

Kennispaper: Duurzame begroeide daken

Via groen naar geel, blauw en rood



Aansprakelijkheid

SBRCURnet en degenen die aan dit product hebben meegewerkt, hebben een zo groot mogelijke zorgvuldigheid betracht bij het samenstellen van deze publicatie. Toch kan niet worden uitgesloten dat de inhoud onjuistheden bevat. De gebruiker van dit product aanvaardt daarvoor het risico. SBRCURnet sluit, mede ten behoeve van de auteurs, iedere aansprakelijkheid uit voor schade die mocht voortvloeien uit het gebruik van informatie uit dit product.

© SBRCURnet

Alle rechten voorbehouden. Niets van deze uitgave mag worden veelevoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, getransformeerd tot software of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opname of enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

Voor zover het maken van kopieën uit deze uitgave is toegestaan op grond van artikel 16b Auteurswet 1912 in verbinding met het Besluit van 23 augustus 1985, Stb. 471 en artikel 17 Auteurswet 1912, dient men de daarvoor wettelijk verschuldigde vergoedingen te voldoen aan de Stichting Reprorecht (Postbus 882, 1180 AW Amstelveen). Voor het overnemen van gedeelte(n) uit deze uitgave in bloemlezingen, readers en andere compilatiewerken (artikel 16 Auteurswet 1912) dient u zich te richten tot: SBRCURnet, Postbus 516, 2600 AM DELFT.

No part of this book may be reproduced in any form by print, photoprint, microfilm, stored in a database or retrieval system, or any other means without written permission from the SBRCURnet.

Colofon

Auteur

dr.dr.s.ir. Christoph Maria Ravesloot

Projectmanager

Geert-Jan Verkade, SBRCURnet

Platform multifunctionele daken

Peter Bosch, TNO

Marlous Gout, Gemeente Rotterdam

Nico Heijmen, Building Changes

Guido Lammerink, SBRCURnet

Jasper Passtoors, Gemeente Amsterdam

Paul van Roosmalen, Gemeente Rotterdam

Sacha Stolp, Gemeente Amsterdam

Stef Janssen, Innovatief Groen

Vormgeving

Joshua Tourrich, SBRCURnet

K705.16

Delft, april 2016

Deze rapportage is mede mogelijk gemaakt door een financiële bijdrage van de Gemeente Rotterdam en van het Opleidings- en Ontwikkelingsfonds van de Bouwnijverheid.



Meer informatie

U vindt meer informatie over alle SBRCURnet-producten en -projecten op www.sbrcurnet.nl.

Wilt u op de hoogte blijven van onze activiteiten?

Meld u dan via www.sbrcurnet.nl aan voor onze gratis e-mailnieuwsbrief.

Heeft u meer vragen over deze publicatie?

Bel met de afdeling verkoop via (015) 303 05 00 of stuur een mail naar verkoop@sbrcurnet.nl.

Duurzame begroeide daken

Via groen naar geel, blauw en rood

Inhoud

1 Duurzame Daken vanuit groene functies in relatie tot gele, blauwe en rode functies 7

2 Nieuwe kennis en inzichten 8

2.1 Thermische isolatie tegen afkoeling van begroeide daken 9

2.2 Thermische koeling van begroeide daken in Nederland tegen opwarming 14

2.3 Weerstand van begroeide daken in Nederland tegen windinvloeden 17

2.4 Constructieve capaciteit van stalen daken in Nederland om dakbegroeiing te dragen 21

Literatuur 21

Voorwoord

Het dak kent vaak maar een functie: het gebouw beschermen tegen koude, wind en regen. In het kader van groene energie wordt het dak daarnaast steeds vaker benut voor het plaatsen van bijvoorbeeld zonnecellen.

Als bouwsteen naar een duurzame stedenbouw worden steeds vaker begroeide daken gerealiseerd. Begroeide daken hebben veel voordelen (zie Kennispaper: *Waar koop ik een duurzaam multifunctioneel dak?*

Handreiking voor dakeigenaren. SBRCURnet 2015).

'Begroeide daken' is een verzamelbegrip dat betrekking heeft op mos/sedumdaken, gras/kruidendaken en gebruikt wordt voor beloopbare beplante daklandschappen en hellende daken. In principe worden twee typen begroeide daken onderscheiden, namelijk extensieve begroeide daken en intensieve begroeide daken. Het onderscheid in extensief en intensief berust op de intensiteit van het noodzakelijke beheer; daarnaast is ook de opbouw verschillend. Extensieve begroeide daken zijn dunner en dus lichter qua opbouw en over het algemeen minder kostbaar. Extensieve begroeide daken kunnen hierdoor ook eerder toegepast worden op bestaande gebouwen. Intensieve begroeide daken variëren van bewaterde gras/kruidendaken tot beloopbare stadsparken op gebouwen.

Het inrichten en toegankelijk maken van het daklandschap op een nieuw maaiveld biedt allerlei kansen voor het gebruik. Zo kunnen bewoners hier een eigen tuin krijgen en kan de ruimte worden benut om te recreëren, zitten, spelen of sporten. Groen op daken en tegen gevels is aantrekkelijk voor vogels en insecten. Het groen verbetert de lucht kwaliteit door het invangen van fijnstof en het omzetten van CO₂. De bodem en beplanting houden tijdelijk regenwater vast, wat verkoelend werkt op de aanliggende en direct onderliggende woningen en kantoren. Bovendien draagt deze waterbuffer bij aan vermindering van de opwarming in steden en vermindert het de noodzakelijke afvoercapaciteit voor regenwater. Het toepassen en goed onderhouden van een leeflaag en beplanting zorgt dat een project op een aantrekkelijke manier veroudert. Dat draagt bij aan de belevingskwaliteit.

De potentie van het braakliggend daklandschap in de urbane omgeving is enorm. In de steden liggen grote oppervlakten platte daken te wachten om functioneel te worden ingezet.

De laatste kennis op het gebied van begroeide daken was te vinden in het boek *Begroeide Daken na 2010* (Teeuw en Ravesloot 2011) en in de naslagwerken uitgegeven door SBRCURnet (Hendriks et al. 2006; 2010); zie de literatuurlijst op pagina 22).

In de afgelopen jaren zijn tal van daken in heel Nederland vergroend en is door de Hogeschool Rotterdam onderzoek gedaan naar begroeide daken. In deze Kennispaper zijn de resultaten van de verschillende studentenonderzoeken gebundeld door hun begeleider dr.drs.ir. Christoph Maria Ravesloot, verbonden aan de hogeschool als lector.

Duurzame Daken vanuit groene functies in relatie tot gele, blauwe en rode functies

In het dichtbevolkte Nederland wordt in toenemende mate gebruik gemaakt van de ruimte op daken van bestaande gebouwen. In deze ruimte kunnen functies worden gerealiseerd die elders in de ruimte op het maaiveld geen plek meer krijgen of die op het maaiveld duurder zijn in realisatie en beheer. Deze paper gaat in op een onderzoek van twee jaar van de Hogeschool Rotterdam, waarbij alle brancheorganisaties en de belangrijkste leveranciers van begroeide daken betrokken waren. Vanuit bestaande algemeen geldige wetenschappelijke kennis is verder onderzoek uitgevoerd binnen de specifiek Nederlandse context en binnen Nederlandse omstandigheden. Dit leverde opmerkelijke resultaten, die een belangrijke aanvulling zijn op de algemeen geldige wetenschappelijke kennis, die tot nu toe als uitgangspunt gehanteerd moest worden.

Zo blijken begroeide daken in Nederland, door klimaatomstandigheden, duidelijk andere thermische eigenschappen te hebben dan tot nu toe geclaimd werd op basis van algemene theorie. Begroeide daken isoleren in Nederland niet, maar koelen wel meer dan werd aangenomen.

Begroeide daken waaien niet weg en beschermen losliggende dakbedekkingen tegen opwaaien. Echter, het mechanisme erachter was niet bekend. Dit nieuwe mechanisme sluit ook niet aan bij de huidige manier van berekenen van ballast op basis van grind en tegels. Het extra gewicht van begroeide daken levert problemen op voor staal- en betonconstructies. Daar liggen echter kansen achter verscholen, die tot nu toe niet werden opgemerkt. Aanvullende constructieve versteviging blijkt, tegen niet geringe kosten, toch voldoende potentie te hebben voor het terugverdienen van de kosten die met die versteviging gemoeid zijn. Het lijkt wel alsof het loont om groot te denken bij het aanleggen van begroeide daken in Nederland.

Uit het onderzoek blijkt vooral dat nieuwe toepassingen op begroeide daken zich snel ontwikkelen en in sommige opzichten afwijken van wat gangbaar is en van wat als algemene kennis aangenomen wordt. Het is belangrijk om deze ontwikkelingen telkens overnieuw te toetsen en te waarderen op technische en economische haalbaarheid in het perspectief van de bestaande situatie. In sommige gevallen wordt het dak van passief onrendabele ruimte, getransformeerd naar actief gebruikte rendabele ruimte waarop begroeiing, opwekken van zonne-energie en buffering van water gecombineerd worden. Het is gebleken dat dergelijke, op het eerste gezicht drastische maatregelen, er juist toe leiden dat een gebouw weer rendabel te exploiteren is. Daken met gecombineerde functies in geel

(besparen op fossiele energie en opwekken duurzame energie), groen (aanleggen van vegetatie), blauw (opvangen, bufferen en vertragen van hemelwater) en rood (aanleggen, gebruiken en beheren van nieuwe gebruiksfuncties), leveren op termijn baten op, die de kosten terugverdienen. Door bovenstaande functies te combineren ontstaan duurzame daken.

Nieuwe kennis en inzichten

Voor duurzame begroeide daken is nieuwe kennis beschikbaar over de thermische eigenschappen isolatie en koeling. Deze kennis valt onder de groene functie van daken, in combinatie met geel en blauw. Bij toevoeging van rode functies ontstaan daktuinen en dakakkers.

De laatste kennis op het gebied van begroeide daken was te vinden in het boek *Begroeide Daken na 2010* (Teeuw en Ravesloot 2011) en in de naslagwerken uitgegeven door SBRCURnet (Hendriks et al. 2006; 2010). Enkele onderdelen van die kennis zijn veranderd. Deze paper adresseert deze nieuwe kennis op basis van nieuwe, uit onderzoek verkregen kennis.

Duurzame Daken vanuit groen en geel

- 2.1 Er is wetenschappelijk aangetoond dat extensief begroeide daken niet isoleren kunnen in het gematigde Nederlandse winterklimaat.
- 2.2 Er is aangetoond hoe begroeide daken bijdragen aan een verkoelend effect in het gematigde Nederlandse zomerklimaat.

Duurzame Daken vanuit groen en rood

- 2.3 Er is aangetoond welke twee mechanismen ten grondslag liggen aan het ballasten van losliggende dakbedekkingsmembranen tegen windbelasting, door middel van substraat en vegetatie van begroeide daken.
- 2.4 Er is aangetoond dat grote staalconstructies geen restcapaciteit hebben voor belasting door extra dakbegroeiing. Desondanks kan aanleg van begroeiing, met versteviging van de stalen dakconstructie, renderend zijn. Hetzelfde geldt voor betonconstructies.

In dit stuk wordt nader ingegaan op de nieuwe kennis bij het functioneren van dakbegroeiing. Waar nodig wordt onderscheid gemaakt tussen extensief en intensief begroeide daken. Extensief begroeide daken zijn daken met een substraathoogte tot 150 mm (Teeuw en Ravesloot 2011). Deze daken worden zo ontworpen en aangelegd, dat zij met minimaal onderhoud jarenlang voldoende kunnen functioneren. Extensieve daken zijn kijkdaken met als functie:

- beschermen van de dakhuid en daardoor verlengen van de levensduur van het dak;
- ballast tegen opwaaien en wegwaaien;
- waterbuffering en watervertraging;

- verkoeling van het dak en de lucht boven het dak;
- verbeteren van uitzicht van omwonenden en eventueel geluiddemping.

Soms worden argumenten genoemd als vergroten van de biodiversiteit en het binden van fijnstof en CO₂. Intensief begroeide daken hebben een hogere substraatlaag en hogere vegetatie. Over het algemeen worden intensief begroeide daken daktuinen genoemd (Teeuw en Ravesloot 2011). Op dergelijke daktuinen worden rode verblijfsfuncties gerealiseerd, waarbij zelfs groente en fruit op het dak worden gekweekt en geoogst.



De Dakakker. Aangelegd door: Binder Groenprojecten
Foto: Gemeente Rotterdam.

¹Er wordt in deze paper ervan uitgegaan dat u als lezer bekend bent met bestaande technieken als aanleg en beheer van dakbegroeiing, zonnepanelen en zonneboilers. In deze tekst wordt daarom niet aangegeven welke principes ten grondslag liggen aan het ontwerpen van duurzame functies op begroeide daken.

2.1 Thermische isolatie tegen afkoeling van begroeide daken

Er is aangetoond dat extensief begroeide daken niet extra isoleren in het gematigde Nederlandse winterklimaat (Ravesloot, 2015). De thermisch isolerende eigenschappen van de dakconstructie onder de dakbegroeiing zijn bij de meeste daken zo hoog, dat de geringe isolerende werking van dakbegroeiing wegvalt. Dakbegroeiing is gemiddeld genomen in Nederland, te nat waardoor deze niet isoleert. Dakbegroeiing houdt warmte tegen door de planten en dakbegroeiing reflecteert invallende zonnewarmte. Alleen als het substraat droog is, de planten niet het gehele substraat bedekken en als de bestaande constructie ongeïsoleerd is met een R_c -waarde lager dan $1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$, dan is de isolerende werking berekenbaar en meetbaar.

Op basis van wetenschappelijke literatuur is het mogelijk gebleken om de thermische processen in substraatlaag en vegetatielaag van extensieve begroeide daken in bouwfysische formules te vatten. Er zijn vier mogelijke modellen van deze formules bekend in de literatuur:

- Model Feng (Feng et al. 2010);
- Model Ouidboukhitine (Ouidboukhitine et al. 2011);
- Model Taberes-Velasco (Tabares-Velasco et al. 2012);
- Model Djedjig (Djedjig et al. 2012).

De processen die beschreven worden kunnen als parameters in de formules worden teruggevonden. Het gaat daarbij om processen als Leaf Area Index, dat is de hoeveelheid blad boven het substraat ten opzichte van de hoeveelheid substraat die niet afgedekt is door blad, temperaturen op diverse punten in substraatlaag en vegetatielaag, invallende en uitgaande warmtestraling eigenschappen en vochtigheid van lucht en substraat. De gevonden modellen zijn allemaal afgeleid van metingen op veld- of laboratoriumlocaties. Deze locaties zijn binnen vele verschillende klimatologische omstandigheden getest. De conclusies variëren tussen waargenomen isolerende werking tot geen waargenomen isolerende werking.

Om voor de Nederlandse situatie een conclusie te kunnen formuleren, is op een samengesteld model, waarin zo veel mogelijk parameters zijn meegenomen, een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd. Een gevoeligheidsanalyse berekent voor iedere parameter met de uiterste kleinste waarde en de uiterste grootste waarde

de invloed op de totale berekening. Verandert er in de totale berekening weinig, dan zijn het model en de formule minder gevoelig voor deze parameter. Op die manier kunnen sterke invloeden van minder sterke invloeden worden onderscheiden.

Tabel 1 toont de parameters en de bandbreedtes van de waarden die in een gematigd klimaat als in Nederland verwacht kunnen worden als de bouwfysische thermische processen, die invloed hebben op de isolerende werking van een begroeide dak, beschreven worden. Deze parameters komen voor in een samengestelde wiskundige formule, waarmee de R-waarde van substraat en vegetatie kan worden berekend.

De thermische eigenschappen van een begroeid dak zijn gerelateerd aan de opbouw, de isolerende werking is in de literatuur vooral afhankelijk van het vochtgehalte in het substraat. De constructieve opbouw binnen (binnenklimaat) en de constructieve opbouw aan de buitenkant (weersomstandigheden) bepalen de relatieve invloed in de gehele constructie. In wetenschappelijke literatuur zijn onderzoeken met metingen van isolerende werking te vinden. Door alle bekende metingen uit deze literatuur met elkaar te vergelijken zijn de factoren gevonden die in de praktijk voorkomen.

Tabel 1 Parameters en bandbreedte van bouwfysische parameters die van invloed zijn op begroeide daken.

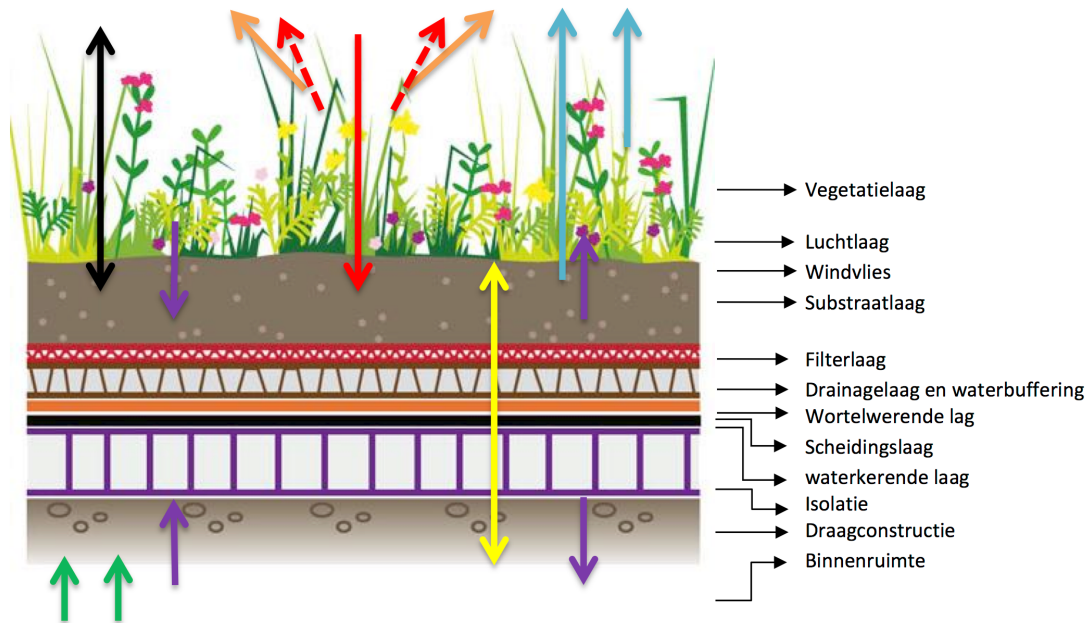
Symbol	Parameter	Overdag	's Nachts	24 uur gemiddelde
LAI	LAI (Leaf Area Index, oppervlakte blad/m ²)	2	2	2
f	Dichtheid vegetatie	0,9	0,9	0,9
Waf	Windsnelheid	4 m/s	4 m/s	4 m/s
α_f	Korte golf Albedo* warmte van de vegetatie	0.5	0.5	0.5
α_g	Korte golf Albedo warmte van het substraat	0.5	0.5	0.5
r''	Natheidsfactor	0.5	0.5	0.5
ϵ_f	Warmte uitstraling vegetatie	0.5	0.5	0.5

ϵ_g	Warmte uitstraling substraat	0.5	0.5	0.5
I_s	Korte golf straling	270 W/m ²	0 W/m ²	191 W/m ²
I_{lr}	Lange golf straling	360 W/m ²	341 W/m ²	354 W/m ²
T_f	Temperatuur vegetatie	21 °C	12 °C	18 °C
T_g	Temperatuur substraat	17 °C	13 °C	14 °C
T_{af}	Temperatuur lucht tussen vegetatie	20 °C	14 °C	17 °C
T_2	Temperatuur onderin het substraat	18 °C	13 °C	15 °C

* Hoeveelheid zonnestrallen die door een oppervlak worden teruggekaatst

In verder onderzoek is gekeken naar deze totale thermische werking als de factoren zoals in de formule weergegeven is, in hun extreme waarde zouden optreden. Hoe gevoelig reageert dan de totale isolerende werking op deze extremen? Een dergelijke gevoeligheidsanalyse geeft een beeld van de invloed van iedere individuele factor op het totale thermische gedrag volgens dit model. Helaas zijn nog niet alle waarden voor de afzonderlijke factoren bekend en is het model niet helemaal compleet. Wel wordt in de literatuur vermeld dat het theoretische model nauwkeuriger is dan in de praktijk gemeten kan worden. Voor zowel het substraat apart van de begroeiing als voor substraat en begroeiing opgeteld geldt dat er niet extreem gereageerd wordt. Het viel op dat het beeld bij een modelberekening van een begroeid dak in de wintersituatie ten opzichte van de zomersituatie niet past bij een gemiddelde meting met dezelfde factoren.

Figuur 1 toont de parameters die een rol spelen bij thermische processen in een opbouw voor een begroeid dak.



Figuur 1 Thermische processen bij begroeid dak.

	<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)

De typische zomer- of wintersituatie, waarbij de temperaturen boven het dak duidelijk afwijken van de temperaturen onder het dak, wordt bij een gevoeligheidsanalyse van de theoretische modellen nauwelijks benaderd. Dat kan zo worden geïnterpreteerd dat de omstandigheden op een extensief begroeid dak zo vaak zullen wijzigen, dat er nooit sprake is van een stabiele of gemiddelde (stationaire) winter- of zomer-situatie. In het onderzoek is de vraag gesteld of er desalniettemin een gemiddelde kan worden berekend van het thermisch gedrag van extensief begroeide daken. Die conclusie is er mogelijk wel: als je naar de grote verschillen in meetopstellingen en meetresultaten kijkt, dan valt de grote diversiteit en dynamiek op. Een gemiddelde bestaat dus alleen op papier. Dit klopt ook met het beeld dat ontstaat uit de theoretische modellen voor het thermisch gedrag.

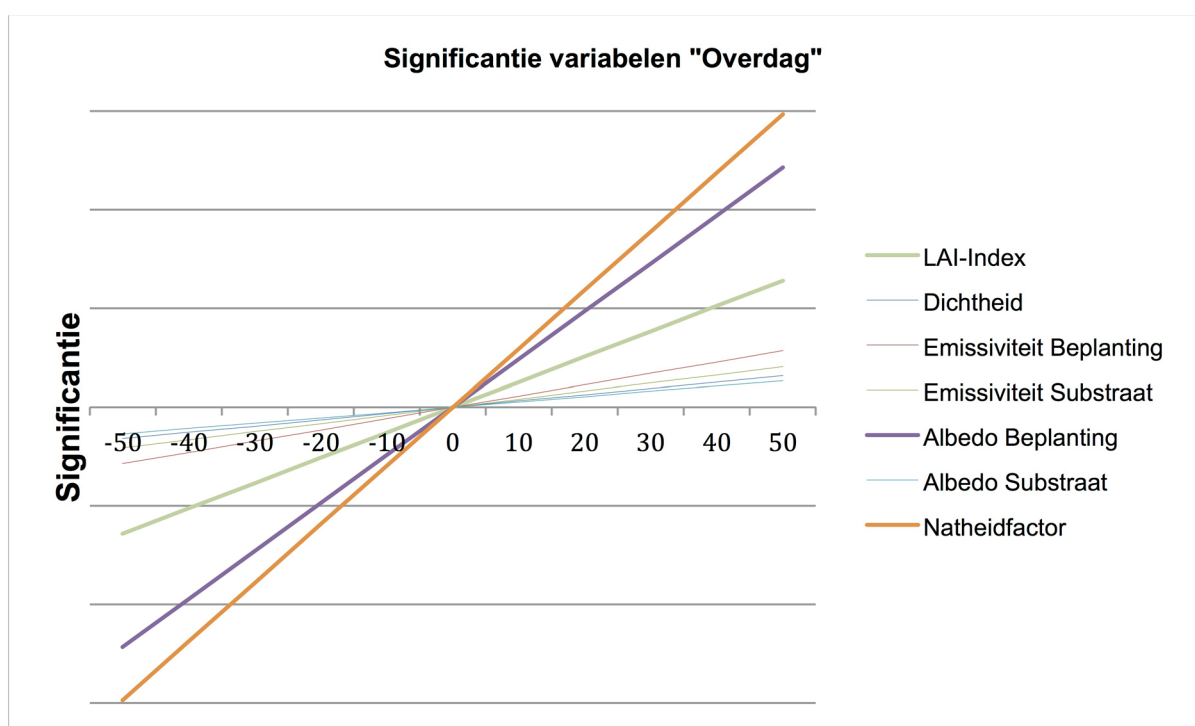
Tabel 2 toont thermische eigenschappen van begroeide daken gedifferentieerd naar LAI (Leaf Area index). De invloed van de LAI is zichtbaar in modelberekeningen, maar niet zo heel groot (naar Faffal I. et al. 2011). De vraag is of dit aandeel in een praktijkmeting tegen de achtergrond van meetnauwkeurigheid overeind blijft?

Tabel 2 Thermische eigenschappen begroeid dak, gedifferentieerd naar Leaf Area Index.

Daktype	Binnentemperatuur °C		Energieverbruik kWh/m ² a		
	temp gemiddeld	temp max	verwarming	koeling	totaal
Zwart dak 0	28,3	30,1	36	2,5	38,5
Begroeid dak LAI 0,5	26,6	28,3	35,4	0,2	35,6
Begroeid dak LAI 2	26,3	28	36,1	0,1	36,2
Begroeid dak LAI 3,5	26,2	27,9	36,2	0,1	36,2
Begroeid dak LAI 5	26,2	27,9	36,3	0,1	36,4

In het onderzoek zijn alle factoren, op basis van de bandbreedte die gebruikt is in de gevoeligheidsanalyse, beoordeeld op de invloed die deze nog kunnen hebben als er wel sprake zou zijn van een stabiele of gemiddelde thermische zomer- of wintersituatie. Stel dat er wel thermische isolatie te verwachten is van een begroeid dak, door welke factoren zou deze dan worden veroorzaakt? Bij een berekening met het model

Figuur 2 Gevoeligheid beplantingslaag voor natheidsfactor, Albedo-effect beplanting en LAI-index.



over die vraag blijkt dat er maar weinig factoren overblijven.

Bij de wintersituatie dient ook nog verschil te worden gemaakt in overdag- en nachtsituatie, omdat de straling op en uit het dak van invloed zal zijn.

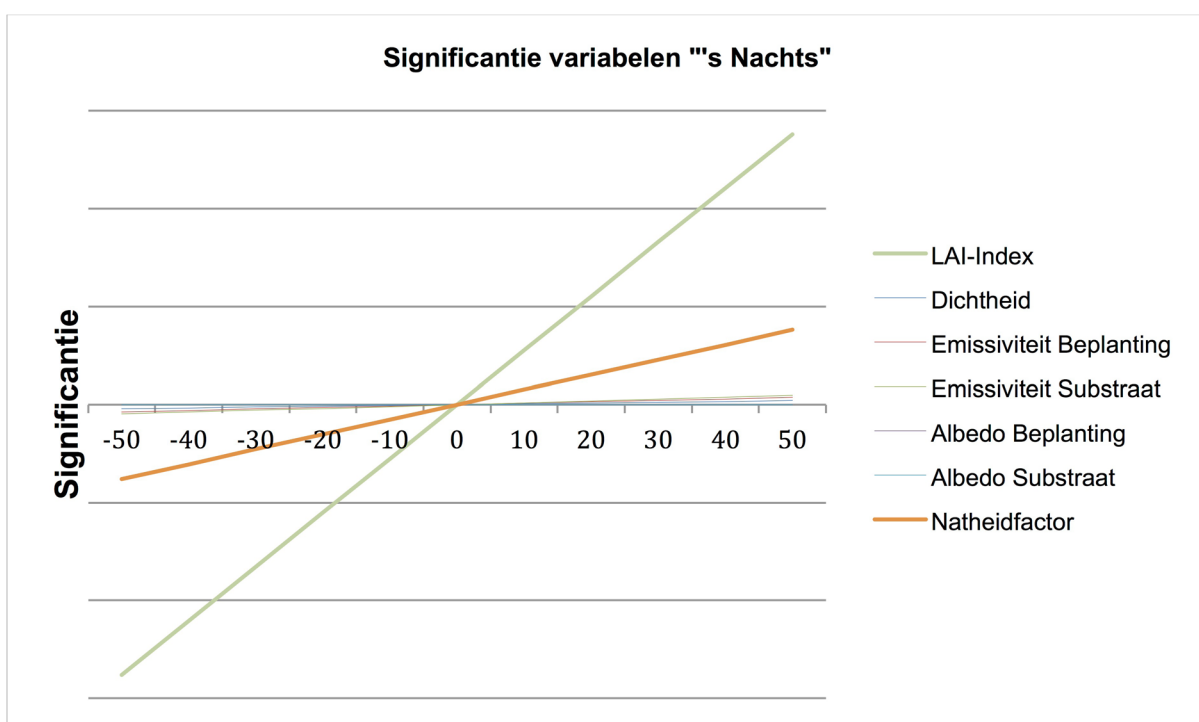
Figuur 2 toont de gevoeligheid van de beplantingslaag voor de overwegende factoren natheidsfactor, Albedo-effect beplanting en LAI-index in een overdag situatie (Delemarre en Somers, 2012). Albedo-effect is de mate waarin zonnestrallen worden weerkaatst door een oppervlak.

Figuur 3 toont de gevoeligheid van de beplantingslaag voor de overwegende factoren LAI-index, natheidsfactor, Albedo-effect beplanting en in een nachtsituatie (Delemarre en Somers, 2012).

Een ontwerper moet met drie factoren rekening houden als hij de thermische werking van substraat en begroeiing bij koelbehoefte wil maximaliseren: natheidsfactor, LAI-index en Albedo-effect. Nu kan een ontwerper meestal niet zo veel aan de wind veranderen, tenzij de dakvorm of dakrandvorm er op zou worden aangepast. De andere factoren zijn beter te beïnvloeden, bijvoorbeeld door extensief begroeide daken in die richting verder te optimaliseren. Bij beschouwing van de bandbreedtes bij deze factoren kan een bijdrage aan de totale R_c -waarde van de dakconstructies van een of

enkele tienden verwacht worden. Dat is in de orde van grootte van enkele malen de waarde van de overgangswaarden van lucht binnen en buiten. Vanuit die verhouding gezien zijn het dus geen bijdragen die je zomaar mag verwaarlozen. Echter, als de isolerende werking van de onderliggende constructie hoger is dan ongeveer $1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$, dan is de gemiddelde bijdrage van een begroeid dak verwaarloosbaar.

Figuur 3 Gevoeligheid beplantingslaag.



Invloed op R_c en EPC

Op een extensief begroeid dak, blijkt uit modellen en metingen, kan slechts op beperkte eigenschappen worden geïnnoveerd en beperkt worden bijgedragen aan het verhogen van een R_c -waarde. Als je naar de drie maatgevende factoren kijkt, is dat ook niet zo raar. De natheid van substraat is eigenlijk de omgekeerde waarde van de isolerende werking van een isolatiemateriaal. Die wordt bepaald door de hoeveelheid ingesloten lucht en de daardoor gevormde weerstand tegen transmissie, eventueel aangevuld met verbeterde weerstand tegen straling en convectie van lucht. Het moge duidelijk zijn dat in een nat substraat geen droge stilstaande lucht aanwezig is en dat daardoor convectie en straling van warmte door de lucht onmogelijk is. Er is sprake van een natte deken op een dakconstructie, die vooral een verkoelende werking zal hebben, maar niet een isolerende. Het zelfde geldt voor het effect van bladeren boven het substraat, meetbaar gemaakt door de LAI-index en voor het Albedo-effect. Deze factoren spelen geen belangrijke rol bij de bepalingsmethode voor de Lambda-waarde van een isolatiemateriaal of de R-waarde van een constructie.

Is desondanks te bepalen in welke mate een gemiddeld nat substraat zal bijdragen aan de totale R_c -waarde van een dakconstructie en aan de EPC berekening met een kleine bijdrage aan de R_c -waarde? Daarvoor zijn de R_c -waarden van twee verschillende begroeide daken uitgerekend.

Een dak met een substraatsamenstelling van 80 mm dik, met een toegevoegde $R = 0,45 \text{ m}^2\text{K/W}$ en een tweede met substraatsamenstelling van dikte 80 mm dik, met een toegevoegde: $R = 0,26 \text{ m}^2\text{K/W}$. Beide zijn met water verzadigd, de drainagelaag is 25 mm met luchtspon, $R = 0,15 \text{ m}^2\text{K/W}$.

Andere factoren zijn constant aangenomen. Deze waarden zijn voor de wintersituatie ingevoerd in EPC software (ENORM). Bij een EPC van 0,60 [-] reageert de berekening niet op veranderingen in de R-waarde voor de dakconstructie. Bij een uitgangspunt van $\text{EPC} = 1,30$ [-] reageert de EPC naar 1,31. Bij $\text{EPC} 2,[-]$ 65 naar 2,67. De bewering dat vroeger, bij lagere EPC en bij lagere R_c -waarden voor het dak, isolerende werking van een dakbegroeiing zichtbaar van invloed was, wordt bevestigd. Maar na de verlaging van EPC onder 1,3 valt de invloed weg. Ook mensen die nog nooit een EPC berekening gemaakt hebben kunnen inzien dat een dergelijke kleine toevoeging aan de R_c -waarde van een dakconstructie in een EPC berekening wegvalt.

Tabel 3 Verschillen in warmtevraag voor eengezinswoningen.

Isolatie niveau [mm]	R_c [$\text{m}^2\text{K/W}$]	Energieverbruik verwarming [$\text{kWh/m}^2\text{/Jaar}$]	
		Traditioneel dak	Begroeid dak
0	0	133,6	69,8
50	1,3	45,6	43,0
100	2,5	36,0	36,1
150	3,8	32,4	32,8
200	5,0	30,5	31,0
250	6,3	29,3	29,8
300	7,5	28,5	29,0



Figuur 4 Bezoekerscentrum De Hoep

Figuur 4 toont een foto van het Bezoekerscentrum De Hoep in Castricum van architect Maarten Min uit 1992. Bij dit bezoekerscentrum heeft de beplanting en het substraat bovengemiddelde invloed op de totale R_c -waarde van de constructie omdat het oppervlak een groot deel van het gebouw beslaat en omdat de constructieve R-waarde in de tijd dat het gebouw ontworpen is, nog niet zo hoog was als nu gebruikelijk

is. De EPC eis voor woningbouw werd in 1994 verlaagd naar 1,2 [-]. Bron: Min2 bouw-kunst BV, 1992.

Uit de vergelijking van de metingen die in wetenschappelijke literatuur te vinden zijn, blijkt vooral dat ze niet te vergelijken zijn. Om vergelijking mogelijk te maken zijn de gegevens uit het overzicht over deze literatuur afgezet tegen de huidige gebruikelijke R-waarden en de toekomstige verplichte minimale R-waarde van 5 [SI]. Zowel in een R-waarde berekening als in een EPC berekening valt een eventuele positieve bijdrage weg. De bijdrage van passieve koeling, doordat dakbegroeiing de temperaturen boven het dak sterk vermindert, kan wel significant zijn.



De Kameleon. Aangelegd door: Leven op Daken Foto: Leven op Daken.

2.2 Thermische koeling van begroeide daken in Nederland tegen opwarming

Er is aangetoond hoe begroeide daken bijdragen aan een verkoelend effect in het gematigde Nederlandse zomerklimaat. Het effect van een natte deken als gevolg van vochtig substraat geeft verkoeling. De verdampingswarmte wordt aan het substraat onttrokken. De beplanting vormt kleine parasols die de opwarming van het substraat voorkomen, dit geeft een verkoelend effect. Door het reflecterend vermogen van het substraat zal dit minder snel opwarmen bij zoninstraling en bij hogere luchttemperaturen boven de vegetatie. Deze drie effecten zijn echter moeilijk te verdisconteren binnen huidige methoden voor het berekenen van koellast en koellastcapaciteit. Het gecombineerde resultaat van de verkoelende effecten is een sterk verminderd temperatuurverschil (ΔT) tussen binnen- en buitentemperatuur boven dakbegroeiing.

Door de berekening in de gevoeligheidsanalyse van thermische eigenschappen voor begroeide daken, blijkt logisch dat er van de constructie van de substraat- en vegetatielaag verkoelende werking te verwachten is. Uit diverse experimenten op veldlocaties, in met name subtropische en tropische landen, blijkt inderdaad dat er een verkoelend effect optreedt. De vraag is of dat ook voor de Nederlandse zomersituatie geldt?

Drie bepalende factoren hebben een rechtstreeks verband met koeling. Het gaat om:

- natheid van het substraat (natte deken-effect)
- LAI-index (Leaf Area Index, parasol-effect)
- Albedo-effect (terugkaatsing van zoninstraling)

Dat een natte deken koelt door verdamping van het water, is bekend. Dat een parasol instraling van warmte tegengaat is ook logisch. Dat substraat niet opwarmt, omdat opvallende straling teruggekaatsd wordt, is minder voor de hand liggend. Toch is deze eigenschap als derde verantwoordelijk voor een klein deel van de verkoelende werking van een begroeid dak.

De energie die nodig is voor het verdampen van het water, bij hogere temperaturen boven het dak, wordt aan substraat en dakconstructie onttrokken. Dit leidt tot minder snelle warmtedoorstroom naar de ruimtes onder het dak. Het leidt tot minder hogere temperaturen boven de vegetatie. Dit is te zien in een minder groot temperatuurverschil ΔT tussen daktemperatuur en temperatuur van de buitenlucht boven het substraat.

Als gevolg van de ΔT over de totale dakconstructie zal de warmtedoorstroom ook nog kleiner zijn dan bij traditionele daken, die niet door begroeiing worden gekoeld.

ΔT als gevolg van lagere warmtedoorstroom van buiten naar binnen, waardoor minder warmte naar binnen komt (parasol-effect).

ΔT als gevolg van vertraagde warmtedoorstroom, omdat de warmte die doorstroomt eerst gebruikt wordt om water uit het substraat te verdampen. Het natte deken-effect.

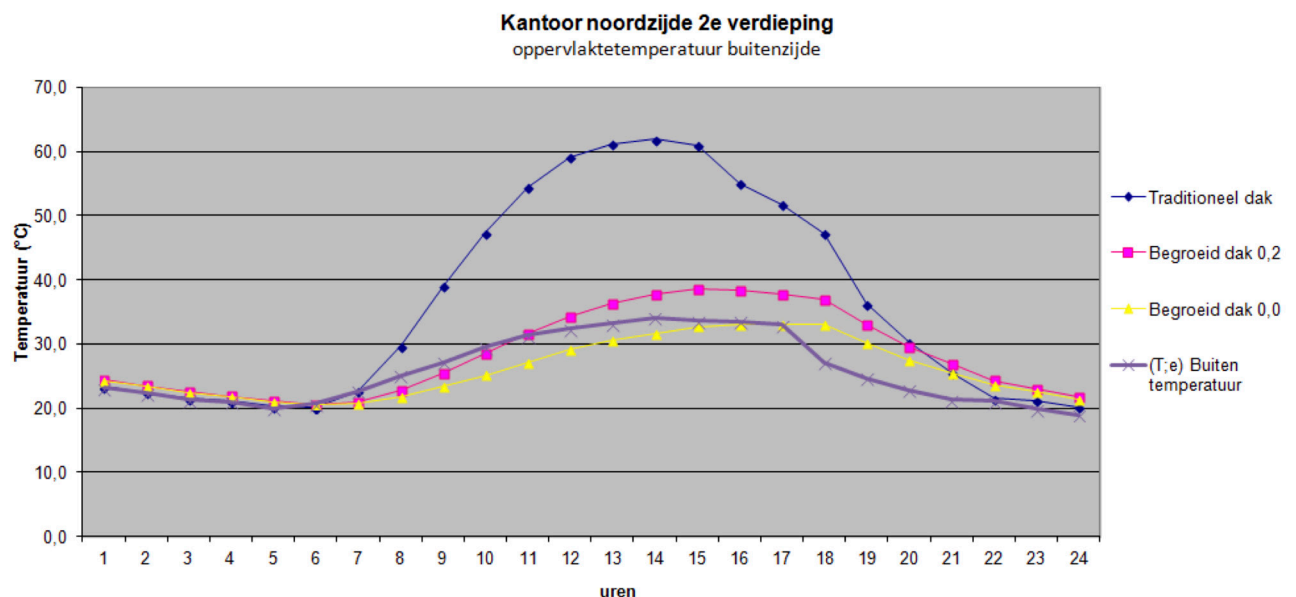
Boven een zwart bitumineus dak kan de luchttemperatuur tot boven 70°C stijgen. De luchttemperatuur boven een begroeid dak zal gelijk zijn aan de luchttemperatuur in de omgeving, door verdamping van water uit het substraat, door schaduwwerking van de vegetatie en door het Albedo-effect, verminderde instraling overdag en vergrote uitstraling 's nachts. Begroeide daken zullen daarom een verkoelend effect hebben op de constructie en ruimten onder het dak, als er sprake is van een grote LAI en een grote massa voor warmteopslag door een nat substraat en bijbehorend verdampingseffect. Het Albedo-effect is minder van invloed en is ongeveer evenredig met de beplantingsdichtheid (LAI). Deze twee eigenschappen LAI en verdamping zijn echter geen onderdeel van bestaande berekeningsmethoden voor koellast berekeningen voor gebouwen en geen onderdeel van energiegebruik berekeningen voor energieverbruik door koeling in gebouwen.

In een dynamische gebouwsimulatie met BINK software is onderzocht in hoeverre LAI, verdamping en Albedo-effect kunnen worden meegenomen in de berekening van energie voor koeling. Het gaat om een casestudie van een kantoor met drie lagen en een plat dak. Geprobeerd is om het effect van LAI en verdamping in de berekening mee te simuleren.

In de praktijk is gemeten dat een verhoging van LAI een verlaging van energiegebruik voor koeling tot gevolg zal hebben. Hetzelfde geldt voor de hoeveelheid water in het substraat. Hoe meer water, hoe meer koelend effect. Beide effecten nemen echter relatief af, naarmate de bouwkundige isolatie in de dakconstructie toeneemt. Het effect lijkt gedempt te worden door de isolatie. Het blijkt niet mogelijk om in de dynamische berekening direct een invloed van LAI of natheid van het substraat in te voeren. De software kent wel een zonabsorptiecoëfficiënt. Daarmee zou een koelend effect van een begroeid dak kunnen worden gesimuleerd. Door deze coëfficiënt te variëren, kan de luchttemperatuur boven het begroeide dak gelijk worden gebracht met de buitenluchttemperatuur. Dit zou in omstandigheden dan in ieder geval overeenkomen met de werkelijkheid. Het berekeningsmechanisme in de dynamische berekening past dan waarschijnlijk niet bij het werkelijke thermische proces als gevolg van LAI en natheid van het substraat.

Uit de simulatie volgt dat de software zou moeten worden aangevuld met coëfficiënten die wel LAI en natheidsfactor kunnen calculeren. Ervan uitgaande dat de berekening wel ongeveer klopt zolang de luchttemperatuur boven het dak klopt met de luchttemperatuur in

Figuur 5 Simulatie met temperaturen op begroeid dak van kantoorgebouw.



de omgeving, worden voorzichtig conclusies verbonden aan de uitkomst van de simulatie.

Figuur 5 toont de uitkomsten van de dynamische kantoor simulatie met een begroeid dak met coëfficiënt 0,2 en 0,0. Dit is vergeleken met een traditioneel plat zwart dak. De temperatuurverschillen ten opzichte van de omgeving buitentemperatuur zijn klein.

Bij een voorzichtige inschatting van de zonabsorptiecoëfficiënt en een vrij hoge inschatting van de bouwkundige isolatiewaarde van $R = 4,5 \text{ m}^2\text{k/W}$ is op de derde bouwlaag toch nog een reductie op koellastverbruik van ruim 3% te verwachten. Dat percentage is uiteraard sterk afhankelijk van bouwkundige maatregelen om directe zontoetreding door de ramen te voorkomen. Op de eerste verdieping is de reductie minder groot en kleiner dan de fouttolerantie in de berekening.

De aanname dat koellastreductie als gevolg van het aanbrengen van een begroeid dak te verwachten is, kan, ondanks onvolledige berekening met bestaande software, positief worden bevestigd. Als de berekeningsmethodiek eenmaal aangepast is en de LAI en natheid volgens de werkelijke thermische processen in kaart kan worden gebracht, dan zal mogelijk een toename in effect zichtbaar worden in de simulaties.

Op basis van proefopstellingen is aangetoond dat zonnepanelen (PV-panelen), als gevolg van lagere luchttemperaturen boven begroeide daken ten opzichte van zwarte daken, meer opbrengst kunnen hebben. Zonnepanelen hebben namelijk een hoger rendement bij lagere temperaturen. De hogere opbrengst is een bijkomend positief effect van dakbegroeiing. Het verkoelend effect levert daar dus meer opbrengst in kWh op. Echter, ook is met praktijkmetingen in Nederland aangetoond dat de invloed van wind over het dak ongeveer even groot zal zijn als de invloed van begroeiing op het dak.

Het onderzoek naar de thermische eigenschappen van dakbegroeiing is uitgevoerd door afstudeerders van het Instituut voor Gebouwde Omgeving IGO van de Hogeschool Rotterdam. Erik Huang, Marc Delemarre, Peppijn Somers, Mitchel Klaasman, Diyako Shadmanfar en Stephen Abraham-Reynolds onderzochten de thermische eigenschappen van begroeide daken in Nederland vanuit verschillende perspectieven. Delemarre M., Somers P. (2012) De isolerende werking van begroeide daken in de zomer, Isolerend vermogen

begroeide daken, fictie of feit?, Bachelor eindrapportage IGO Hogeschool Rotterdam;
Huang E.C. X. (2013), De thermische werking van begroeide daken in de winter, Bachelor eindrapportage IGO Hogeschool Rotterdam;
Klaasman M. (2013) De meerwaarde van koeling door een grotere ΔT bij begroeide daken, Bachelor eindrapportage IGO Hogeschool Rotterdam;
Shadmanfar D., Abraham-Reynolds S. (2014), Green Roof Integrated Photovoltaics versus Conventional Photovoltaics, a theoretical and practical approach, Bachelor eindrapportage IGO Hogeschool Rotterdam.



Het Rotterdamse Dakpark. Aangelegd door: Mostert de Winter Foto: Gemeente Rotterdam.

2.3 Weerstand van begroeide daken in Nederland tegen windinvloeden

Er is aangetoond welk mechanisme ten grondslag ligt aan het ballasten van losliggende dakbedekkingsmembranen door middel van substraat en vegetatie van begroeide daken. Maatgevend is de weerstand tegen erosie, waardoor ook op lange termijn de hoeveelheid substraat groot genoeg om voldoende gewicht te hebben tegen opwaaien. Daarnaast is van belang dat de zuigende werking van hoge windsnelheden over het substraat niet leidt tot grotere opbolling van de dakhuid dan door de dakbegroeiing kan worden tegengehouden. Dit wordt uitgedrukt in een drukvereffeningscoëfficiënt. Met windtunnelproeven zijn deze twee wetmatigheden aangetoond. Per type dakbegroeiing en onderliggende dakhuid zal echter in de windtunnel getest moeten worden met welke erosie en met welke drukvereffeningscoëfficiënt gerekend kan worden.

De berekeningsformule bij bescherming tegen opwaaien voor ballastlagen van grind en tegels is bekend. Maar voor begroeide daken is geen berekeningsformule of test bekend. Voor tegels en grind wordt uitgegaan van een drukvereffeningscoëfficiënt. Deze is in het verleden vastgesteld op grond van statistische analyse van schadegevallen.

Na een inventarisatie bij eigenaren en producenten van dakbegroeiing is in 2013 vastgesteld dat geen schadegevallen van begroeide daken door windbelasting bekend zijn.

Voor begroeide daken zijn verkennende windtunnelmetingen verricht, om te kunnen vaststellen welk bezwijkmechanisme bepalend is bij de bescherming tegen opwaaien van losliggende dakbedekking onder een ballastlaag van een opbouw van dakbegroeiing. Het doel is om een methode te ontwikkelen voor het bepalen van windbelasting en –weerstand van extensief begroeide daken, die aansluit bij bestaande bepalingsmethoden voor andere systemen. Er zijn twee mogelijke oorzaken voor bezwijken van een dakconstructie met een losliggende dakbedekking onder een ballastlaag van substraat en vegetatie:

A Winderosie: de hoeveelheid daksubstraat vermindert door wegwaaien van deeltjes, waardoor uiteindelijk te weinig gewicht overblijft om de losliggende dakbedekking op zijn plek te houden. Uit onderzoek van de praktijk blijkt dat in slechts weinig gevallen sprake

is van bezwijken of schade aan de dakconstructie als gevolg van winderosie.

B Windzuiging: door hoge windsnelheden en laag gewicht van de ballast en dakbedekking, kan de dakbedekking los komen van de dakconstructie. Op dat moment is de zuiging van de lagere luchtdruk boven het dak groter dan de weerstand van de constructie tegen het opbollen naar boven. Uit onderzoek in de praktijk blijkt dat in nog minder gevallen dan bij winderosie, sprake is van bezwijken of schade als gevolg van windzuiging. Die gevallen die bekend zijn, werden beïnvloed door externe factoren zoals onvolledig bevestigde zonneboilers en dergelijke.

Het belang van een berekeningsformule of bepalingsmethode om de bescherming tegen winderosie en tegen windzuiging te bepalen, kent twee invalshoeken. Enerzijds is het belang groot, omdat vele losliggende dakbedekkingen op bestaande daken in Nederland op hun plek worden gehouden door grind of tegels. Het zou mogelijk moeten zijn om het grind en de tegels te vervangen door dakbegroeiing. Dat zou voor het klimaat in de stad en voor de levensduurverlenging van het dak een voordeel zijn.

Anderzijds is het belang klein, omdat begroeide daken over het algemeen worden aangelegd bij nieuwbouw of bij vervanging van dakmembranen. Onder die omstandigheden hoeft er nauwelijks extra inspanning geleverd te worden om het dakmembraan te bevestigen op de dakconstructie, waardoor windzuiging geen effect meer heeft. Weerstand tegen erosie van substraat en vegetatie heeft dan als doel om te zorgen dat het pakket boven het dakmembraan blijft liggen en blijft functioneren.

Daar zit vanuit de regelgeving in het Bouwbesluit nog wel een kleine complicatie. Als de dakbegroeiing, bestaande uit verschillende lagen waaronder substraat en vegetatie, nodig is om de losliggende dakbedekking op zijn plek te houden, dan moeten al deze materialen aan alle prestatie-eisen van het Bouwbesluit voldoen. Als de dakbedekking mechanisch bevestigd of chemisch gekleefd is, dan hoeft dat niet. Vervolgens blijkt het lastig om altijd voor alle lagen aan te tonen dat aan alle eisen van het Bouwbesluit is voldaan. Dat geldt dan bijvoorbeeld voor de brandveiligheid.

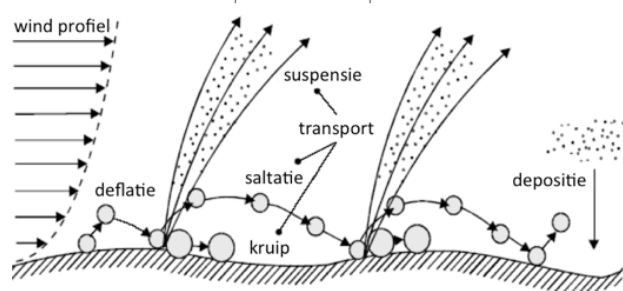
Winderosie zal de inleidende factor zijn voor bezwijken onder windzuiging. Bij winderosie zullen per deeltje krachten werken die het deeltje van zijn plek forceren. Op datzelfde deeltje werken ook krachten die het

deeltje op zijn plek houden. Als de inwerkende forceerende krachten, zoals de wind, en andere deeltjes die gaan rollen, groter zijn dan de vasthoudende krachten, zoals bodemstructuur, aanwezigheid van organische stoffen, oppervlakteruwheid en vegetatie, wordt de zogenoemde kritische sleepsnelheid bereikt. Dit past bij de drie fasen van erosie waarbij een deeltje wordt losgemaakt. De eerste fase, het loskomen, heet deflatie (zie fig. 6). Tijdens de tweede fase van transport worden drie deelfasen onderscheiden, saltatie, waarbij bodemdeeltjes met een diameter van 60 tot 1000 μm zich sprongsgewijs verplaatsen, kruip, waarbij rollend of schuiven verplaatsing ontstaat, en tenslotte suspensie, het transport door de lucht van de fijnste bodemdeeltjes met een diameter kleiner dan 70 μm .

Bepalend daarin is de drukvereffeningscoëfficiënt. Deze coëfficiënt komt uit bestaande normen voor tegels en grind als ballastlaag. Het lijkt op basis van de verkennende windtunneltesten mogelijk voor ieder begroeid daksysteem de drukvereffeningscoëfficiënt proefondervindelijk vast te stellen. Daarmee zou aangegevoerd worden onder welke extreme omstandigheden begroeide daken hun werking als ballast op losliggende dakbedekkingen verliezen.

In de derde fase slaan de deeltjes tenslotte neer. Dat hoeft dus niet op het zelfde dak te zijn.

Figuur 6 Weerstand van een begroeid dak tegen erosie die door de kritische sleepsnelheid bepaald wordt.



De kritische sleepsnelheid kon in een wiskundige formule worden samengevat. In die formule spelen een aantal parameters een rol, die in een windtunnel kunnen worden gesimuleerd en redelijk constant gehouden kunnen worden. De parameters zijn onder andere:

- drempel parameter [-]
- de deeltjesdichtheid [kg/m^3]
- de luchtdichtheid [kg/m^3]
- de deeltjesdiameter [m]
- de windsnelheid [m/s]

De vochtigheid van het substraat dient zo veel mogelijk constant gehouden te worden, zodat tijdens de windtunneltest geen verandering in de kritische sleepsnelheid als gevolg van verandering in de vochtigheid te verwachten is. In de praktijk zal vochtigheid wel een grote rol spelen. Bij natte storm is er minder kans op schade te verwachten dan bij een droge storm. Uit de tests in de windtunnel bij verschillende soorten substraat met verschillend ingestelde parameters, werd de wiskundige relatie tussen de parameters in alle gevallen aangetoond.

Voor windzuiging is een andere formule nodig. De in de Eurocode 1 vermelde drukvereffeningscoëfficiënt kan voor begroeide daken worden vastgesteld. Dan kan op basis van een ontwerp voor een dakopbouw voor begroeiing vooraf worden vastgesteld of de constructie voldoende weerstand zal opwerpen om een losliggende dakbedekking te behoeden tegen wegwaaien.

Het opwaaien wordt volgens de Eurocode 1 bepaald door de luchtdrukverschillen van de lucht boven het dakmembraan ten opzichte van de luchtdruk eronder in relatie tot de luchtdoorlatendheid van de onderconstructie. Echter, de waarden voor dakbegroeiingsystemen zijn onbekend. Voor elk systeem zou ook een andere waarde kunnen gelden. Dit zou proefondervindelijk in een windtunneltest, met een groot aantal metingen, moeten worden bepaald.

In de praktijk wordt voor begroeide daken gebruik gemaakt van een drukvereffeningscoëfficiënt van 0,1 en wordt voor de berekening uitgegaan van een volledig droog pakket daksubstraat. Tot nu toe blijkt dit in de praktijk niet tot schadegevallen te leiden. Maar, het is dus niet bekend waarom 0,1 zou voldoen, het is niet meer dan een ingeschat 'worst-case' scenario, dat tot nu toe lijkt te voldoen.



Biesbosch museum. Eiland met steun van o.a. 'Mijn Mooi Brabant'-programma (provincie Noord Brabant).

2.4 Constructieve capaciteit van stalen daken in Nederland om dakbegroeiing te dragen

Er is aangetoond dat grote staalconstructies geen restcapaciteit hebben voor belasting van extra dakbegroeiing. Tevens lijkt het erop dat met aanleg van begroeiing extra versterking van de constructie renderend kan zijn. Zowel voor staaldaken als voor betondaken geldt dat er op basis van berekeningen geen restcapaciteit aanwezig zal zijn. Voor betonconstructies zal in de praktijk wel restcapaciteit aanwezig kunnen zijn, omdat betondaken in de praktijk vaak een grotere sterkte hebben dan noodzakelijk.

Het rendement voor aanleg van dakbegroeiing op stalen daken zit in het combineren van de voordelen van begroeide daken, die terugverdiend kunnen worden op de levensduur van het dak en de gehele constructie, op verminderde koellasten en eventueel op montage van PV panelen op de verzwaarde constructie. Mogelijk kan ook een gebruiksfunctie als een dakpark of dakakker er toe leiden dat verzwaring van de constructie terugverdiend kan worden.

Op dezelfde wijze is aangetoond dat betonnen daken volgens de theoretische berekeningen nauwelijks extra capaciteit hebben om het gewicht van een begroeid dak af te voeren. In de praktijk zou het meevallen, als de restwaarde gezocht kan en mag worden in variabele belasting zoals sneeuw en in het gewicht van weggehaalde ballast van grind of tegels.

Casestudie

Op vele plaatsen in Nederland staan duizenden vierkante meters daken op hallen met stalen constructies. Als deze daken zouden worden voorzien van begroeiing, dan zou dat een positief effect hebben op het klimaat in en rond de hal. De vraag is echter of op een bestaande stalen dakconstructie nog restcapaciteit aanwezig is voor extra gewicht. Daarvoor moet het dak opnieuw worden doorgerekend volgens de aanwijzingen van de Eurocode. In een verkennende casestudie voor het Sligro bedrijfsgebouw in de Rotterdamse Spaanse Polder is met de Eurocode gerekend aan extra belastingen van het eigengewicht van het begroeide dak, aan het gewicht van het gebufferde water en de aan de veranderlijke belasting. Om gedekt te zijn voor de zwaarste belastingvariant is aangenomen is dat de sneeuwbelasting tegelijk aanwezig is met volledig verzadigd water in het substraat. De constructie is eerst berekend met de oude NEN-normen (TGB) en daarna

met de Eurocode. Er zitten al verschillen in de belastingfactoren en in de windbelasting. Hoewel de rekenwaarde van deze belasting volgens de Eurocode lager is, valt de unity check hoger uit. Juist de dakbalken en de gevelkolommen voldoen volgens de Eurocode niet aan de eisen voor het extra gewicht van een begroeid dak. Eigenlijk voldoet de constructie zonder dakbegroeiing ook niet aan de Eurocode, terwijl de constructie in het verleden wel aan de eisen uit de TGB NEN-normen voldeed.

Om toch aan de eisen van constructieve veiligheid in de Eurocode te voldoen, zijn de liggers onder het stalen dak onderspannen met trekverbanden. De kolommen zijn bovendien versterkt om aan de eisen te kunnen voldoen. Daarvoor worden de open ruimten in het stalen profiel van de kolommen met beton volgestort. Dit lijkt een minder drastische maatregel dan het vervangen van de kolommen. Omdat ook de dakplaten over de stalen dakbalken niet voldoen aan de eisen, is vervanging hier ook een optie. Dat is alleen zinvol als de dakhuid aan vervanging toe is. Als de kolommen en onderspan constructie ruim gedimensioneerd zijn, kan boven op het dak ook een extra overspanning in de vorm van een ruimtevakwerk worden gemaakt, van hoofddrager naar hoofddrager, waar dan eventueel extra gewicht van dakbegroeiing en extra zonnepanelen aan opgehangen kan worden.

De kosten van versterking van een staalconstructie om een hogere belasting toe te laten voor dakbegroeiing, zijn te berekenen op basis van bouwkosten en eventueel verlies van productie in de hal tijdens de bouw en mogelijk zelfs na de bouw. Bij het toepassen van een onderspan constructie, kan door verlies aan hoogte ook functionaliteit verloren gaan. Bijvoorbeeld kan de vrije doorgang voor geladen vorkheftrucks verminderen of de hoogte van stapelbare pallets en stellingen kan verlaagd zijn. De opbrengsten bij een versterking van de staalconstructie lijken de investeringen te dekken als deze ook bestaan uit bijvoorbeeld energiebesparing voor koeling, energiebesparing doordat extra isolatiemateriaal kan worden aangebracht in wanden en daken en als deze bestaat uit stroomopbrengst van aangebrachte PV panelen. Het sluitstuk van een dergelijke kosten- en batenanalyse is een eventuele korting op de waterschapsbelasting. Als het begroeide dak goed aangebracht wordt, kan een significante bijdrage geleverd worden aan vermindering van afvloeien van hemelwater naar het riool en het oppervlaktewater bij hevige piek regenbuien. Deze regenbuien zullen vaker voorkomen als gevolg van de klimaatverandering in Nederland. Bij sommige produc-

tiehallen zal het effect van de dakbegroeiing op de verminderde koellast in de hal maatgevend zijn voor de baten.

Gezien de grote verschillen in afwerking van grote overspanningen in staal, zijn geen algemene technische oplossingen en algemene kosten- en batenanalyses te formuleren. Altijd zal per gevalstudie een analyse gemaakt moeten worden met een specifieke technische oplossing.

Eén algemene wetmatigheid lijkt op basis van de één-gevalstudie wel zichtbaar. De kosten- en batenverhouding sluit eerder in balans als gericht geïnvesteerd wordt in batenbrengende maatregelen. Meer draagvermogen levert een hogere toelaatbare belasting op waardoor meer water gebufferd kan worden, waardoor PV systemen gemonteerd kunnen worden. Dit levert meer opbrengsten op in beheer. Naarmate de terugverdientijd langer mag worden, komen meer opties naar voren om de kosten en baten rond te rekenen tot een gezonde businesscase.

Het onderzoek naar de constructieve eigenschappen van dakbegroeiing is uitgevoerd door afstudeerders van het Instituut voor Gebouwde Omgeving IGO. Jason Kopelle onderzocht de windweerstand eigenschappen van begroeide daken in Nederland vanuit het perspectief van winderosie en opwaaien van substraat en dakmembraan.

Madina Karim onderzocht de restcapaciteit van betonnen daken voor dakbegroeiing.

Geoffrey Quak en Raimon de Jong onderzochten de restcapaciteit van stalen constructies voor dakbegroeiing (Bosch 2013).

Kapelle J.T. (2014), Kenmerken Windvastheid Extensief Begroeide Daken, Bachelor eindrapportage IGO Hogeschool Rotterdam;

Karim M. (2014), Herbestemming van bestaande betonnen daken voor dakbegroeiing, Bachelor eindrapportage IGO Hogeschool Rotterdam;

Quak G., Jong de R. (2013), Begroeide daken op bestaande staalconstructies, Bachelor eindrapportage IGO Hogeschool Rotterdam;

Literatuur

- Borch C.J. ter (2013), Studentenstaalprijs 2013, Geen kwantiteit, wel kwaliteit, Bouwen met Staal 235, oktober.
- Broks K., Luijtelaar H. van (2015), Groene daken nader beschouwd, Over de effecten van begroeide daken in breed perspectief met de nadruk op de stedelijke waterhuishouding, Rapport 2015-12 Stowa - Rioned Amersfoort.
- Djedjig R., Ouldboukhidine S.-E., Belarbi R., Bozonnet E. (2012), Development and validation of a coupled heat and mass transfer model for green roofs, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol 39 (6) pages 752–761; DOI PDF.
- Feng C., Meng Q., Zhang Y. (2010), Theoretical and experimental analysis of the energy balance of extensive green roofs, *Energy Build*, Vol 42 (6) pages 959–965; DOI PDF.
- Jaffa I., Ouldboukhidine S.E., Belarbi R. (2012), Renewable Energy, A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance, LEPTIAB, University of La Rochelle, December.
- Hendriks N. et al. (2006) Dakbegroeiingsrichtlijn, SBR-publicatie nr. 547 Rotterdam.
- Hendriks N. et al. (2010) Richtlijn vegetatiedaken bestaande bouw - Aanwijzingen voor het ontwerpen, uitvoeren en beheren van vegetatiedaken op bestaande dakconstructies, SBR-publicatie nr. 621, Rotterdam.
- Min2 bouw-kunst, 1992, www.min2.nl
- Ouldboukhidine S.E., Belarbi R., Jaffal I., Trabelsi A. (2011), Assessment of green roof thermal behavior: A coupled heat and mass transfer model, *Building and Environment*, Vol 46 (12) pages 2624–2631; DOI PDF.
- Passtoors J. (2015), Kennisrapport: Waar koop ik een duurzaam multifunctioneel dak? Handreiking voor dakeigenaren. SBRCURnet 2015, Delft.
- Ravesloot C.M. (2013), .Koppelle J.C., Kerksen A.J., Weerstand tegen wind van begroeide daken, *Dak- en Gevelgroen* 7, 4, Uitgever NWST Nijmegen; coming soon
- Ravesloot C.M. (2013), Groendaken, Dakbegroeiing als parasol, *Roofs 02-2013*, Lindeman Uitgeverij Alkmaar.
- Ravesloot C.M. (2013), Begroeide Daken houden hemelwater vast, *Vakblad Riolerings 19 / 3* HolaPress Valkenswaard.
- Ravesloot C.M. (2012), Richtlijn watermanagement 24/50, Krijgen begroeide daken een gouden randje?, *Dak- en Gevelgroen* 6, 3, Uitgever NWST Nijmegen.
- Ravesloot C.M. (2012), Waterterughouding begroeide daken, Modellen van overheid moeten worden aangepast en heffing moet worden gesplitst, *Bouw- en Uitvoering*, APR groep Amersfoort.
- Ravesloot C.M. (2012), Thermische eigenschappen extensief begroeide daken, zijn de claims van isolerende werking houdbaar? *Dak & Gevel Groen* 3, 3, Uitgever NWST Nijmegen 3.
- Ravesloot C.M. (2012), van Langelaar C.M., Wagemaker S., Waterterughouding Groen versus verhard, Nergens ter wereld zijn metingen gedaan aan het watersysteem op wijkniveau, *Leven op Daken* 16 De Meern.
- Ravesloot C.M. (2012), Akkeren op Rotterdams kantoordak, Dakboerin Annelies Kuiper boert op Dak Akker op het Schieblock, *Dak & Gevel Groen* 2, Uitgever NWST Nijmegen.
- Ravesloot C.M. (2012), Groendaken in Cijfers, Classificatie van Specificaties Begroeide Daken, uniforme reken en meetmethoden voor technische eigenschappen, *Dak & Gevel Groen* 1, Uitgever NWST Nijmegen.
- Ravesloot C.M. (2015), Determining Thermal Specifications for Vegetated GREEN Roofs in Moderate Winter Climates, *Journal Modern Applied Science*, Canadian Center of Science and Education Vol. 9, No. 13.; <http://dx.doi.org/10.5539/mas.v9n13p208>
- Tabares-Velasco et al. (2012), A heat transfer model for assessment of plant based roofing systems in summer conditions, *Building and Environment* 49 pages 310–323; DOI PDF.
- Teeuw P. G. Ravesloot C. M. (2011), Begroeide daken na 2010, afstemmen van techniek, organisatie & maatschappelijk belang, 'Green Roofs, tuning of technology, organization and policy priority', Delft University of Technology Techné Press Amsterdam.
- Verburg W. (ed) et al. (2009), Beoordelingsrichtlijn 'dak- en gevelbegroening', Stichting Groenkeur, Houten, 2009.

Internetsites

- www.sbrcurnet.nl
- www.klimaatindestad.nl
- www.groenendestad.nl
- www.kennisvoorklimaat.nl
- www.ipcc.ch
- www.knmi.nl/klimaatverandering_en_broeikaseffect

» Video multifunctionele daken: het Andaz dak en het Orlyplein:

www.sbrcurnet.nl/projecten/kennispartnerproject-andaz-hotel-amsterdam

» Download gratis als paper: De handreiking voor het inkopen van multifunctionele daken:

www.sbrcurnet.nl/multifunctioneledaken

Aanvullende producten

Daken in het groen

<http://www.sbrcurnet.nl/producten/publicaties/daken-in-t-groen>

Richtlijn Dakbegroeiing

<http://www.sbrcurnet.nl/producten/publicaties/dakbegroeiingsrichtlijn>

Richtlijn Vegetatiedaken bestaande bouw

<http://www.sbrcurnet.nl/producten/publicaties/richtlijn-vegetatiedaken-bestaande-bouw>

Richtlijn dakbestrating

<http://www.sbrcurnet.nl/producten/publicaties/dakbestratingsrichtlijn>

SBRCURnet

SBRCURnet is een onafhankelijk kennisnetwerk voor de gehele bouwsector. Wij zorgen er voor dat professionals in de Burgerlijke en Utiliteitsbouw en in de Grond-, Weg- en Waterbouw hun werk beter kunnen doen.

Wij brengen partijen uit de bouwsector met elkaar in contact voor het ontwikkelen van nieuwe vakkennis over actuele vraagstukken. Wij voorzien de sector van betrouwbare, bruikbare vakkennis. Dat doen we door kennis uit te geven in een breed scala aan producten en diensten. Bovendien helpen we bij het implementeren van kennis.

Kijk voor meer interessante gratis kennispapers en andere publicaties op www.sbrcurnet.nl.

ARTIKELNUMMER K705.16