

Baanbrekend concept voor verwarming en koeling

Thomas Kresse

Voor de realisatie van energie-efficiënte verwarmingsinstallaties voor gebouwen vormt de inbouw van warmtepompen een optimale variant. De rentabiliteit van de verwarming is echter niet alleen een functie van de constructie van de warmtepomp, maar hangt sterk af van de efficiëntie van de energiewinning uit de habitat en van de warmteafgifte-systemen. Capillaire buismatten voldoen aan al deze eisen.

In Duitsland zagen ze in een vroeg stadium al in dat voor de genoemde opgaven het gebruik van capillaire kunststofbuis-matten zeer efficiënte oplossingen mogelijk maakt. Daarom heeft het Duitse ministerie van Economische Zaken en Technologie op dit gebied tijdens de afgelopen negen jaar omvangrijke onderzoeksprojecten geïnitieerd. De Westsächsische Hochschule Zwickau (FH) en fabrikant Clina hebben de uitvoering van de onderzoeken verricht. Voor het grootste deel van de theoretische werkzaamheden en de bijbehorende rekenprogramma's heeft prof. dr.-ing. Bernd Glück getekend.

Alle onderzoeksrapporten en simulatiemodellen zijn met toestemming van de projectpartners op internet gepubliceerd en zijn gratis in het Duits (bijvoorbeeld via www.berndglueck.de) te downloaden. Hier zijn de grondbeginselen van de capillaire buistechiek te vinden [1]; toepassingen van capillaire buismatten voor bijvoorbeeld vloerverwarming, muurverwarming, plafonddoeling, PCM-accumulatieplaten, koelschachten, koelzuilen, gebruik van luchtenthalpie door een wikkelpakket [2] en gebruik van grondwarmte door een collector [3]. Verder wordt een kort overzicht gegeven van de resultaten van de jarenlange werkzaamheden en over de ontwikkelde systemen.

AANDRIJFVERMOGEN VAN DE WARMTEPOMP

Uitgaande van kleine temperatuurspreidingen tussen aanvoer en retour, kunnen op eenvoudige wijze de gemiddel-

de mediatemperaturen aan de warmtebronzijde T_Q en aan de verwarmingszijde T_H worden gebruikt. Voor het aandrijfvermogen van de warmtepomp geldt dan het volgende:

$$P_{WP} = 1 - \frac{T_Q}{T_H} \cdot \dot{Q}_H \frac{1}{\zeta_{WP}} \quad (1)$$

Vanzelfsprekend moet de noodzakelijke verwarmingscapaciteit van gebouwen \dot{Q}_H door warmte-isolatie klein zijn. Het exergetische rendement van de warmtepomp (benaming volgens Baehr) ζ_{WP} moet groot zijn (door een goede machineconstructie).

Om de factor $(1 - T_Q / T_H)$ klein te houden, moeten zo efficiënt mogelijke installatiesystemen voor de warmteoverdracht worden toegepast. De verschillen voor een aantal praktische gevallen staan in tabel 1. Wanneer bijvoorbeeld door een geoptimaliseerd brongebruik de temperatuur van de zoutoplossing (verder te noemen 'brine') van -8°C tot -4°C kan toenemen en tevens door een beter oppervlakteverwarmingssysteem de gemiddelde aanvoertemperatuur van het cv-water van 45°C tot 27°C kan afnemen, dan neemt in dit praktische geval de capaciteitsfactor af van 0,17 tot 0,10. Dit resulteert dan in een besparing van 41 procent. Hieruit blijkt dat een wijziging van de genoemde gemiddelde temperaturen zeer lonend is.

brine-temperatuur	4 °C			0 °C			-4 °C			-8 °C		
	45 °C	36 °C	27 °C	45 °C	36 °C	27 °C	45 °C	36 °C	27 °C	45 °C	36 °C	27 °C
$1 - T_Q / T_H$	0,13	0,10	0,08	0,14	0,12	0,09	0,15	0,13	0,10	0,17	0,14	0,12

Tabel 1. Invloed van de gemiddelde brine-temperatuur $T_Q = t_Q + 273\text{ K}$ en van de gemiddelde verwarmingstemperatuur $T_H = t_H + 273\text{ K}$ op het aandrijfvermogen van de warmtepomp.

collectortype	d_s mm	s mm	buisafstand mm	ρ_R kg/m ³	λ_R W/(mK)	c_R J/(kgK)	w m/s	vloeistof
PE-slangen	32	2,9	500	930	0,38	2000	0,9	Tyfocon L 40 %
capillaire buisemat	4,3	0,8	20	897	0,21	2000	0,2	(Vol)

Tabel 2. Buisafmetingen en materiaalgegevens van de onderzochte aardwarmtecollectoren.

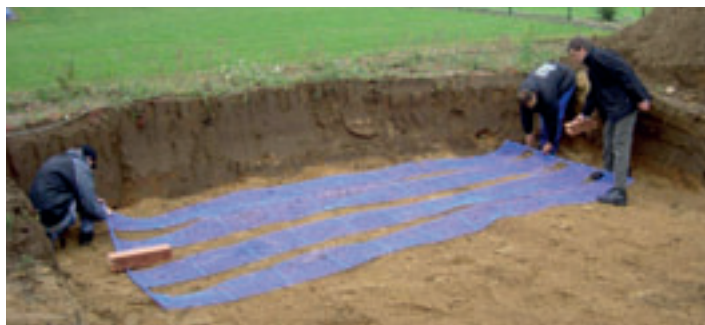
EFFICIËNTE SYSTEMEN GEBRUIK WARMTEBRON

In [2, pagina 283 en verder] zijn de in tabel 2 genoemde aardwarmtecollectoren onderzocht. Deze liggen op een diepte van 1,20 m (afbeelding 1). Volgens een bepaald belastingsmodel wordt 1.997 uur volle belasting per jaar aangenomen. Dat is gelijk aan het aantal uur onttrekking van een constante, vooropgestelde warmtestroomdichtheid uit de aardcollector van $q = 20 \text{ W/m}^2$, respectievelijk 40 W/m^2 .

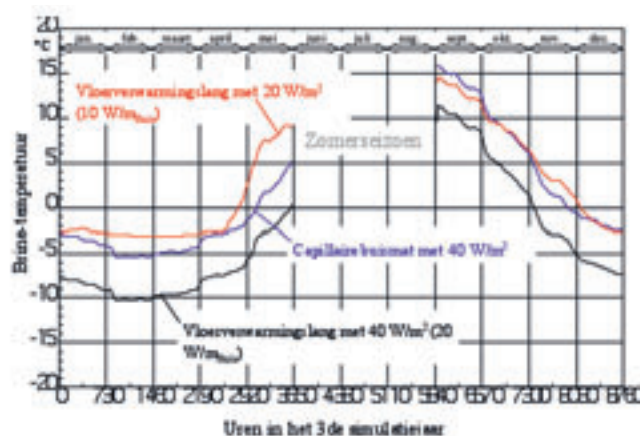
De zoutoplossingstemperatuur wordt door een 'regeling in het simulatiemodel' zodanig ingesteld dat de vereiste warmtestroomdichtheid tijdens de duur van de onttrekking wordt aangehouden. De gebruiksuren zijn over de maanden, afhankelijk van de buitentemperaturen, verschillend verdeeld. De in de loop van een jaar wisselende brine-temperatuur ligt bij dezelfde warmtestroomdichtheid in het geval van capillaire buismatten gemiddeld 4,7 K hoger dan bij het traditionele slangenregister. Dit betekent een aanzienlijk thermodynamisch en bijgevolg economisch voordeel voor de werking van de warmtepomp. Het voordeel van de hogere brine-temperatuur bij dezelfde belasting is het hele jaar gewaarborgd. Voor het verloop tijdens een jaar verwijzen wij naar afbeelding 2.

Als alternatief hiervoor is bij het gebruik van capillaire buismatten bij een ongewijzigde brine-temperatuur ook een overeenkomstige verkleining van het warmteoverdrachtsoppervlak van de collector mogelijk. Bij kleiner wordende perceeloppervlakten, en om kosten te besparen, is bovendien het gecombineerde, tijdelijke energiegebruik uit de atmosferische lucht zinvol. Een spiraalvormige wikkelconstructie op basis van capillaire buismatten met radiale luchtdoorstroming (afbeelding 3) vormt een zeer goede oplossing voor lucht-vloeistofwarmtewisselaars. Ook in deze warmtewisselaar stroomt brine en deze is, wanneer naar de aardwarmtecollector wordt omgeschakeld, als extra warmtebron voor de warmtepomp bruikbaar.

De hierboven aangestipte collectoren met capillaire buismatten en de luchtenthalpiesensor zijn met een omschakelalgoritme gesimuleerd, zodat steeds de hogere zoutoplossingstemperatuur is toegepast. Het temperatuurverloop van de zoutoplossing gedurende het jaar is te zien in afbeelding 4. De zoutoplossingstemperatuur steeg in jaarlijks gemiddelde van $-1,5 - +0,1 \text{ }^\circ\text{C}$, bij hetzelfde onttrekkingsvermogen van 40 W/m^2 . De aardwarmtecollector wordt jaarlijks nog maar voor ongeveer 75 procent van de bedrijfsuren gebruikt. De resterende tijd dient de lucht-brine-warmtewisselaar als warmtebron voor de warmtepomp. Interessant is ook de vergelijking met de spiraalbuiscollector



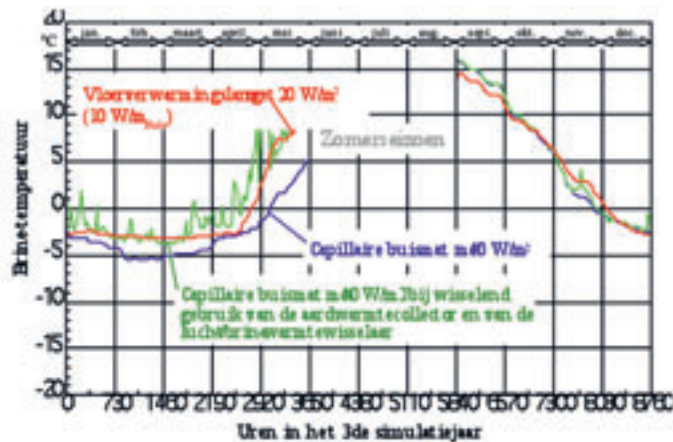
1. Plaatsing van een aardwarmtecollector op basis van capillaire kunststofbuismatten van de firma Clina.



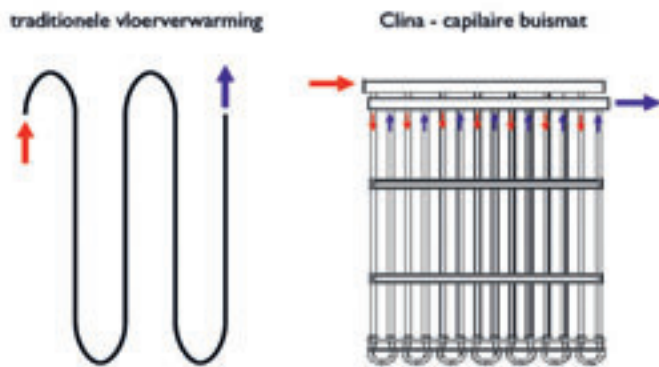
2. Brine-temperatuur (gemiddelde waarde van aanvoer en retour) over het jaar voor drie verschillende simulatievoorbeelden.



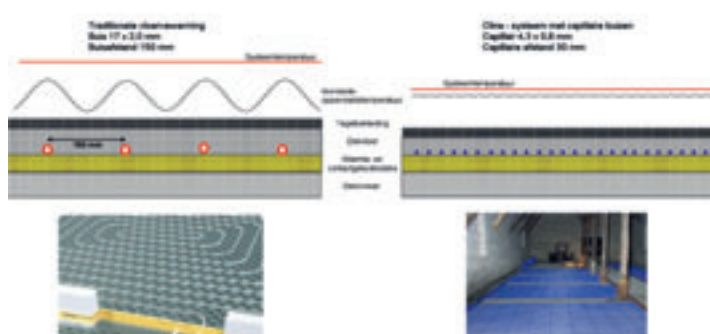
3. Lucht-/brine-warmtewisselaar (afkoeling van een geforceerde luchtstroom door een brine-warmtewisselaar met capillaire buismatten van de firma Clina; apparaatmantel is verwijderd).



4. Brine-temperatuur (gemiddelde waarde van aanvoer en retour) over een jaar bij verschillende collectortypen, overdrachtscapaciteit en bedrijfsvarianten.



5. Vergelijking in doorstroming van een traditionele vloerverwarmingslang en de capillaire kunststofbuis-matten.



6. Vergelijking systeemtemperatuur/oppervlaktetemperatuurprofiel van een traditionele vloerverwarmingslang en een systeem met de Clina capillaire kunststof buismatten.

bij halve belasting (20 W/m^2). De gemiddelde jaartemperatuur van de zoutoplossing is bij collectoren met capillaire buismatten (40 W/m^2) $0,4 \text{ K}$ hoger.

Een andere, bijkomende mogelijkheid is actieve regeneratie van de aardwarmteaccumulators, bijvoorbeeld met de omgevingsenergie uit de lucht of uit de zonnecollectoren. Verder is het mogelijk de in de zomer in een gebouw verzamelde warmte via dicht bij de oppervlakte geïnstalleerde capillaire kunststofbuis-matten op te nemen en naar de aardwarmteaccumulator te verplaatsen. Daardoor wordt bovendien het gebouw, zonder mechanische koudeopwekking, passief en milieuvriendelijk gekoeld en wordt tevens het thermische comfort binnen aanzienlijk verbeterd.

EFFICIËNTE RUIMTEVERWARMINGSSYSTEMEN

In [2, pagina 70 en verder] zijn verschillende vloerverwarmingen gesimuleerd, een traditionele oplossing met slangen in een 65 mm dikke deklaag en de plaatsing van capillaire kunststofbuis-matten in een 9 mm dunne gietmassa. Door de geringere buisafstand ontstaat een beduidend groter oppervlak van de parallelle doorstroming (afbeelding 5) en dankzij de plaatsing dicht bij de oppervlakte, komen bij vloerverwarmingen met capillaire buismatten beduidend hogere warmtestroomdichtheden tot stand dan bij de traditionele variant. Zo is bij het systeem met capillaire buizen al bij een gemiddelde watertemperatuur van circa $30 \text{ }^\circ\text{C}$ een nuttig rendement binnen een ruimte van 80 W/m^2 bij een $R_{\lambda B} = 0,05 \text{ m}^2\text{K/W}$ bereikbaar. In het traditionele geval is daarentegen zelfs bij een beperkte buisafstand van 150 mm bijna $40 \text{ }^\circ\text{C}$ noodzakelijk (afbeelding 6).

Verder onderscheiden vloerverwarmingen met capillaire kunststofbuis-matten zich vanwege hun geringere inertie door een beduidend kortere opwarmings-tijd. Op de website van VV+ is een grafiek van het opwarmingsproces te zien. Bij een centrale ligging van de matten in de deklaag en een $RA = 30 \text{ mm}$, heeft een vloerverwarming met capillaire buismatten van kunststof in vergelijking met traditionele systemen met een $RA = 300 \text{ mm}$ een 78 procent kortere opwarmings-tijd. Zelfs wanneer als referentiewaarde het krap geplaatste traditionele systeem met een $RA = 150 \text{ mm}$ wordt gekozen, is de opwarmings-tijd van de variant met capillaire buizen in de deklaag nog altijd 65 procent korter.

Een technisch uiterst progressief product is de in een profielfolie bevestigde capillaire buismat van het type 'Folimat'. Deze buismat kan ook aan muren of plafonds worden 'gehangen' (afbeelding 7). Op de vloer, vlak onder de bovenste vloerbedekking in een dunne gietmassa gelegd, verkort deze



variant de opwarmingstijd nogmaals met minstens tweederde in vergelijking met de capillaire buismat in de deklaag. Op grond van de zeer geringe opbouwhoogte is dit product ook uitermate geschikt voor renovatieomstandigheden (afbeelding 8).

Over het algemeen is het uiteraard voordelig de verwarmingsoppervlakten in de ruimte zo groot mogelijk in te richten (bijvoorbeeld vloeren plus wanden). Dit heeft een uiterst positieve invloed op de behaaglijkheid. Tevens kan de gemiddelde verwarmingswatertemperatuur daardoor verder afnemen, wat de energiebesparende werking van de warmtepomp ten goede komt. Een allesomvattend praktijkvoorbeeld is te zien in afbeelding 9.

BIJKOMENDE FUNCTIE RUIMTEKOELING

De overwegingen tot nu toe golden vooral voor de ruimteverwarming. Bij capillaire buismatten van kunststof is het vanwege de zeer kleine buisafstanden ook uitstekend mogelijk de thermisch geactiveerde oppervlakten te gebruiken voor ruimtekoeling, met mediatemperaturen die dicht bij de kamertemperatuur liggen. Wand- en plafondoppervlakken zijn daar uitermate geschikt voor: Indien er zomerse kamertemperaturen op een bepaald niveau moeten worden gega-randeerd, is het aan te bevelen voor de actieve koeling een omschakelbare warmtepomp toe te passen.

LUCHTKOELING EN LUCHTONTVOCHTING

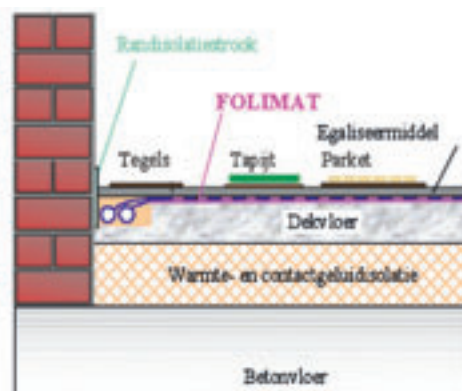
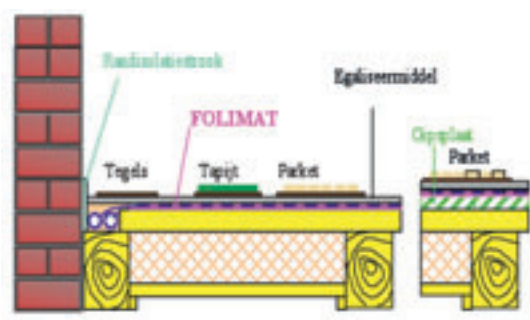
Wanneer een omschakelbare warmtepomp wordt gebruikt, werkt deze in de zomer als koelmachine. Daarbij gelden in principe dezelfde overwegingen voor de toename van de efficiëntie als bij de verwarming: kleine temperatuurstijging, grote koeloppervlakken in de ruimte, enzovoort.



7. Systeem op basis van capillaire buismatten type Folimat voor thermisch te activeren vloeren, wanden en plafonds.



9. Voorbeeld van een uitgebreide toepassing van kunststof capillaire buismatten van de firma Clina voor het verwarmen en koelen van een huis met een warmtepomp als opwekker van verwarmd en gekoeld water voor verwarmen en koelen.



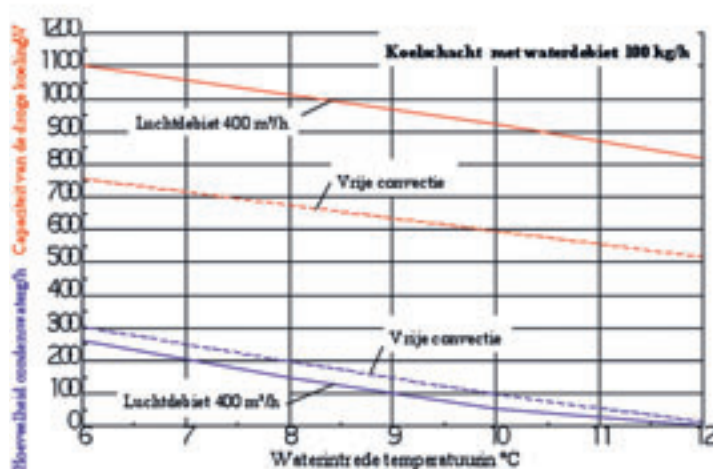
8. Mogelijkheden van vloerverwarming bij renovatie van oude gebouwen met het systeem op basis van kunststof capillaire buismatten type Folimat (product van de firma Clina).



Uiteraard moet de temperatuur van een koeloppervlak in de zomer boven het dauwpunt liggen. Als het gevaar bestaat dat het dauwpunt niet wordt bereikt, volgt ter preventie van condensvorming ofwel een door de geïntegreerde dauwpuntopnemer tot stand gebrachte nooduitschakeling, ofwel een stijging van de aanvoertemperatuur van het koelsysteem.

Op basis van de capillaire kunststofbuismatten zijn verschillende convectief werkende koelementen ontwikkeld en onderzocht om de koelfunctie ook bij een heet en vochtig klimaat te garanderen en om zeer hoge koelcapaciteiten te bereiken. Samen met de luchtcooling bewerkstelligen deze een aanzienlijke luchtontvochtiging. Hiertoe dienen speciale koelschachten. Voor nadere details verwijzen wij naar [2, pagina 164 en verder].

Normaliter werkt de koelschacht onder invloed van de zwaartekracht, zonder enige vorm van aandrijving, als 'stille koeling'. De capaciteitsregeling kan in overeenstemming met de ruimtetemperatuur of op basis van de vochtigheidsgraad of van de ruimtelucht plaatshebben. Hierbij kan de wateraanvoertemperatuur en/of het waterdebiet als regelgrootte worden toegepast. Voor een toename van de capaciteit kan – indien gewenst – nog een ventilator worden bijgeschakeld. Door een juiste keuze van de constructiegrootte



10. Capaciteit van een koelschacht op basis van zwaartekracht en bij geforceerde doorstroming afhankelijk van de wateraanvoertemperatuur bij een ruimtetemperatuur van 24 °C en een relatieve vochtigheid van 50 procent.

De totale capaciteit van de koelschacht vloeit voort uit het vermogen van de droge koeling plus de condensatiewarmte. Deze bedraagt bijvoorbeeld bij een wateraanvoertemperatuur van 6 °C bij natuurlijke convectie 964 W en bij een luchtdébit van 400 m³/h 1.277 W.

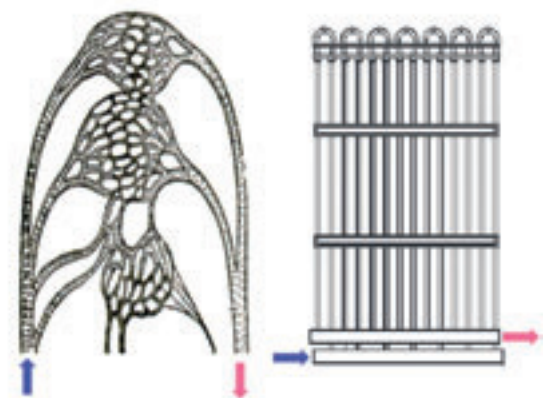
en de watervulling is nagenoeg elke koel- dan wel ontvochtigingscapaciteit te realiseren. Afbeelding 10 levert hiertoe de eerste aanknopingswaarden. Bijkomende vermogenssimulaties zijn met het in [2] gepubliceerde rekenprogramma mogelijk.

WAT MAAKT UNIVERSEEL GEBRUIK VAN CAPILLAIRE BUISMAT MOGELIJK?

Nu enkele toepassingen van de capillaire buismat van kunststof zijn getoond, rijst de 'filosofische' vraag wat de oorzaak voor de efficiënte toepassingsmogelijkheid van de capillaire buismat is.

De nog jonge wetenschap biotechniek leert hoe de natuurlijke processen – vooral op het terrein van de biologie – naar het domein van de techniek zijn over te dragen. Een kanttekening hierbij is dat altijd slechts gedeelten van de complexe processen kunnen worden overgedragen.

Voor wat betreft de warmtewisselaars met een vlakke vorm is sprake van een analogie met de doorbloeding van het menselijk lichaam. Bewust wordt niet over de bloedsomloop in zijn totaliteit gesproken, omdat deze functie dusdanig complex is dat een 'imitatie' volslagen utopisch zou zijn. De bloedsomloop, die de warmte naar buiten afgeeft, is door een technische omzetting van de componenten van de ca-



11. Deel van de menselijke bloedsomloop in vergelijking met de capillaire buismat van kunststof. In beide gevallen volgt er een verdeling van de totale massastroom in parallel doorstroomde vloeistofkanalen. De stroomsnelheden in de aderen en in de capillaire buizen liggen in dezelfde orde van grootte van 0,05 tot 0,2 m/s.



pillaire buismatten daarmee te vergelijken (afbeelding 11). Hieronder volgt een samenvatting van de analogie in de zin van de biotechniek.

- Het efficiënte, economische warmtetransport heeft in beide gevallen plaats met een vloeibare warmtewisselaar.
- De vloeistofbelasting van de verwarmings- en koeloppervlakte door parallel doorstroomde buisjes wordt beschouwd als analoog met de bloedsomloop, die door de evolutie is 'geoptimaliseerd'.

Een ander voorbeeld stamt uit de hydrografie. Een waterloop naar een breed riviereiland vormt dan bijvoorbeeld meanders (te vergelijken met slangen) als deze door de gegeven glooiing energie mag 'verkwisten'. Als er nauwelijks potentiële energie voorhanden is, stroomt de loop naar parallelle vertakkingen, zoals in een rivierdelta gebruikelijk is (te vergelijken met buismatten).

- De geringe afstand van de vloeistofkanalen bewerkstelligt, ook zonder warmtegeleidende ribben, een homogene temperatuurverdeling over het geactiveerde oppervlak. Extra warmtegeleidende ribben tussen de vloeistofkanalen, zoals bij traditionele vloerverwarmingen bij de droge plaatsingsmethode gebruikelijk, leveren bij de kleine buisafstanden geen merkbare verbeteringen op. In plaats daarvan kunnen eventueel kleinere buisafstanden zinvol zijn. De natuur werkt blijkbaar volgens hetzelfde bouwprincipe.
- Alle materialen zijn 'corrosiebestendig'. In waterkringlopen met capillaire buismatten van kunststof mogen er vanwege de zuurstofdiffusie door het materiaal polypropyleen (PP) ook geen corrosieve materialen zijn ingebouwd. Er worden uitsluitend geschikte kunststoffen of hoogwaardige metalen, zoals roestvast staal en/of messing, gebruikt. Daardoor zijn alle door zuurstof of bacteriën veroorzaakte corrosieprocessen die later tot een functiestoring van de installatie zouden kunnen leiden van meet af aan definitief uitgesloten.

Omdat eveneens zeer goed wordt voldaan aan de uiteenlopende thermodynamische, hydraulische en bouwtechnische vereisten, is het mogelijk een optimale technische oplossing te ontwikkelen volgens een homogeen constructieprincipe. We moeten met veel verbeeldingskracht nieuwe constructies ontwerpen. De evolutie probeert immers ook heel wat dingen uit. Hindernissen die vaak bij de ambachtelijke realisatie met nieuwe bouwmaterialen of halffabricaten worden gezien, mogen met het oog op de enorme technische ontwikkelingsmogelijkheden – vooral in de bouwwereld – niet overhaast naar voren worden gebracht.



12. Gebruik van warmte-energie uit een rivier bij een gemaal.

In deze context moet nog de speciale toepassing in afbeelding 12 worden vermeld. Op www.vvplus.nl is een conceptstudie voor verdere ontwikkeling van het systeem te zien.

Literatuur

- [1] PTJ-onderzoeksrapport 2003: milieuvriendelijke ruimteverwarming en -koeling door polyvalent gebruik van capillaire buismatten van kunststof, <http://berndglueck.de/Kapillarohrmatten>.
- [2] PTJ-onderzoeksrapport en rekenprogramma's 2008: innovatieve warmteoverdracht en warmteaccumulatie, <http://berndglueck.de/LowEx>.
- [3] Privéonderzoeksrapport en rekenprogramma 2009: simulatiemodel 'Aardwarmtecollector' voor de warmtetechnische beoordeling van warmtebronnen, koudebronnen en warmte- en koudeaccumulatoren, <http://berndglueck.de/Erdwaermekollektor>.

Auteur

Dipl.-Ing. Thomas Kresse, Clina Heiz- und Kühlelemente, Berlin

