

## White paper



# Luchtvochtigheid in musea en bibliotheken

## Beheersing van omgevingscondities voor een correct behoud van ons culturele erfgoed

Bijna alle kunstwerken, kunstvoorwerpen en documenten die bewaard worden in musea en bibliotheken zijn gemaakt van materialen die gevoelig zijn voor de vochtigheid in de omgeving waarin ze bewaard worden. Schildersdoek, hout, perkament en papier hebben een vochtgehalte dat geneigd is om in evenwicht te komen met de vochtigheid in de omringende lucht. Variaties in de kamertemperatuur en vochtigheid kunnen de afmetingen en mechanische eigenschappen van deze materialen veranderen, wat onherstelbare

schade aan de schilderijen, manuscripten en andere kunstwerken veroorzaakt.

Om oude voorwerpen perfect intact te conserveren moeten musea en bibliotheken daarom specifieke omgevingscondities garanderen, met precisie en over zeer lange tijdsperiodes.

In dit document geeft CAREL zijn kennis over hoe de ideale omstandigheden bereikt kunnen worden voor het behoud van de voorwerpen die ons historische en culturele erfgoed vormen.

Voor verdere informatie over de inhoud van dit document kunt u altijd contact met ons opnemen:

Knowledge  
Center 

CAREL Industries  
[carel@carel.com](mailto:carel@carel.com)  
(+39) 0499 716611

# Inhoud

Samenvatting .....	5
Gevoeligheid van materialen voor relatieve vochtigheid .....	9
Hout .....	11
Papier .....	12
Stoffen en huiden .....	12
Gevolgen van schommelingen in de relatieve vochtigheid.....	13
Vochtigheidsregeling in musea en bibliotheken 15	
Luchtverwarming .....	17
Bezoekersstromen.....	19
Verlichting.....	19
Normen en literatuur .....	21
Bevochtigingssystemen .....	27
Vereisten van bevochtigingssystemen .....	29
Passieve bevochtigingssystemen .....	31
Actieve bevochtigingssystemen .....	32
Kiezen van het juiste bevochtigingssysteem .....	34
Conclusies.....	37
Conclusies.....	39





## Samenvatting



De materialen die gebruikt worden om schilderijen, gravures, manuscripten en kunstwerken in het algemeen te maken zijn zeer gevoelig voor de omstandigheden in de ruimtes waarin ze bewaard worden. Als we niet zorgen voor de juiste omstandigheden, lopen we het risico om voorwerpen die we geërfd hebben van vroegere beschavingen onherstelbaar te beschadigen.

Het kan vreemd lijken waarom er zulke strenge eisen aan de conservering van werken zijn, die eeuwenlang in meer of minder goede condities zijn overgeleverd, zonder speciale aandacht voor omgevingscondities. Deze kwetsbare voorwerpen lopen vandaag de dag juist risico door technologieën die pas recent geïntroduceerd zijn: kunstmatige verlichting verandert de kleuren van schilderijen, luchtvervuiling tast oppervlakken aan en verwarming in gebouwen in de winter droogt de lucht uit, waardoor een relatieve vochtigheid ontstaat die onder het aanvaardbare niveau voor het correcte behoud van kunstwerken ligt.

De plaatsen waar oude kunstwerken bewaard worden, staan voor de moeilijke uitdaging om openbare toegang voor het bekijken van de werken toe te staan, terwijl tegelijkertijd het risico als gevolg van onjuiste beheersing van omgevingscondities tot een minimum beperkt moet worden. Naast de economische waarde van deze zeer kostbare voorwerpen zijn er tevens de onschatbare kosten van het mogelijke verlies van een kunstwerk uit ons culturele erfgoed.

Tijdens de twintigste eeuw liep zelfs één van de beroemdste schilderijen ter wereld, de Mona Lisa van Leonardo da Vinci, schade op doordat de omgevingscondities niet goed onder controle waren: door schommelingen in relatieve vochtigheid trok het paneel waarop het portret geschilderd is krom. Helaas is dit type schade onherstelbaar: inmiddels wordt het schilderij bewaard bij strenge, klimaatgecontroleerde omstandigheden, bij een temperatuur tussen de 18°C en 21°C en een constante relatieve vochtigheid van 50%.

Het is dus niet verwonderlijk dat eigenaars die hun collectie kunstwerken uitlenen aan tentoonstellingen, of dit nu musea of particuliere collecties zijn, strikte, constant bewaakte condities eisen; als deze resultaten niet geleverd worden, kan dit leiden tot annulering van de uitlening en betaling van een schadevergoeding. De condities die bijvoorbeeld geëist worden door het British Museum zijn: temperatuur 18°C ±2°C, relatieve vochtigheid 50% ±5%, verlichting minder dan 80 lux en niet roken in de tentoonstellingsruimte en naastliggende ruimten.

Tal van organisaties hebben richtlijnen gepubliceerd met specificaties voor de juiste conservering van kunstwerken: overheidsinstanties, verenigingen en individuele musea. Er is een enorme hoeveelheid literatuur beschikbaar over dit onderwerp, met enkele best practices die makkelijk te identificeren zijn, maar met de aanbeveling dat het altijd prioriteit heeft om per geval aan specifieke vereisten te voldoen.

Voor musea en bibliotheken is er inderdaad geen bevochtigingssysteem dat universeel beter is dan de andere: de keuze hangt af van factoren die betrekking hebben op de individuele installatie. Ongeacht voor welk systeem gekozen wordt, zijn bepaalde eigenschappen met betrekking tot hygiëne, betrouwbaarheid en hoge prestaties essentiële vereisten. Dit betekent dat sommige oplossingen met een lage begininvestering, zoals bevochtigingssystemen met ondergedompelde elektroden of bevochtigde media ongeschikt zijn.

De ervaring leert dat de beste resultaten gewoonlijk worden bereikt met oplossingen die doorgaans hogere begininvesteringskosten hebben, door hun betere efficiëntie, prestaties en betrouwbaarheid, en bovenal door de kwaliteit en frequentie van routineonderhoud, lopende kosten die vaak onderschat worden tijdens de ontwerpfase.







## Gevoeligheid van materialen voor relatieve vochtigheid

De eigenschappen van materialen die gebruikt worden voor het maken van kunstwerken veranderen op basis van relatieve vochtigheid. Zo heeft hun vochtgehalte de neiging om in evenwicht te komen met de vochtigheid in de omringende lucht. Schommelingen in de relatieve vochtigheid zorgen ervoor dat voorwerpen van grootte veranderen, uitzetten dan wel samentrekken, wat resulteert in vervorming en na verloop van tijd zelfs breuk. Materialen die deze eigenschappen hebben worden hygroscopisch genoemd.

In dit deel wordt ingegaan op de eigenschappen van enkele van deze materialen, zoals hout, papier, stoffen en huiden.



Het vocht in vele materialen, stoffen en producten heeft de neiging om in evenwicht te komen met de vochtigheid van de omgeving waarin het voorwerp wordt bewaard, over een periode die varieert op basis van een aantal verschillende parameters, zoals luchttemperatuur en -snelheid. Specifieker kan worden gesteld dat er een trend is in de richting van evenwicht tussen de waterdampdruk in het materiaal en de partiële druk van de waterdamp in de lucht. De implicaties van deze trend kunnen aanzienlijk zijn in termen van conservering van voorwerpen of producten. Als de omgeving te droog is, zal er een min of meer snelle overdracht van vocht uit het voorwerp of product zijn, met daaruit voortvloeiende wijzigingen in hun esthetische, geometrische en mechanische eigenschappen. Omgekeerd kan een omgeving die te vochtig is leiden tot de overdracht van vocht uit de lucht naar het product, met mogelijke schade, schimmelvorming enz.

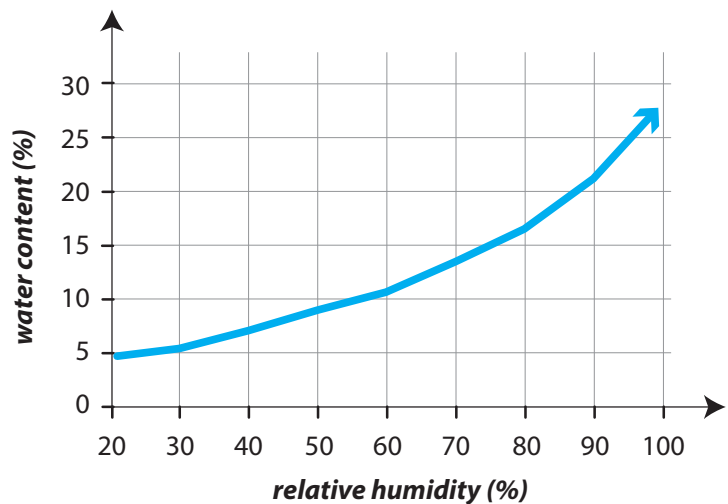
Een veelvoorkomend voorbeeld is het gedrag van houten meubels, die de neiging hebben zich samen te trekken in te droge omgevingen, waardoor er barsten in het hout komen. In het tegenovergestelde geval zorgt een omgeving die te vochtig is voor schimmelvorming op de houten panelen.

De vele materialen met deze eigenschappen worden gedefinieerd als hygroscopisch. Zoals bij het lezen van dit document duidelijk zal worden, wordt de ergste schade veroorzaakt door snelle schommelingen in de vochtigheid, meer nog dan het niet kunnen handhaven van een geschikt relatief vochtigheidsniveau.

## 1. Hout

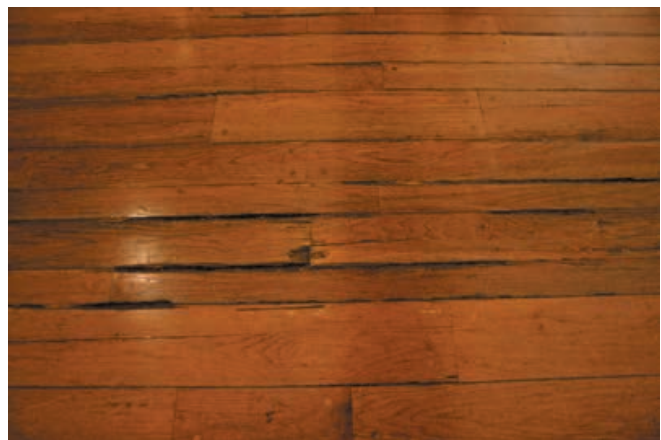
Het is algemeen bekend dat hout een aanzienlijk vochtgehalte heeft, zowel als levende plant als in versgehakte blokken.

Vanaf het moment dat hout wordt gehakt, dat wil zeggen wanneer het vochtgehalte het hoogst is, verandert het vochtgehalte van hout aanzienlijk volgens de omstandigheden van de omgeving waarmee het in evenwicht probeert te komen. De trend wordt weergegeven door de lijn in figuur 1, waar het vochtgehalte in het hout wordt weergegeven ten opzichte van de relatieve vochtigheid van de omgeving bij een temperatuur van rond de 20°C.



Grafiek 1 - Variatie in het vochtgehalte van hout ten opzichte van de relatieve vochtigheid in de omgeving waarin het wordt bewaard, bij een temperatuur van 20°C.

Een snelle verandering in het vochtgehalte, zoals kan gebeuren als hout in een ruimte wordt geplaatst waarin de relatieve vochtigheid nogal verschilt van de waarde die overeenkomt met het evenwicht in de huidige condities, kan aanzienlijke vervorming veroorzaken als gevolg van dimensionale variaties in de plantvezels. Dit kan ervoor zorgen dat planken kromtrekken, horizontaal vervormen, naar één kant buigen en zelfs barsten (zie figuur 1). Diegenen die wel eens hebben meegemaakt dat een houten vloer onder water kwam te staan, kennen deze problemen maar al te goed. De omgevingsvochtigheid heeft nog meer invloed op afgewerkte houten producten, met name op meubels, antiek en schilderijlijsten. Als de juiste omstandigheden niet in acht worden genomen, vooral bij lagere vochtigheidsniveaus, kan dit ernstige schade veroorzaken, van afwijkingen in vlakheid en barsten tot het openspringen van hoekverbindingen.



Figuur 1 - Schommelingen in relatieve vochtigheid zorgen ervoor dat houten voorwerpen en producten, zoals parket, kromtrekken en barsten.

## 2. Papier

Ook het proces van papieropslag wordt beïnvloed door variaties in het vochtgehalte met betrekking tot de omgevingsvochtigheid.

Zoals we weten is papier gemaakt van cellulose, dat wil zeggen van plantvezels die van nature hygroscopisch zijn. Het vochtgehalte van papier bereikt een evenwicht bij condities die afhankelijk zijn van de omgevingstemperatuur en de relatieve vochtigheid. Bij een temperatuur van 20°C kan er bijvoorbeeld een vochtgehalte van 6% in gewicht zijn bij een relatieve vochtigheid in de lucht van 40%. Dit percentage kan oplopen tot 7% bij een relatieve vochtigheid van 60% en zelfs tot 10% bij een relatieve vochtigheid van 80%.

De variatie in vochtgehalte veroorzaakt dimensionale wijzigingen: het vel papier krimpt wanneer het vochtgehalte afneemt, en zet uit wanneer het vochtgehalte toeneemt.

In het bijzonder kan de variatie in de lengte van plantvezels fluctueren tussen de 0,1% en 0,2% bij een verandering van 10% in de vochtigheid. Bij een A4-vel betekent dit een verschil van ongeveer een halve millimeter.

Dit verschijnsel, dat op zichzelf negatief is, gebeurt niet noodzakelijkerwijs op een gelijkmatige manier. Het effect van luchtvochtigheid op een pak papier bijvoorbeeld, is eerst aan de buitenkant te zien, en heeft pas na langere tijd invloed op het midden: de variatie vindt dus voornamelijk plaats rond de omtrek, wat leidt tot het kromtrekken of buigen van de vellen (figuur 2). Dit is de reden waarom niet alleen het vochtigheidsniveau zelf essentieel is, maar bovenal de nauwkeurige regeling van de stabiliteit ervan door de tijd heen.



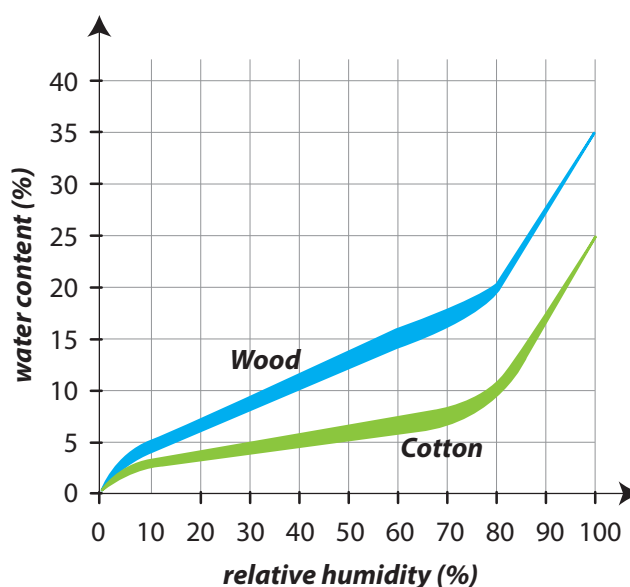
Figuur 2 - Het papier in een boek reageert niet gelijkmatig op variaties in de omgevingscondities; hierdoor trekken de bladzijden krom

## 3. Stoffen en huiden

Net als bij papier hebben de natuurlijke of synthetische vezels die gebruikt worden in de textielindustrie de neiging om een hygroscopisch evenwicht te bereiken met de omgeving, met een vochtgehalte dat evenredig toeneemt met de vochtigheid.

Grafiek 2 laat zien hoe het vochtgehalte van twee natuurlijke vezels, wol en katoen, varieert naarmate de omgevingsvochtigheid afneemt, en vervolgens terugkeert naar de beginwaarde (met een bepaald hysteresis-effect) wanneer de vochtigheid weer toeneemt.

De aanbevolen relatieve vochtigheidswaarden zijn hoger dan die gespecificeerd zijn voor papier; in sommige gevallen moeten ze hoger zijn dan 70% om achteruitgang van de mechanische eigenschappen van de vezels te voorkomen naarmate de relatieve vochtigheid afneemt, wat leidt tot een grotere broosheid en minder elasticiteit.



Grafiek 2. Variatie in het vochtgehalte van wol- en katoenvezels ten opzichte van relatieve vochtigheid in de omgeving waarin ze bewaard worden, bij een temperatuur van rond de 20°C

Leer en huiden zijn eveneens zeer hygroscoopische materialen waarin net als bij papier- en textielvezels, de variatie in vochtgehalte gerelateerd is aan aanzienlijke variaties in afmetingen. Omdat het oppervlak van huiden zich snel aanpast aan de omgevingsvochtigheid, terwijl de binnenste massa langzamer reageert doordat het vocht tijd nodig heeft om zich uit of in het oppervlak te verplaatsen (diffusietijd), worden er in het geval van plotselinge en aanzienlijke variaties in relatieve vochtigheid spanningen gecreëerd, die verschijnen als krommingen en inkepingen (figuur 3).

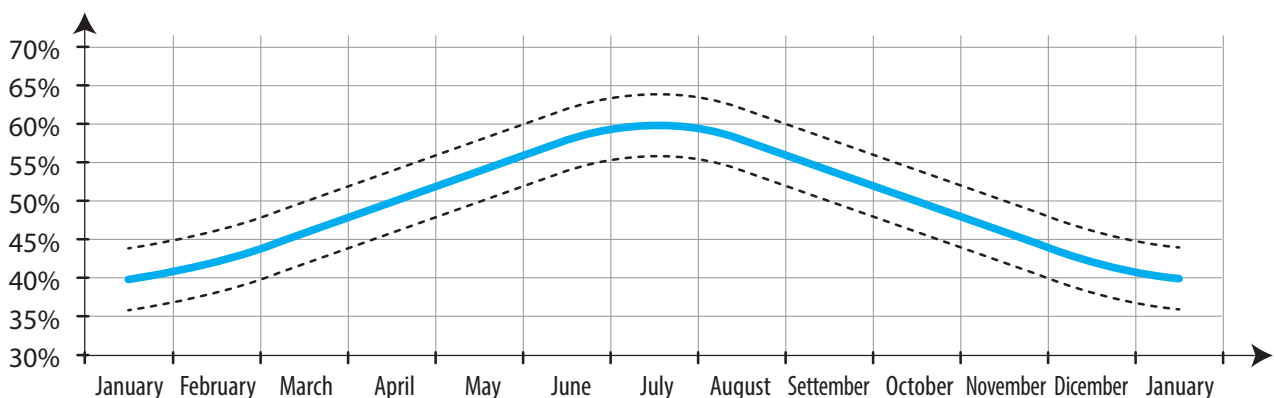


Figuur 3. Effecten van droge lucht op een leerproduct.

## 4. Gevolgen van schommelingen in de relatieve vochtigheid

Het Smithsonian Museum Conservation Institute heeft gedetailleerd onderzoek gepubliceerd naar de reactie van in musea bewaarde materialen op variaties in temperatuur en relatieve vochtigheid, waarbij richtlijnen worden gegeven voor correcte conservering. Dit onderzoek met de naam "Determining the Acceptable Ranges of Relative Humidity And Temperature in Museums and Galleries" (Mecklenburg, 2007), benadrukt hoe plotselinge variaties in relatieve vochtigheid nog veel schadelijker kunnen zijn dan een tijdelijke afwijking van het optimale bereik. In één opvallend experiment werd een schilderij op schildersdoek blootgesteld aan cycli waarin de relatieve vochtigheid varieerde over een bereik van 35% tot 90%. Elke halve cyclus (van minimum naar maximum en andersom) duurde 24 uur.

De conditie van het schilderij ging snel achteruit, waarbij de meeste schade optrad na vier cycli, bestaande uit grote barsten in het oppervlak. Na negen cycli vond er praktisch geen extra beschadiging meer plaats. Dit bewijst hoe slechts een paar plotselinge variaties in relatieve vochtigheid voldoende zijn om het grootste deel van de problemen te veroorzaken. Zoals we zullen zien heeft dit belangrijke implicaties voor het niveau van betrouwbaarheid dat vereist is bij een bevochtigingssysteem. Grafiek 3 laat zien hoe in bepaalde omstandigheden jaarlijkse variaties in relatieve vochtigheid binnen een bereik van 40% tot 60% acceptabel zijn. Dit kan inderdaad wenselijk zijn om de bevochtigingsvraag in de winter en de ontvochtiging in de zomer tot een minimum te beperken. Veel belangrijker echter is dat kortdurende schommelingen nooit een gedefinieerde tolerantie overschrijden (over het algemeen  $\pm 5\%$ ).



Grafiek 3 - Kortdurende schommelingen in relatieve vochtigheid zijn schadelijker dan een gecontroleerde variatie over de langere termijn.





## Vochtigheidsregeling in musea en bibliotheken

De problemen met betrekking tot papier en hout worden enorm vergroot in het geval van musea of bibliotheken, waarbij de conservering van kunstwerken, manuscripten en boeken onder perfecte condities gegarandeerd moet worden gedurende zeer lange perioden.

De ideale omstandigheden voor het bewaren van dergelijke werken veranderen voortdurend door factoren als verlichting, verwarming of simpelweg het aantal bezoekers.

Daardoor is een nauwkeurige temperatuurvochtigheidsregeling van essentieel belang.





De materialen die gebruikt zijn voor het maken van de geconserveerde kunstwerken zijn dezelfde als die we al onderzocht hebben: doek, hout, papier, perkament; niettemin zijn er bij de conservering van deze materialen beperkingen die veel strikter zijn dan die gerelateerd zijn aan het materiaal alleen. Een verandering in de afmetingen van het doek van een schilderij kan ertoe leiden dat de verf afbladdert; hetzelfde effect bij hout kan barsten in de geschilderde panelen veroorzaken, of in het geval van antieke meubels losraking van verbindingen en het loslaten van decoraties. Bovendien kunnen er vervormingen optreden bij manuscripten, met verlies van elasticiteit en daardoor een grotere broosheid.

Daardoor is een nauwkeurige temperatuur-vochtigheidsregeling van essentieel belang. De kamertemperatuur wordt gewoonlijk vastgesteld aan de hand van de behoeften van bezoekers en wordt ingesteld tussen de 18 en 20°C. De relatieve vochtigheid voor de correcte conservering van de tentoongestelde werken ligt binnen het beperkte bereik tussen de 45 en 50%.

Conservering kan plaatsvinden bij lagere vochtigheidsniveaus dan aangegeven, zolang de temperatuur dan ook lager is. Bij een temperatuur van 10°C bijvoorbeeld is een relatieve vochtigheid van 30% acceptabel, terwijl het gebruik van verwarming in combinatie met het binnenkomen van koude buitenlucht met een laag vochtgehalte tot zeer lage relatieve vochtigheidswaarden leiden, die slecht verdragen worden door de tentoongestelde werken. Uiteraard mogen ook andere kant bepaalde limieten niet worden overschreden, omdat hoge vochtigheidsniveaus kunnen leiden tot plaatselijke condens- en schimmelvorming, evenals dimensionale veranderingen die niet altijd acceptabel zijn.

Vergelijkbare problemen doen zich ook voor in bibliotheken, met name waar kostbare documenten worden bewaard. De ideale omstandigheden zijn een temperatuur van 18°C ±1°C en een relatieve vochtigheid van 40% ±5% het hele jaar door in ruimtes waar boeken worden bewaard. In leeszalen is het acceptabele bereik van waarden breder, met een vochtigheid van 50% ±10% en een temperatuur die geschikter is voor het comfort van de gebruikers, zowel door de kortere naslagtijd en het mindere belang van de werken die vaker worden gelezen (vergeleken met manuscripten of perkamenten van historisch-artistisch belang).

Het kan vreemd lijken waarom er zulke strenge eisen zijn aan de conservering van werken die de eeuwen hebben doorstaan in min of meer goede conditie, zonder speciale aandacht voor de omgevingsomstandigheden.

Er zijn drie belangrijke verschillen met het verleden die geleid hebben tot schommelingen in relatieve vochtigheidsniveaus in musea: verwarming van ruimtes in de winter, bezoekersstromen en verlichting.

## 1. Luchtverwarming

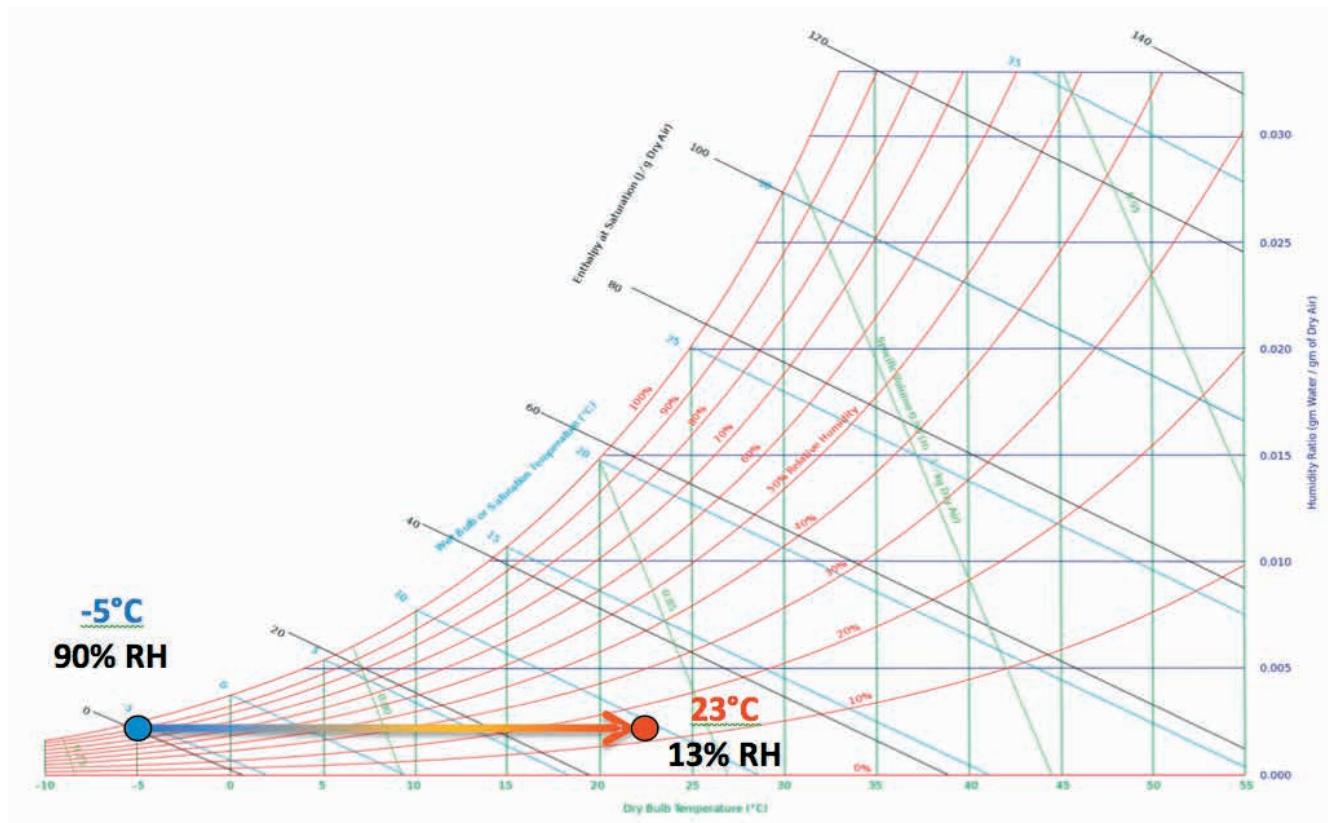
Het begrip relatieve vochtigheid kan in eenvoudige termen worden gedefinieerd als de hoeveelheid water in de lucht ten opzichte van de hoeveelheid die dezelfde lucht mogelijk zou kunnen bevatten. Wanneer de lucht een relatieve vochtigheid van 100% bereikt, is deze verzadigd; het toevoegen van nog meer waterdamp leidt tot condensatie. Een van de elementaire eigenschappen van lucht is dat zijn vermogen om waterdamp te bevatten toeneemt met de temperatuur. Daarom is het zo dat in de winter, ook als de buitenlucht zeer vochtig is, de relatieve vochtigheid van deze lucht drastisch daalt als deze een verwarmd gebouw binnenkomt (of museum in dit geval). De psychometrische tabel in figuur 4 laat zien hoe koude en zeer vochtige lucht (-5°C, 90% RV) zeer droog is (13% RV) als deze verwarmd wordt tot 23°C.

Een van de belangrijkste uitdagingen van de tegenwoordige tijd is dat binnenomgevingen in de winter over het algemeen verwarmd worden tot temperaturen die in het verleden alleen werden toegepast in kleinere woongebieden. Kerken bijvoorbeeld werden nooit verwarmd. Door de luchttemperatuur te verhogen zonder meer waterdamp toe te voegen, zal vervolgens voor een duidelijke afname van de relatieve vochtigheid zorgen. In kamers die verwarmd worden voor persoonlijk comfort in koude klimaten, kan dit verschijnsel leiden tot een extreem droge lucht. Tabel 1 toont de relatieve vochtigheid die bereikt wordt in ruimtes die verwarmd zijn tot 20°C, rekening houdend met de gemiddelde minimum buitentemperatuur en de relatieve vochtigheid, bij enkele grote steden in de maand januari.

Hierbij moet u bedenken dat dit gemiddelde minimumtemperaturen zijn; in New York bijvoorbeeld, is het niet zeldzaam om dagen te hebben waarop de temperatuur onder de -10°C daalt.

Het is duidelijk dat dergelijke relatieve vochtigheidswaarden volkomen ongeschikt zijn voor de conservering van kunstwerken, zonder het even belangrijke comfort van bezoekers en museum personeel te vergeten.

Het resultaat is dat vooral in de winter, wanneer het ventilatiesysteem (geforceerd of natuurlijk) buitenlucht binnenbrengt in gecontroleerde binnenruimtes, deze lucht ook bevochtigd moet worden.



Figuur 4 - De psychrometrische grafiek laat duidelijk zien hoe naarmate de temperatuur stijgt, ook het vermogen van de lucht om waterdamp te bevatten toeneemt. Koude buitenlucht, zelfs als deze zeer vochtig is, wordt zeer droog als zij verwarmd wordt tot temperaturen die afgestemd zijn op persoonlijk comfort.

Stad	Gemiddelde minimum T (januari)	Gemiddelde RV (januari)	Relatieve vochtigheid bij 20 °C
Londen	2,3°C	79,6%	24,9%
Parijs	2,7°C	88%	27,7%
Milaan	-0,9°C	86%	20,8%
New York	-2,8°C	61,5%	12,5%
Beijing	-8,4°C	44%	5,6%

Tabel I. Gemiddelde minimumtemperatuur en relatieve vochtigheid in januari in enkele grote steden.

## 2. Bezoekersstromen

In een museum zijn de aanwezigheidstrends nogal atypisch, met bezoekers die snel de verschillende ruimtes binnenkomen en verlaten. In een gesloten omgeving leidt deze situatie tot schommelingen in temperatuur en vochtigheid die soms aanzienlijk kunnen zijn, en zelfs schadelijk voor gevoelige voorwerpen zoals schilderijen op doek of manuscripten.

De aanwezigheid van mensen is verreweg de belangrijkste "passieve" oorzaak van de introductie van waterdamp in gesloten omgevingen, via ademhaling en transpiratie. Zoals we weten zijn deze processen zeer belangrijk voor de stofwisselingsnelheid, en des te meer bij hogere temperaturen en intensievere lichamelijke activiteit.

Om de introductie van waterdamp in ruimtes door de aanwezigheid van mensen te evalueren, moeten we de gemiddelde bezettingsgraad en het gemiddelde activiteitsniveau weten. Ter indicatie kunnen we ervan uitgaan dat de gemiddelde stofwisselingsnelheid van een persoon in een museumomgeving rond de 150 W (~130 kcal/u) ligt. Om de introductie van waterdamp in ruimtes door de aanwezigheid van mensen te evalueren, moeten we de gemiddelde bezettingsgraad en het gemiddelde activiteitsniveau weten. We kunnen ervan uitgaan dat er slechts lichte lichamelijke activiteit nodig is om een museum te bezoeken; bij een temperatuur van 20°C leidt dit tot een toevoeging van ongeveer 30 gram vocht per uur per persoon, als gevolg van transpiratie. Deze waarde neemt snel toe naarmate de kamertemperatuur stijgt.

Laten we uitgaan van een ruimte van 50 vierkante meter en 3 meter hoog (dus met een volume van 150 m<sup>3</sup>), met daarin 25 mensen. Dit is een redelijk veelvoorkomende situatie die optreedt tijdens bezoeken door schoolklassen of rond de meest beroemde kunstwerken. Deze mensen zouden ongeveer 750 g/u waterdamp in de omgeving afgeven. Als de begincondities 20°C en 50% RV zijn, d.w.z. een absolute vochtigheid van rond de 7,3 g/m<sup>3</sup>, zonder de lucht te veranderen, dan zou de absolute vochtigheid in slechts één uur toenemen tot 12,3 g/m<sup>3</sup>, en zou de relatieve vochtigheid dus 80% zijn.

In werkelijkheid moeten we ook rekening houden met de gecontroleerde (luchtverversing door ventilatie) of ongecontroleerde (infiltratie) introductie van verse buitenlucht. Het resultaat van het mengen van buiten- en binnenlucht, gecombineerd met latente warmtewisseling met de aanwezige mensen, leidt tot een af- of toename van de vochtigheid: om de omgevingscondities onder controle te houden, is het essentieel om de lucht te bevochtigen of te ontvochtigen, afhankelijk van het seizoen en het aantal mensen en moet dit per geval worden bekeken.

## 3. Verlichting

Het in- en uitschakelen van verlichting is een van de oorzaken van schommelingen in de luchttemperatuur, die weer schommelingen in de relatieve vochtigheid veroorzaken. Voordat we echter de effecten op de bevochtigingsvraag onderzoeken, is het nuttig enkele voorlopige observaties te doen.

Licht versnelt de achteruitgang van manuscripten door cellulosevezels te verzwakken en hun kleur te veranderen, en verandert de kleur, de zichtbaarheid en het uiterlijk van documenten, foto's en kunstwerken in het algemeen. Blootstelling aan licht, zelfs voor een korte periode, is daarom schadelijk en de schade is cumulatief en onherstelbaar.

Hoewel licht van elke golflengte schade veroorzaakt, is ultraviolette straling (UV) vooral schadelijk door zijn hoge energie-inhoud. Zonlicht en moderne spaarlampen behoren tot de meest schadelijke bronnen door hun hoge niveaus van UV-straling. Verlichting moet dus zoveel mogelijk gedimd zijn, terwijl tegelijk een acceptabel visueel comfort voor gebruikers verzekerd wordt, moet uitgeschakeld worden als ze niet nodig is en mag alleen geleverd worden via gloeilampen die lagere UV-emissies hebben.

Gloeilampen genereren echter warmte: niet alleen moeten ze op veilige afstand van kunstwerken worden geplaatst, maar ze veranderen ook de kamertemperatuur en daardoor de relatieve vochtigheid. Dit is een factor waarmee rekening moet worden gehouden bij correcte controle van beide parameters.

Bij een gloeilamp wordt slechts 10% van de elektriciteit omgezet in licht, terwijl de resterende 90% verloren gaat via warmte. Een voorbeeld kan helpen om de impact van verlichting op temperatuur en daardoor op de relatieve vochtigheid te meten. Lichtstroom wordt gemeten in lumen (lm). Lux (lx) is de meeteenheid van verlichtingssterkte en is gelijk aan één lumen per vierkante meter. Een verlichtingssterkte van 150 lux is een goed compromis tussen correcte conservering van werken die redelijk gevoelig zijn voor licht, zoals olieverf- of temperaschilderijen op doek en visueel comfort van gebruikers. In een ruimte van 50 vierkante meter is de aanbevolen verlichting dus:

$$50 \text{ m}^2 \times 150 \text{ lx} = 7500 \text{ lm}$$

De totale lichtefficiëntie van een wolframgloeilamp van 100 W is 13,8 W/lm. Het stroomverbruik dat nodig is om aan de verlichtingseisen te voldoen is dan:

$$7500 \text{ lm} / (13,8 \text{ W/lm}) = 543,5 \text{ W}$$

Afgerond betekent dit zes lampen van 100 W, dus in totaal 600 W. Gezien het feit dat deze soorten gloeilampen ongeveer 90% van de stroom die ze verbruiken afgeven als warmte, voegt de verlichting 540 W aan warmte toe aan de omgeving. In onze ruimte van 50 vierkante meter, zonder ventilatie, zou dit alleen al voldoende zijn om de temperatuur in één uur van 18°C tot 28°C te verhogen, waarmee de relatieve vochtigheid verlaagd wordt van 50% tot 27%. In dit geval moet ook rekening worden gehouden met de geforceerde of natuurlijke introductie van verse buitenlucht; niettemin is het duidelijk dat de energiebijdrage van de verlichtingssystemen groot is en dat deze de omgevingscondities aanzienlijk kan veranderen, vooral wanneer de verlichting in- of uitgeschakeld wordt.



## Normen en literatuur

Tal van organisaties hebben richtlijnen gepubliceerd met specificaties voor de juiste conservering van kunstwerken: overheidsinstanties, verenigingen en individuele musea. Er is een enorme hoeveelheid literatuur beschikbaar over dit onderwerp, met enkele best practices die makkelijk te identificeren zijn, maar met de aanbeveling dat het altijd prioriteit heeft om per geval aan specifieke vereisten te voldoen.



Er zijn drie typen nationale en internationale organisaties die richtlijnen en referentienormen voor de conservering van voorwerpen van historisch en cultureel belang publiceren:

- technische organisaties
- culturele organisaties
- brancheorganisaties

Enkele voorbeelden hiervan worden gegeven in tabel II.

Deze organisaties hebben in de loop der jaren tal van normen gepubliceerd, waarvan sommige worden vermeld in tabel III. Samen met deze organisaties hebben individuele musea normen en onderzoeken gepubliceerd.

Er bestaat een enorme hoeveelheid literatuur over dit onderwerp en specificaties kunnen enigszins verschillen met betrekking tot objectieve parameters en toegestane toleranties, afhankelijk van het type materiaal en kunstwerk. De belangrijkste toegepaste parameters zijn echter gewoonlijk hetzelfde, en dat zijn:

- temperatuur;
- relatieve vochtigheid;
- verlichting;
- luchtverontreiniging (stof);
- meet- en bewakingsprocedures.

Als voorbeeld worden in tabel IV de referentiewaarden gegeven volgens de Italiaanse norm UNI 10829. Dit zijn de referentiewaarden van omgevingsparameters in relatie tot de conservering van 33 categorieën van materialen en voorwerpen, met als doel het ontwerpen van nieuwe airconditioningsystemen voor museumomgevingen.

In eerste instantie kunnen er twee opmerkingen worden gemaakt over de gegevens in de tabel:

- de getolereerde afwijking van dagelijkse temperatuur en relatieve vochtigheid is bijna altijd lager dan het gehele acceptabele bereik voor elke categorie voorwerpen. Dit onderstreept het belang van stabiliteit door de tijd heen, evenals de feitelijke vochtigheidswaarde zelf;
- Bij bepaalde categorieën voorwerpen en materialen is de toegestane afwijking in het instelpunt van de relatieve vochtigheid maar 2%. Dit niveau van nauwkeurigheid vereist dus een bevochtigingssysteem met zeer hoge prestaties.

In de volgende Italiaanse norm, UNI 10969, worden geen precieze omgevingswaarden aanbevolen, maar algemene principes vastgesteld die gevolgd moeten worden bij degenen die verantwoordelijk zijn voor het behoud van cultureel erfgoed. De norm benadrukt dat er bij het definiëren van omgevingsparameters vooral rekening moet worden gehouden met de behoeften van de opgeslagen voorwerpen en niet met het comfort van mensen, en onderstreept hoe voor dergelijke voorwerpen het proces van achteruitgang cumulatief, voortschrijdend en onomkeerbaar is.

In de norm wordt het plannen van een abstract, nationaal gestandaardiseerd microklimaat vermeden, terwijl benadrukt wordt dat om individuele voorwerpen op de beste manier te conserveren, rekening moet worden gehouden met hun oorspronkelijke microklimatologische context. De richtlijnen geven aan dat de relatieve vochtigheid en temperatuur de hele dag zo stabiel mogelijk moeten blijven, zonder fluctuaties, en zo gelijkmatig mogelijk moeten zijn in de ruimte, zowel in dezelfde ruimte als tussen naastliggende ruimtes.

Voor een gedetailleerde analyse van de effecten van temperatuur en relatieve vochtigheid op de conservering van kunstwerken wordt tevens aanbevolen om het al eerder genoemde Mecklenburg-onderzoek te lezen, *Determining the acceptable ranges of relative humidity and temperature in museums and galleries*, dat gepubliceerd is door het Smithsonian Museum Conservation Institute.

Type organisatie	Afkorting	Beschrijving	Gebied
Technisch	ISO	Internationale Organisatie voor Normalisatie	Internationaal
	CEN	Europees Normalisatiecomité	Europa
	UNI	Italiaanse Nationale Uniformeringsorganisatie	Italië
	ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers	VS
Cultureel	UNESCO	Organisatie van de Verenigde Naties voor Onderwijs, Wetenschappen en Cultuur	Internationaal
	AIC	American Institute for Conservation	VS

Type organisatie	Afkorting	Beschrijving	Gebied
Technisch	ISO	Internationale Organisatie voor Normalisatie	Internationaal
	CEN	Europees Normalisatiecomité	Europa
	UNI	Italiaanse Nationale Uniformeringsorganisatie	Italië
	ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers	VS
Cultureel	UNESCO	Organisatie van de Verenigde Naties voor Onderwijs, Wetenschappen en Cultuur	Internationaal
	AIC	American Institute for Conservation	VS
Branche	IFLA	International Federation of Library Associations and Institutions	Internationaal
	ICA	International Council of Archives	Internationaal
	ICCROM	International Centre for the Study of the Preservation and Restoration of Cultural Property	Internationaal
	ICOM	International Council of Museums	Internationaal

*Tabel II - Organisaties die normen en richtlijnen gepubliceerd hebben, onderverdeeld per type.*

Norm	Titel	Gebied
ISO 11799	Documentopslagvereisten voor archief- en bibliotheekmaterialen	Internationaal
EN 15757:2010	Normen voor de conservering van cultureel eigendom	Europa
ICCROM	Normen voor preventieve conservering: betekenissen en toepassingen	Internationaal
AAM	Omgevingsnormen voor musea	VS
UNESCO	Procedures en conservering - normen voor museumcollecties in transport en tentoongesteld	Internationaal
UNI 10829	Omgevingscondities voor conservering van kunstwerken van historisch en artistiek belang	Italië
UNI 10969	Algemene beginselen voor de keuze en regeling van het microklimaat voor het conserveren van cultureel erfgoed in binnenomgevingen	Italië
UNI 10586	Klimatologische condities voor ruimtes waarin grafische documenten worden bewaard, en kenmerken van de containers	Italië

*Tabel III - Enkele van de meestgebruikte nationale en internationale referentienormen.*

Kunstwerken van historisch en artistiek belang	$t_0$ (°C)	$\Delta t_{\max}$ (°C)	$u_0$ (%)	$\Delta u_{\max}$ (%)	$E_{\max}$ (lx)	$UV_{\max}$ ( $\mu W/cm^2$ )	$LO_{\max}$ (lx/yr)
--	---------------	---------------------------	--------------	--------------------------	--------------------	---------------------------------	------------------------

**ORGANISCHE MATERIALEN/VOORWERPEN**

Kunstwerken op papier, papier-maché, vloeipapier, wandtapijten	18 – 22	1,5	40 – 55	6	50	75	0,2
Stoffen, weefsels, tapijten, wandkleden, zijde, kostuums, kleding, religieuze gewaden, natuurlijke vezelmaterialen, sisal, jute	19 – 24	1,5	30 – 50	6	50	75	0,2
Was, anatomische was	<18	NR	NR	NR	150	75	-
Herbaria en verzamelingen	21 – 23	1,5	45 – 55	2	50	75	0,2
Entomologische verzamelingen	19 – 24	1,5	40 – 60	6	50	75	0,2
Dieren en anatomische organen bewaard in formaline	15 – 25	-	NR	NR	50	75	0,2
Dieren, gedroogde anatomische organen, mummies	21 – 23	1,5	20 – 35	-	50	75	0,2
Pelzen, veren, opgezette dieren en vogels	4 – 10	1,5	30 – 50	5	50	75	0,2
Tekeningen, aquarellen, pastels en dergelijke op papier	19 – 24	1,5	45 – 60	2	50	75	0,2
Etnografische verzamelingen, maskers, leer, leren kleding	19 – 24	1,5	45 – 60	6	50	75	0,2
Schilderijen op doek, olieverfschilderijen op doek en textiel, tempera, gouaches	19 – 24	1,5	40 – 55	6	150	75	0,5
Documentarchieven op papier of perkament, papyrus, manuscripten, gedrukte boeken, postzegelverzamelingen	13 – 18	-	50 – 60	5	150	75	-
Boekbanden met huid of perkament	19 – 24	1,5	45 – 55	6	50	75	0,2
Gelakte voorwerpen, ingelegde, gedecoreerde of gelakte meubels	19 – 24	1,5	50 – 60	4	50	75	0,2



Kunstwerken van historisch en artistiek belang	$t_0$ (°C)	$\Delta t_{\max}$ (°C)	$u_0$ (%)	$\Delta u_{\max}$ (%)	$E_{\max}$ (lx)	$UV_{\max}$ ( $\mu W/cm^2$ )	$LO_{\max}$ (lx/yr)
Geverfde houten sculpturen, geverfd hout, schilderijen op hout, iconen, houten klokken, houten muziekinstrumenten	19 – 24	1,5	50 – 60	4	50	75	0,2
Ongeverfde houten sculpturen, voorwerpen gemaakt van riet, houten planken of boomschors	19 – 24	1,5	45 – 60	4	150	75	0,5

#### ANORGANISCHE MATERIALEN/VOORWERPEN

Porselein, keramiek, gres, terracotta, niet-natuurstenen tegels en natuurstenen tegels indien gedemineraliseerd	NR	-	NR	10	NR	-	-
Stenen, gesteentes, mineralen, stabiele (poreuze) meteorieten	19 – 24	-	40 – 60	6	NR	-	-
Mozaïeken van stenen, gesteente, mineralen, meteorieten (niet-poreus), fossielen en verzamelingen keien	15 – 25	-	20 – 60	10	NR	-	-
Metaal, gepolijst metaal, metaallegeringen, zilver, wapens, brons, munten, voorwerpen van koper, blik, ijzer, staal, lood en tin	NR	-	<50	-	NR	-	-
Metaal met actieve corrosiegebieden	NR	-	<40	-	NR	-	-
Goud	NR	-	NR	-	NR	-	-
Gips	21 – 23	1,5	45 – 55	2	150	75	0,5
Instabiel, iriserend, gevoelig glas, gevoelige glasmozaïeken	20 – 24	1,5	40 – 45	-	150	75	0,5

#### GEMENGDE VOORWERPEN

Wandschilderingen, fresco's, sinopia (los)	10 – 24	-	55 – 65	-	150	-	-
Droge wandschilderingen (los)	10 – 24	-	45 – 50	-	150	75	0,2
Ivoor, hoorns, malacologieverzamelingen, eieren, nesten, koraal	19 – 24	1,5	40 – 60	6	-	75	0,5
Grammofoonplaten	10 – 21	-	40 – 55	2	-	-	-
Synthetische vezels	19 – 24	-	40 – 60	-	50	75	0,2
Film, kleurenfoto's	0 – 15	-	30 – 45	-	50	75	0,2
Kunststof materialen	NR	-	30 – 50	10	<300	75	-

Tabel IV - Referentiewaarden volgens UNI 10829 die toegepast moeten worden met betrekking tot de omgevingsparameters voor de conservering van materialen en voorwerpen, met het doel nieuwe airconditioningsystemen te ontwerpen voor museumomgevingen.

#### Legenda

$t_0$  - luchttemperatuur

$\Delta t_{\max}$  - maximaal dagelijks temperatuurverschil

$u_0$  - relatieve luchtvochtigheid

$\Delta u_{\max}$  - maximaal dagelijks verschil in relatieve vochtigheid

$E_{\max}$  - maximale verlichtingssterkte

$UV_{\max}$  - maximale hoeveelheid ultraviolette straling

$LO_{\max}$  - maximale jaarlijkse hoeveelheid licht

NR - niet relevant

**Opmerking:** houd voor temperatuur en vochtigheid ( $t_0$  en  $u_0$ ) een vaste gekozen waarde tussen de grenswaarden aan



## Bevochtigingssystemen

Voor musea en bibliotheken is er geen bevochtigingssysteem dat universeel beter is dan de andere: de keuze hangt af van factoren die betrekking hebben op de individuele installatie.

Het systeem kan rechtstreeks geïnstalleerd worden in de vitrine, in de ruimte of in een luchtbehandelingssysteem voor meerdere ruimtes.

Ongeacht welk systeem gekozen wordt, zijn er bepaalde aspecten waaraan altijd moet worden voldaan: hygiëne, betrouwbaarheid en hoge prestaties zijn essentiële vereisten.



Het meest geschikte bevochtigingssysteem voor musea en bibliotheken hangt af van verschillende factoren, zoals:

- de grootte van de ruimte die bevochtigd moet worden;
- de vereiste nauwkeurigheid;
- energiebesparing.

Hoewel de vereisten van de toepassing specifiek kunnen zijn, zoals eerder beschreven, zijn er niettemin bepaalde kenmerken die het bevochtigingssysteem altijd moet hebben, ongeacht de gebruikte technologie. Dit zijn minimumvereisten in termen van:

- prestaties;
- betrouwbaarheid en veiligheid van het systeem;
- hygiëne.

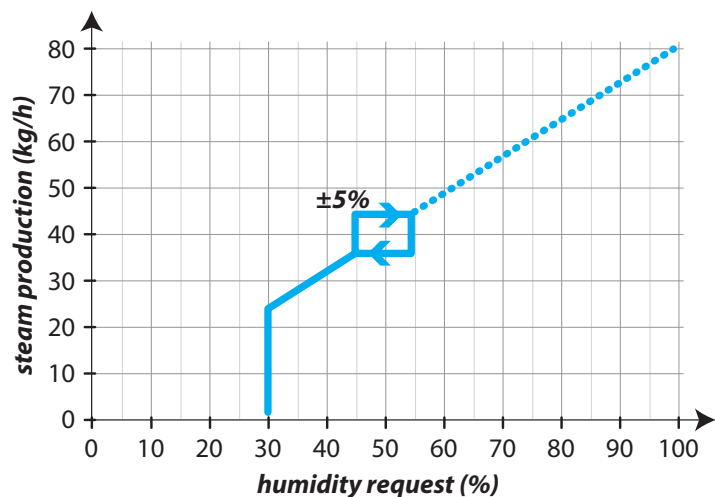
## 1. Vereisten van bevochtigingsystemen

### Prestaties

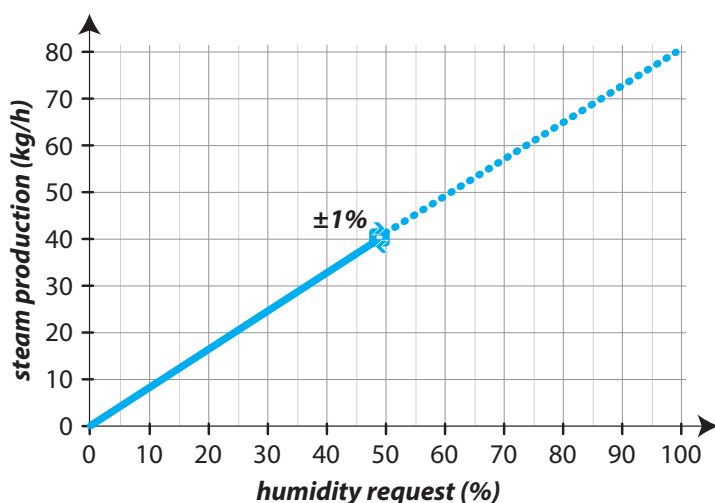
De algemene term 'prestaties' kan bepaalde operationele aspecten van het bevochtigingssysteem omvatten, zoals nauwkeurigheid, reactiviteit op variaties en absorptie-efficiëntie.

Wat betreft nauwkeurigheid is zoals we hebben gezien een niveau van  $\pm 5\%$  rond het instelpunt bijna altijd voldoende om materialen te beschermen tegen mogelijke risico's. Een hogere nauwkeurigheid biedt een verdere garantie dat het vastgestelde bereik nageleefd wordt, terwijl een lagere nauwkeurigheid, bijvoorbeeld  $\pm 10\%$ , daarentegen kan leiden tot problemen op de middellange termijn. Zo is een tolerantie van 10 procent rond het instelpunt gelijk aan een fluctuering van 20% in de relatieve vochtigheid, een bereik dat beslist te groot is om een correcte conservering op de lange termijn van gevoelige materialen te kunnen garanderen. Het is belangrijk om te onthouden dat om nauwkeurigheid van het bevochtigingssysteem te verzekeren, niet alleen de bevochtiger een voldoende niveau van nauwkeurigheid moet leveren, maar ook de sensor die de relatieve vochtigheid in de lucht meet moet voldoende nauwkeurig zijn.

Een van de aspecten die de precisie van het systeem beïnvloedt is reactiviteit op veranderingen in de bevochtigingsvraag. Er zijn inderdaad bepaalde typen bevochtigers die pas in werking treden als de vraag boven een bepaald percentage van hun nominale capaciteit komt, waardoor ze ontoereikend zijn als de vraag laag is (grafiek 4). Andersom werken bepaalde bevochtigers over het gehele bereik van de nominale capaciteit (grafiek 5) en beschikken ze over specifieke functies, zoals voorverwarming bij stoombevochtigers, om te zorgen voor een betere reactiviteit.



Grafiek 4 - Sommige typen bevochtigers, zoals apparaten met ondergedompelde elektrodes, kunnen pas beginnen met het produceren van stoom als de bevochtigingsvraag een minimaal percentage van de nominale capaciteit bereikt (30% en 80 kg/u in dit voorbeeld) en hebben doorgaans geen hogere nauwkeurigheid dan  $\pm 5\%$ .



Grafiek 5 - De beste bevochtigers met verwarmers werken over het gehele bereik van de nominale capaciteit en garanderen een nauwkeurigheid van  $\pm 1\%$ .

## Betrouwbaarheid en veiligheid van het systeem

In de winter zal uurlijkse luchtverversing zonder bevochtiging ervoor zorgen dat de relatieve vochtigheid onder de alarmdrempel zal dalen. Zoals we hebben gezien in de paragraaf over de gevoeligheid van materialen voor relatieve vochtigheid, zijn slechts een paar grote schommelingen genoeg om onherstelbare schade te veroorzaken aan kunstwerken. Om risico's te voorkomen en voorwerpen te beschermen, moet het bevochtigingssysteem over bepaalde vereisten beschikken die continue werking garanderen.

De eerste aanbeveling is om systemen te kiezen die stilstand voor onderhoud tot een minimum beperken. Dit onderwerp zal in detail worden besproken in de volgende paragraaf. Over het algemeen hebben bevochtigers die gedemineraliseerd water gebruiken minder onderhoud nodig, omdat kalkafzetting en de noodzaak van periodieke reiniging en/of vervangen van onderdelen hierdoor worden voorkomen. Door dit aspect vallen bepaalde bevochtigingstechnologieën eigenlijk al af: systemen met ondergedompelde elektroden kunnen bijvoorbeeld niet werken op gedemineraliseerd water en hebben zeer regelmatig onderhoud nodig.

Een andere sterk aanbevolen eis aan bevochtigers is dat ze over rotatie- en redundantiefuncties beschikken. Door rotatie kunnen de bevochtigers de werking afwisselen, zodat de werkings- en onderhoudsintervallen verlengd worden, terwijl redundantie continue service garandeert: als de ene bevochtiger uitgeschakeld is door onderhoud of een storing, dan wordt de vochtproductie niet onderbroken, omdat de andere bevochtigers de extra output leveren.

Een bevochtigingssysteem met deze beide kenmerken (werking op gedemineraliseerd water en rotatie-/redundantiefunctie) vormt zeker de ideale oplossing in termen van betrouwbaarheid: de vochtproductie stopt nooit, zelfs niet tijdens de al minimale onderhoudswerkzaamheden.

Zorgen voor aanvullende veiligheid van het systeem - beschouwd als het vermogen om mogelijk schadelijke situaties voor voorwerpen en mensen te voorkomen - is de mogelijkheid van de bevochtiger om een limietsonde te beheeren. Dit is een sensor die in de leidingen of in de ruimte moet worden geïnstalleerd, die meet wanneer de vochtigheid een bepaald ingesteld niveau overschrijdt. In dat geval stopt de productie om te voorkomen dat er condensatie optreedt. Condensatie brengt niet alleen de voorwerpen in gevaar als er condensvorming optreedt in de ruimtes, maar brengt ook hygiënische en gezondheidsrisico's met zich mee als er ophopingen van stilstaand water gecreëerd worden. De meest geavanceerde modellen bevochtigers beschikken over een modulerende sonde, die de product geleidelijk laat afnemen naarmate de vochtigheid de limiet nadert, en zo plotselinge onderbrekingen met ongewenste gevolgen voorkomt.

Prestaties	Betrouwbaarheid en veiligheid	Hygiëne	Connectiviteit
<ul style="list-style-type: none"> <li>Nauwkeurigheid (<math>\pm 1\%</math>)</li> <li>Breed modulatiebereik (0 tot 100%)</li> <li>Reactiviteit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Rotatie en redundantie</li> <li>Gebruik met gedemineraliseerd water</li> <li>Modulerende limietsonde</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Stoom <i>of bij adiabatische bevochtigers</i></li> <li>Gedemineraliseerd water</li> <li>Geen recirculatie van water</li> <li>100% absorptie</li> <li>Geen chemische biociden</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Geïntegreerde communicatieprotocollen (Modbus, BACnet)</li> <li>Compatibiliteit met BMS en beheer op afstand</li> <li>Ingebouwde webserver</li> </ul>

Tabel V - Kenmerken van een ideaal bevochtigingssysteem voor musea.

## Hygiëne

Het bevochtigingssysteem en het ventilatiesysteem in het algemeen moet voorkomen dat er bacteriën en andere verontreinigende stoffen in de gecontroleerde ruimte komen, vooral als er voorwerpen van organische aard aanwezig zijn, zoals papier, stoffen en huiden.

In dit opzicht zijn de systemen die intrinsiek het veiligst zijn stoombevochtigers (zie de volgende paragraaf), omdat stoom volledig aseptisch is. Dit sluit echter het absoluut veilige gebruik van adiabatische systemen niet uit, waarbij echter verschillende voorzorgsmaatregelen moeten worden genomen. Ook dit punt wordt verderop besproken, maar over het algemeen worden adiabatische systemen met recirculatie of opslag van stilstaand water binnenin het systeem uiteraard niet aanbevolen.

Nog een tegenmaatregel die kan worden genomen is het desinfecteren van het toevoerwater met behulp van een UV-lamp, waardoor alle mogelijke bacteriën verwijderd worden. Het gebruik van chemische biociden wordt echter niet aanbevolen, niet alleen omdat ze zeer duur zijn, maar omdat er bovendien speciale voorzorgsmaatregelen nodig zijn voor afvoer van het water, evenals frequente analyse van de bacteriologische verontreiniging. In het geval van storingen in de biocideregelingen- en distributiesysteem, kan de bevochtiger bovendien blijven werken op water dat niet hygiënisch zuiver is: daarom is het geen intrinsiek veilige oplossing.

Voor adiabatische bevochtigers is gedemineraliseerd water vereist: anders zouden de minerale zouten die opgelost zijn in het toevoerwater zich afzetten in de bevochtigde ruimte, en zouden de onderhoudsvereisten aanzienlijk toenemen.

Ongeacht de gebruikte technologie moet het systeem zodanig ontworpen zijn dat de stoom (bij isotherme bevochtigers) of water (adiabatische bevochtigers) volledig geabsorbeerd wordt door de lucht, en dat er geen plaatsen zijn waar zich stilstaand water kan verzamelen in de ruimte of in de bevochtigingsleidingen. Stilstaand water bij kamertemperatuur is immers een ideale omgeving voor de groei van bacteriën.

## Connectiviteit

Connectiviteitsfuncties zijn niet strikt noodzakelijk op het bevochtigingssysteem, maar ze zijn wel een steeds belangrijker voordeel, vanwege de groeiende behoefte om informatie in complexe systemen met verschillende instelpunten te beheren, te volgen en te verzamelen. Om deze reden worden steeds meer HVAC-systemen tegenwoordig beheerd via een BMS (Building Management System), dat ook het bevochtigingssysteem regelt, met de mogelijkheid van gecentraliseerd beheer van meerdere locaties. Bevochtigers moeten dus uitgerust zijn met de meestgebruikte communicatieprotocollen, zoals Modbus en BACnet.

Sommige van de nieuwste generatie bevochtigers hebben zelfs een ingebouwde webserver. Hierdoor kan het gehele bevochtigingssysteem worden beheerd, gecontroleerd en gevolgd op een lokaal netwerk, rechtstreeks vanaf een pc of tablet. Indien aangesloten op een geschikt toezichtssysteem kan het ook worden beheerd via een verbinding op afstand.

## 2. Passieve bevochtigssystemen

Het kiezen van het juiste bevochtigingssysteem hangt ook af van andere kenmerken van de specifieke toepassing. Als de te bevochtigen ruimte zeer klein is of luchtdicht, dan zijn passieve bevochtigssystemen over het algemeen de beste oplossing.

Bevochtigssystemen worden passief genoemd wanneer ze niet direct een bron van vocht genereren, maar het vocht in de omringende lucht absorberen en afgeven, met als doel om een constant niveau in de gecontroleerde ruimte te garanderen.

Dit zijn goede oplossingen, en ook zeer voordelige, wanneer ze geïnstalleerd worden in kleine ruimtes of direct in de vitrines waarin de kunstwerken worden bewaard, als deze goed afgedicht zijn en in staat zijn om een goede thermische isolatie te garanderen (in vitrines van hoge kwaliteit is de luchtuitswisseling met de buitenkant minder dan 0,1 volume/uur). Deze systemen maken gebruik van de aanzienlijke hygroscopische eigenschappen van bepaalde materialen, waarvan het meestgebruikte silicagel is (figuur 5), om vocht af te geven wanneer de vochtigheid onder het instelpunt is, en vocht op te nemen wanneer de vochtigheid hoger is dan nodig. De gel is geprepareerd op een ingesteld niveau van relatieve vochtigheid; als de gel in de gecontroleerde ruimte wordt geplaatst, zorgt deze ervoor dat de vochtigheid rond de gedefinieerde waarde blijft.



Figuur 5. Silicagel

Een verder voordeel van dit systeem, naast zijn eenvoud en lage kosten, is dat het ook werkt als ontvochtiger. Het reageert bijvoorbeeld op variaties in relatieve vochtigheid als gevolg van schommelingen in de temperatuur binnen de vitrine. Deze systemen kunnen echter niet worden gebruikt in kisten en vitrines die gemaakt zijn met hygroscopische materialen zoals hout. Zo heeft 6 kg hout dezelfde hygroscopische capaciteit als 1 kg silicagel: als het vochtgehalte in het hout niet gelijk is aan het instelpunt, bijvoorbeeld omdat het bewaard is op een zeer vochtige of zeer droge plaats, dan zal het passieve bevochtigingssysteem niet in staat zijn om het vereiste vochtigheidsniveau te garanderen.

### 3. Actieve bevochtigingssystemen

Wanneer de bevochtigde ruimte groter is of als de luchtwisseling in de vitrine aanzienlijk is (>2 vol/u), dan is een passief bevochtigingssysteem niet meer voldoende om het juiste vochtigheidsniveau te garanderen, vooral tijdens de winter. Het is ook duidelijk dat dergelijke systemen ongeschikt zijn voor het bevochtigen van een hele kamer of een luchtkanaal. In dat geval zijn er dus bevochtigers en ontvochtigers nodig die vocht kunnen toevoegen aan en verwijderen uit grotere luchtvolumes.

Bevochtigers kunnen onderverdeeld worden in twee hoofdcategoryën: isotherme en adiabatische.

#### Isotherme bevochtigers

Isotherme bevochtigers bevochtigen de lucht door water te koken, dat omgezet wordt in stoom en vervolgens in de gecontroleerde omgeving wordt gebracht. De energie voor deze verandering van toestand, ongeveer 750 W per liter verdampt water, wordt geleverd door de bevochtiger, hetzij via elektriciteit of een andere bron (aardgas of LPG). De definitie isotherm is afgeleid van het feit dat de lucht geen substantiële verandering in temperatuur ondergaat en alleen bevochtigd wordt.

Isotherme bevochtigers zijn vrij eenvoudig te installeren, garanderen hygiënisch veilig stoom en kunnen gebruikt worden voor zowel distributie rechtstreeks in ruimtes als in de kanalen van luchtbehandelingssystemen. Ze zijn ook geschikt voor zeer lage outputs.

Er zijn drie typen isotherme bevochtigers:

- ondergedompelde elektrodes
- ondergedompelde verwarmers
- gasgestookt

#### Bevochtiger met ondergedompelde elektrodes

Deze zijn het eenvoudigste en over het algemeen het meest zuinige type. Een elektrodepaar gebruikt het water als weerstandselement door het te verwarmen tot het kookt. De belangrijkste beperkingen van deze systemen zijn hun nauwkeurigheid (bijna nooit meer dan  $\pm 5\%$  RV) en productiebereik, dat pas begint bij een bepaald percentage van nominale capaciteit.

Daarbij komt dat dit type bevochtiger niet kan werken op gedemineraliseerd water en daardoor vaker onderhoud en vervanging van de cilinders nodig heeft, waarbij de noodzaak toeneemt op basis van het zoutgehalte van het toevoerwater.

#### Bevochtiger met ondergedompelde verwarmers

Elektrische verwarmingselementen verwarmen het water tot het kookpunt. Bevochtigers met verwarmers van goede kwaliteit kunnen een zeer hoge nauwkeurigheid bereiken ( $\pm 1\%$ ) en werken over het gehele bereik van de nominale capaciteit, dankzij de mogelijkheid om de verwarmertemperatuur te moduleren.

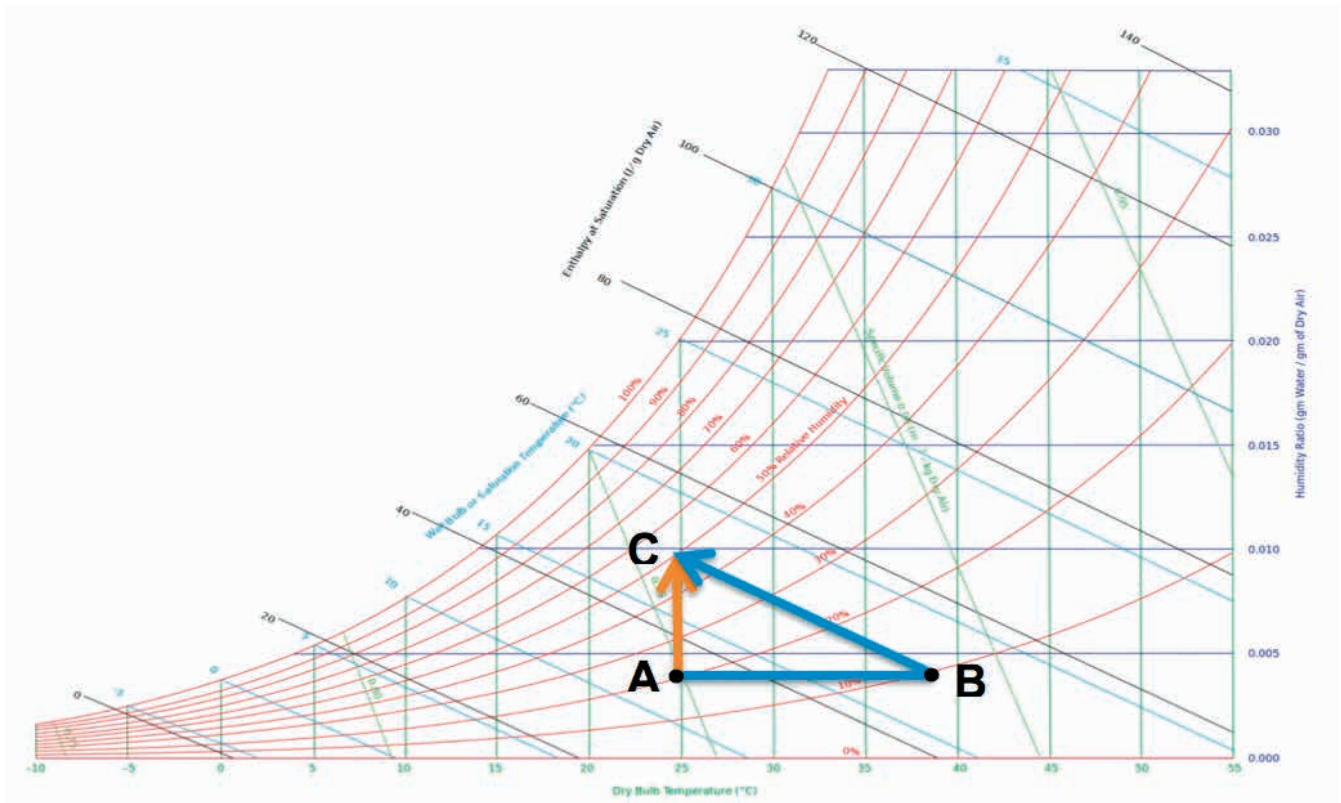
#### Gasgestookte bevochtiger

Deze systemen hebben eenzelfde werkingsprincipe als dat van bevochtigers met ondergedompelde elektrodes. Er is een aardgas- of LPG-brander gemonteerd binnen een warmtewisselaar die ondergedompeld is in het water. De productie wordt gemoduleerd door de gastoevoer aan te passen. Het belangrijkste voordeel zijn de lagere kosten van de energiebron vergeleken met elektriciteit, en daarom is deze oplossingen kosteneffectiever op plaatsen waar gas goedkoper is.



Om een snelle start van de productie te verzekeren als deze nodig is, moeten deze bevochtigers een voorverwarmingsfunctie hebben die het water op een temperatuur rond het kookpunt houdt, zodat het water snel kookt als dat nodig is.

De belangrijkste beperking van stoomtechnologie is zijn hoge energieverbruik, waardoor het mogelijk niet haalbaar is bij hoge bevochtigingsbelastingen door de hoge gebruikskosten.



*Figuur 6 - In tegenstelling tot isotherme bevochtigers (oranje pijl) koelen adiabatische bevochtigers de lucht. Om dezelfde instelpunten voor temperatuur en vochtigheid te bereiken (punt C), moet de lucht daarom worden voorverwarmd tot een hogere temperatuur (punt B). Gezien het zeer lage energieverbruik dat nodig is voor bevochtiging, neemt de energiebesparing evenredig toe met de efficiëntie van het verwarmingssysteem. Hetzelfde adiabatische effect kan worden benut in de zomer om de lucht te koelen.*

## Adiabatische bevochtigers

Adiabatische bevochtigers zorgen voor directe verdamping van water in de lucht zonder externe energie toe te voegen, en dus zonder de temperatuur te verhogen; de vereiste warmte voor verdamping wordt geleverd door de bevochtigde lucht, die vervolgens wordt gekoeld.

Deze apparaten creëren een groot contactoppervlak tussen de lucht en het water in vloeibare toestand, dat spontaan verdampt. Het belangrijkste voordeel van adiabatische bevochtiging is het zeer lage energieverbruik: de enige energie die nodig is, is voor het verstuiwen van het water in microscopisch kleine druppeltjes met een diameter van een paar micron.

Dit resultaat kan op verschillende manieren bereikt worden, afhankelijk van de gebruikte technologie. Hier beperken we ons tot drie van de meestgebruikte oplossingen:

- hogedruksproeiers;
- ultrasone verstuivers;
- systemen met bevochtigde media.

## Hogedruksproeiers

Deze apparaten zijn voorzien van een pomp die het water onder druk zet tot waarden tot meer dan 70 bar. Het water wordt gesproeid via een distributiesysteem met zeer kleine spuitmondjes dat geïnstalleerd is in het kanaal, en wordt zo fijn verstoven en makkelijk geabsorbeerd door de lucht. Deze apparaten kunnen een uitstekende nauwkeurigheid bereiken ( $\pm 2\%$ ) en een zeer hoge capaciteit, met een zeer laag energieverbruik ( $< 4$  W per liter verdampt water). Er wordt geen water gerecirculeerd en daarom is dit een hygiënisch veilige oplossing.

## Ultrasone verstuivers

Ultrasone bevochtigers atomiseren het water op een vergelijkbare manier als hogedrukbevochtigers, maar de verkregen druppeltjes zijn nog kleiner. De beste ultrasone bevochtigers kunnen een uitzonderlijke nauwkeurigheid bereiken ( $\pm 1\%$ ) en werken over het gehele bereik van de nominale capaciteit. Deze bevochtigers zijn dankzij hun hoge absorptie-efficiëntie ideaal voor distributie direct in de bevochtigde ruimte en in kanalen en zijn geschikt voor kleine en middelgrote installaties. De technologie is zeer geavanceerd en vereist over het algemeen een hogere begininvestering vergeleken met andere kleine bevochtigers. De hoge prestaties, het lage energieverbruik en het bijna niet-bestaande onderhoud zorgen echter voor een relatief snel rendement op de investering, vooral in modernisering voor het vervangen van stoomsystemen.

## Systemen met bevochtigde media

Deze technologie wordt ondanks een aantal problemen nog vrij algemeen gebruikt voor adiabatische bevochtiging in hoge volumes, omdat het een van de meest voordelige en makkelijk te installeren oplossingen is. Hoewel de nadelen misschien tolerabel zijn in andere toepassingen, zijn deze systemen niet geschikt voor musea:

- de nauwkeurigheid is te laag (over het algemeen  $\pm 10\%$ );
- de absorptie-efficiëntie is eveneens zeer laag, en het water moet gerecirculeerd worden om verspilling te voorkomen. Daardoor moeten er chemische biociden worden gebruikt om de vorming van bacteriekolonies te voorkomen;
- als gevolg van een zeer hoge drukdaling, verbruikt het ventilatiesysteem meer energie, zelfs in de zomer als het bevochtigingssysteem niet wordt gebruikt.

Gezien de laatste twee punten zijn de gebruikskosten hoger dan bij efficiëntere adiabatische systemen, die op de middellange en lange termijn de hogere kosten van de begininvestering terugverdienen.

# 4. Kiezen van het juiste bevochtigingssysteem

Als we naar dit onderwerp kijken, willen we nogmaals benadrukken dat er geen oplossing is die in absolute termen beter is dan de andere, maar dat dit afhangt van de individuele vereisten. Een goede richtlijn is te controleren of de oplossingen die geëvalueerd worden het best beantwoorden aan behoeften in termen van prestatie, betrouwbaarheid, hygiëne en connectiviteit, zoals beschreven in de eerste paragraaf van dit hoofdstuk.

Er zullen zowel isotherme als adiabatische oplossingen zijn die voldoen aan alle vereisten. Sommige objectieve criteria, samengevat in tabel VI en VII, kunnen echter een leidraad zijn voor gebruikers bij het maken van de juiste keuze.

## Distributiesysteem

Stoom of vocht kan rechtstreeks in de vitrines, de museumzalen (vanaf de muur of door de bevochtiger op de ventilatorspoelen of in het verlaagde plafond te installeren) of in de leidingen van het luchtbehandelingsysteem worden gedistribueerd. Niet alle typen bevochtigers zijn geschikt voor de verschillende mogelijke distributiesystemen.

## Grootte van het systeem

Afhankelijk van het gekozen distributiesysteem kan de bevochtigingsbelasting variëren van een paar honderd gram per uur (als gekozen wordt voor directe bevochtiging in de vitrine) tot honderden kilo's per uur (bij een luchtbehandelingssysteem dat verschillende ruimtes bedient). Ook in dit geval hangt het aantal mogelijke opties af van de situatie. Bij kleinere installaties zal de keuze waarschijnlijk zijn tussen een stoomapparaat en een ultrasone bevochtiger.

Ook de energievereisten van de oplossing moeten in overweging worden genomen. Sommige modellen stoombevochtigers met ondergedompelde verwarmers voldoen volledig aan alle vereisten voor museumtoepassingen. Hun hoge energieverbruik betekent echter dat de gebruikskosten te hoog zijn bij zeer grote systemen, in welk geval gasgestookte bevochtigers of adiabatiese systemen de voorkeur zullen hebben.

## Verdampingskoeling

Als u ook wilt profiteren van het verdampingskoelingseffect in de zomer, dan zijn adiabatiese bevochtigers de enige oplossing. Dit type toepassing kan volledig worden benut in warme en droge klimaten, waarbij de lucht tegelijkertijd bevochtigd en gekoeld wordt en de energiebesparingen daarmee zo groot mogelijk zijn. Het koelingseffect is 0,7 kW voor elke liter verdampt water, met een zeer laag energieverbruik.

Bevochtigertechnologie		Distributiesysteem		
		Vitrine	Zaal	Leidingen
Isotherm	Ondergedompelde elektrode			
	Verwarmer			
	Gasgestookt			
Adiabatisch	Hogedruksproeier		Mogelijk, maar niet aanbevolen in museumtoepassingen	
	Ultrasoon			
	Bevochtigde media			

Tabel VI - Compatibiliteit van bevochtigingstechnologieën met verschillende distributiesystemen

Bevochtigertechnologie		Bevochtigingsvraag			
		Zeer laag (<2 kg/u)	Laag (2-20 kg/u)	Gemiddeld (20-100 kg/u)	Hoog (>100 kg/u)
Isotherm	Ondergedompelde elektrode				Hoog energieverbruik
	Verwarmer				Hoog energieverbruik
	Gasgestookt				
Adiabatisch	Hogedruksproeier		Controleer minimale productie		
	Ultrasoon				
	Bevochtigde media				

Tabel VII - Compatibiliteit van bevochtigingstechnologieën met verschillende systeemgroottes





## Conclusies





# 1. Conclusies

Voor de correcte conservering van kunstwerken van historisch en artistiek belang is nauwkeurige en vooral constante controle van omgevingscondities door de tijd heen vereist. De materialen die gebruikt zijn om deze werken te maken, zijn gevoelig voor luchttemperatuur en relatieve vochtigheid, en in het bijzonder voor plotselinge variaties in deze condities als gevolg van allerlei interne en externe factoren. Zo hebben we gezien dat slechts een paar plotselinge schommelingen in de relatieve vochtigheid genoeg waren om onherstelbare schade aan schilderijen te veroorzaken. Gezien de artistieke, historische en economische waarde van de voorwerpen in kwestie, is bevochtiging in musea en bibliotheken daadwerkelijk een cruciale toepassing.

De aspecten die geanalyseerd zijn in dit document hebben geleid tot het vaststellen van verschillende minimumvereisten waaraan bevochtigingssystemen in musea moeten voldoen voor wat betreft prestaties, betrouwbaarheid en hygiëne. Geavanceerde connectiviteitsfuncties worden steeds wenselijker om regeling en bewaking van complexe systemen te vereenvoudigen, zoals bij grote musea, terwijl deze tevens de mogelijkheid bieden van gecentraliseerd beheer van meerdere locaties.

Bij het kiezen van een bevochtigingssysteem is een veelgemaakte fout om eenvoudigweg een aantal voorstellen te evalueren die schijnbaar gelijk zijn in termen van functies op basis van alleen de investeringskosten. In werkelijkheid hebben verschillende bevochtigingssystemen verschillende gebruiks- en onderhoudskosten, en de voordelen van wat een eerste besparing leek verdwijnen vaak na slechts een paar maanden en worden daarna een economisch verlies.

In het geval van isotherme bevochtigers wordt het feit dat apparaten met ondergedompelde elektrodes niet kunnen werken op gedemineraliseerd water en daarom frequent onderhoud vereisen, met periodieke reiniging of vervanging van de cilinders, vaak genegeerd.

Voor wat betreft adiabatische technologie leidt het kiezen voor een systeem met bevochtigde media tot slechte prestaties en de noodzaak van het gebruik van dure chemische biociden, periodieke analyse van de waterkwaliteit en vervanging van de media, en niet te vergeten de extra kosten door drukdaling, die het hele jaar door van toepassing zijn.

Over het algemeen is dezelfde redenering van toepassing op de vergelijking tussen isotherme en adiabatische technologie: de laatstgenoemde systemen zijn over het algemeen duurder, maar energiebesparing tijdens de werking garandeert een snellere terugverdiening van de investering bij een hogere bevochtigingsbelasting.

Gezien het feit dat het altijd prioriteit heeft om te voldoen aan alle vereisten die nodig zijn om optimale conservering van de kunstwerken te garanderen, leert de ervaring dat de beste resultaten gewoonlijk behaald worden met oplossingen die hogere eerste investeringskosten hebben, om de volgende drie hoofdredenen:

- efficiëntie van het airconditioningsysteem en nauwkeurigheid van het regelsysteem;
- geen bijkomende kosten door systemen met lagere prestaties;
- kwaliteit en frequentie van routinematig onderhoud.











## Headquarters ITALY

### CAREL INDUSTRIES Hqs.

Via dell'Industria, 11  
35020 Brugine - Padova (Italy)  
Tel. (+39) 0499 716611 - Fax (+39) 0499 716600  
carel@carel.com

## Sales organization

CAREL Asia Ltd.  
[www.carel.com](http://www.carel.com)

CAREL Australia Pty Ltd.  
[www.carel.com.au](http://www.carel.com.au)

CAREL Central and Southern Europe  
[www.carel.com](http://www.carel.com)

CAREL Deutschland GmbH  
[www.carel.de](http://www.carel.de)

CAREL Electronic (Suzhou) Co. Ltd.  
[www.carel-china.com](http://www.carel-china.com)

CAREL France Sas  
[www.carelfrence.fr](http://www.carelfrence.fr)

CAREL HVAC/R Korea Ltd  
[www.carel.com](http://www.carel.com)

CAREL Controls Ibérica, S.L.  
[www.carel.es](http://www.carel.es)

CAREL Italy  
[www.carel.it](http://www.carel.it)

CAREL ACR Systems India (Pvt) Ltd.  
[www.carel.in](http://www.carel.in)

CAREL Mexicana S de RL de CV  
[www.carel.mx](http://www.carel.mx)

CAREL Middle East DWC LLC  
[www.carel.com](http://www.carel.com)

CAREL Nordic AB  
[www.carel.com](http://www.carel.com)

CAREL Russia LLC  
[www.carelrussia.com](http://www.carelrussia.com)

CAREL Controls South Africa (Pty) Ltd.  
[www.carelcontrols.co.za](http://www.carelcontrols.co.za)

CAREL Sud America Instrumentação Electronica LTDA  
[www.carel.com.br](http://www.carel.com.br)

CAREL Thailand Co., Ltd.  
[www.carel.co.th](http://www.carel.co.th)

CAREL U.K. LTD  
[www.careluk.co.uk](http://www.careluk.co.uk)

CAREL U.S.A. L.L.C.  
[www.carelusa.com](http://www.carelusa.com)

## Affiliates

CAREL Czech & Slovakia  
CAREL spol. s.r.o.  
[www.carel-cz.cz](http://www.carel-cz.cz)

CAREL Ireland  
FarrahVale Controls & Electronics Ltd.  
[www.carel.com](http://www.carel.com)

CAREL Japan Co., Ltd.  
[www.carel-japan.com](http://www.carel-japan.com)

CAREL Turkey  
CFM Sogutma ve Otomasyon San. Tic. Ltd.  
[www.carel.com.tr](http://www.carel.com.tr)