Thermisch comfort/energie besparing	20
3.2.8 Bescherming dakbedekking	20
3.2.9 Waarde verhoging vastgoed	20
3.3 Nadelen begroeide daken	20
3.3.1 Aanlegkosten en onderhoudskosten	21
3.3.2 Lekkages	21
3.3.3 Windbelasting	21
3.4 Wat zijn de voorwaarden van toepassing van begroeide daken?	21
4. Wat is er bekend over de thermische werking van begroeide daken in de wintersituatie?	23
4.1 Inleiding	23
4.2 case studie 1	23
4.3 Case studie 2	26
4.4 case studie 3	28
4.5 Case studie 4	28
4.6 Casestudie 5	30
4.7 Casestudie 6	32
4.8 Conclusie	33
5. Welke gevalideerde modellen hanteren de onderzoekers voor het bepalen van de thermische eigenschappen van begroeide daken?	34
5.1 Inleiding	34

5.2 Gevalideerde modellen voor het bepalen van de thermische eigenschappen van begroeide daken.	
5.2.1 Model van Feng et al.	34
5.2.2 Model van Ouldboukhitine et al.	35
5.2.3 Model van Tabares-Velasco et al.	37
5.2.4 Model van Djedig et al.	38
5.3 Analyse van de rekenkundige modellen	40
5.4 Conclusie	45
6. In welke mate beïnvloeden de eigenschappen van een begroeid extensief dak de thermische werking?	46
6.1 Inleiding	46
6.2 Uitwerking energiebalansmodel	46
6.2.1 Energiebalans begroeiing	49
6.2.2 Energiebalans substraat	51
6.2.3 waterbalans	52
6.2.4 Numerieke oplossingen	53
6.3 rekentool	53
6.4 Conclusie	55
6.5 Discussie	56
7. Wat is de invloed van de thermische werking van begroeide daken op de energieverbruik van een woning?	57
7.1 Inleiding	57
7.2 Berekening R-waarde van een begroeid dak op een koude winterdag	57
7.3 EPC berekeningen van een woning met verschillende isolatie niveaus	59
7.4 EPC berekeningen van een woning met verschillende woonlagen	60
7.5 Conclusie	61
Bijlage:	62
Prototype warmtebalansmodel	

1. Inleiding

1.1 Probleemschets

In de jaren '70 is in de samenleving milieubewustheid ontstaan, mede door het in 1972 verschenen rapport 'The Limits to Growth' van de Club van Rome, een collectief van wetenschappers. Dit en opvolgende rapporten hebben sterk bijgedragen aan het besef dat fossiele brandstoffen beperkt beschikbaar zijn, omdat de natuurlijke wijze waarop zij ontstaan gewoonweg te langzaam is in vergelijking met het huidige verbruik van de mens. Dit heeft als gevolg dat de voorraad aan fossiele brandstoffen op raakt. Bovendien komt CO₂ vrij bij verbranding van fossiele brandstoffen. Een verhoogde concentratie van CO₂ in de atmosfeer veroorzaakt klimaatsverandering als gevolg van het broeikaseffect.

Het is mogelijk om de bovengenoemde problemen op te lossen door het gebruikmaken van duurzame energiebronnen. Voorbeelden hiervan zijn zonne-energie, windenergie, waterenergie en geothermische energie. Een ander alternatief is het beperken van het energieverbruik onder andere door betere isolatie in gebouwen en door duurzaam te bouwen. Isolatie kan inwendig worden toegepast, maar ook uitwendig. Begroeide daken worden in toenemende mate toegepast voor onder andere de esthetische effect, waterbuffering, verbetering van de luchtkwaliteit en vermindering geluidsoverlast. Daarnaast worden ook thermische voordelen toegeschreven aan groene daken. In de zomer zou een begroeid dak voor temperatuurvermindering zorgen, het 'urban heat island'-effect (een fenomeen gekenmerkt door hogere temperatuur in een stedelijke gebied vergeleken met het omliggende landelijk gebied, voor nader toelichting zie hoofdstuk 2.4.2) en in de winter voor een isolerend werking [1-3]. Deze thermische voordelen van groene daken kunnen bijdragen aan energiebesparing van gebouwen. Temeer omdat verwarming van gebouwen een aanzienlijk deel (ca. 40%) uitmaakt van het totale energieverbruik in Nederlandse huishoudens [4]. Echter, de resultaten uit recente onderzoeken naar deze thermische voordelen spreken elkaar tegen [5-25]. Deze tegenstrijdigheden hebben mogelijk te maken met onder andere de gebruikte meetopstellingen-en methodes, het klimaat ter plaatse en het gebouwtype. Als gevolg hiervan is de marktgroei van groene daken gedeeltelijk belemmerd [26, 27]. Het is juist daarom interessant om te onderzoeken wat de thermische effecten zijn van begroeide daken en welke eigenschappen van het dak de thermische effecten beïnvloeden. Indien de begroeide daken een isolerend werking hebben, wat de energieprestatie winst is van begroeide daken ten opzichte van conventionele daken.

1.2 Belanghebbenden

Het scheppen van duidelijkheid over de vermeende thermische voordelen van begroeide daken geven opdrachtgevers en leveranciers een extra verkoop/aankoopargument. Indien uit het onderzoek naar voren komt onder welke omstandigheden een begroeide dak tot energiebesparing leidt, kan dit nuttige informatie zijn voor vakspecialisten en ontwerpers. Voor de eigenaar/gebruiker van de ruimte onder het dak scheidt het eveneens duidelijkheid wat betreft de kosten besparing in de vorm van minder energieverbruik in de winter.

1.3 Onderzoeksvragen

Hoofdvraag

De hoofdvraag die in deze scriptie centraal staat is:

Wat is de thermische werking van een extensief begroeid plat dak tussen 30-120 mm dikte in de wintersituatie in Nederland en in welke mate beïnvloeden de eigenschappen van het dak deze werking?*

* extensief: onderhoudsarm

Om stapsgewijs tot het antwoord van deze hoofdvraag te komen hebben wij de volgende deelvragen gesteld.

Deelvragen

1: Wat zijn begroeide daken en welke types zijn er? In hoofdstuk 2 wordt een overzicht van verschillende types begroeide daken gegeven. De opbouw en de functies van de lagen waaruit begroeide dak systemen bestaan worden besproken.

2. Wat zijn de voor- en nadelen van begroeide daken? In hoofdstuk 3 worden de voor- en nadelen van begroeide daken en de voorwaarden van toepassing besproken.

3. Wat is er bekend over de thermische werking van begroeide daken in de wintersituatie? In hoofdstuk 4 worden studies besproken die de thermische werking van begroeide daken hebben onderzocht. In deze studies komen een aantal factoren aan bod die de thermische werking significant beïnvloeden.

4. Welke gevalideerde modellen hanteren onderzoekers voor het bepalen van de thermische eigenschappen van de begroeide daken? In hoofdstuk 5 wordt een overzicht gegeven van gevalideerde modellen voor de analyse van de thermische werking van begroeide daken. De modellen worden beoordeeld naar compleetheid (welke factoren zijn meegenomen in het model?) en significantie (zijn factoren die grote impact hebben in de thermische werking van het dak meegenomen?).

5. In welke mate beïnvloeden de verschillende eigenschappen van een begroeid extensief dak de thermische werking? In hoofdstuk 6 wordt het meest complete en significante model uit het vorige hoofdstuk uitgewerkt. Van dit model wordt een rekentool gemaakt om de dak eigenschappen op de thermische werking van een begroeid dak te bestuderen.

6. Wat is de invloed van een begroeid dak op de energieprestatie van een woning? In dit hoofdstuk wordt de energieverbruik van woningen met een begroeid dak en een plat dak met behulp van EPC berekend. De woningen variëren in isolatieniveau en woonlagen.

1.4 Afbakening

De thermische werking van een begroeid dak is afhankelijk van verschillende factoren. Deze scriptie beperkt zich tot de thermische werking van extensief begroeide platte daken tussen 30-120 mm dik in de Nederlandse winter situatie. Het onderzoek maakt deel uit van een twee jaar durend groot onderzoek van het lectoraat Innovatie Bouwproces en Duurzaamheid (IB&D) in samenwerking met de gemeente Rotterdam en het bedrijfsleven (RAAK-mkb). Het hoofdonderzoek richt zich op het ontwikkelen van een uniforme bepalingsmethode om de technische eigenschappen van verschillende typen begroeide daken te meten en te berekenen en om de innovatie te stimuleren met het doel de marktgroei van begroeide daken te stimuleren.

Referentie

[1] T. Susca et al., *Positive effects of vegetation: Urban heat island and green roofs*, Environmental Pollution, 159-2119-2126, 2011.

[2] E. Alexandri et al., *Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs*, Building and Environment 43-480-493, 2008.

[3] I. Jaffal et al., *A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance*, Renewable Energy, Elsevier, 2012.

[4] <http://www.energie-nederland.nl/wp-content/uploads/2011/08/Energie-in-Nederland-2011.pdf>.

- [5] A. Niachou et al., *Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance*, Energy and Buildings, 33-719-729, 2001.
- [6] C. Y. Jim et al., *Biophysical properties and thermal performance of an intensive green roof*, Building and Environment 46-1263-1274, 2011.
- [7] K. L. Getter et al., *Seasonal heat flux properties of an extensive green roof in a Midwestern U.S. climate*, Energy and Buildings 43-3548–3557 (2011).
- [8] S. W. Tsang et al., *Theoretical evaluation of thermal and energy performance of tropical green roofs*, Energy 36-3590-3598, 2011.
- [9] E. P. Barrio, *Analysis of the green roofs cooling potential in buildings*, Energy and Buildings 27-179-193, 1998.
- [10] R.M. Lazzarin et al., *Experimental measurements and numerical modelling of a green roof*, Energy and Buildings 37-1260–1267, 2005.
- [11] H.F. Castletona et al., *Green roofs; building energy savings and the potential for retrofit*, Energy and Buildings 42-1582–1591, 2010.
- [12] R. Kumar et al., *Performance evaluation of green roof and shading for thermal protection of buildings*, Building and Environment 40-1505–1511, 2005.
- [13] D. Morau et al., *Performance Evaluation of Green Roof for Thermal Protection of Buildings In Reunion Island*, Energy Procedia 14-1008-1016, 2012.
- [14] C. Y. Jim et al., *Weather effect on thermal and energy performance of an extensive tropical green roof*, Urban Forestry & Urban Greening 11-73–85, 2012.
- [15] D. J. Sailer, *A green roof model for building energy simulation programs*, Energy and Buildings 40-1466–1478, 2008.
- [16] [20] N. H. Wong et al., *The effects of rooftop garden on energy consumption of a commercial building*, Energy and Buildings 35-352-364, 2003.
- [17] G. Kotsiris et al., *Dynamic U-value estimation and energy simulation for green roofs*, Energy and Buildings 45-240–249, 2012.
- [18] D. J. Sailor et al., *Exploring the building energy impacts of green roof design decisions- a modeling study of buildings in four distinct climates*, Journal of Building Physics, 2011.
- [19] J. Sonne et al., *Energy performance aspect of a Florida green roof*, FSEC-PF-442-08, 2008.
- [20] M. Santamouris et al., *Investigating and analyzing the energy and environmental performance of an experimental green roof system installed in a nursery school building in Athens*, Energy 32-1781–1788, 2007.
- [21] S. Parizotto et al., *Investigation of green roof thermal performance in temperate climate; A case study of an experimental building in Florianopolis city, Southern Brazil*, Energy and Buildings 43-1712–1722, 2011.
- [22] T. Hong et al., *LCC and LCCO2 analysis of green roofs in elementary schools with energy saving measures*, Energy and Buildings 45-229–239, 2012.
- [23] A. Spala et al., *On the green roof system. Selection, state of the art and energy potential investigation of a system installed in an office building in Athens Greece*, Renewable Energy 33-173–177, 2008.
- [24] S. Ray et al., *Potential Energy Savings of Various Roof Technologies*, Building Technology and Mechanical Engineerin, Cambridge, 2010.
- [25] A. Sfakianaki et al., *Theoretical and experimental analysis of the thermal behaviour of a green roof system installed in two residential buildings in Athens, Greece*, INTERNATIONAL JOURNAL OF ENERGY RESEARCH, 33:1059–1069, 2009.
- [26] Teeuw P.G., ravesloot C.M., 2011, *Begroeiide daken na 2010*, techne Press, Amsterdam.
- [27] www.edepot.wur.nl/170191

2. Wat zijn begroeide daken en welke types zijn er?

2.1 Inleiding

Begroeide daken worden al lange tijd toegepast. Een van de eerste voorbeelden is “de hangende tuinen van Babylon” (600 v. Chr.), een van de zeven wereldwonderen. Begroeide daken worden in toenemende mate toegepast in steden sinds de invoering van platte daken en de benodigde technologische ontwikkeling hiervoor in de jaren tachtig vorige eeuw [1].

In dit hoofdstuk wordt de verschillende typen begroeide daken en de opbouw hiervan besproken.

Een begroeide dak is een dak dat bedekt is met een vegetatie die wortelt in een substraatlaag. De vegetatie kan bestaan uit sedums, mossen, grassen, kruiden, heesters en bomen (afbeelding 2.1-2.6) [2]:



Afbeelding 2.1: Mos-sedumdak



Afbeelding 2.2: Sedum-kruidendak



Afbeelding 2.3: Gras-Kruidendak



Afbeelding 2.4: Dakpark met hoge heesters



Afbeelding 2.5: Dakmoestuin



Afbeelding 2.6: Dakpark met bomen

2.2 Verschillende typen begroeide daken

In grote lijnen zijn er twee soorten begroeide daken: extensief of intensief. Een extensief dak is een lichtere versie van een begroeide dak, ook wel vegetatiedaken genoemd. Daken waarop parken en tuinen zijn aangelegd worden daktuinen of intensieve daken genoemd. Tussenvormen ervan bezitten eigenschappen van zowel een extensief als een intensief dak [3].

Tabel 1: Indeling begroeide daken en opbouwhoogte substraat laag [4].

Soort	Type begroeiing	Planten	Opbouwhoogte (mm)
Vegetatie daken	Extensief	Mos-sedum	20-80
		Sedum	80-100
		Sedum-kruiden	80-150
		Gras-kruiden	150-200
Daktuinen	Intensief	Bodembedekkers	150-250*
		Lage heesters	250-500
		Moestuin	400
		Hoge heesters	500-600
		Bomen	800-1100

*Intensieve daken met een opbouwhoogte van 150 tot 200 mm worden ook wel 'licht intensieve daken' genoemd.

2.2.1 Extensieve begroeide daken

Extensieve begroeide daken hebben een substraat dikte tussen 20 mm en 200 mm. De beplanting van dit type daken moet extreme omstandigheden op de daken zelfstandig kunnen overleven. Vaak komen deze plantsoorten uit rotsachtige en woestijnachtige gebieden zoals sedums, mossen, kruiden en grassen. De naam extensief dak verwijst naar het feit dat het dak onderhoudsarm is. Een

onderhoudsfrequentie van 1-2 keer per jaar is voldoende. Het onderhoud bestaat uit het schoonmaken van grindstroken, controleren van het waterafvoer, herbeplanting van kale plekken en verwijderen van ongewenste begroeiing [5]. In droge periodes is besproeiing niet nodig.

2.2.2 Intensief begroeide daken

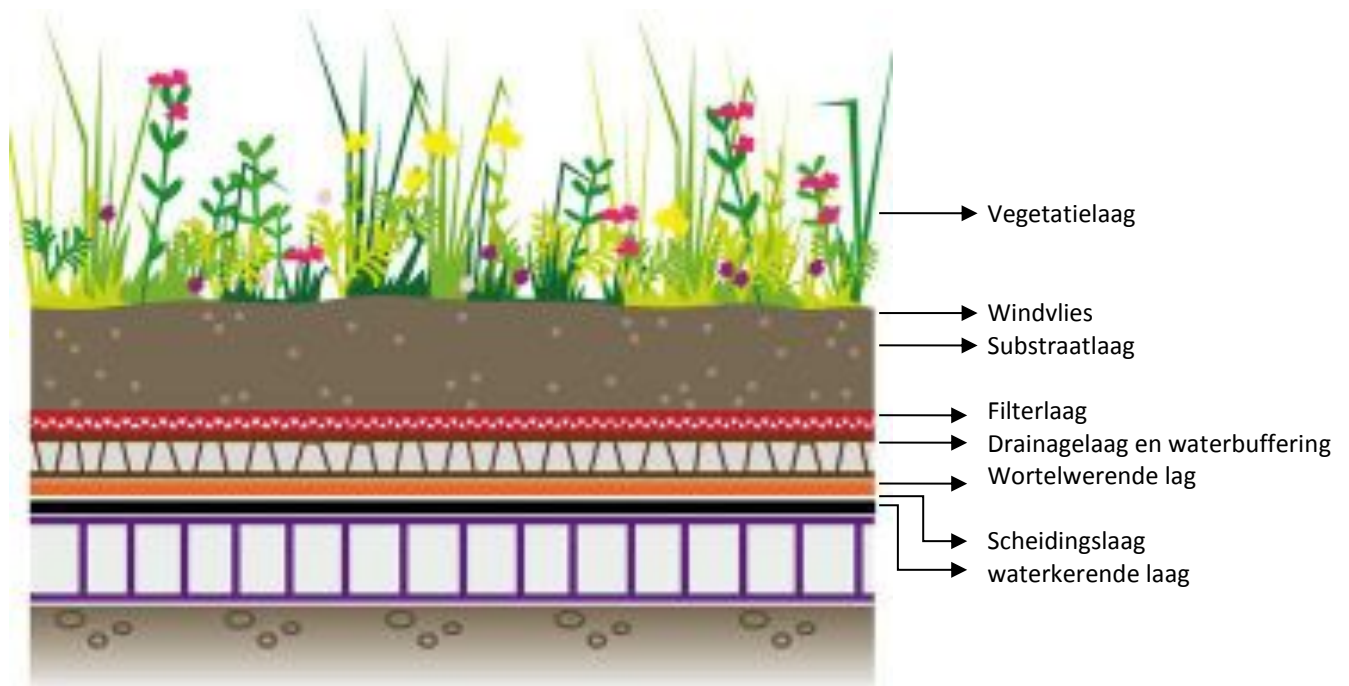
Een intensief dak heeft een substraat dikte van 150 mm of hoger. De beplanting van intensief dak is divers en bestaat uit sedums, mossen, grassen, heesters en bomen. Bij dit type dak is mogelijk om terrassen, sportvelden, paden, vijvers en wegen aan te leggen. Intensief begroeide daken hebben in tegenstelling tot extensief begroeide daken veel onderhoud nodig. De onderhoudsfrequentie is gemiddeld 2-3 keer per maand. Het onderhoud bestaat uit snoeien, bemesten en wieden van onkruid. Een intensief begroeid dak moet het gehele jaar van water worden voorzien. De verschillen tussen extensief dak en intensief dak worden aangegeven in tabel 2.

Tabel 2: Kenmerken van intensieve en extensieve daken [5].

	Intensief groendak grasdak – daktuin	Extensief groendak begroeid dak – sedumdak
Opbouw laagdikte	> 20 cm 25 – 50 cm: gras, kruiden, struiken > 50 cm: kruiden, struiken, bomen.	< 20 cm 2 – 6 cm: mossen en vetplanten 8 – 12 cm: mossen, vetplanten, kruiden. 12 – 21 cm: vetplanten, gras, kruiden
Helling van het dak Groengrasdak	1° tot 4° (2% tot 7%) tot 45° (2% tot 5%)	1° tot 45° of 60° (2% tot 5%)
Belasting	> 200 kg/m ² aangepaste dakconstructie vereist	40 tot 110 kg / m ²
Beloopbaar	Ja	Nee (geen daktuin / terras)
Realisatie bij nieuwbouw	In overleg te bepalen	Ja
Realisatie bij renovatie	Nee	Ja
Draagkracht dakconstructie	Controle door deskundige / bouwkundige	Controle door deskundige / bouwkundige
Vergunning vereist	Ja	Nee
Onderhoud	Onderhoud zoals een 'echte tuin'	Beperkt onderhoud

2.3 Opbouw van begroeide daken

De opbouwlagen van een intensief en extensief dak zijn over algemeen hetzelfde. De verschillende lagen van een begroeid dak zijn weergegeven in afbeelding 2.7. De functies van de verschillende lagen worden hieronder besproken [3].



Afbeelding 2.7: Opbouw van begroeide daken [www.thecodestore.co.uk].

Vegetatielaag

Deze laag kan bestaan uit sedums, mossen, kruiden, grassen, struiken, heesters, bolgewassen en bomen. Behalve een esthetische functie, heeft deze laag ook ecologische functies zoals het vergroten van de biodiversiteit, bijdragen aan waterverdamping en het verminderen van de “hitte eiland-effect” (zie paragraaf 2.4.2).

Windvlies

Deze laag zorgt voor een goede verankering van plantenwortels tegen erosie. Het windvlies zit in de substraatlaag. Het kan gemaakt worden uit fijnmazige netten, kunststof, jutte of biologisch afbreekbare gel.

Substraat

De substraatlaag is de voedingsbodemaag voor de vegetatie. Deze voedingsbodem neemt lucht en water op en zorgt voor voedingsstoffen in de juiste zuurgraad. Tevens draagt het substraat bij aan de waterberging. De substraatlaag bestaat voornamelijk uit organische materiaal (mengsel van aarde, klei, lava, zand, etc.), soms aangevuld met anorganische materiaal en kunststofmaterialen.

Filterlaag

Deze laag moet voorkomen dat de fijne substraatdelen worden weggespoeld en terecht komen in de drainagelaag. De filterlaag bestaat tegenwoordig vaak uit synthetische materiaal, bijvoorbeeld een vlies uit polyester, nylon of polyethen. Soms kan deze laag ook bestaan uit turf of fijnkorrelige zand.

Drainagelaag en waterbuffering

Deze laag zorgt ervoor dat het overtollige water na een regenbui afgevoerd wordt. Dit is nodig voor een succesvolle plantengroei. Tevens slaat deze laag een deel van het water op voor de planten in de droge periodes (waterbuffering). De drainagelaag kan bestaan uit kiezel, soms met zandtoevoeging, lava, geëxpandeerde vulkaniet, kleikorrels, kokosmatten, steenwolplaten, en synthetische matten. Tegenwoordig worden vaak kunststofelementen in vorm van eierdozen gebruikt om water zolang mogelijk te bufferen en de afvoer te vertragen.

Wortelwerende laag

Deze laag beschermt de dakconstructie tegen plantenwortels die doorgroeien. Dit kan gerealiseerd worden met folies, kunststofmembranen, kunststof bevattend bitumen dakbanen, of met constructies waarbij een luchtsponw ervoor zorgt dat de wortels afsterven.

Scheidingslaag

Deze laag voorkomt onderlinge reacties van materialen van verschillende lagen zoals een bovenlaag van PVC van een onderlaag met bitumen. Een scheidingslaag wordt alleen toegepast bij renovaties, omdat in nieuwbouw is de waterkerende laag gecombineerd met de wortelwerende laag en dus is de scheidingslaag niet meer nodig.

Waterkerende laag

In nieuwbouw is de waterkerende laag gecombineerd met de wortelwerende laag. Deze laag voorkomt dat het water in de dakconstructie komt.

Begroeide daken kunnen ook bestaan uit minder lagen dan hierboven is aangegeven. Ook kunnen bepaalde lagen gecombineerd worden. Op basis van de laagopbouw kan begroeide daken onderverdeeld worden in drie systemen [5].

- Eenlaagse systemen: de begroeiing wordt rechteerks in een substraatlaag geplant. Er is geen drainage en geen waterreservoir. Dit systeem zal op termijn voor problemen zorgen, onder meer op het gebied van de waterdichting. Er is geen waterbufferfunctie.
- Tweelaagse systemen: Deze systemen zijn samengesteld uit een substraat en een drainagelaag, over het algemeen gescheiden door een filtervlies.
- Drielaagse systemen: behalve een substraat en een drainagelaag, bevatten deze systemen ook een waterreservoir, al dan niet geïntegreerd in de drainagelaag. De planten kunnen in periodes van droogte het nodige vocht uit de waterreservoir halen.

In Nederland komen eenlaagse systemen bijna niet meer voor. De leveranciers leveren uitsluitend de twee-en drielaagse systemen. Dit onderzoek richt zich alleen op twee-en drielaagse systemen.

Referentie

[1] www.edepot.wur.nl/170191.

[2] www.optigroen.nl

[3] Teeuw P.G., ravesloot C.M., 2011, *Begroeide daken na 2010*, techne Press, Amsterdam.

[4] Prof. G. Losken, 2006, *SBR – Dakbegroeiingsrichtlijnen 2006*, Rotterdam.

[5] <http://www.groendak.info>.

3. Wat zijn de voor-en nadelen van begroeide daken?

3.1 Inleiding

Begroeide daken zijn niet alleen esthetisch fraai, maar hebben ook vele voordelen zoals waterbufferende werking, verbetering van de stadsklimaat, verbetering van de biodiversiteit, en verlenging levensduur van het daksysteem. Naast de vele voordelen zijn er ook enkele nadelen.

3.2 Voordelen begroeide daken

Anno 2012 telt de wereldbevolking 7 miljard mensen, waarvan 50% in stedelijke gebieden wonen. Begroeide daken worden steeds vaker toegepast op de daken van Nederlandse steden [1]. De voordelen hebben veelal betrekking op het verminderen van een aantal negatieve milieu- en gezondheidseffecten die door bebouwing in de stad wordt veroorzaakt [1,2,3]. De voordelen worden hieronder besproken.

3.2.1 Waterbuffering en watervertraging

De water bufferende en vertragende eigenschappen van begroeide daken worden erkend als een van de belangrijkste voordelen [1]. Deze eigenschappen vormen de reden van gemeentes om subsidies te verstrekken voor het aanleggen van begroeide daken. Begroeide daken kunnen tot 50% van het regenwater vasthouden. Het andere deel van het regenwater wordt vertraagt aangeboden aan het riool door het lagensysteem van begroeide daken. Beide eigenschappen voorkomen overbelasting van het rioolstelsel tijdens een hevige regenbui. Bovendien komt een gedeelte van het vastgehouden water via verdamping direct terecht in de natuurlijke kringloop. Begroeide daken kunnen daarom worden ingezet als instrument voor een duurzaam waterbeheer.

De mate van water bufferende is afhankelijk van vele factoren, onder andere het klimaat, het soort substraat, de dikte van het substraat, de soort beplanting, het type drainage systeem en het afschot van het dak [1,4]. Momenteel wordt onderzoek verricht naar de mate van deze waterbuffering binnen de kader van het onderzoek van de Lectoraat Innovatie Bouwproces en Duurzaamheid (IB&D).

3.2.2 Stadsklimaat verbetering

Hitte eiland effect

In stedelijke gebieden met weinig groen en veel bestrating kunnen overdag de temperatuur net als in een woestijn snel oplopen. Het fenomeen houdt in dat de temperatuur in een stedelijke gebied gemiddeld hoger is dan in het omliggende landelijk gebieden. Gebouwen moeten veel meer gekoeld

worden en mensen lopen grotere kans op hittestress. Begroeiing op daken zorgen ervoor dat de daken minder opwarmen en ook minder warmte uitstralen. Grootschalig toepassing van begroeide daken zou zorgen voor het minder oplopen van de temperaturen in de stad [5].

Vermindering piekbelasting energiecentrales

Vermindering van het hitte-eiland effect leidt tot minder vraag naar koeling en dit leidt tot lagere pieklasten voor elektrische centrales en energiebesparing [1].

Fijnstof binding

Op donkere bitumineuze daken en steenachtige oppervlakten ontstaat warme lucht die opstijgt en fijnstofdeeltjes meeneemt. Beplanting kan fijnstofdeeltjes binden en daardoor zorgen voor minder luchtvervuiling en verbetering van het microklimaat in de stad. Uit recent onderzoeken blijken dat begroeide daken indien op grote schaal worden toegepast, 10-20% van de vervuiling uit de lucht filtreren [1,4,5].

CO2 reductie

Door fotosynthese zetten planten CO₂ en water om in zuurstof en koolhydraten. Een bladoppervlakte van 25m² produceert de hoeveelheid zuurstof wat een mens per dag nodig heeft. CO₂, een van de broeikasgassen zorgt voor temperatuur verhoging van de aarde welke weer leidt tot een wereldwijde klimaatverandering. Beplanting van daken draait bij aan de CO₂ reductie en daarmee aan vermindering van de opwarming [1,6].

3.2.3 Multifunctioneel ruimtegebruik

De grondprijzen in stedelijke gebieden stijgen. Ruimtes worden voller gebouwd. Meerdere gemeenten offeren openbaar groen op aan bebouwing. Door daken te laten begroeien worden kostbare ruimtes efficiënt benut [1].

3.2.4 Biodiversiteit

In de stedelijke gebieden komen veel bijzondere plantensoorten voor en daar is de biodiversiteit het hoogst. De landelijke gebieden worden vaak getypeerd door eentonige berm- en landbouw gewassen. Op begroeide daken zijn de klimatologische en bodemomstandigheden zeer verschillend van de omstandigheden van de grond. Plantensoorten die aangepast zijn op omstandigheden van de daken kunnen daar tot bloei komen. Door begroeide daken toe te passen op diverse hoogteniveaus worden verschillende omstandigheden gecreëerd en de biodiversiteit verhoogt [1].

3.2.5 Psychologie

Begroeide daken bieden een aantrekkelijk uitzicht op de daken van gebouwen. Over het algemeen is in een stedelijke omgeving gebrek aan groen. Begroeide daken compenseren gedeeltelijk de behoefte. Studies hebben aangetoond dat een natuurlijke omgeving de aandacht van de kijker vasthoudt en verlegt weg van zichzelf, en een meditatie-achtige stand uitlokt [7].

3.2.6 Geluidsisolatie

Begroeide daken hebben een uitstekende geluiddemping, in het bijzonder voor de lage frequenties. Een extensief dak kan gereflecteerde geluid verminderen met 40 decibel, terwijl een intensief dak het geluid met 46-50 decibel reduceert [8].

3.2.7 Thermisch comfort/energie besparing

In de zomer zou een begroeid dak voor temperatuur verlaging zorgen en in de winter voor een isolerend werking. Deze vermeende thermische voordelen zijn afhankelijk van vele factoren zoals klimaat, seizoen, type gebouw, etc. Onderzoeken zijn niet conclusief. [9, zie referentie hoofdstuk 1: 5-25]. Dit onderzoek dient duidelijkheid te verschaffen over de isolerende werking in de wintersituatie.

3.2.8 Bescherming dakbedekking

Een begroeide dak verhoogt de levensduur van de dakbedekking. De substraatlaag en de vegetatielaag beschermen de dakbedekking tegen schadelijke effecten van direct zonlicht, regen, hagel, wind en temperatuurschommelingen. Uit metingen is gebleken in de zomer wanneer de zon op een bitumen dak schijnt de temperatuur kan oplopen tot 80 graden [8]. In een winternacht kan de temperatuur van het dak dalen tot -30 graden. Bij een begroeid dak blijft dit redelijk constant. Dit komt door accumulatie vermogen van een begroeid dak [1]. Men kan als vuistregel hanteren dat de dakbedekking met begroeiing twee keer zolang mee gaat dan zonder begroeiing [8].

3.2.9 Waarde verhoging vastgoed

Uit onderzoek blijkt dat mensen bereid zijn om meer te betalen voor een woning met een groen uitzicht [5]. Dit kan leiden tot een prijsstijging met 12% [10].

3.3 Nadelen begroeide daken

De nadelen van begroeide daken worden hieronder besproken.

3.3.1 Aanlegkosten en onderhoudskosten

Het aanleggen van een begroeide dak brengt kosten met zich mee. De kosten voor het aanleggen verschilt per systeem. De laagste prijs ligt rond 45 euro per m². In enkele steden zoals Rotterdam worden subsidies gegeven voor het aanleggen van begroeide daken. Een voorwaarde voor de subsidiering is dat het dak minimaal 15 liter water per m² kan vasthouden [3].

Er zijn ook onderhoudskosten aan een begroeid dak verbonden, die zijn hoger dan een conventionele dak. De onderhoudskosten van een extensief dak zijn lager dan een intensief dak. De onderhoudskosten van een extensief dak is circa 1 euro per m² per jaar. Voor een intensief dak is het vergelijkbaar met een tuin [3].

3.3.2 Lekkages

Lekkage is een grote nadeel van een begroeide dak. Een lekkage bij een bitumen dak/ conventionele dak is makkelijk te achterhalen. De plek van de lekkage bij een begroeid dak is zeer moeilijk te vinden. Daarnaast ook zeer lastig te repareren. De kans op beschadiging tijdens onderhoud is groter bij een begroeid dak dan bij een bitumen dak door het intensievere onderhoud. Verkeerde aanleg en verkeerd gebruik van een begroeid dak zijn veel voorkomende oorzaken van lekkages [1].

3.3.3 Windbelasting

Waar een opwaartse richting van de wind kan het substraat bij extensieve daken, als het erg droog is, opwaaien. Er moet rekening mee gehouden worden bij de aanleg. Bij intensieve daken met bomen moet de windbelasting berekend worden door een constructeur, wat ook kosten met zich meebrengt. De bomen moeten op de juiste manier vergrendeld zijn aan het dak [1,3].

3.4 Wat zijn de voorwaarden van toepassing van begroeide daken?

De voorwaarde voor het aanleggen van begroeide daken is dat de dakconstructie sterk genoeg moet zijn om het gewicht van het groene dak te kunnen dragen. Lichte extensieve daken zijn voor de meeste daken van bestaande bouw geschikt. Een gebouw met een grind dak kan een zwaarder groen dak houden omdat het gewicht van het grind vervangen wordt door het gewicht van het vegetatiedak. Intensieve daken zijn alleen op enkele uitzonderingen na geschikt voor nieuwbouw wegens hun zware eis aan de dakconstructie. Extensieve daken zijn vanwege deze draagkrachtedenen het meest toegepast. Om een begroeid dak te kunnen aanleggen, mag de dakhelling niet groter zijn dan 45° [11].

Referentie

- [1] Teeuw P.G., ravesloot C.M., *Begroeide daken na 2010*, techne Press, Amsterdam 2011.
- [2] www.optigroen.nl.
- [3] <http://www.zinco.nl>.
- [4] T. Carter et al., *Life-cycle cost–benefit analysis of extensive vegetated roof systems*, Athene 2007.
- [5] D. Banting et al., *Report on the Environmental Benefits and Costs of Green Roof Technology for the City of Toronto*, Dept. of Architectural Science, Ryerson University 2005.
- [6] <http://nl.wikipedia.org>.
- [7] D. Townshend, *Study on green roof application in Hong Kong*, Architectural service department 2007.
- [8] <http://www.greenroofs.org>.
- [9] Hilten, R., *An analysis of the energetic and stormwater mediation potential of greenroofs*, M.S. Thesis, Department of Biological and Agricultural Engineering, University of Georgia, Athens 2005.
- [10] T. Bade, G. Smid, Tonneijck F., *Groen loont!*, De groene stad.
- [11] G. Losken, *dakbegroeiingsrichtlijn, richtlijn voor ontwerp, aanleg en onderhoud van dakbegroeiingen*, 2006.

4. Wat is er bekend over de thermische werking van begroeide daken in de wintersituatie?

4.1 Inleiding

Tot op heden zijn er veel onduidelijkheden over de thermische werking van begroeide daken in de wintersituatie. De thermische werking van begroeide daken is zeer moeilijk te onderzoeken. Deze werking is afhankelijk van de eigenschappen van het dak en van omgevingsfactoren. In dit hoofdstuk worden een aantal onderzoeken beschreven die illustreren welke factoren de thermische werking beïnvloeden in de wintersituatie.

4.2 case studie 1

Jaffal et al. [1], *A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance*, Renewable Energy, 2012.

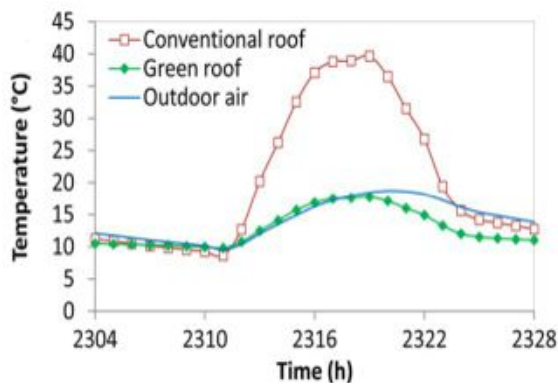
Jaffal et al. vergeleek de energieprestatie van een gebouw met een extensief begroeid dak met een gebouw met een traditioneel dak in Athene, La Rochelle en Stockholm. Het energieverbruik tussen beide gebouwen werd berekend met behulp van een gevalideerde warmtebalansmodel gekoppeld aan een energiesimulatieprogramma Transient System Simulation Program (TRNSYS).

Als voorbeeldgebouw was een eengezinswoning genomen met een oppervlakte van 96 m², met een raam percentage van 18%, een dakisolatie van 2,5m²K/W en een interne warmtelast van 5 W/m². De beplanting van het extensief begroeide dak bestond uit sedum en had een LAI van 2 (Leaf Area Index geeft aan hoeveel lagen bladeren het substraat bedekt is). Het substraat bestond uit 40% compost en 60% vulkanisch materiaal.

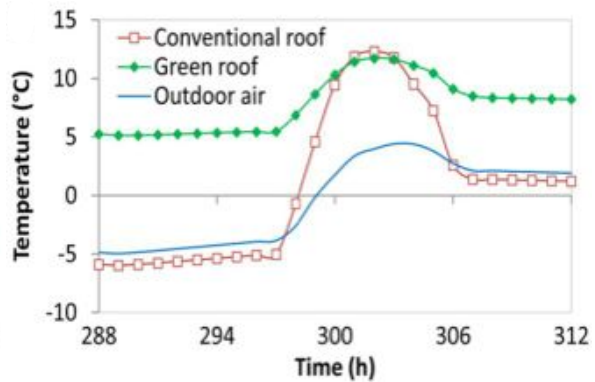
Zonlicht

La Rochelle in Frankrijk heeft een gematigd maritiem klimaat dat vergelijkbaar is met het Nederlandse klimaat (zelfde breedtegraad 51°). Figuur 4.1 laat zien dat op een zonnige winterdag de gemiddelde temperatuur van de dakplaat van het begroeide dak lager was dan het traditionele dak. Als gevolg hiervan verloor het begroeide dak 0,04 kWh/m²/dag meer energie dan het traditionele dak. Dit kwam voornamelijk door de zonwering van het substraat en de beplanting en het evapotranspiratie proces (het verdampen van water) in het begroeide dak. Zonwering van de beplanting zorgde ervoor dat het dak niet kon profiteren van het zonlicht. Door het verdampen van water wordt warmte onttrokken aan het dak en zo ontstond een luchtstroom waardoor het dak extra warmte verloor door convectie. Op een zonnige winterdag hadden de zonwering en de evapotranspiratie een negatieve effect op de energieprestatie van een gebouw.

De gemiddelde temperatuur van de dakplaat van het begroeide dak daarentegen, lag hoger dan het traditioneel dak op een koude winterdag met weinig zon (figuur 4.2). Als gevolg hiervan bespaarde het begroeide dak 0,06 kWh/m²/dag aan energie. Dit kwam voornamelijk door de isolerende werking van het substraat en de laag stilstaande lucht tussen de begroeiing. De laag stilstaande lucht tussen de begroeiing zorgde voor minder warmteverlies door convectie, daarnaast was stilstaande lucht een goede isolator. Evapotranspiratie speelde een kleine rol op een koude winterdag met weinig zon. Om de bovengenoemde redenen domineerden de isolerende factoren van een begroeide dak op een koude winterdag met weinig zon.



Figuur 4.1: Temperatuur van buitenoppervlak dakplaat in zonnige winterdag.



Figuur 4.2: Temperatuur van buitenoppervlak dakplaat in koude winterdag.

LAI (Leaf Area Index)

Het effect van de verschillende LAI waarde op de energieprestatie van een gebouw werd onderzocht in de wintersituatie in La Rochelle. Het LAI niveau varieerde van 0,5 tot 5,0. De resultaten zijn aangegeven in tabel 4.1. Een LAI van 0,5 gaf een energiebesparing van 0,6 kWh/m²/jaar. Bij een eengezinswoning met een oppervlakte van 96 m² zou een extensief begroeid dak bij een energie verbruik van 3480 kWh/jaar een energiebesparing van 1,7% geven op de totale energiekosten. Bij een LAI van 2 of hoger verbruikte een begroeid dak 36,1 – 36,0 = 0,1 kWh/m²/jaar meer energie dan een traditioneel dak, maar het is niet significant.

Tabel 4.1: Energievraag voor verwarming bij verschillende LAI niveaus.

Dak type	Energieverbruik verwarming (kWh/m ² /jaar)
Traditioneel	36,0
Begroeid dak LAI 0,5	35,4
Begroeid dak LAI 2,0	36,1
Begroeid dak LAI 3,5	36,2
Begroeid dak LAI 5	36,3

Dakisolatie

De thermische werking van begroeide daken is afhankelijk van de isolatie niveau van het dak. Jaffal et al. heeft in zijn onderzoek naar het energieverbruik bij verschillende dakisolatie niveaus gekeken. Tabel 4.2 laat zien dat een begroeid dak zonder isolatie 63,8 kWh/m²/jaar (48%) minder energie verbruikte voor het verwarmen van het gebouw dan een traditioneel dak zonder isolatie. Deze reductie was voornamelijk het gevolg van de warmteweerstand van een begroeid dak. Naarmate de isolatie niveau toenam, nam het isolerend effect van een begroeid dak af. Dit effect was niet meer significant bij een isolatie dikker dan 5 cm of meer.

Tabel 4.2: Energievraag voor verwarming van een eengezinswoning met een traditioneel dak en een begroeide dak met verschillende isolatie niveaus.

Isolatie niveau (cm)	Rc (m ² K/W)	Energieverbruik verwarming (kWh/m ² /jaar)	
		Traditioneel dak	Begroeid dak
0	0	133,6	69,8
5	1,3	45,6	43,0
10	2,5	36,0	36,1
15	3,8	32,4	32,8
20	5,0	30,5	31,0
25	6,3	29,3	29,8
30	7,5	28,5	29,0

Klimaat

De isolerende werking van begroeide daken is sterk afhankelijk van de omgevingsfactoren zoals de luchtvochtigheid, temperatuur, gemiddelde aantal uren zon, regenhoeveelheid en windsnelheid. Jaffal et al. bestudeerde het energieverbruik van een begroeid dak in verschillende klimaten. Hij toonde aan dat er nauwelijks verschil was tussen een gebouw met begroeid dak en een traditioneel dak (beide met dakisolatie van 10 cm) in energieverbruik in de wintersituatie in La Rochelle, waar een gematigd klimaat heerst als in Nederland (tabel 4.3). In Athene, nam het energieverbruik juist met 1,1 kWh/m²/jaar (8%) toe in gebouwen met begroeide daken als gevolg van de negatieve effecten van zonwering en evapotranspiratie in een zonnig klimaat. In Stockholm (met veel koude winterdagen met weinig zon) daarentegen zorgde een begroeid dak voor een energiebesparing van 10,7 kWh/m²/jaar (8%).

Tabel 4.3: Energieverbruik tussen een traditioneel dak en begroeid dak in verschillende klimaat.

Stad	Energieverbruik verwarming (kWh/m ² /jaar)	
	Traditioneel dak	Begroeid dak
Athene	14.1	15.2
La Rochelle	36.0	36.1
Stockholm	131.0	120.3

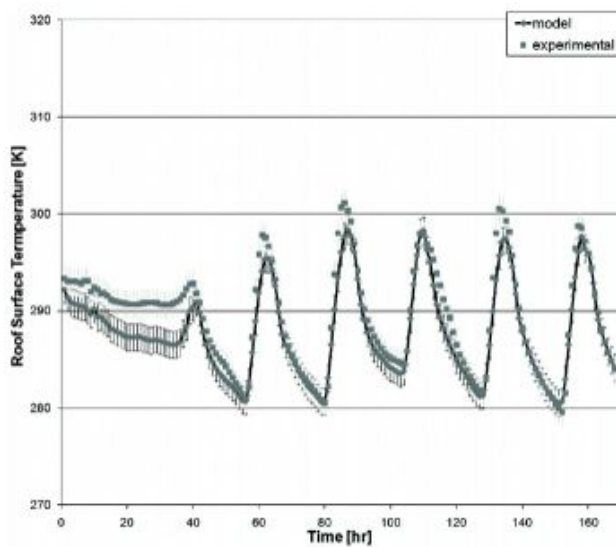
4.3 Case studie 2

Ray et al. [2], *Potential Energy Savings of Various Roof Technologies*, Building Technology and Mechanical Engineering at Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 2010.

Ray et al. ontwikkelde een tool (MIT Design Advisor 2010) om het energieverbruik van verschillende daksystemen (bitumen daken en begroeide daken) van verschillende gebouwtypen met verschillende isolatie niveaus en in verschillende klimaten te schatten. Het tool maakte gebruik van een gevalideerde bitumen dak model en een gevalideerde begroeid dak model (25 mm- 152 mm).

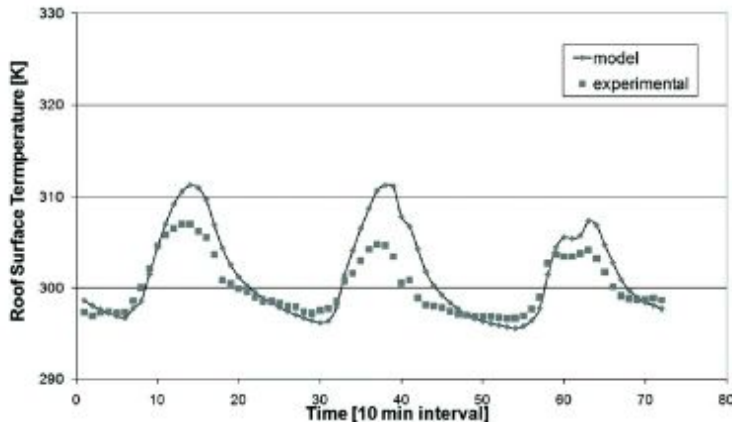
Validatie

Validatie vond plaats door gebruik te maken van twee experimentele data sets. Het eerste experiment is uitgevoerd in Florida. De berekende waarden met de tool verschilden 14% voor een begroeid dak van de werkelijk gemeten waarden (figuur 4.3). Het verschil van 14% is te verklaren uit het feit dat bij de experiment een andere type begroeiing is toegepast dan bij het model.



Figuur 4.3 De berekende waarden met behulp van het tool MIT design advisor 2010 uitgezet tegen de gemeten waarden uit een veldexperiment met een extensief begroeid dak in Florida in de winter.

Het tweede experiment is uitgevoerd in Japan. De berekende waarden met het tool verschilden 26% voor een begroeid dak van de werkelijk gemeten waarden (figuur 4.4). Terwijl de vegetatie van Japan beter overeenkwam met die van het model is het verschil in gemeten waarden en model waarden hier groter dan in Florida. De auteurs verklaarden het grotere verschil als gevolg van het ontbreken van de dakisolatie in Japan, waardoor de eigenschappen van het dakmateriaal een grote rol speelt in de thermische werking. Kleine verschillen in dakmateriaal eigenschappen tussen model en experiment leveren grote verschillen op in uitkomsten.

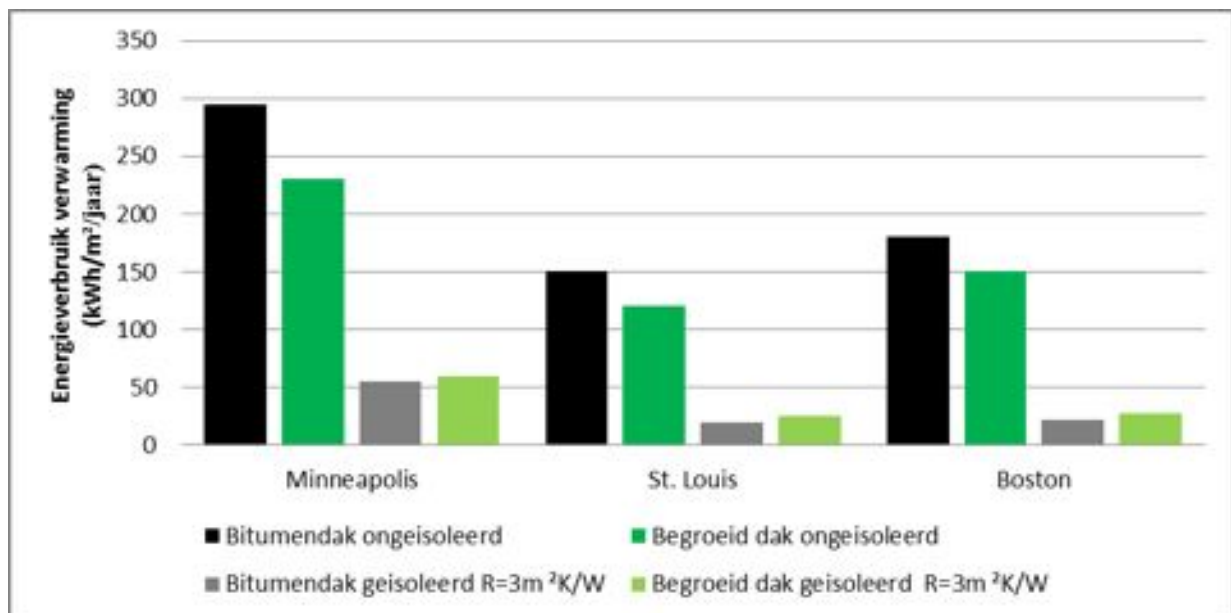


Figuur 4.4 De berekende waarden met behulp van het tool MIT design advisor 2010 uitgezet tegen de gemeten waarden uit een veldexperiment met een extensief begroeid dak in Japan in de winter.

Dakisolatie

De auteurs gebruikte het tool bij een kantoorgebouw met 1 verdieping met een raam percentage van 40% op de zuidgevel, dubbele beglazing, lichte thermische massa, mechanische verwarming en koeling. De gevels hebben een warmteweerstand van $2,0 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$. De ventilatievoud is 0,5 en de interne warmtelast is 7 W/m^2 .

Figuur 4.5 laat zien dat een begroeid dak zonder dakisolatie in een koud klimaat (Minneapolis, St. Louis en Boston) tussen 30 en 60 $\text{kWh/m}^2/\text{jaar}$ ($\pm 20\%$) minder energie verbruikte voor de verwarming dan een bitumen dak. De energiebesparing was met name het gevolg van de warmteweerstand van het substraat. Deze verschillen vielen weg bij het toevoegen van een dakisolatie van $3 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$.



Figuur 4.5: Energievraag voor verwarming van een kantoorgebouw met één verdieping, 40% beglazing, lichte thermische massa, bij zowel een ongeïsoleerd als een geïsoleerd bitumen/begroeid dak.

4.4 case studie 3

Niachou et al. [3], *Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance*, National Kapodistrian University of Athens, Energy and Buildings, 2001.

Niachou et al. onderzocht de energieprestatie van begroeide daken versus traditionele daken met verschillende isolatieniveaus in Athene. Dit theoretisch model is gevalideerd voor de zomerperiode in Athene. De energieprestatie werd berekend voor zowel de zomer als de winterperiode in Athene door de warmtedoorgangscoefficiënt (U-waarde) van het dak te koppelen aan het energiesimulatie programma Transient System Simulation Program (TRNSYS). De U-waarde van de begroeiden daken werd verkregen uit de productinformatie.

Dakisolatie

De energieprestatie werd berekend voor een hotel, met een ventilatievoud van 0,5 en een bezittingsgraad van 10 m²/persoon. In tabel 4.4 zijn de R-waarden aangegeven in plaats van U-waarden voor de vergelijking met de andere casestudies. De tabel laat zien dat het verschil in energieverbruik tussen traditioneel en begroeid dak het grootst was bij ongeïsoleerde daken.

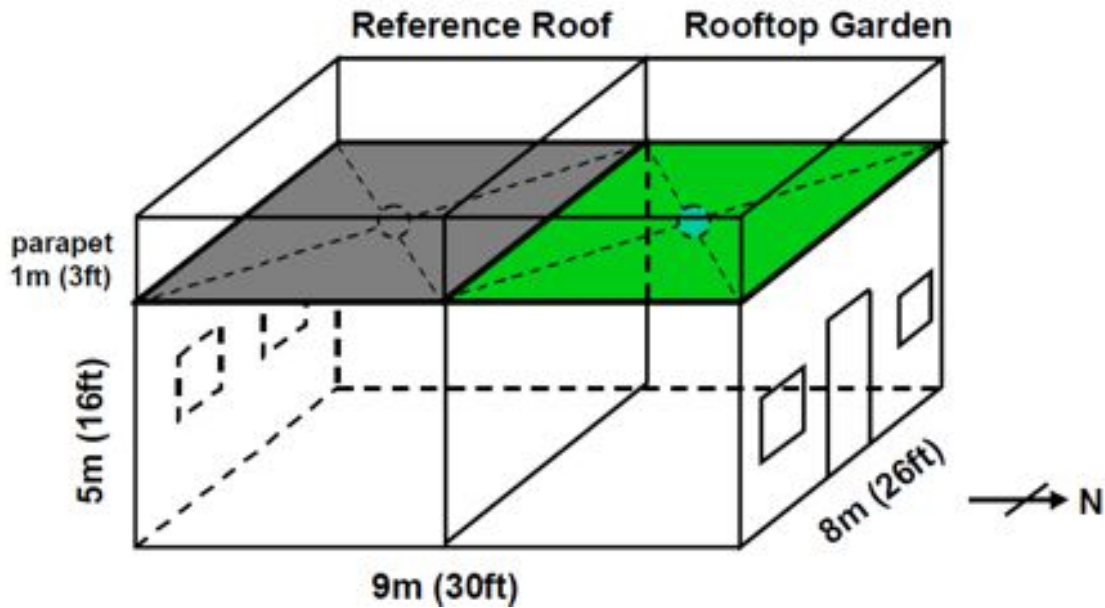
Tabel 4.4: R-waarden en energieverbruik van traditioneel daken en begroeid daken met verschillende isolatieniveaus in Athene.

Type dak	R-waarde dak <i>traditioneel dak</i> (m ² K/W)	Energieverbruik verwarming <i>traditioneel dak</i> (kWh/m ² /jaar)	R-waarde dak met <i>begroeid dak</i> (m ² K/W)	Energieverbruik verwarming <i>begroeid dak</i> (kWh/m ² /jaar)
Goed geïsoleerd	2,50-3,85	12	2,94 – 4,17	11
Matig geïsoleerd	1,25-1,35	15	1,69 – 1,82	13
Ongeïsoleerd	0,06-0,13	42	0,50 – 0,58	23

4.5 Case studie 4

Liu et al. [4], *Thermal performance of green roofs through field evaluation*, National Research Council, Institute for Research in Construction 1500 Montreal Road, Ottawa, Ontario, Canada, 2003.

Liu et al. heeft een veldonderzoek uitgevoerd in Ottawa Canada van november 2000 tot september 2002 om de energieprestatie van een begroeid dak en een bitumen dak te meten. De meetopstelling is proefgebouw van 9 m lang, 8 m breed en 5m hoog. Het dak is verdeeld in twee delen door borstwering van 1m hoog (figuur 4.6).



Figuur 4.6: Schematisch tekening proefgebouw.

De opbouw van het bitumen dak en het begroeide dak is aangegeven in tabel 4.5. Het dak heeft een R-waarde van $2,5\text{m}^2\text{K/W}$.

Tabel 4.5: de opbouw van het bitumen dak en het begroeide dak.

Lagen	Referentie dak	Begroeid dak
Draagconstructie	Staal/houten draagconstructie afgedekt met houtplaat 22mm	Idem
Damp remmende laag	Membraam van asfaltbasis	Idem
Isolatie	Mineraal wol 75mm	Idem
Dakpaneel	Vezelplaat 12,5mm	Idem
Waterkerende laag	Twee laags bitumen membraam	Idem
Drainagelaag	N.v.t.	Geëxpandeerd polystyreen paneel 36mm
Filterlaag	N.v.t.	Polyester mat
Substraat	N.v.t.	Licht gewicht substraat 150mm
Begroeiing	N.v.t.	Weide begroeiing

De metingen zijn gedaan van november 2000 tot 2002. De beplanting was pas volgroeid in de zomer van 2001. Daarom worden in dit verslag alleen de resultaten van de winter 2001/2002 besproken. In de wintersituatie is het temperatuurprofiel van het dak zeer afhankelijk van de hoeveelheid

sneeuwbedekking. Zonder sneeuwbedekking had een begroeid dak een hogere temperatuur dan een bitumen dak. Er was geen verschil in temperatuurprofiel tussen de daken bij een volledige sneeuwbedekking. De auteurs concludeerden dat een begroeid dak in Ottawa met een vochtig continentaal koud klimaat in de winter 13% tot 14% meer energie bespaarde dan een bitumen dak (tabel 4.6).

Tabel 4.6: Energiebesparing in de wintermaanden van een begroeid dak ten opzichte van een bitumen dak in Ottawa.

Wintermaanden	Energiebesparing begroeid dak (%)
December 2001	13
Januari 2002	13
Februari 2002	14

4.6 Casestudie 5

Sailor et al. [5], *Exploring the building energy impacts of green roof design decisions – a modeling study of buildings in four distinct climates*, Journal of Building Physics, 35(4) 372–391, 2011.

Sailer et al. onderzocht de effecten van verschillende begroeide daken op de energiestaat van verschillende type gebouwen (kantoor en woning) op verschillende plaatsen (Phoenix, New York, Portland en Houston). De begroeide daken varieerden in LAI en substraat dikte. In dit verslag laten we de resultaten zien van de energiestaat van gebouwen in Portland met een zeeklimaat net als Nederland. De energiestaat van gebouwen met begroeide daken met een substraat dikte boven de 150mm vallen buiten de scope. Voor dit onderzoek gebruikte Sailer et al. een begroeid dak model dat ontwikkeld is door Portland State Universiteit (Sailer, 2008). Het model wordt gekoppeld met EnergyPlus, energiestaatprogramma voor gebouwen van april 2007.

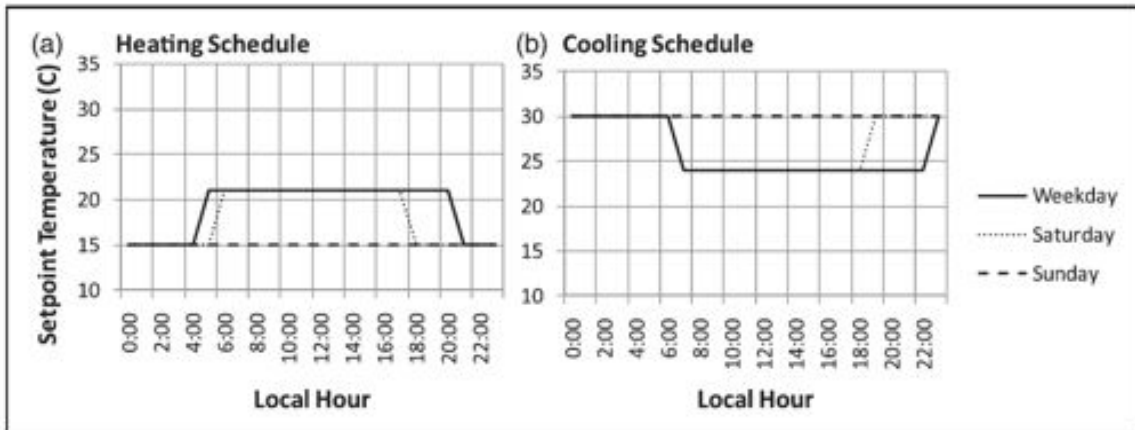
Het dak van de gebouwen hebben een R-waarde van 2,55 m²K/W. De conventioneel bitumen dak heeft een dakmembraan met een albedo (straling absorptiecoëfficiënt) van 0,30.

Woongebouw versus kantoorgebouw

Twee typen gebouwen worden hier nader bekeken: een woongebouw en een kantoorgebouw. Het woongebouw heeft vier verdiepingen, 31 appartementen, een algemene ruimte en een raampercentage van 15%. De totale geconditioneerde ruimte heeft een oppervlak van 2824m² en het dakoppervlak is 744m². Het gebouw wordt 24 uur lang geconditioneerd met een binnentemperatuur tussen 21°C en 24°C.

Het kantoorgebouw heeft drie verdiepingen, 4982m² geconditioneerde ruimte, een dakoppervlak van 1660m² en raampercentage van 33%. Dit kantoorgebouw wordt op bepaalde tijden en dagen geconditioneerd (binnentemperatuur tussen 21°C en 24°C), zie figuur 4.7.

Beide gebouwen zijn mechanische gekoeld met elektrische apparaten en verwarmd met aardgas.



Figuur 4.7: Verwarmings-en koelingsplan van het kantoorgebouw.

Tabel 4.7 geeft aan dat begroeide daken in de winter meer energie besparen bij woongebouwen dan bij kantoren. Dit komt doordat woongebouwen constant verwarmd moeten worden en kantoren alleen tijdens de werktijden. De thermische massa van het begroeide dak slaat warmte op en geeft het af in de nacht, waardoor er minder verwarmingsenergie nodig is in woongebouwen. Een andere reden voor een grotere energiebesparing bij woongebouwen komt doordat het warmteverlies door het dak relatief belangrijker is dan voor kantoorgebouw. Warmteverlies van kantoren is hoofdzakelijk het gevolg van luchtverwarmings/ventilatie-installaties en verlies door de gevelopeningen (raampercentage kantoorgebouw is 33% versus 15% in woongebouw) en minder door het dak.

Substraatdikte

Bij toename van de substraatdikte neemt de energiebesparing toe (tabel 4.7). De toename van energiebesparing is het grootst bij woongebouwen. Dit komt doordat woongebouwen beter kunnen profiteren van de warmteweerstand en thermische massa van het substraat om de bovengenoemde redenen.

LAI

Bij een LAI >2 neemt de energiebesparing af bij woongebouwen. Hogere LAI zorgt voor meer zonwering door de begroeiing, dus minder inkomende zonne-energie. Hogere LAI zorgt ook voor meer evapotranspiratie, dus meer energie verlies.

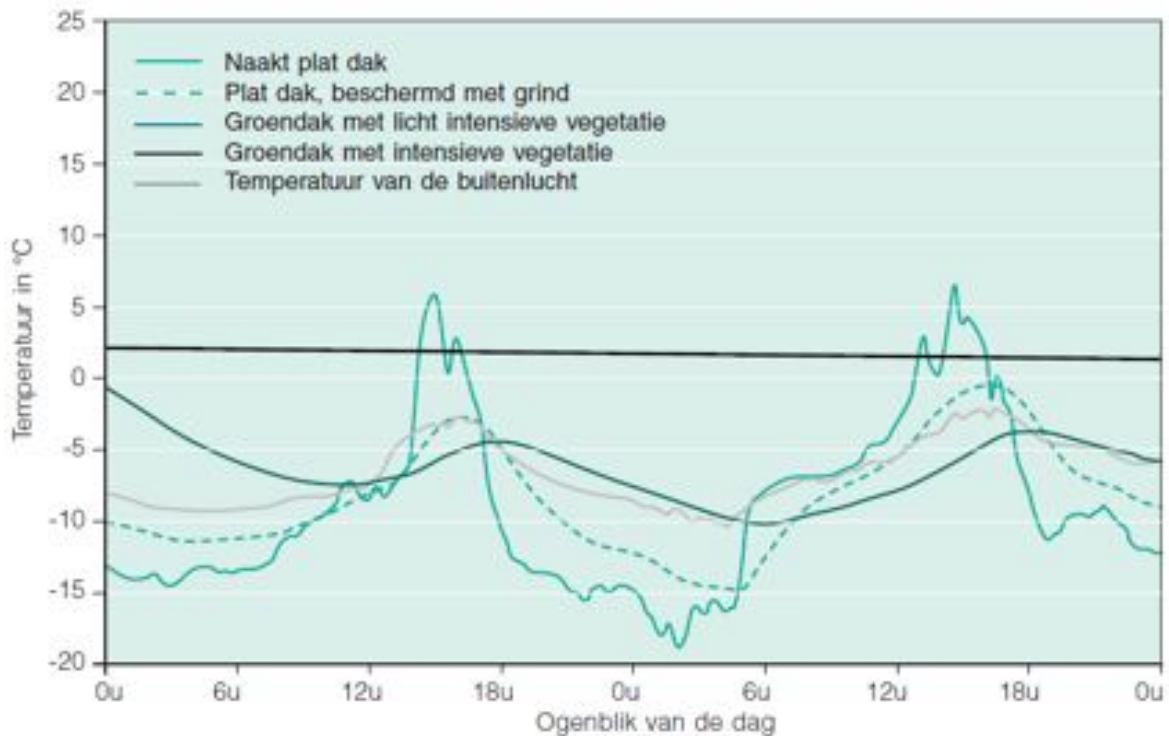
Tabel 4.7: Energiebesparing van begroeide daken met verschillende dikte en LAI t.o.v. conventioneel bitumen dak in Portland in de winter.

Type dak	LAI	Substraat dikte (mm)	Energiebesparing Woongebouw (%)	Energiebesparing Kantoorgebouw (%)
Begroeid dak 1	2	50	3,3	2,7
Begroeid dak 2	2	150	5,0	2,9
Begroeid dak 3	0,5	150	5,0	2,3
Begroeid dak 4	5	150	4,3	3,4

4.7 Casestudie 6

Van der Vel et al. [6]groendaken, WTCB technische voorlichting 229. 2006.

Deze casestudie is uitgevoerd in het proefstation van het WTCB te Limelette in België op verschillende types begroeide daken. De temperatuurprofielen van verschillend daktypes zijn geregistreerd op twee koude winterdagen (Figuur 4.8).



Figuur 4.8: Temperatuurprofielen van het dakmembraan van verschillende daktypes op twee koude winterdagen [6].

Hieruit blijkt dat een begroeid dak met intensieve vegetatie (substraat van 20 cm en draineerlaag van 10 cm) de gunstigste invloed heeft op het thermische effect. Deze meting is representatief voor de wintersituatie in Nederland. Uit deze studie kan de R waarde van een begroeid dak berekend worden voor de koude winterdagen in Nederland. In hoofdstuk 7 gaat hierover.

4.8 Conclusie

Uit de eerste 3 case studies kunnen we concluderen dat het effect van begroeide daken op de energieprestatie van gebouwen erg afhankelijk is van het isolatieniveau van het dak. Bij een ongeïsoleerd dak kan een begroeid dak een energiebesparing voor verwarming bijdragen tussen 20% en 48%. Het grote verschil in energiebesparing kan verklaard worden door het type gebouw waarop de energieprestatie werd berekend, woning versus kantoor. Case studie 5 laat deze verschillen duidelijk zien. Bij een woning is het energieverbruik voor verwarming relatief hoger vanwege de lange bezittingstijd en de lage interne warmtelast. Andere verschillen zijn de raampercentage van verschillende gebouwen en de manier waarop warmte verloren gaat (in kantoorgebouwen hoofdzakelijk als gevolg van ventilatie-installaties).

Toevoegen van dakisolatie zorgt ervoor dat er geen significante verschillen meer zijn tussen de isolerende werking van begroeide daken en traditionele daken.

De weersomstandigheden spelen hierbij een belangrijke rol. In een gematigde zeeklimaat zoals in Nederland, La Rochelle en Portland zal een begroeid dak geen of minimale thermische voordelen hebben in de winter. In een vochtig landklimaat zoals in Stockholm, Minneapolis, Boston, Sint Louis en Ottawa vermindert het begroeid dak de energievraag voor verwarming.

Begroeide daken →

- Besparing tot 48% aan energie bij ongeïsoleerde daken.
- Geringe besparing aan energie vanaf dakisolatie $1 \text{ m}^2\text{K/W}$.
- Energiesparing zijn minimaal bij gematigd klimaat bij goed geïsoleerde woningen (<5%).
- Optimale LAI voor energiebesparing is 0,5.
- Meer energiebesparing bij koude winters met weinig zon.
- Meer energiebesparing bij woningen dan kantoren.
- Hogere substraatdikte geeft meer energiebesparing.

Referentie

[1] I. Jaffal et al., *A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance*, Renewable Energy, Elsevier, 2012.

[2] Ray et al., *Potential Energy Savings of Various Roof Technologies*, Building Technology and Mechanical Engineering at Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 2010.

[3] Niachou et al., *Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance*, National Kapodistrian University of Athens, Energy and Buildings, 2001.

[4] Liu et al., 2003, *Thermal performance of green roofs through field evaluation*, National Research Council, Institute for Research in Construction 1500 Montreal Road, Ottawa, Ontario, Canada, 2003.

[5] Sailor et al., *Exploring the building energy impacts of green roof design decisions – a modeling study of buildings in four distinct climates*, Journal of Building Physics, 35(4) 372–391, 2011.

[6] L. Van de Vel, D. Raymaekers, 2006, *WTCB Technische voorlichting 229 Groendaken*, Brussel.

5. Welke gevalideerde modellen hanteren de onderzoekers voor het bepalen van de thermische eigenschappen van begroeide daken?

5.1 Inleiding

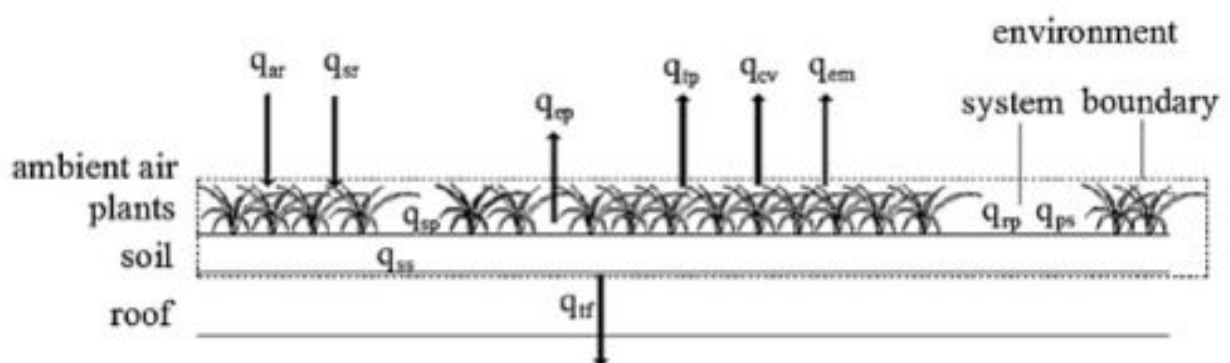
In het vorige hoofdstuk zijn de casestudies beschreven over de thermische werking van het dak. Enkele casestudies [1,2] hebben gevalideerde modellen gebruikt om de thermische effecten van een begroeid dak te extrapoleren naar de wintersituatie in verschillende klimaat. Het is daarom van belang om te weten welke gevalideerde modellen onderzoekers hanteren voor het bepalen van de thermische werking van begroeide daken. Er zijn meer modellen te vinden in de literatuur, alleen de meest recente modellen van de onderzoeksgroepen worden hier besproken. Ik zal hiervan een beknopte beschrijving geven. Zo kan men zien welke factoren in de modellen zijn verwerkt, om zo tot de conclusie te komen tot het meest complete en meest geschikte model voor de wintersituatie in Nederland.

5.2 Gevalideerde modellen voor het bepalen van de thermische eigenschappen van begroeide daken.

5.2.1 Model van Feng et al.

Feng et al. [3], *Theoretical and experimental analysis of the energy balance of extensive green roofs*, Energy and Buildings, 2010, 42:959-965.

Feng et al. ontwikkelde een energiebalansmodel waarbij rekening wordt gehouden met een aantal parameters die invloed hebben op de energie uitwisseling tussen een extensief begroeid dak en de omgeving (figuur 5.1). Een veld experiment met extensief begroeide daken werd uitgevoerd om deze model te valideren. Data uit het 11-dagen durende experiment werd geanalyseerd voor de energiestromen en balans van een extensief begroeid dak.



Figuur 5.1: Energie uitwisseling tussen een extensief begroeid dak en de omgeving.

De energiebalansmodel wordt berekend met de volgende formule:

$$q_{sr} + q_{lr} + q_{cv} + q_{em} + q_{tp} + q_{ep} + q_{sp} + q_{ss} + q_{tf} + q_{ps} + q_{rp} = 0$$

Waarbij:

q_{sr} = Warmtewinst uit korte-golfstraling (W/m^2);

q_{lr} = Warmtewinst uit lange-golfstraling (W/m^2);

q_{cv} = Warmte uitwisseling door convectie (W/m^2);

q_{em} = Warmteverlies door emissie (W/m^2);

q_{tp} = Warmteverlies door transpiratie (W/m^2);

q_{ep} = Warmteverlies door evaporatie (W/m^2);

q_{sp} = Warmteopslag door de beplanting (W/m^2);

q_{ss} = Warmteopslag door het substraat (W/m^2);

q_{tf} = Warmtestroom naar de binnenruimte (W/m^2);

q_{ps} = Zonne-energie omgezet door fotosynthese (W/m^2) en

q_{rp} = Warmte generatie door respiratie van de beplanting (respiratie is omgekeerde proces van fotosynthese; koolhydraten worden afgebroken en energie komt vrij) (W/m^2).

5.2.2 Model van Ouldboukhitine et al.

Ouldboukhitine et al. [4], *Assessment of green roof thermal behavior: A coupled heat and mass transfer model*, Building and Environment 46 (2011) 2624e2631.

Ouldboukhitine et al. ontwikkelde een model waarbij een energiebalans model wordt gekoppeld aan een waterbalansmodel. De energiebalans van een begroeid dak wordt verdeeld in twee delen: de energiebalans van de beplanting en van het substraat. Door het energiebalansmodel te koppelen aan een waterbalans model wordt rekening gehouden met de variatie van de hoeveelheid water in het substraat over de tijd. De factoren evapotranspiratie en warmtegeleiding van het substraat zijn afhankelijk van de waterinhoud in het substraat.

De warmtestroom van de beplanting is afhankelijk van vijf hoofdgroepen aangegeven in de volgende formule. Met latente warmtestroom wordt de warmtestroom bedoeld als gevolg van verdamping.

De energiebalans van de beplanting (F_f in W/m^2) is gegeven in de volgende formule:

$$F_f = \underbrace{\sigma_f \left[I_s (1 - \alpha_f) \right]}_{\text{Korte golfstraling absorptie door de begroeiing.}} + \underbrace{\epsilon_f I_{lr} - \epsilon_f \sigma T_f^4}_{\text{Lange golfstraling uitwisseling tussen begroeiing en atmosfeer.}} + \underbrace{\frac{\sigma_f \epsilon_f \epsilon_g \sigma}{\epsilon_f + \epsilon_g - \epsilon_f \epsilon_g} (T_g^4 - T_f^4)}_{\text{Lange golfstraling uitwisseling tussen de begroeiing en het substraat oppervlak.}} + \underbrace{H_f}_{\text{Voelbare warmtestroom begroeiing.}} + \underbrace{L_f}_{\text{Latente warmtestroom tussen de begroeiing en het atmosfeer.}}$$

Waarbij:

σ_f = Dekking begroeiing (0-1);

I_s = Invallende korte golfstraling (W/m^2);

T_f = Temperatuur begroeiing (Kelvin);

ϵ_g = Emissie coëfficiënt substraat (0-1);

α_f = Albedo begroeiing (Reflectiviteit) (0-1);
 ϵ_f = Emissie coëfficiënt begroeiing (0-1);
 I_{ir} = Lange golfstraling (W/m^2);
 σ = Stefan-Boltzmann constante (W/m^2K^{-4});

T_g = Temperatuur substraat (Kelvin);
 H_g = Voelbare warmtestroom (W/m^2) en
 L_f = Latente warmtestroom (W/m^2).

De warmtestroom van het substraat is afhankelijk van zes hoofdgroepen aangegeven in de volgende formule. Latente warmtestroom wordt warmtestroom bedoeld als gevolg van verdamping.

De warmtebalans van het substraat (F_g in W/m^2) wordt gegeven met de volgende formule:

$$F_g = (1 - \sigma_f) \left[I_s (1 - \alpha_g) + \epsilon_g I_{ir} - \epsilon_g \sigma T_g^4 \right] - \frac{\sigma_f \epsilon_f \epsilon_g \sigma}{\epsilon_f + \epsilon_g - \epsilon_f \epsilon_g} (T_g^4 - T_f^4) + H_g + L_g + q''_{sg}$$

Waarbij:

σ_f = Dekking begroeiing (0-1);
 I_s = Invallende korte golfstraling (W/m^2);
 α_f = Albedo begroeiing (Reflectiviteit) (0-1);
 ϵ_g = Emissie coëfficiënt substraat (0-1);
 I_{ir} = Lange golfstraling (W/m^2);
 σ = Stefan-Boltzmann constante (W/m^2K^{-4});

T_g = Temperatuur substraat (Kelvin);
 ϵ_f = Emissie coëfficiënt begroeiing (0-1);
 T_f = Temperatuur begroeiing (Kelvin);
 H_g = Voelbare warmtestroom (W/m^2);
 L_f = Latente warmtestroom (W/m^2) en
 q''_{sg} = Warmtestroom geleiding (W/m^2).

De warmtegeleiding van het substraat met waterinhoud bestaat uit de geleiding van het substraat en de geleiding door het water, zoals beschreven in deze formule:

$$K(\theta) = K_0 + \theta K_e$$

Waarbij:

K = Warmtegeleiding substraat met water (W/Ks);
 K_0 = Warmtegeleiding substraat zonder water (W/Ks);
 θ = Waterinhoud (Kg/m^3) en
 K_e = Warmtegeleiding water (W/Ks).

De hoeveelheid water in het substraat op een bepaalde tijdstip wordt beïnvloed door de neerslag, de drainage en de evapotranspiratie. Het is gegeven door de formule:

$$\theta_i(T_f, T_g) - \theta_{i-1}(T_f, T_g) + P_r - D - ETP = 0$$

Waarbij:

θ_i = Waterinhoud op bepaalde tijd (Kg/m^3);

T_f = Temperatuur begroeiing (Kelvin);

T_g = Temperatuur substraat (Kelvin);

P_r = Neerslag;

D = Drainage en

ETP = Evapotranspiratie.

Bovengenoemde termen worden nog verder uitgewerkt in de publicatie. Numerieke methodes worden toegepast om de vergelijkingen op te lossen. Dit model werd gevalideerd in veld experimenten in La Rochelle in Frankrijk.

5.2.3 Model van Tabares-Velasco et al.

Tabares-Velasco et al.[5], *A heat transfer model for assessment of plant based roofing systems in summer conditions*, Building and Environment 49(2012) 310–323.

Tabares-Velasco et al. ontwikkelde het warmte -en massatransport model van begroeide daken in een quasi-stationaire toestand. Het warmte -en massatransport vindt plaats tussen de begroeiing, het substraat en de atmosfeer. Daken die niet, gedeeltelijk of volledig bedekt zijn met begroeiing hebben andere thermische eigenschappen als gevolg van zonwering, transpiratie en windbescherming. Een model zonder en een model met volledig dakbedekking zijn ontwikkeld en gecombineerd tot een derde model voor gedeeltelijk dakbedekking.

Model zonder begroeiing wordt gegeven door de formule:

$$R_n = Q_E + Q_{\text{sensible}} + Q_{\text{conduction}}$$

Waarbij:

R_n = Netto warmtestraling geabsorbeerd substraat (W/m^2);

Q_E = Latente warmtestroom substraat (W/m^2);

Q_{sensible} = Voelbare warmtestroom substraat (W/m^2) en

$Q_{\text{conduction}}$ = Geleide warmtestroom substraat (W/m^2).

Model volledig bedekt met begroeiing wordt gegeven door de formules:

$$R_{sh,abs,plants} = Q_{\text{film, plants}} + Q_{IR,S,P}$$

$$R_{sh,abs,substrate} = -Q_{IR,S,P} + Q_{S,S} + Q_{\text{conduction}} + Q_{IR,subs, cov, sky} + Q_E$$

Waarbij:

$R_{sh,abs,plants}$ = Korte golfstaling geabsorbeerd begroeiing (W/m^2)

$Q_{\text{film, plant}}$ = $Q_T + Q_{S,P} + Q_{ir}$ (W/m^2);

Q_T = Latente warmtestroom transpiratie (W/m^2);

$Q_{S,P}$ = Voelbare warmtestroom begroeiing (W/m^2);

Q_{IR} = Lange golfstaling uitwisseling begroeiing en atmosfeer (W/m^2) en

$Q_{IR,S,P}$ = Lange golfstaling uitwisseling begroeiing en substraat (W/m^2).

$R_{sh,abs,substrate}$ = Korte golfstraling geabsorbeerd door het substraat (W/m^2);

$Q_{IR,S,P}$ = Lange golfstraling uitwisseling tussen substraat en begroeiing (W/m^2);

$Q_{S,S}$ = Voelbare warmtestroom substraat (W/m^2);

$Q_{\text{conduction}}$ = Geleide warmtestroom substraat (W/m^2);
 $Q_{\text{IR,subs,cov,sky}}$ = Lange golfstraling uitwisseling substraat en lucht (W/m^2) en
 Q_E = Latente warmtestroom verdamping (W/m^2).

Model gedeeltelijk bedekt met begroeiing wordt geven door de formules:

$$Q_{\text{substrate}} = \sigma_f Q_{\text{substrate, covered}} + (1 - \sigma_f) Q_{\text{substrate, bare}}$$

$$Q_{ET, \text{ total}} = \sigma_f (Q_{E, \text{substrate, cov}} + Q_{T, \text{plants}}) + (1 - \sigma_f) Q_{E, \text{substrate, bare}}$$

Waarbij:

$Q_{\text{substrate}}$ = Warmtestroom substraat gedeeltelijk bedekt (W/m^2);
 σ_f = Dekkingsgraad begroeiing (0-1);
 $Q_{\text{substrate, covered}}$ = Warmtestroom substraat volledig bedekt (W/m^2);
 $Q_{\text{substrate, bare}}$ = Warmtestroom substraat geen begroeiing (W/m^2);
 $Q_{ET, \text{ total}}$ = Latente warmtestroom (W/m^2);
 $Q_{E, \text{substrate, cov}}$ = Latente warmtestroom verdamping substraat volledig bedekt (W/m^2) en
 $Q_{T, \text{plants}} = Q_T$ = Latente warmtestroom transpiratie (W/m^2).

5.2.4 Model van Djedjig et al.

Djedjig et al.[6], *Development and validation of a coupled heat and mass transfer model for green roofs*, International Communications in Heat and Mass Transfer, 39 (2012) 752–761.

Het energiewaterbalansmodel van Djedjig et al. bestaat uit een energiemodel van de begroeiing gekoppeld aan een waterbalansmodel van het substraat. Hierdoor wordt de factor evapotranspiratie afhankelijk van de variabele waterinhoud in het substraat. De numerieke resultaten van dit energiewaterbalansmodel worden vergeleken met de gemeten data verkregen uit een 19-dagen durend veldexperiment in La Rochelle in Frankrijk. Het gemiddelde verschil tussen berekende en gemeten temperatuur was $0.8 \text{ }^\circ\text{C}$. 80% van de berekende temperaturen kwamen significant (berekende temperatuur verschilde minder dan 10% van de gemeten waarde) overeen met de gemeten waarden.

Het energiemodel voor de begroeiing is gegeven door formule:

$$(\rho c_p)_f d_f F \frac{dT_f}{dt} = R_{n,f} + H_f + L_f$$

Waarbij:

$(\rho c_p)_f$ = Volumetrische thermische capaciteit begroeiing ($\text{J}/\text{m}^3\text{K}$);
 d_f = Gemiddelde bladdikte (m);
 F = Leaf Area Index;

T_f = Temperatuur begroeiing (Kelvin);

t = Tijdstap (s);

$R_{n,f}$ = Netto straling geabsorbeerd begroeiing (W/m^2);

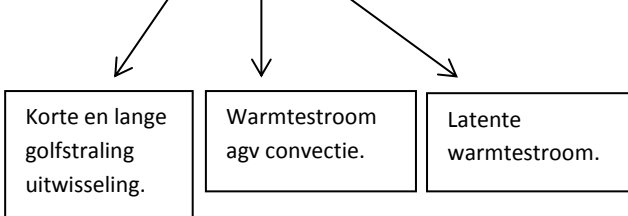
H_f = Voelbare warmtestroom begroeiing (W/m^2) en

L_f = Latente warmtestroom begroeiing (W/m^2).

Met latente warmtestroom wordt de warmtestroom bedoeld die het gevolg is van verdamping.

Bovengenoemde deeltermen worden verder uitgewerkt in de publicatie.

Het energiemodel voor het substraat is gegeven door formule:

$$-k_{\omega_g} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = R_{n,g} + H_g + L_g$$


Korte en lange golfstraling uitwisseling.	Warmtestroom agv convection.	Latente warmtestroom.
---	---------------------------------	--------------------------

Waarbij:

k_{ω_g} = Thermische geleidbaarheid substraat met watergehalte (W/Ks);

T = Temperatuurverschil (Kelvin);

z = Dikte substraat (m);

$R_{n,g}$ = Netto geabsorbeerde zonnestraling substraat (W/m^2);

H_g = Voelbare warmtestroom substraat (W/m^2) en

L_g = Latente warmtestroom substraat (W/m^2).

Het waterinhoud in het substraat heeft een belangrijk impact op de warmte- en massaoverdracht van een begroeid dak. Daarom is het belangrijk de verandering van het waterinhoud over de tijd te bepalen. Het waterbalans (water inhoud) van een begroeid dak is gegeven door formule:

$$\rho_w \Delta z \frac{\partial \omega_g}{\partial t} = P - D - E$$

Waarbij:

ρ_w = Dichtheid water (kg/m^3);

z = Dikte substraat (m);

ω_g = volumetrische watergehalte substraat;

t = Tijd (s);

P = Hoeveelheid neerslag;

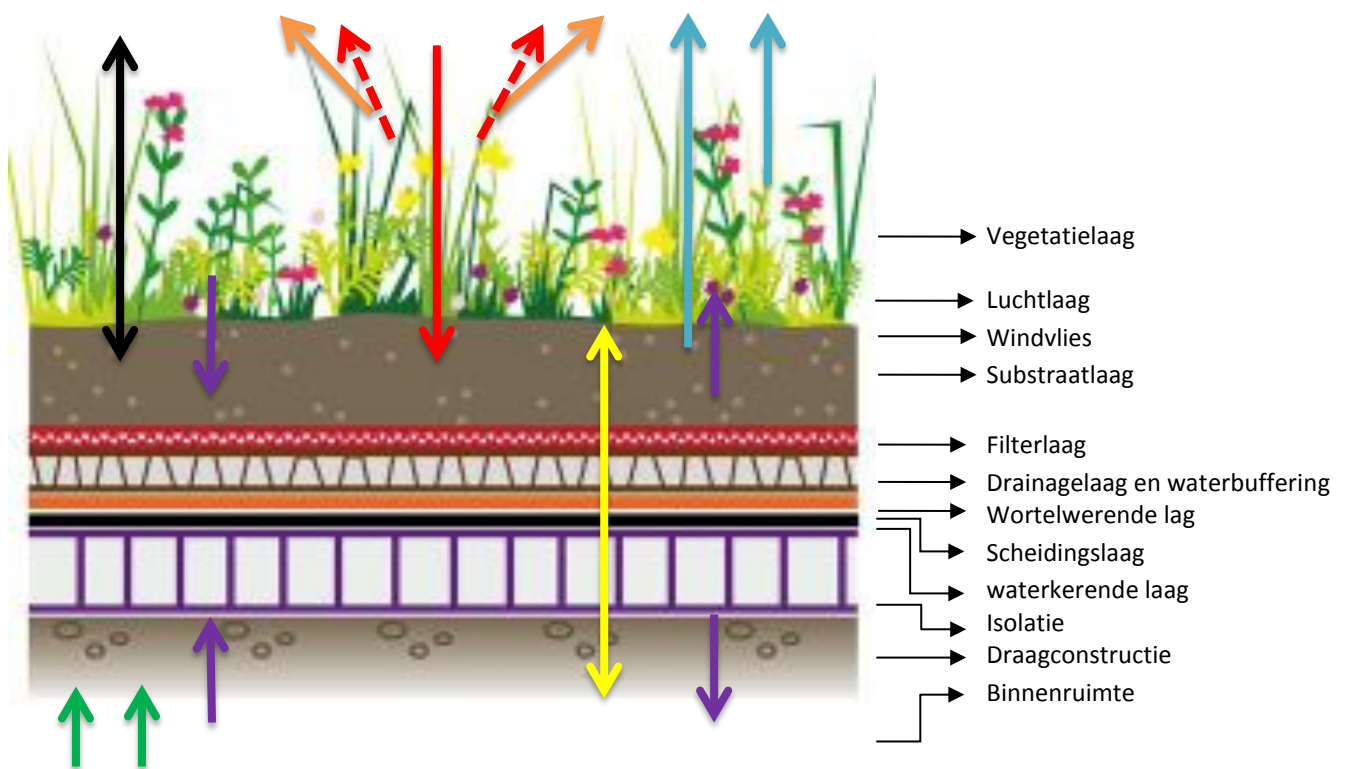
D = Drainage capaciteit (kg/m^2s) en

E = Evapotranspiratie (kg/m^2s)

Bovengenoemde termen worden nog verder uitgewerkt in de publicatie. Numerieke methodes worden toegepast om de vergelijkingen op te lossen.

5.3 Analyse van de rekenkundige modellen

Er zijn verschillende factoren die invloed hebben op de warmtestromen en dus de thermische werking van begroeide daken. Figuur 5.2 geeft deze warmtestromen aan. De hierboven beschreven modellen hebben getracht om alle significante factoren mee te nemen in hun model. In dit deelhoofdstuk worden deze modellen beoordeeld in compleetheid en significantie. De validiteit van een model wordt buiten beschouwing gelaten omdat deze modellen allemaal zijn gevalideerd met veldexperimenten. Het meest complete en significante model wordt verder uitgewerkt en aangepast voor de winter situatie in hoofdstuk 6. Van dit model is een beslissingstool gemaakt waarbij bepaalde eigenschappen van het begroeid extensief dak kunnen worden gevarieerd. Het effect van deze variabelen op de energiebalans van het begroeid dak wordt vervolgens berekend met behulp van deze tool.



	<u>Korte golfstraling reflectie/absorptie door de begroeiing en substraat</u>		<u>Warmteflux van geleiding door de lagen</u>
	<u>Lange-golfstraling uitwisseling tussen begroeiing, substraat en atmosfeer</u>		<u>Warmteopslag door massa</u>
	<u>Warmte uitwisseling door convectie tussen begroeiing, substraat en atmosfeer</u>		<u>Warmte gegeneerd door installaties en personen</u>
	<u>Warmteverlies door transpiratie en verdamping van de begroeiing en het substraat</u>		<u>Fotosynthese</u> Niet aangeven in de figuur (energie wordt omgezet in bouwstoffen door de begroeiing)

Figuur 5.2: Warmtestromen van een begroeid dak.

Tabel 5.1 laat in een overzicht zien met welke factoren de modellen rekening hebben gehouden. Aan de hand hiervan kan de compleetheit van een model worden nagegaan.

Factoren	Parameters	Feng	Ouldboukhitine	Tabares-Velasco	Djedjig
Korte golfstraling uitwisseling tussen begroeiing, substraat en lucht					
	Inkomende korte golfstraling	x	x	x	x
	Dekkingsgraad begroeiing		x		x
	Albedo begroeiing	x	x	x	x
	Albedo substraat	x	x	x	x
	Korte golfstraling transparantie begroeiing			x	x
Lange golfstraling uitwisseling tussen begroeiing, substraat en atmosfeer					
	Inkomende lange golfstraling	x	x	x	x
	Dekkingsgraad begroeiing	-	x	x	x
	Emissie begroeiing	x	x	x	x
	Emissie substraat	x	x	x	x
	Temperatuur begroeiing	x	x	x	x
	Temperatuur substraat	x	x	x	x
	Temperatuur atmosfeer	x	x	x	x
Warmte uitwisseling door convectie tussen begroeiing, substraat en atmosfeer					
	Luchtbeweging	x	x	x	x
	Dichtheid begroeiing	-	x	x	x
	Type begroeiing	-	x	x	x
	Type substraat	-	x	x	x
	Hoeveelheid warmte in lucht	x	x	x	x
	Temperatuur lucht	x	x	x	x
	Temperatuur begroeiing	x	x	x	x
	Temperatuur substraat		x	x	x
Warmteverlies door evaportranspiratie van de begroeiing en het substraat					
	Hoeveelheid warmte in lucht	-	x	x	x
	Dichtheid begroeiing	-	x	x	x
	Luchtbeweging	-	x	x	x
	Type begroeiing	-	x	x	x
	Type substraat	-	x	x	x
	Zonintensiteit	-	x	x	x
	Vochtgehalte substraat	-	x	x	x
	Luchtdruk	-	x	x	x
	Relatieve vochtigheid	-	x	x	x
	Latente warmtetransport	-	x	x	x
	Temperatuur begroeiing	-	x	x	x
Warmtestroom van geleiding door de lagen					
	Warmtegeleidbaarheid substraat	-	x	x	x
	Vochtgehalte substraat	-	x	x	x
	Dikte substraat	-	x	x	x
	Temperatuurverschil	-	x	x	x
Warmteopslag door massa					
	Warmteopslagcapaciteit begroeiing	x	-	-	x
	Temperatuur begroeiing	x	-	-	x
	Warmteopslagcapaciteit substraat	x	-	-	x
	Temperatuur substraat	x	-	-	x
	Watergehalte substraat	-	-	-	x
Warmte gegeneerd door installaties en personen					
	Energieprestatieprogramma	x	x	x	x
Fotosynthese					
	Zonintensiteit	x	-	-	-
	CO ² gehalte	x	-	-	-
	Watergehalte	x	-	-	-
	Temperatuur	x	-	-	-
	Type begroeiing	x	-	-	-
Waterbalans					
	Hoeveelheid neerslag	-	x	-	x
	Drainage capaciteit	-	x	-	x

Tabel 5.1: Overzicht van beschreven factoren door Feng et al., Ouldboukhitine et al., Tabares-Velasco et al. en Djedjig et al. die invloed hebben op de thermische werking van begroeide daken.

Behalve de compleetheid moet ook gekeken worden of de meest significante factoren die de thermische werking bepalen zijn meegenomen in het model. De significantie van deze factoren worden hieronder besproken.

Korte golfstraling uitwisseling tussen begroeiing, substraat en lucht

Bijna alle inkomende energie (99%) van een dak komt van de korte golfstraling (zonlicht). Een klein deel is als gevolg van convectie(1%) van de omgeving (Feng et al.). Korte golfstraling is daarom een belangrijke factor die de thermische eigenschappen van een begroeid dak bepalen. In tabel 5.1 is te zien welke parameters invloed kunnen uitoefenen op de korte golfstraling uitwisseling tussen de begroeiing, het substraat en de lucht.

Feng et al. combineerde de albedo van het substraat en de begroeiing tot één albedo waarde, de albedo waarde van een begroeid dak. Uit tabel 5.1 kan worden opgemaakt dat het model van Djedjig et al. het meest compleet is met betrekking tot korte golfstraling.

Lange golfstraling uitwisseling tussen begroeiing, substraat en atmosfeer

De sterkte van lange-golfstraling uitwisseling wordt bepaald door de emissiviteit van een dak. De emissiviteit geeft aan wat het vermogen van een oppervlak is om energie door middel van straling uit te zenden. Om de emissiviteit van een substantie te definiëren wordt het emissie-coëfficiënt gebruikt.

Het dakoppervlak straalt continu lange-golfstraling terug naar de ruimte ongeacht de hoeveelheid zon, omdat de ruimte altijd koeler is dan het dakoppervlak. De mate waarin dit gebeurt is afhankelijk van de materiaal van het oppervlak en de temperatuur van het dak. Hoe hoger de temperatuur van het dakoppervlak hoe meer warmte er wordt uitgestraald.

Er is ook warmte uitwisseling door middel van lange-golf uitstraling tussen de begroeiing en het substraat. Tabel 5.1 laat zien welke parameters invloed kunnen uitoefenen op de lange golfstraling uitwisseling tussen de begroeiing, het substraat en de lucht.

Alle genoemde modellen hebben rekening gehouden met het factor emissie.

Warmte uitwisseling door convectie tussen begroeiing, substraat en atmosfeer

Alle vier modellen hebben deze factor en de parameters die invloed kunnen uitoefenen op de convectie meegenomen. De verschillen zitten in de manier van berekenen.

Warmteverlies door evapotranspiratie van de begroeiing en het substraat

Verdamping en transpiratie oftewel evapotranspiratie betekent het verdampen van water in het substraat en begroeiing. Het water uit het substraat wordt opgenomen door de begroeiing en via de huidmondjes op de bladeren verdampt. Verder verdampt ook het aanwezige vocht direct uit het

substraat. Evapotranspiratie onttrekt energie uit het dak. Hierdoor daalt de temperatuur van het dak. De mate waarin dit gebeurt is afhankelijk van parameters die in tabel 5.1 zijn weergegeven.

In het model van Feng et al. wordt evapotranspiratie bepaald door het gewicht van het substraat te meten met behulp van een substraat hygrometer. Het energieverbruik die nodig is om bepaalde hoeveelheid water te verdampen kan vervolgens worden berekend. Evapotranspiratie zorgt voor 52% tot 60% van de totale warmteverlies door een begroeid dak (Lazzarin et al, Feng et al., Djedjig et al.).

Ouldboukhitine et al., Tabares-Velasco et al. en Djedjig et al. houden in hun model rekening met de evapotranspiratie door de factor latente warmtetransportweerstand op te nemen. Door het waterbalans model toe te voegen aan het energiebalans model wordt de waterinhoud een variabele in het model van Ouldboukhitine et al. en Djedjig et al.

Warmtestroom als gevolg van geleiding door de lagen

De grootte van de warmtestroom door het dak wordt bepaald door de warmteweerstand of warmtegeleidbaarheid van het dak. Deze is afhankelijk van het soort materiaal van het dak. Verder zijn deze factoren afhankelijk van de temperatuurverschil tussen de lagen. Tevens heeft de aanwezigheid van vocht en stilstaande lucht effect op de warmteweerstand.

Alle vier modellen hebben deze factor meegenomen. De verschillen zitten in de manier van berekenen.

De factor warmtestroom door geleiding in het model van Feng et al. is een onbekende in de vergelijking. Deze wordt bepaald door andere factoren te berekenen en te meten. De overige drie modellen hebben op deze een identieke manier berekend door rekening te houden met o.a. de thermo fysieke eigenschappen van een dak. Ouldboukhitine et al. en Djedjig et al. hebben een waterbalans model toegevoegd, hiermee houden ze rekening met de vochtigheidsgraad van het substraat.

Warmteopslag door massa

Met de thermische massa wordt het warmte accumulerend vermogen van massa aangeduid; het vermogen om warmte op te nemen en af te geven, een periode vast te houden in het materiaal en later weer af te geven via het materiaal-oppervlak. Door deze werking kunnen grote temperatuurschommelingen in een ruimte verkleind en vertraagd worden. De hoeveelheid energie die een dak kan opslaan is afhankelijk van de massa en de vochtgehalte van het dak.

Feng et al. en R. Djedjig et al. hebben de thermische massa opgenomen in hun model. In de modellen van Ouldboukhitine et al. en Tabares-Velasco et al. wordt deze factor als verwaarloosbaar beschouwd.

Djedjig et al. liet in zijn experiment zien dat het niet incalculeren van de warmteopslagcapaciteit van het dak, het model de temperatuur in het substraat met 1°C overschat. Bovendien zijn er meer

temperatuurschommeling en fase verschuivingen in temperatuurpieken als men de warmte accumulerend vermogen van het substraat en begroeiing niet meerekent.

De warmteopslag door massa omvat 0,6-1% van de totale uitgaande/opgeslagen energie (lazzarin et al. feng et al.)

Warmte gegenereerd door installaties en personen

Installaties en personen generen warmte en geven dit af aan het dak. De mate waarin dit gebeurt hangt af van wat er zich in de binnenruimte afspeelt. Een fabriek met zware apparatuur en een hoge bezittingsgraad generen veel meer warmte dan een woning.

Alle onderzoekers hebben deze factor meegenomen door hun eigen energiebalansmodel te koppelen aan een energieprestatieprogramma voor gebouwen, zoals Energyplus en TRNSYS.

Fotosynthese en respiratie

Fotosynthese is een proces waarin lichtenergie wordt gebruikt om koolstofdioxide om te zetten in koolhydraten en zuurstof. Zonne-energie wordt omgezet in chemische stoffen die worden opgeslagen in de plant. De mate van omzetting is afhankelijk van de type begroeiing, de hoeveelheid zonlicht, de aanwezigheid van vocht, luchttemperatuur en CO₂ gehalte.

Alleen het model van Feng et al. heeft deze factor meegenomen. Feng et al. liet zien dat in de zomer fotosynthese voor 10% van de totale uitgaande energie kan opmaken. In de winter is dat met factor 9 verminderd tot zelfs naar nul bij bepaalde soorten planten die niet groeien in de winter (bron: potentieel gemiddelde fotosynthese activiteit 1971-2000, www.knmi.nl).

De andere modellen beschouwen fotosynthese verwaarloosbaar klein.

Waterbalans

De hoeveelheid neerslag, de drainagecapaciteit van een begroeid dak en de vochtgehalte in het substraat hebben effect op de evapotranspiratie, de warmtestroom door het dak en warmteopslagcapaciteit van het dak.

Ouldboukhitine et al. en Djedjig et al. hebben een waterbalans model gekoppeld aan het energiebalans model waardoor waterinhoud als variabele is opgenomen in hun model.

Feng et al. heeft een standaard vochtigheidsgraad opgenomen in zijn model. Tabares-Velasco et al. meet het waterinhoud en dan wordt de benodigde energie die nodig is voor het verdampen van water bepaald.

5.4 Conclusie

Uit het deelhoofdstuk 5.3 kan er worden opgemaakt dat het rekenkundig model van Djedjig et al. de meest significante factoren hebben meegenomen. De factor fotosynthese is niet meegenomen, het speelt mogelijk een significante rol in de zomer, maar een verwaarloosbare rol in de wintersituatie. Waterinhoud als een variabele van tijd maakt het model van Djedjig et al. sterk omdat waterinhoud een belangrijk effect heeft op o.a. evapotranspiratie, die een belangrijke rol speelt bij de thermische werking van een begroeid dak. Eveneens de compleetheid van de factoren die effect hebben op de korte golfstraling die bijna alle inkomende energie van een dak bepaald maakt Djedjig et al. het meest complete model.

Referentie

- [1] I. Jaffal et al., *A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance*, Renewable Energy, Elsevier, 2012.
- [2] Sailor et al., *Exploring the building energy impacts of green roof design decisions – a modeling study of buildings in four distinct climates*, Journal of Building Physics, 35(4) 372–391, 2011.
- [3] Feng et al., *Theoretical and experimental analysis of the energy balance of extensive green roofs*, Energy and Buildings, 42:959-965, 2010.
- [4] Ouldboukhitine et al., *Assessment of green roof thermal behavior: A coupled heat and mass transfer model*, Building and Environment 46-2624-2631, 2011.
- [5] Tabares-Velasco et al. *A heat transfer model for assessment of plant based roofing systems in summer conditions*, Building and Environment 49-310–323, 2012.
- [6] Djedjig et al, *Development and validation of a coupled heat and mass transfer model for green roofs*, International Communications in Heat and Mass Transfer, 39-752–761, 2012.

6. In welke mate beïnvloeden de eigenschappen van een begroeid extensief dak de thermische werking?

6.1 Inleiding

Om deze vraag te kunnen beantwoorden wordt het meest complete en significante model [1] uit de modellen van hoofdstuk 5 uitgewerkt. Een rekentool wordt gemaakt naar aanleiding van Djedjig et al. [1] om de dakeigenschappen op thermische werking van een begroeid dak te bestuderen.

6.2 Uitwerking energiebalansmodel

het energiebalansmodel dat is ontwikkeld door Djedjig et al. [1] verdeelt het begroeide dak in drie delen: een energiebalans voor de begroeiing, een energiebalans voor het substraat en een waterbalansmodel voor het substraat. De invoergegevens van dit model zijn invallende korte golfstraling, lange golfstraling, luchttemperatuur, luchtvochtigheid, windsnelheid, neerslag en de temperatuur onder het substraat. Het laatste kan bepaald worden met behulp van energieprestatieprogramma's voor gebouwen zoals: EnergyPlus en TRNSYS.

6.2.1 Energiebalans begroeiing

De factoren van de energiebalans van begroeiing zijn: warmteopslagcapaciteit van de begroeiing, netto korte golf- en lange golfstraling, voelbare warmtestroom en latente warmtestroom.

De warmteopslagcapaciteit wordt bepaald door type begroeiing en de temperatuur van de begroeiing ($(\rho c_p)_f d_f T_f$). De voelbare en latente warmtestromen worden berekend met behulp van de aerodynamische weerstandsformules voor warmte en waterdamp transport.

De energiebalans van de begroeiing wordt gegeven door de formule:

$$\left(\rho c_p\right)_f d_f F \frac{dT_f}{dt} = R_{n,f} + H_f + L_f \quad (1)$$

Waarbij:

$(\rho c_p)_f$ = Volumetrische thermische capaciteit begroeiing (J/m^3K);

d_f = Gemiddelde bladdikte (m);

F = Leaf Area Index;

T_f = Temperatuur begroeiing (Kelvin);

dt = Tijdstap (s);

$R_{n,f}$ = Netto straling geabsorbeerd begroeiing (W/m^2);

H_f = Voelbare warmtestroom begroeiing (W/m^2) en

L_f = Latente warmtestroom begroeiing (W/m^2).

De geabsorbeerde hoeveelheid korte golfstraling (netto korte golfstraling) door de begroeiing is gelijk aan $\sigma_f[\varphi_s(1 - \tau_s - \rho_s)(1 + \tau_s\rho_g)]$.

De lange golfstraling uitwisseling tussen de begroeiing en de hemel is gelijk aan $\sigma_f[\varepsilon_f \sigma(T_{sky}^4 - T_f^4)]$.

De lange golfstraling uitwisseling tussen de begroeiing en substraat is gelijk aan $\sigma_f[\varepsilon_{fg} \sigma(T_g^4 - T_f^4)]$.

De netto warmtestraling geabsorbeerd door de begroeiing ($R_{n,f}$ in W/m^2) wordt gegeven door de formule:

$$R_{n,f} = \sigma_f \left[(1 - \tau_s - \rho_s) (1 + \tau_s \rho_g) \varphi_s + \varepsilon_f \sigma (T_{sky}^4 - T_f^4) + \varepsilon_{fg} \sigma (T_g^4 - T_f^4) \right] \quad (2)$$

Waarbij:

σ_f = Dekking begroeiing (0-1);

τ_s = Korte golfstraling overdracht begroeiing (0-1);

ρ_s = Korte golfstraling reflectiecoëfficiënt begroeiing (0-1);

ρ_g = Korte golfstraling reflectiecoëfficiënt substraat (0-1);

φ_s = Invallende zonnestraling op horizontale vlak (W/m^2);

ε_f = Emissie coëfficiënt begroeiing (0-1);

σ = Stefan-Boltzmann constante (W/m^2K^4);

T_{sky} = Temperatuur hemel (Kelvin);

T_f = Temperatuur begroeiing (Kelvin);

ε_{fg} = Emissie coëfficiënt begroeid dak (0-1) en

T_g = Temperatuur substraat (Kelvin).

De voelbare warmtestroom wordt bepaald door de massawarmtettransportweerstand van de begroeiing (r_a) en temperatuurverschil tussen begroeiing en lucht ($T_a - T_f$).

De voelbare warmtestroom begroeiing (H_f in W/m^2) wordt gegeven door de formule:

$$H_f = F \frac{(\rho c_p)_a}{r_a} (T_a - T_f) \quad (3)$$

Waarbij:

F = Leaf Area Index;

$(\rho c_p)_a$ = Volumetrische thermische capaciteit lucht (J/m^3K);

r_a = Massawarmtettransportweerstand begroeiingsoppervlak (s/m);

T_a = Temperatuur lucht (Kelvin) en

T_f = Temperatuur begroeiing (Kelvin).

De massawarmtettransportweerstand van de begroeiingsoppervlak wordt bepaald door de ruwheid en lengte van de begroeiingsoppervlak en de windsnelheid (u).

De massawarmtettransportweerstand begroeiingsoppervlak (r_a in s/m) wordt geven door de formule:

$$r_a = \frac{\ln\left(\frac{z-d_0}{z_{om}}\right)}{\kappa^2 u} \quad (4)$$

Waarbij:

z = Lengte begroeiing (m);

d_0 = Hoogteverschuiving (m);

z_{om} = ruwheidslengte schaal voor moment (m);

κ = Von Karman's constante en

u = Windsnelheid (m/s).

De hoogteverschuiving (d_0 in m) wordt gegeven door de formule:

$$d_0 = 0.701 h_c^{0.975} \quad (5)$$

Waarbij:

h_c = Hoogte begroeiing (m).

De ruwheidslengte schaal voor moment (z_{om} in m) wordt gegeven door de formule:

$$z_{om} = 0.131 h_c^{0.997} \quad (6)$$

Waarbij:

h_c = Hoogte begroeiing (m).

De latende warmtestroom wordt bepaald door de massa warmte transport weerstanden (r_a , r_s) en verschil van dampspanning ($Pv_{f,sat} - Pv_a$).

De latente warmtestroom van de begroeiing (L_f in W/m^2) wordt gegeven door de formule:

$$L_f = -F \frac{(\rho c_p)_a}{\gamma(r_a + r_s)} (Pv_{f,sat} - Pv_a) \quad (7)$$

Waarbij:

F = Leaf Area Index;

$(\rho c_p)_a$ = Specifieke volumetrische thermische capaciteit lucht (J/m^3K);

γ = Thermische psychometrische constante (Pa/K);

r_a = Massa warmtetransportweerstand begroeiingsoppervlak (s/m);

r_s = Bladstomata massawarmtetransportweerstand (s/m);

$Pv_{f,sat}$ = Verzadigde dampspanning lucht tussen de begroeiing (Pa) en

Pv_a = Dampspanning lucht (pa).

De bladstomata massawarmtetransportweerstand wordt bepaald door de minimum bladstomata massawarmtetransportweerstand ($r_{s,min}$) aan te passen aan de omgevingsfactoren. De meegerekende factoren zijn de hoeveelheid zonlicht ($f_1(\varphi_s)$), temperatuur ($f_2(T_f)$), watergehalte in het substraat ($f_3(\omega_g)$) en de relatieve luchtvochtigheid ($f_4(Pv_{f,sat} - Pv_a)$).

De bladstomata massawarmtettransportweerstand (r_s in s/m) wordt gegeven door de formule:

$$r_s = \frac{r_{s, \min}}{F} f_1(\varphi_s) f_2(T_f) f_3(\omega_g) f_4(p_{v_{f, \text{sat}}} - p_{v_a}) \quad (8)$$

Waarbij:

$r_{s, \min}$ = Minimale bladstomata massa warmtettransportweerstand (s/m);

F = Leaf Area Index;

$$f_1(\varphi_s) = 1 + e^{-0,034(\varphi_s - 3,5)};$$

φ_s = Invallende zonnestraling op horizontale vlak (W/m^2);

$$f_2(T_f) = (e^{0,3(T_f - 273,15)} + 258) / (e^{0,3(T_f - 273,15)} + 27);$$

T_f = Temperatuur begroeiing (Kelvin);

$$f_3(\omega_g) = (\omega_g^{\max} - \omega_g^{\min}) / (\omega_g - \omega_g^{\min}) \approx 1 / S_r;$$

ω_g^{\max} = Maximale volumetrisch watergehalte substraat;

ω_g^{\min} = Minimale volumetrisch watergehalte substraat;

ω_g = Volumetrisch watergehalte substraat;

S_r = Verzadiging verhouding substraat = $\omega_g / \omega_g^{\text{sat}}$;

ω_g^{sat} = Verzadigd substraat met water;

$$f_4(p_{v_{f, \text{sat}}} - p_{v_a}) = 4 \times 10^{-3} + e^{-0,73 \cdot (0,622 \times 10^3 / p_{\text{atm}}) (p_{v_{f, \text{sat}}} - p_{v_a})};$$

p_{atm} = Luchtdruk atmosfeer (Pa);

$p_{v_{f, \text{sat}}}$ = Verzadigde dampspanning lucht tussen de begroeiing (Pa) en

p_{v_a} = Dampspanning lucht (pa).

6.2.2 Energiebalans substraat

Het energiebalansmodel van het substraat is gebaseerd op de ééndimensionale warmte vergelijking. Deze vergelijking koppelt de volumetrisch thermische capaciteit van het substraat met watergehalte aan de thermische geleidbaarheid van het substraat met watergehalte.

De koppeling wordt gegeven door de formule:

$$(\rho c_p)_{g, \omega_g} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{\omega_g} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (9)$$

Waarbij:

$(\rho c_p)_{g, \omega_g}$ = Volumetrische thermische capaciteit substraat met watergehalte ($\text{J/m}^3\text{K}$);

T = Temperatuurverschil substraatoppervlak substraatbodem (Kelvin);

t = Tijdstap (s);

z = Dikte substraat (m) en

k_{ω_g} = Thermische geleidbaarheid substraat met watergehalte (W/Ks).

De thermische geleidbaarheid van het substraat met watergehalte (κ_{ω_g} in W/Ks) wordt gegeven door de formule:

$$k_{\omega_g} = k_0 + \omega_g k_w \quad (10)$$

Waarbij:

k_0 = Thermische geleidbaarheid substraat (W/Ks);
 ω_g = Volumetrische watergehalte substraat en
 k_w = Thermische geleidbaarheid water (W/Ks).

De volumetrische thermische capaciteit van het substraat met watergehalte $((\rho c_p)_{g,\omega_g}$ in J/m³K) wordt gegeven door de formule:

$$(\rho c_p)_{g,\omega_g} = c_{p_w} (0.2 + \omega_g) \rho_{soil} \quad (11)$$

waarbij:

c_{p_w} = Thermische capaciteit water (J/kgK);
 ω_g = volumetrische watergehalte substraat en
 ρ_{soil} = Dichtheid substraat (kg/m³).

De temperatuur van de substraatbodem (T in Kelvin) wordt gegeven door de formule:

$$T(z = h_g, t) = T_b \quad (12)$$

Waarbij:

z = Hoogte (m);
 h_g = Dikte substraat (m);
 t = Tijd (s) en
 T_b = Temperatuur substraatbodem.

De hoeveelheid warmte die de door het substraat geleid wordt is gelijk aan de som van de hoeveelheid netto warmtestraling ($R_{n,g}$), de voelbare warmtestroom (H_g) en de latende warmtestroom (L_g).

Het substraat energiebalansmodel en waterbalansmodel wordt gegeven door de formule:

$$-k_{\omega_g} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = R_{n,g} + H_g + L_g \quad (13)$$

waarbij:

k_{ω_g} = Thermische geleidbaarheid substraat met watergehalte (W/Ks);
 T = Temperatuurverschil (Kelvin);
 z = Dikte substraat (m);
 $R_{n,g}$ = Netto geabsorbeerde zonnestraling substraat (W/m²);
 H_g = Voelbare warmtestroom substraat (W/m²) en
 L_g = Latente warmtestroom substraat (W/m²).

De geabsorbeerde warmtestraling door het substraat is de som van de geabsorbeerde korte golfstraling en de lange golfstraling uitwisseling tussen de begroeiing, substraat en atmosfeer.

De geabsorbeerde korte-golfstraling door het substraat is gelijk aan $\phi_s(1 - \rho_g)(1 - \sigma_f(1 - \tau_s))$.
 De lange-golfstraling uitwisseling tussen de begroeiing en substraat is gelijk aan $\sigma_f \epsilon_{fg} \sigma (T_g^4 - T_f^4)$.

De lange-golfstraling uitwisseling tussen het substraat en de hemel is gelijk aan $\varepsilon_g \sigma (1 - \sigma_f) (T_{sky}^4 - T_g^4)$.

De netto geabsorbeerde warmtestraling door het substraat ($R_{n,g}$ in W/m^2) wordt gegeven door de formule:

$$R_{n,g} = (1 - \rho_g) \left(1 - \sigma_f (1 - \tau_s) \right) \varphi_s + \sigma_f \varepsilon_{fg} \sigma (T_f^4 - T_g^4) + (1 - \sigma_f) \varepsilon_g \sigma (T_{sky}^4 - T_g^4). \quad (14)$$

Waarbij:

ρ_g = Korte golfstraling reflectiecoëfficiënt substraat (0-1);

σ_f = Dekking begroeiing (0-1);

τ_s = Korte golfstraling overdracht begroeiing (0-1);

φ_s = Invallende zonnestraling op horizontale vlak (W/m^2);

ε_{fg} = Emissie coëfficiënt begroeid dak (0-1);

σ = Stefan-Boltzmann constante (W/m^2K^4);

T_f = Temperatuur begroeiing (Kelvin);

T_g = Temperatuur substraat (Kelvin);

ε_g = Emissie coëfficiënt substraat (0-1) en

T_{sky} = Temperatuur hemel (Kelvin).

De voelbare warmtestroom van het substraat wordt bepaald door de massa warmte transport weerstand van substraatoppervlakte (r_c), de massawarmtetransportweerstand van begroeiingsoppervlak (r_a) en het verschil in temperatuur tussen lucht en substraat ($T_a - T_g$).

De voelbare warmtestroom van het substraat (H_g in W/m^2) wordt gegeven door de formule:

$$H_g = \frac{(\rho c_p)_a}{(r_c + r_a)} (T_a - T_g) \quad (15)$$

Waarbij:

$(\rho c_p)_a$ = Volumetrisch thermische capaciteit lucht (J/m^3K);

r_c = Massawarmtetransportweerstand van substraatoppervlak (s/m);

r_a = Mass warmtetransportweerstand begroeiingsoppervlak (s/m);

T_a = Temperatuur lucht (Kelvin) en

T_g = Temperatuur substraat (Kelvin).

De massawarmtetransportweerstand van het substraatoppervlak hangt af van de windsnelheid tussen de begroeiing (u_c).

De massawarmtetransportweerstand van substraatoppervlak (r_c in s/m) wordt gegeven door de formule:

$$r_c = \frac{1}{a' + b'u_c} \quad (16)$$

Waarbij:

$\alpha' \approx 0,004$ (m/s);

$b' \approx 0,012$ (m/s) en

u_c = Windsnelheid tussen de begroeiing (m/s).

De latente warmtestroom van het substraat hangt af van de waterdamp transport weerstand van de substraatoppervlak (r_{sub}), massa warmte transport weerstand van de begroeiingoppervlak (r_a) en het verschil in waterdampspanning in de lucht ($P_{v_{f,sat}} - P_{v_a}$).

De latente warmtestroom van het substraat (L_g in W/m^2) wordt gegeven door de formule:

$$L_g = - \frac{(\rho c_p)_a}{\gamma(r_{sub} + r_a)} (p_{v_{g,sat}} - p_{v_a}) \quad (17)$$

Waarbij:

$(\rho c_p)_a$ = Volumetrisch thermische capaciteit lucht (J/m^3K);

γ = Thermische psychometrische constante (Pa/K);

r_{sub} = waterdamp transport weerstand substraatoppervlak (s/m);

r_a = Massa warmte transport weerstand begroeiingsoppervlak (s/m);

$P_{v_{f,sat}}$ = Verzadigde waterdampspanning lucht tussen de begroeiing (Pa) en

P_{v_a} = waterdampspanning lucht (pa).

De waterdamp transportweerstand is berekend uit de watergehalte in het substraat.

De waterdamp transportweerstand van het substraatoppervlak (r_{sub} in s/m) wordt gegeven door de formule:

$$r_{sub} = C_0 + C_1 \times \left(\frac{\omega_g}{\omega_g^{sat}} \right)^{-C_2} \quad (18)$$

Waarbij:

$C_0 = 0$;

$C_1 = 34,5$;

$C_2 = -3,3$;

ω_g = Volumetrische watergehalte substraat en

ω_g^{sat} = Verzadigd substraat met water.

6.2.3 waterbalans

Het watergehalte in het substraat heeft grote invloed op thermische eigenschappen van het substraat. De waterinhoud heeft ook invloed op de warmte -en massatransport van het dak. Het modelleren met watergehalte van het substraat als variabele van de tijd is daarom belangrijk. Het

watergehalte van het substraat wordt bepaald door de hoeveelheid neerslag (P) minus de hoeveelheid gedraineerd water (D) en hoeveelheid verdampt water (E) als gevolg van evapotranspiratie.

De waterbalans van het substraat wordt gegeven door de formule:

$$\rho_w \Delta z \frac{\partial \omega_g}{\partial t} = P - D - E \quad (19)$$

Waarbij:

ρ_w = Dichtheid water (kg/m³);

z = Dikte substraat (m);

ω_g = volumetrische watergehalte substraat;

t = Tijd (s);

P = Hoeveelheid neerslag;

D = Drainage capaciteit (kg/m²s) en

E = Evapotranspiratie (kg/m²s)

De evapotraspiratie is de som van de hoeveelheid verdampt water uit het substraat (L_g) en de hoeveelheid verdampt water door transpiratie van de begroeiing (L_f).

De evapotranspiratie (E in kg/m²s) wordt gegeven door de formule:

$$E = - (L_f + L_g) / l_v \quad (20)$$

Waarbij:

L_f = Latente warmtestroom begroeiing (W/m²);

L_g = Latente warmtestroom substraat (W/m²) en

l_v = Latente warmte verdamping (J/kg).

6.2.4 Numerieke oplossingen

Numerieke methoden zijn gebruikt om bovenstaande vergelijkingen op te lossen; o.a. discretisatie is toegepast op de vergelijkingen 9 en 19, en korte golfstraling en latente warmtestromen zijn gelineariseerd.

6.3 rekentool

Naar aanleiding van het model van Djedjig et al. is een rekentool gemaakt om de dakeigenschappen op de thermische werking van een begroeid dak te bestuderen.

De beïnvloedbare dakeigenschappen zijn:

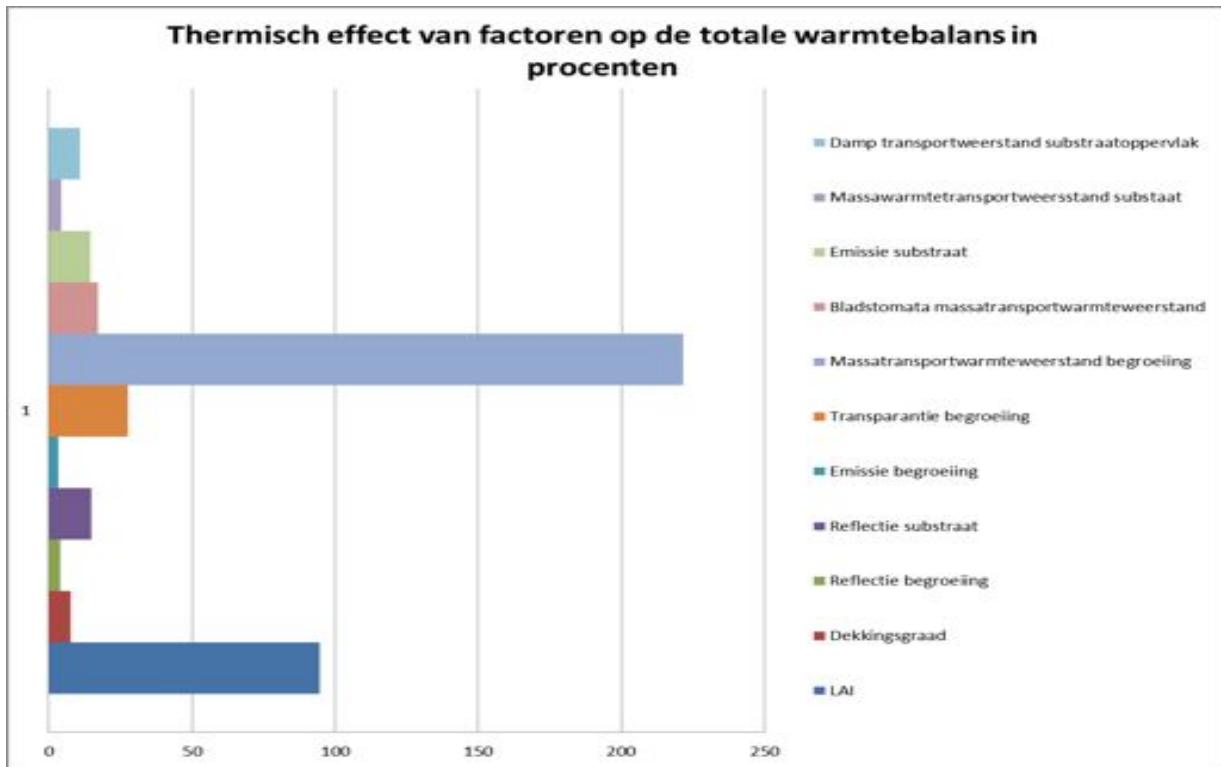
- Dekkingsgraad van het dak, varieert tussen 0,1-1.

- Korte golfstraling transmissie coëfficiënt van de begroeiing, varieert tussen 0,1-0,7.
- Korte golfstraling reflectie coëfficiënt van de begroeiing, varieert tussen 0,14-0,26.
- Korte golfstraling reflectie coëfficiënt van het substraat, varieert tussen 0,08-0,43.
- Emissie coëfficiënt van de begroeiing, varieert tussen 0,970-0,988.
- Emissie coëfficiënt van het substraat, varieert tussen 0,908-0,967.
- LAI, varieert tussen 0-6.
- Massa warmte transport weerstand van de begroeiingsoppervlak, varieert tussen 50-200.
- Massa warmte transport weerstand van de substraatoppervlakte, varieert tussen 25-44.
- Blad stomata massa warmte transport weerstand, varieert tussen 200-12000.
- Damp transport weerstand van de substraatoppervlakte, varieert tussen 21-48.

Hieronder staan de niet beïnvloedbare omgevingsfactoren. Er wordt uitgelegd hoe deze waarden tot stand zijn gekomen:

- Invallende zonnestraling op horizontale vlak: de gemiddelde hoeveelheid directe straling in W/m² in de wintermaanden (december, januari en februari) voor de Bilt is hierbij gebruikt. (www.knmi.nl)
- Temperatuur hemel is een afgeleide van de lange golfstraling; de lange golfstraling is de gemiddelde hoeveelheid lange golfstraling in W/m² in de wintermaanden voor de Bilt. (www.knmi.nl)
- Temperatuur lucht: de gemiddelde temperatuur in de wintermaanden is 3,3°C. (www.knmi.nl)
- Temperatuur begroeiing: de gemiddelde temperatuur in de begroeiing is gemiddeld 0,5°C hoger dan de gemiddelde lucht temperatuur. (jaffal et al. www.knmi.nl)
- Temperatuur substraat: de gemiddelde temperatuur in het substraat is gemiddeld 2,7°C hoger dan de gemiddelde lucht temperatuur. (jaffal et al., www.knmi.nl)
- Volumetrische thermische capaciteit van de lucht: hierbij is de gemiddelde temperatuur, namelijk 3,3°C voor de wintermaanden genomen. (www.engineeringtoolbox.com)
- Verzadigde dampspanning lucht tussen de begroeiing is afhankelijk van de temperatuur. De temperatuur is 3,8°C tussen de begroeiing. (boek: van der Linden, bouwfysica, 5^e druk)
- Dampspanning lucht: de gemiddelde dampspanning op zeeniveau in de wintermaanden is hiervoor gebruikt. (www.knmi.nl)
- Verzadigde dampdruk lucht boven de substraatoppervlak is afhankelijk van de temperatuur. De temperatuur is 6°C in het substraat. (boek: van der Linden, bouwfysica, 5^e druk)

De uitkomsten van de berekeningen met deze tool zijn weergegeven in figuur 6.1. Door één dakeigenschap per setting te veranderen is het mogelijk het thermische effect van dit factor op de warmtebalans van het begroeid dak te laten zien. Dit effect wordt uitgedrukt in percentage van de totale warmtebalans met de standaardsetting. De input van de standaardsetting zijn weergegeven in de bijlage rekentool.



Figuur 6.1: Effect van de factoren op de warmtebalans van een begroeid dak. Het effect is uitgedrukt in percentage van de totale warmtebalans (warmte balans van de begroeiing en van het substraat) met de standaardsetting (zie bijlage).

* LAI begroeiing: hier wordt alleen de LAI op de balans van de begroeiing meegenomen. Effect van de LAI op de totale balans bestaat uit het effect op de balans van de begroeiing en de substraat. Het thermische effect op de balans op het substraat is onbekend. Voor deze berekening is de windsnelheid tussen de begroeiing nodig. Die berekening doet te ver in het kader van dit onderzoek.

6.4 Conclusie

Met de rekentool op basis van het model van Djedig hebben we kunnen laten zien dat de massatransportwarmteweerstand van de begroeiing het grootste effect hebben op de warmtebalans van een begroeid dak. De LAI heeft het grootste effect hebben op de warmtebalans van de begroeiing en het effect op de warmtebalans van het substraat is zoals eerder genoemd niet bepaald.

Voor een optimale thermische werking van een begroeid dak in de wintersituatie dienen bepaalde parameters laag en een aantal parameters hoog te worden gehouden (zie onderstaande tabel).

Parameters die laag dienen worden gehouden voor een optimale thermische werking in de winter zijn:

Dekkingsgraad van het dak
Korte golfstraling transparantie coëfficiënt van de begroeiing
Korte golfstraling reflectiecoëfficiënt van de begroeiing
Korte golfstraling reflectiecoëfficiënt van het substraat
Emissie coëfficiënt van de begroeiing
Emissie coëfficiënt van het substraat

Parameters die hoog dienen worden gehouden voor een optimale thermische werking in de winter zijn:

Massatransportwarmteweerstand van de begroeiingsoppervlak

Massatransportwarmteweerstand van de substraatoppervlak

Bladstomata massatransportwarmteweerstand

Damptransportweerstand van de substraatoppervlakte
--

6.5 Discussie

De rekentool is gebaseerd op het model van Djedig. Er zijn een aantal sterke punten van de model. De compleetheid van de model is een sterk punt. In dit model is de waterbalans in verwerkt, waardoor het effect van evapotranspiratie nauwkeurig kan worden voorspeld. Zoals eerder besproken in hoofdstuk 5 is evapotranspiratie een belangrijke determinant van de warmtebalans. Tevens voorspelt dit model nauwkeurig de temperatuur variatie gedurende de dag.

Een belangrijke nadeel van dit model is dat het niet voor de wintersituatie is gevalideerd.

De tool in de bijlage is gebaseerd op dit model. Men kan deze tool om de significantie van een bepaalde dakeigenschap op de thermische werking van een begroeid dak te bepalen. Wat van belang is bij het gebruik van deze tool, is men dat zich realiseert dat de tool niet gevalideerd is voor de wintersituatie.

Een tweede restrictie van deze tool is dat de numerieke methoden gebruikt in het model van Djedig (beschreven in hoofdstuk 6.2.4) niet is toegepast in deze tool om het uiteindelijke effect op de totale balans van een begroeid dak te berekenen. Daarbij is een wiskundig softwareprogramma nodig zoals de MatLab. Mede dank aan Dhr. Remijn, hogeschool docent, voor de kritische kijk naar dit model.

Deze tool kan worden beschouwd als een prototype van een model van een begroeid dak. Een ideale model is gevalideerd voor onder andere: verschillende seizoenen van het jaar, verschillende klimaten en verschillende typen begroeide daken. Tevens moet de tool gekoppeld worden aan een wiskunde softwareprogramma zodat de temperatuur van het dakmembraan kan worden berekend. Met de temperatuur van het dakmembraan kan met behulp van een energieprestatieprogramma de energieprestatie van een gebouw worden berekend.

Referentie

[1] Djedig et al, *Development and validation of a coupled heat and mass transfer model for green roofs*, International Communications in Heat and Mass Transfer, 39-752-761, 2012.

7. Wat is de invloed van begroeide daken op de energieverbruik van een woning?

7.1 Inleiding

Om de hoeveelheid energieverbruik van een woning te bepalen moet de R-waarde van het dak bekend zijn. De R-waarde van een begroeid dak kan worden berekend uit proefmetingen. De proefmetingen van casestudie Van de Vel et al. [1] wordt gebruikt om de R-waarde van een begroeid dak met substraatdikte van 80 mm en een drainagelaag van 20 mm te berekenen. Met deze R-waarde kan de energieprestatie van gebouwen met verschillende isolatieniveau en verschillende verdiepingen worden berekend m.b.v. EPC-berekeningen.

7.2 Berekening R-waarde van een begroeid dak op een koude winterdag.

Om de R-waarde van een begroeid dak te bepalen moet de gemiddelde temperatuur op het dakmembraan, de binnentemperatuur en de warmteweerstand van de constructie bekend zijn. De metingen van Van de Vel et al. worden gebruikt om de gemiddelde temperatuur op het dakmembraan te berekenen (zie tabel 7.1). De warmteweerstand van de constructie wordt aangenomen. Dat is $2,72 \text{ m}^2\text{K/W}$, een eis van het bouwbesluit. De binnentemperatuur wordt aangenomen op 20°C .

Tabel 7.1: Gemiddelde temperatuur van het dakmembraan van een naakt dak en begroeid dak op twee koude winterdagen [1].

Naakt dak	begroeid dak
9,2 °C	6,2 °C

De R-waarde berekening van een begroeid dak met substraatdikte van 80 mm en een drainagelaag van 20 mm (in tabel 7.1) is dat het begroeide dak met extensieve vegetatie) is als volgt:

- Eerst wordt de warmtestroom van een naakt dak berekend m.b.v. de gemiddelde temperatuur op het dakmembraan, de binnentemperatuur (20°C) en de warmteweerstand van de constructie ($2,72 \text{ m}^2\text{K/W}$).
- Daarna wordt de warmtestroom van een begroeid dak (substraat 80 mm en drainagelaag 20 mm) berekend m.b.v. gemiddelde temperatuur op het dakmembraan, de binnentemperatuur (20°C) en de warmteweerstand van de constructie ($2,72 \text{ m}^2\text{K/W}$).
- Als laatste wordt het verschil in warmtestromen tussen het naakte dak en het begroeide dak omgezet in een R-waarde. En dit is de toegevoegde R-waarde van het begroeide dak.

De berekeningen zijn als volgt:

De warmtestroom van het naakte dak wordt gegeven door formule:

$$q_n = U_n \times (\Delta T)$$

$$U_n = 1 / R$$

Waarbij:

$$q_n = \text{Warmtestroom naakt dak (W/m}^2\text{)};$$

ΔT = Temperatuurverschil ($29,2^{\circ}\text{C}$)
 U_n = Warmtedoorgangscoefficiënt naakt dak ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$);
 R = Warmteweerstand constructie ($2,72 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$);

De warmtestroom van het begroeide dak wordt gegeven door formule:

$$q_g = U_n \times (\Delta T)$$

$$U_g = 1 / R$$

Waarbij:

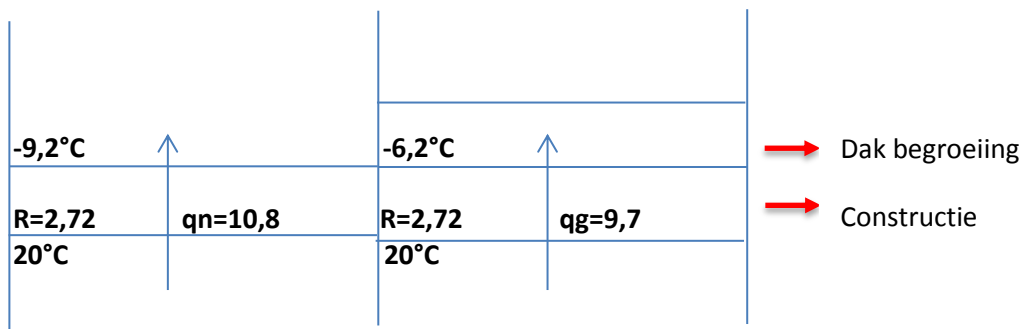
q_g = Warmtestroom begroeid dak (W/m^2);

ΔT = Temperatuurverschil ($26,2^{\circ}\text{C}$)

U_g = Warmtedoorgangscoefficiënt begroeid dak ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$);

R = Warmteweerstand constructie ($2,72 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$);

Hieruit blijkt dat het begroeide dak in een koude winterdag $10,8 \text{ W}/\text{m}^2 - 9,7 \text{ W}/\text{m}^2 = 1,1 \text{ W}/\text{m}^2$ meer energie bespaart dan het naakte dak (zie figuur 7.1). Deze energiewinst is gelijk aan een warmteweerstand toevoeging van $0,29 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$. Dus de warmteweerstand van het begroeide dak wordt $2,72 \text{ m}^2\text{K}/\text{W} + 0,29 \text{ m}^2\text{K}/\text{W} = 3,01 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$.



Figuur 7.1: Overzicht van temperaturen, warmtestromen en R-waarde gaat van $2,72 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$ (naakt dak) naar $3,01 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$ (begroeid dak).

7.3 EPC berekeningen van een woning met verschillende isolatie niveaus

Het energieverbruik van een begroeide dak (substraatdikte 80 mm en drainagelaag 20 mm) en een plat dak bij vier verschillende isolatie niveaus wordt weergegeven in tabel 7.2.

Tabel 7.2 Energieverbruik met verschillende isolatie niveaus.

Gebouweigenschappen	Woning 1970	Woning 1988	Woning 2003	Woning 2012	Woning 2015
<i>Gebouw afmeting aan</i>					
- noord kant	9 m	9 m	9 m	9 m	9 m
- oost kant	6 m	6 m	6 m	6 m	6 m
- zuid kant	9 m	9 m	9 m	9 m	9 m
- west kant	6 m	6 m	6 m	6 m	6 m
<i>Glasoppervlakte aan</i>					
- noord kant	8 m ²	8 m ²	8 m ²	8 m ²	8 m ²
- oost kant	6 m ²	6 m ²	6 m ²	6 m ²	6 m ²
- zuid kant	8 m ²	8 m ²	8 m ²	8 m ²	8 m ²
- west kant	6 m ²	6 m ²	6 m ²	6 m ²	6 m ²
<i>Verdiepingshoogte</i>	3 m	3 m	3 m	3 m	3 m
<i>Bouwlagen</i>	3	3	3	3	3
<i>Isolatie</i>					
- gevels	0,22 m ² k/W	1,50 m ² k/W	2,50 m ² k/W	3,50 m ² k/W	5,0 m ² k/W
- dak	0,22 m ² k/W	1,50 m ² k/W	2,50 m ² k/W	3,50 m ² k/W	5,0 m ² k/W
- vloer	0,22 m ² k/W	1,50 m ² k/W	2,50 m ² k/W	3,50 m ² k/W	5,0 m ² k/W
<i>Type beglazing</i>	enkel glas	dubbel glas	dubbel glas	drievoudig glas	drievoudig glas
<i>Bezittingsgraad</i>	0,025 persoon/m ²	0,025 persoon/m ²	0,025 persoon/m ²	0,025 persoon/m ²	0,025 persoon/m ²
<i>Interne warmtelast</i>	5,0 W/m ²	5,0 W/m ²	5,0 W/m ²	5,0 W/m ²	5,0 W/m ²
<i>Minimum binnentemperatuur</i>	20°C	20°C	20°C	20°C	20°C
<i>Ventilatie voud</i>	1,8/uur	1,8/uur	1,8/uur	1,8/uur	1,8/uur
<i>Energieverbruik zonder begroeid dak kWh/m²</i>	85	47	42	39	38
<i>Energieverbruik met begroeid dak kWh/m²</i>	74	46	41	39	38
<i>Energie besparing in %</i>	12 (±1)	2 (±1)	2 (±1)	0 (±1)	0 (±)

7.4 EPC berekeningen van een woning met verschillende woonlagen

Het energieverbruik van een woning met een begroeid dak (substraatdikte 80 mm en drainagelaag 20 mm) en een plat dak met vijf verschillende woonlagen wordt weergegeven in tabel 7.3.

Tabel 7.3: energieverbruik bij verschillende woonlagen.

Gebouweigenschappen	Woning 1	Woning 2	Woning 3	Woning 4	Woning 5
<i>Gebouw afmeting aan</i>					
- noord kant	9 m	9 m	9 m	9 m	9 m
- oost kant	6 m	6 m	6 m	6 m	6 m
- zuid kant	9 m	9 m	9 m	9 m	9 m
- west kant	6 m	6 m	6 m	6 m	6 m
<i>Glasoppervlakte aan</i>					
- noord kant	2,7 m ²	5,3 m ²	8 m ²	10,7 m ²	13,3 m ²
- oost kant	2 m ²	4 m ²	6 m ²	8 m ²	10 m ²
- zuid kant	2,7 m ²	5,4 m ²	8 m ²	10,7 m ²	13,3 m ²
- west kant	2 m ²	4 m ²	6 m ²	8 m ²	10 m ²
<i>Verdiepingshoogte</i>	3 m	3 m	3 m	3 m	3 m
<i>Bouwlagen</i>	1	2	3	4	5
<i>Isolatie</i>					
- gevels	1,50 m ² k/W	1,50 m ² k/W	1,50 m ² k/W	1,50 m ² k/W	1,50 m ² k/W
- dak	1,50 m ² k/W	1,50 m ² k/W	1,50 m ² k/W	1,50 m ² k/W	1,50 m ² k/W
- vloer	1,50 m ² k/W	1,50 m ² k/W	1,50 m ² k/W	1,50 m ² k/W	1,50 m ² k/W
<i>Type beglazing</i>	dubbel glas	dubbel glas	dubbel glas	dubbel glas	dubbel glas
<i>Bezittingsgraad</i>	0,025 persoon/m ²	0,025 persoon/m ²	0,025 persoon/m ²	0,025 persoon/m ²	0,025 persoon/m ²
<i>Interne warmtelast</i>	5,0 W/m ²	5,0 W/m ²	5,0 W/m ²	5,0 W/m ²	5,0 W/m ²
<i>Minimum binnentemperatuur</i>	20°C	20°C	20°C	20°C	20°C
<i>Energieverbruik zonder begroeid dak kWh/m²</i>	61	50	47	45	44
<i>Energieverbruik met begroeid dak kWh/m²</i>	59	49	46	45	44
<i>Energie besparing in %</i>	3 (±1)	2 (±1)	2 (±1)	0 (±1)	0 (±1)

7.5 Conclusie

Uit de EPC berekeningen van dit hoofdstuk kan men concluderen dat een woning met een laag isolatie niveau en weinig woonlagen meer baat heeft bij een begroeid dak. Een woning van 3 bouwlagen met een begroeid dak met minimale isolatie bespaart 12% gedurende winter t.o.v. dezelfde woning met een plat dak. Er is een minimaal verschil in energieverbruik tussen een woning met of zonder een begroeid dak met verschillende woonlagen bij een isolatieniveau van 1,50 m²k/W of meer.

Referentie

[1] L. Van de Vel, D. Raymaekers, 2006, *WTCB Technische voorlichting 229 Groendaken*, Brussel.

Bijlage:

Prototype warmtebalansmodel

De uitleg van de formules wordt in hoofdstuk 6 aangeven.

Energiebalans begroeid dak							
Energiebalans Begroeiing:							
$\left(\rho c_p\right)_f d_f F \frac{dT_f}{dt} = R_{n,f} + H_f + L_f$							
Uitkomst		35,35541287 W/m ²					
Netto warmte straling van de begroeiing:							
$R_{n,f} = \sigma_f \left[(1 - \tau_s - \rho_s) (1 + \tau_s \rho_g) \varphi_s + \varepsilon_f \sigma (T_{sky}^4 - T_f^4) + \varepsilon_{fg} \sigma (T_g^4 - T_f^4) \right]$							
=		3,55663435 W/m ²					
Voelbare warmtestroom begroeiing:							
$H_f = F \frac{(\rho c_p)_a}{r_a} (T_a - T_f)$							
=		32,53333333 W/m ²					
Latente warmtestroom begroeiing:							
$L_f = -F \frac{(\rho c_p)_a}{\gamma(r_a + r_s)} (p_{v_f,sat} - p_{v_a})$							
=		-0,734554815 W/m ²					

Energiebalans substraat:

$$-k_{\omega_g} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = R_{n,g} + H_g + L_g$$

Uitkomst -57,00 W/m²

Netto warmtestraling substraat:

$$R_{n,g} = (1 - \rho_g) \left(1 - \sigma_f (1 - \tau_s) \right) \varphi_s + \sigma_f \varepsilon_{fg} \sigma (T_f^4 - T_g^4) + (1 - \sigma_f) \varepsilon_g \sigma (T_{sky}^4 - T_g^4)$$
$$= 3,238859959 \text{ W/m}^2$$

Voelbare warmtestroom substraat:

$$H_g = \frac{(\rho c_p)_a}{(r_c + r_a)} (T_a - T_g)$$
$$= -23,23809524 \text{ W/m}^2$$

Latende warmtestroom substraat:

$$L_g = - \frac{(\rho c_p)_a}{\gamma (r_{sub} + r_a)} (p_{v_{g,sat}} - p_{v_a})$$
$$= -36,99721661 \text{ W/m}^2$$

Variabelen en ranges

Voor elke variabeel is een reële ranges bepaald aan de hand van literatuuronderzoek en weer-gegevens van de KNMI. Door per variabeel in zijn reële range te variëren, is te zien hoe groot de effecten zijn van dakeigenschappen op de energiebalans van het dak.

Symbol	Omschrijving	Eenheid	Range	Ingevoerde waarde
$R_{n,f}$	Netto straling geabsorbeerd begroeiing	W/m ²	0-300	3,55663435
σ_f	Dekkingsgraad van het dak	-	0,1-1	0,5
τ_s	Korte golfstraling transmissie coefficient begroeiing	-	0,1-0,7	0,40
ρ_s	Korte golfstraling reflectiecoëfficiënt begroeiing	-	0,14-0,26	0,2
ρ_g	Korte golfstraling reflectiecoëfficiënt substraat	-	0,08-0,43	0,08
φ_s	Invallende zonnestraling op horizontale vlak	W/m ²	-	44,00
ϵ_f	Emissie coëfficiënt begroeiing	-	0,970-0,988	0,979
σ	Stefan-Boltzmann constante	W/m ² K ⁴	-	5,64E-08
T_{sky}	Temperatuur hemel	Kelvin	-	270,6
T_f	Temperatuur begroeiing	Kelvin	267-286	276
ϵ_{fg}	Emissie coëfficiënt begroeid dak	-	0-1	0,9195
T_g	Temperatuur substraat	Kelvin	267-286	279
H_f	Voelbare warmtestroom begroeiing	W/m ²	-	32,53333333
L_f	Latente warmtestroom begroeiing	W/m ²	-	-0,734554815
F	Leaf Area Index	-	0,5-6	2
$(\rho c_p)_a$	Volumetrische thermische capaciteit lucht	J/m ³ K	1211-1299	1220
r_a	Massa warmtetransportweerstand begroeiingsoppervlak	s/m	50-200	75
T_a	Temperatuur lucht	Kelvin	267-286	277
γ	Thermische psychometrische constante	Pa/K	-	67,15549
r_s	Bladstomata massa warmtetransportweerstand	s/m	200-12000	6009
$Pv_{f,sat}$	Verzadigde dampspanning lucht tussen de begroeiing	Pa	330-1450	800
Pv_a	Dampspanning lucht	Pa	650-720	677,00
$R_{n,g}$	Netto geabsorbeerde zonnestraling substraat	W/m ²	-	3,238859959
ϵ_g	Emissie coëfficiënt substraat	-	0,908-0,967	0,938
H_g	Voelbare warmtestroom substraat	W/m ²	-	-23,23809524
L_g	Latente warmtestroom substraat	W/m ²	-	-36,99721661
r_c	Massa warmtetransportweerstand van tussen lucht en substraatoppervlak	s/m	25-44	30
r_{sub}	Damptransportweerstand substraatoppervlak	s/m	21-48	34,5
$Pv_{g,sat}$	Verzadigde dampdruk lucht boven de substraatoppervlak	Pa	330-1450	900
K_{wg}	Warmtegeleiding substraat	W/mK	-	8,549467783
ΔT	Temperatuurverschil top en bodem substraat	Kelvin	-	1
Δz	Dikte Substraat	m	0,05-1	0,15
	Beïnvloedbaar door de eigenschappen van begroeiing aan te passen			
	Beïnvloedbaar door de eigenschappen van substraat aan te passen			
	Beïnvloedbaar door weeromstandigheden			

Referentie prototype warmtebalansmodel

Symbol	Bronvermelding waarde
σ_f	http://landsaf.meteo.pt/algorithms.jsp?seltab=8&starttab=8 S. E. Ouldboukhitine et al. 2012, J. C. Jiménez-Muñoz et al. 2009
τ_s	http://geol.hu/data/online_help/Understanding_Vegetation_and_Its_Reflectance_Properties.html
ρ_s	http://geol.hu/data/online_help/Understanding_Vegetation_and_Its_Reflectance_Properties.html
ρ_g	www.kmni.nl
φ_s	www.kmni.nl
ϵ_f	http://www.icess.ucsb.edu/modis/EMIS/html/vegetation.html E. Caselles et al. 2011, A. N. French et al. 2000.
σ	P. C. Tabares-Velasco et al. 2012
T_{sky}	M. Martin et al. 1984, R. Djedjig et al. 2012.
T_f	-
ϵ_{fg}	http://www.icess.ucsb.edu/modis/EMIS/html/vegetation.html E. Caselles et al. 2011, A. N. French et al. 2000.
T_g	-
F	R. Darvishzadeh et al. 2007, A. A. Gitelson 2003.
$(\rho C_p)_a$	http://www.engineeringtoolbox.com/air-properties-d_156.html
r_a	S. Liu et al. 2006, J. M. Ham et al. 1990.
T_a	www.kmni.nl
γ	-
r_s	P. C. Tabares-Velasco et al. 2012, J. C. O'Toole et al. 1980.
$PV_{f,sat}$	www.kmni.nl
PV_a	www.kmni.nl
ϵ_g	http://www.omega.com/literature/transactions/volume1/emissivityb.html M. Mira et al., J. A. Sobrino et al. 2009.
r_c	J. M. Ham et al. 1990, R. Djedjig et al. 2012.
r_{sub}	R. Djedjig et al. 2012, J.M. Ham et al. 1990.
$PV_{g,sat}$	www.kmni.nl