

Energiebesparing in musea door setpointstrategieën

Veel musea hanteren strenge klimaateisen, resulterend in een hoog energiegebruik, complexe installaties en een fysieke belasting op monumentale gebouwen. Dit artikel beschrijft een simulatiestudie naar het energiebesparingspotentieel van verschillende setpointstrategieën in een museum in Nederland. Schadefuncties zijn gebruikt voor het bepalen van de risico's voor de collectie en de Adaptieve Temperatuur Grenswaarden-methode is gebruikt om het thermisch comfort te beoordelen. De studie laat zien dat het mogelijk is om in dit museum tegelijkertijd significant energie te besparen, het thermisch comfort te verbeteren en het risico op chemische veroudering te verminderen.

Ir. M.P.E. (Marco) Maas^{*,**}, ir. R.P. (Rick) Kramer^{**}, dr.ir. M.H.J. (Marco) Martens^{**,**}, dr.ir. A.W.M. (Jos) van Schijndel^{**}, dr.ir. H.L. (Henk) Schellen^{**}

*Kuijpers Installaties B.V., **Faculteit Bouwkunde, unit Building Physics and Services, Technische Universiteit Eindhoven, ***Helicon Conservation Support B.V.

Musea in Nederland besteedden tot in de late jaren tachtig van de vorige eeuw weinig aandacht aan preventief collectiebehoud. Het toenmalige ministerie van Gezondheid en Cultuur lanceerde in 1990 het Deltaplan om een verbeterslag te maken. Er werden belangrijke aspecten gedefinieerd, waaronder de binnenklimaatcondities. Vele musea installeerden complexe installaties om het binnenklimaat beter te conditioneren en zo een veiligere omgeving te scheppen voor de collectie. In het Deltaplan waren geen klimaatrichtlijnen opgenomen. Daarom werden op nationaal niveau nieuwe richtlijnen [1] ontwikkeld en verschillende klimaatklassen omvattende internationale richtlijnen [2] overgenomen. De daarop volgende jaren evolueerde het besef van wat een adequaat binnenklimaat voor een museum zou moeten zijn; als fluctuaties van $\pm 5\%$ RV goed zijn, dan moeten fluctuaties van

$\pm 3\%$ RV nog beter zijn, dacht men. Dus, musea kozen voor de meest strikte klimaatklasse om de collectie zo goed mogelijk te beschermen. De keuze voor een strak binnenklimaat, gedicteerd door de eisen voor de collectie, heeft enkele negatieve consequenties:

- musea zijn vaak gehuisvest in monumentale gebouwen met een zeer hoog energiegebruik door de hoge warmteverliezen [3];
- er treden bouwfysische problemen op, bijvoorbeeld houtrot bij balkopleggingen door condensatie van warme bevochtigde lucht tegen buitenwanden [4];
- een onomkeerbaar effect op het gebouw van grote installaties (bijvoorbeeld kanaaldoorvoering).

Martens (2012) ontwikkelde een methode om het risico voor de collectie te beoordelen gebaseerd op temperatuur- en relatieve

vochtigheidsmetingen door middel van schadefuncties. De methode beoordeelt hoe de objecten het klimaat ervaren in plaats van direct het binnenklimaat te beoordelen. De risico's voor de collectie in een monumentaal gebouw met een simpele installatie blijken vaak niet groter te zijn dan de risico's in een vergelijkbaar gebouw uitgerust met een complexe installatie. Dit artikel presenteert een integrale onderzoeksmethode om het energiebesparingspotentieel van verschillende setpointstrategieën voor temperatuur (T) en relatieve vochtigheid (RV) te onderzoeken, waarbij gekeken is naar zowel collectiebehoud, behoud van gebouw als thermisch comfort. Er is een simulatiestudie uitgevoerd, waarbij het museum de Hermitage Amsterdam gemodelleerd is. Schadefuncties zijn gebruikt om collectierisico's te toetsen en de Adaptieve Temperatuur

Grenswaarden-methode [6] is gebruikt om het thermisch comfort te beoordelen. De installaties zijn meegenomen voor de validatie van het model, maar bewust buiten beschouwing gelaten in de simulaties om het effect van de setpointstrategieën op de gebouwvraag inzichtelijk te maken.

METHODE

Het museum

De gevalstudie omvat de Hermitage gelegen in Amsterdam. Het museum is gehuisvest in een gebouw aan de Amstel uit de laat zeventiende eeuw. Het gebouw is in 1970 aanzienlijk gerenoveerd, waarna het dienst deed als verpleegtehuis. Van 2007 tot 2009 is het gebouw getransformeerd tot een modern museum. Figuur 1 laat de plattegrond zien inclusief de twee bijna identieke vleugels met de tentoonstellingsruimten en kabinetten. De hoofd tentoonstellingsruimte bevat een groot glazen dak, voorzien van zonwering die bijna altijd gesloten is. De ruimten worden geconditioneerd door een all-air systeem. De gehanteerde instellingen voor T zijn: setpoint 21°C, toegestane uurlijkse fluctuatie 2°C en dagelijkse fluctuatie 3°C. Voor RV geldt: schilderijen en meubilair setpoint 55%, gemengde collectie 45-50% en metalen collectie 40-50%, allemaal met een tolerantie van $\pm 5\%$. De tentoonstellingsruimte wordt geconditioneerd door één luchtbehandelingskast die de lucht verwarmt, koelt, bevochtigt, ontvochtigt en die bacteriën, schimmel, en deeltjes filtert. Het aandeel verse buitenlucht is CO₂-gestuurd.

Modelvorming

Met behulp van Habase is een multi-zone-model ontwikkeld [7]. Dit is een simulatiemodel voor warmte- en vochttransport geschreven in Matlab en ontwikkeld aan de TU Eindhoven. Het model is gebruikt om de binnentemperatuur, binnenluchtvochtigheid en energievraag te simuleren. Het model bestaat uit negen zones: één hoofd tentoonstellingsruimte en alle aangrenzende ruimten. De installaties zijn gemodelleerd om het model te kalibreren, maar zijn voor de simulaties buiten beschouwing gelaten zodat de energievraag alleen de gebouwvraag representeert. Het model is gekalibreerd door de gesimuleerde energievraag te vergelijken met de berekende energievraag (berekend uit metingen). Luchtinfiltratie, interne warmtebronnen en interne vochtbronnen zijn gebruikt voor het fine tunen van het model. De afwijkingen van de gesimuleerde energievraag ten opzichte van de werkelijke energievraag zijn: +2% voor verwarming, 0% voor koeling, -9% voor



-Figuur 1- De plattegrond van de eerste verdieping omvat twee bijna identieke tentoonstellingsruimten (tussen de rode stippen), boven enrechts, en de doorsnede hiervan, onder

bevochtiging en -8% voor ontvochtiging.

Data-acquisitie

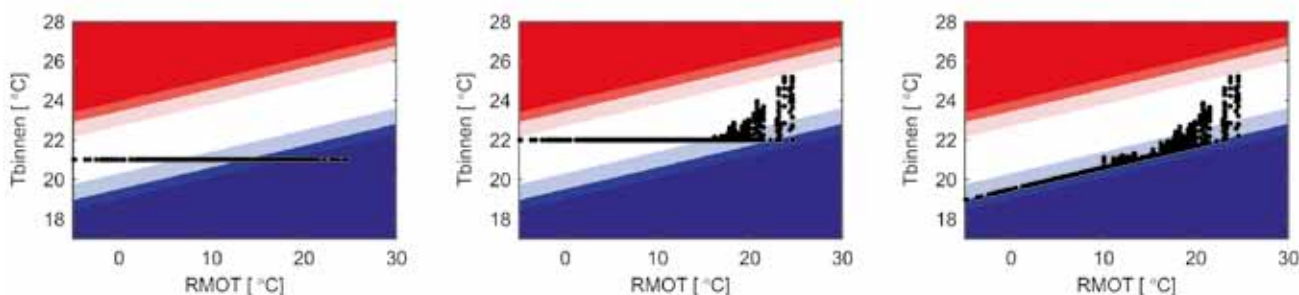
Voor de validatie van het gebouwmodel zijn klimaatdata van het jaar 2011 gebruikt. T- en RV-gegevens komen van het eigen weerstation van de Hermitage. Gegevens over zonnestraaling is verkregen uit de database van het KNMI (station Schiphol). Het klimaatjaar 2003 is gebruikt voor de simulatie van de setpointstrategieën: Dit jaar had een warme zomer en een koude winter en is daarom geschikt om te discrimineren tussen de strategieën. De tentoonstellingsruimten zijn uitgerust met vier gecombineerde T- en RV-sensoren die verbonden zijn met het gebouwbeheersysteem.

Schadefuncties en thermisch comfort

De specifieke klimaatrisicomethode [5] richt zich op de invloed van het binnenklimaat (T en RV) op het klimaat nabij vier objecten: papier, een paneelschilderij, een houten meubelstuk

en een houten beeld. Hiervoor wordt de respons berekend met een eerste orde filter, met inachtneming van de responstijd van de objecten (variërend van enkele minuten voor papier tot 40 dagen voor volledige respons van het meubelstuk). Vervolgens worden voor drie degradatiefenomenen de risico's (toelichting tussen haakjes) bepaald:

- biologische degradatie (veilig want geen ontkieming van schimmels, ontkieming van schimmels mogelijk, of aantal millimeters te verwachten groei van schimmels);
- chemische degradatie (de Lifetime Multiplier: een maat voor de reactiesnelheid van degradatieprocessen zoals vergeling van papier, hoe hoger hoe trager de degradatie en hoe langer de objecten bruikbaar zullen zijn);
- mechanische degradatie van het paneel, meubel en beeldje (veilig want alleen elastische vervorming, schade mogelijk door permanente vervorming, of acute schade



-Figuur 2- Comfortbeoordeling. Links: referentie situatie, T is 21°C. Midden: Strategie 4, het verwarmingssetpoint is 22°C en er is geen koeling. Rechts: Strategie 8, T-setpoints zijn gebaseerd op de RMOT.

- door scheurvorming);
- mechanische degradatie van de verflaag (veilig want alleen elastische vervorming, op de lange duur schade te verwachten door vermoeiing of acute schade mogelijk).

Thermisch comfort is beoordeeld met de Adaptieve Thermische Grenswaardenmethode (ATG) [6], waarbij de comfortgrenzen afhankelijk zijn van de Running Mean Outdoor Temperature (RMOT), een gewogen gemiddelde van de buitentemperatuur van de huidige en voorafgaande drie dagen. Het museum is geclassificeerd als een 'beta'-gebouw: de bezoekers hebben geen individuele controle over het binnenklimaat. Thermisch discomfort is gekwantificeerd door het aantal uren binnen de openingstijden (10-17 uur) te sommeren, dat het binnenklimaat buiten de grenzen van de 80% tevredenheidsklasse valt. De ATG is specifiek ontwikkeld voor kantoren, maar in dit onderzoek gebruikt bij gebrek aan specifieke comfortrichtlijnen voor musea.

RESULTATEN

Eén van de tentoonstellingsruimten is gesimuleerd met verschillende setpointstrategieën voor T en RV om het energiebesparingspotentieel inzichtelijk te maken met aandacht voor comfort en collectie. De energiebesparing is berekend t.o.v. de referentiesituatie en de energie omvat de gebouwvraag voor verwarming, koeling, be- en ontvochtiging. De strategieën zijn genummerd van 1 tot 14.

Referentie

De referentie omvat het simuleren van de tentoonstellingsruimte met constante setpoints: 21°C voor T en 48% voor RV. Tabel 1 (strategie 1) laat zien dat het handhaven van een zeer strikt klimaat (24/7), zoals doorgaans vaak gebeurt in musea, leidt tot een veilig klimaat voor de collectie, maar ook discomfort: het is te koud gedurende 812 uren tijdens de openingstijden (figuur 2, links).

Strategieën voor T

De eerste strategieën voor T omvatten constante setpoints: (2.) constant 22°C; (3.) alleen

	setpoint		energie		risico voor collectie				discomfort
	T [%]	RV [%]	totaal [MWh]	vs ref. [%]	schimmel	LM	paneel	verflaag	
1. ref.	21	48	146	-		0.92			812 h
2. const.	22	48	169	+16		0.80			63 h
3. zonder koeling	22 - ?	48	168	+15		0.80			7 h
4. sinus	20/22	48	142	-3		0.91			299 h
5. sinus	20.5/22.5	48	153	+5		0.85			0 h
6. RMOT	-	48	133	-9		0.96			0 h
7. recirculatie	RMOT	48	51	-65		0.96			0 h
8. nachtverlaging	RMOTFF	48	39	-74		1.10			0 h

-Tabel 1- Verschillende strategieën voor T zijn gesimuleerd. De energievraag omvat verwarming, koeling, ont- en bevochtiging. Collectiebehoud is gevisualiseerd met de kleuren groen (geen risico), oranje (mogelijk risico) en rood (groot risico), en bepaald voor de degradatiefenomenen biologisch (schimmel), chemisch (Lifetime Multiplier) en mechanisch. Thermisch comfort is gebaseerd op de ATG en uitgedrukt in uren discomfort.

een ondergrens van 22°C, dus geen koeling zie tabel 1 voor de resultaten). Strategie 2 laat zien dat het verhogen van T naar 22°C het comfort significant verbetert, maar ook leidt tot een flinke verhoging van de energievraag (+16%). Bovendien is de lagere LM een indicatie voor een snellere chemische degradatie. Strategie 3 laat zien dat koeling niet nodig is voor comfort (uiteraard wel voor ontvochtiging), zie figuur 2 (midden).

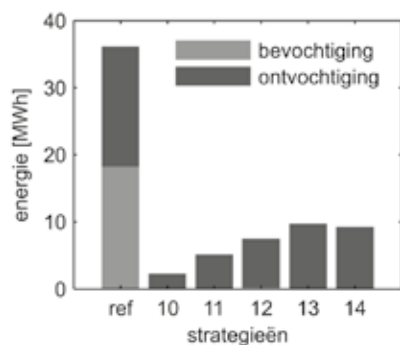
Vervolgens zijn vier strategieën gesimuleerd die de setpoints voor T baseren op de buitentemperatuur: (4.) T-setpoints volgen een sinus met gemiddelde 21°C en een amplitude van 1°C; (5.) een sinus met gemiddelde van 21.5°C en amplitude van 1°C; (6.) T-setpoints gebaseerd op de Running Mean Outdoor Temperature (RMOT) (zie tabel 1 voor de resultaten). Strategie 4 laat zien dat het mogelijk is om zowel energie te besparen als het comfort te verbeteren. De collectie is veilig. Echter, strategie 5 laat zien dat er veel energie nodig is om het comfort significant te verbeteren (0h discomfort). Strategie 6 presteert het beste: thermisch comfort is geoptimaliseerd, zie figuur 2 (rechts), met een minimum aan energievraag (-9%).

Thermisch comfort is echter alleen vereist tijdens de openingsuren. Daarom wordt strategie 6 gehanteerd tijdens de openingsuren (10-17h) en worden de volgende strategieën gehanteerd tijdens de sluitingsuren: (7.) toepassen van 100% recirculatie en T gebaseerd

op de RMOT; (8.) toepassen van 100% recirculatie en T niet conditioneren (EN: free floating (FF)). In de laatstgenoemde situatie zorgt de recirculatie in combinatie met de thermische massa van het gebouw voor vertraagd uitkoelelen en het dempen van de temperatuurschommelingen (zie tabel 1 voor de resultaten). De toepassing van 100% recirculatie tijdens de sluitingsuren bespaart veel energie. Strategie 8 combineert dit met het loslaten van de T tijdens de sluitingsuren: door de hoge thermische massa van het gebouw is het binnenklimaat gedurende het grootste deel van het jaar redelijk stabiel, wat resulteert in een positieve beoordeling; het resulterende binnenklimaat is beoordeeld als veilig. De lagere T tijdens de sluitingsuren resulteert zelfs in een verhoogde LM: chemische degradatie is vertraagd.

Strategieën voor RV

In deze sectie wordt strategie 8 gebruikt voor T-setpoints. Zes strategieën zijn gesimuleerd voor RV: (9.) RV ongeconditioneerd (EN: free floating (FF)), die het minimum energiegebruik laat zien; (10.) RV tussen 30% en 70%; (11.) RV tussen 40% en 60%; (12.) RV tussen 45% en 55%; (13.) RV tussen 40% en 50%; (14.) RV tussen twee sinusen met gemiddelde 40% en gemiddelde 50%, beide met een amplitude van 5%. Strategie 14 wordt door verschillende musea gebruikt en gezien als superieur t.o.v. constante onder- en bovengrenzen. Tabel 2 bevat de resultaten.



-Figuur 3- Ont- en bevochtigingsenergie voor RV-strategieën

Strategie 9 laat zien, zoals verwacht, dat het geheel loslaten van RV leidt tot onaanvaardbare risico's voor de collectie. Alle objecten zijn aangetast door alle degradatiefenomenen. De maximale energiebesparing is hierdoor vastgelegd op 84%. Strategie 10 laat zien dat het conditioneren van de RV tussen de 30% en 70% al leidt tot een veilig klimaat m.b.t. schimmelgroei en mechanische schade. Chemische degradatie is vrij hoog, maar chemisch instabiele materialen kunnen verplaatst worden naar vitrines, alwaar een droger microklimaat gecreëerd kan worden. De energiebesparing is 82%. De resultaten laten zien dat het verkleinen van de toegestane fluctuaties (strategie 10-12) de chemische degradatie vermindert – maar dit wordt direct veroorzaakt door het verlagen van de bovengrens – en ook de energiebesparing verkleint (zie figuur 3 voor de specificatie van be- en ontvochtigingsenergie). Chemische degradatie kan verminderd worden door een bovengrens van 50% RV te hanteren (strategie 15), maar dit vergt veel ontvochtiging en is dus erg duur. Strategie 13 en 14 laten zien dat het baseren van de RV-setpoints op een sinus niet zinvol is, maar dat de RV beter tussen vaste grenzen geconditioneerd kan worden.

CONCLUSIES

Omdat dit een gevalstudie is, zijn de resultaten geldig voor goed geïsoleerde, dus gerenoveerde, monumentale gebouwen. De gehanteerde methode dient toegepast te worden op meerdere type gebouwen, vooral om de toepasbaarheid te testen van het loslaten van de temperatuur tijdens sluitingsuren. Dit aangezien de respons van het binnenklimaat sterk afhangt van de thermische massa van het gebouw en de warmteweerstand van de gebouwschil.

De installaties zijn in de simulatiestudie buiten beschouwing gelaten om het effect van de setpointstrategieën op de gebouwvraag inzichtelijk te maken. In lijn met de Trias Energetica

	setpoint		energie		risico voor collectie			
	T [°C]	RV [%]	totaal [MWh]	besparing [%]	schimmel	LM	paneel	verlaag
9.	strat.B	FF	24	-84		0.70		
10.	strat.B	30-70	26	-82		0.78		
11.	strat.B	40-60	29	-80		0.88		
12.	strat.B	45-55	31	-79		0.95		
13.	strat.B	40-50	33	-77		1.06		
14. sinus	strat.B	40/50±5	33	-78		1.05		

-Tabel 2- Verschillende strategieën voor RV zijn gesimuleerd. De energievraag omvat verwarming, koeling, ont- en bevochtiging. Collectiebehoud is gevisualiseerd met de kleuren groen (geen risico), oranje (mogelijk risico) en rood (groot risico), en is bepaald voor de degradatiefenomenen biologisch (schimmel), chemisch (Lifetime Multiplier) en mechanisch. Thermisch comfort is volgens strategie 8 Oh discomfort.

is het beperken van de energievraag de eerste stap richting het energie-efficiënt conditioneren van musea. Bovendien zijn de resultaten hierdoor algemener geldig voor musea die gehuisvest zijn in gerenoveerde monumentale gebouwen.

De hoofdconclusies zijn:

- T-setpoints worden vooral bepaald door de thermische comforteisen en RV-setpoints worden bepaald door de eisen voor de collectie;
- het loslaten van T (free floating) i.c.m. 100% recirculatie tijdens de sluitingsuren levert de grootste energiebesparing op en is niet schadelijk voor de collectie in deze gevalstudie;
- T-setpoints dienen afhankelijk te zijn van de buitentemperatuur, maar vaste boven- en ondergrenzen dienen gehanteerd te worden voor RV-setpoints;
- het is mogelijk om zowel energie te besparen, het thermisch comfort te verbeteren als de chemische degradatie te verminderen (strategie 13) in deze gevalstudie.

De hoofdboodschap luidt: tijdens het afstemmen van de T- en RV-specificaties voor het programma van eisen, dient naast het collectiebehoud ook aandacht besteed te worden aan de invloed van de gemaakte keuzes op het monumentale gebouw, comfort en vooral energiegebruik.

DANKWOORD

De auteurs uiten hun dankbaarheid richting de Hermitage Amsterdam voor de gelegenheid om het museum te bezoeken en meetgegevens te verzamelen.

REFERENTIES

1. Jütte BAHG. Passieve conservering: klimaat en licht. Amsterdam: 1994
2. Ashrae. Museums, Archives and Libraries. Ashrae Handb. Heating, Vent. Air Cond. Appl., American Society of Heating Refrigeration and Air-Conditioning

Engineers; 2007, p. 211–21.23

3. Ankersmit B. Klimaatwerk: Richtlijnen voor het museale binnenklimaat. Amsterdam: Amsterdam University Press; 2009
4. Schellen HL. Heating Monumental Churches, Indoor Climate and Preservation of Cultural Heritage. University of Technology Eindhoven, 2002
5. Martens MHJ. Climate Risk Assessment In Museums: degradation risks determined from temperature and relative humidity data. Eindhoven University of Technology, 2012
6. Van der Linden AC, Boerstra AC, Raue AK, Kurvers SR, de Dear RJ. Adaptive temperature limits: A new guideline in The Netherlands. Energy Build 2006;38:8–17
7. De Wit MH. Heat Air and Moisture model for Building And Systems Evaluation. Bouwstenen. Eindhoven: Eindhoven University Press; 2006