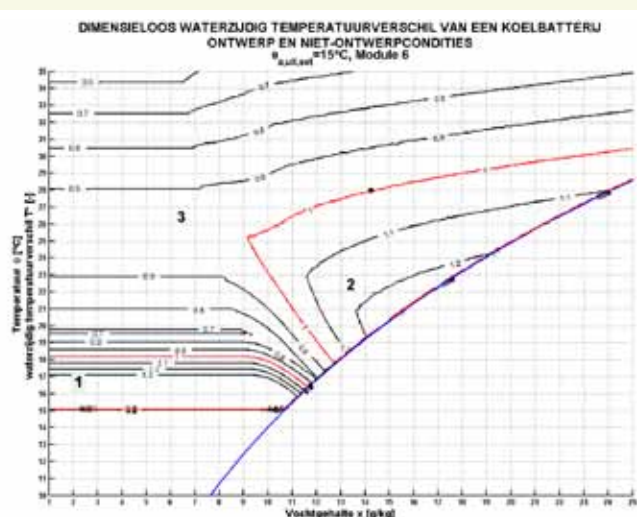


Deellastgedrag van een koelbatterij in een Nederlands klimaat

In een eerder artikel [1] is een nieuwe wijze gepresenteerd waarmee de waterzijdige prestaties van een koelbatterij in niet-ontwerpcondities weergegeven kunnen worden. Het bleek dat het waterzijdig temperatuurverloop in deellast niet altijd stijgt zoals algemeen verondersteld wordt. Dit wordt nu verder toegelicht door een heel jaar te bekijken in een Nederlands klimaat. De keuze van de water- en luchttemperaturen blijkt van grote invloed op het waterzijdig temperatuurverschil in deellast en kan zelfs leiden tot een uitsluitend ongewenst dalend karakter. De resultaten worden verwerkt in een temperatuurverschil-duurkromme. Ten slotte wordt het gemiddeld gewogen temperatuurverschil berekend, waarmee de benutting van een warmte- en koudeopslagsysteem (WKO) berekend kan worden.

Ir. A.H.T.M. (Alet) van den Brink, Kropman Installatietechniek, afdeling Ontwerp en Techniek; ir. G. (Gert) Boxem en dr.ir. A.W.M. (Jos) van Schijndel, Technische Universiteit Eindhoven



-Figuur 1- Lijnen van constante waterzijdige temperatuurverschillen T^* van koelbatterij no.1 voor ontwerp- en niet-ontwerpcondities, smooreschakeling

In het eerste artikel [1] is figuur 1 weergegeven met de (contour) lijnen van constante waterzijdige genormaliseerde temperatuurverschillen T^* . Deze vormen het verband tussen het genormaliseerde vermogen P^* en het genormaliseerde waterdebiet q_m^* . Twee conclusies zijn dat (I) er geen eenvoudig verband is tussen het koelvermogen en het waterzijdig temperatuurverschil en (II) het waterzijdig temperatuurverschil in deellast niet uitsluitend stijgt (gebied 3) zoals in ISSO-publicatie

Dit artikel maakt deel uit van een serie van artikelen waarbij bij de huidige kennis van waterzijdige systemen wordt aangevuld

		Koelbatterij no.1	Koelbatterij no.2
Debiet (lucht)	V_a	0,93m ³ /s	0,93m ³ /s
Debiet (water)	$q_{m,nom}$	1,15kg/s	1,12kg/s
Luchtintredetemperatuur	$\theta_{a,in}$	28°C	28°C
Luchtuitredetemperatuur	$\theta_{a,uit}$	15°C	11,47°C
Vermogen	P_{nom}	27.980W	35.520W
Vochtgehalte, uitrede	$x_{a,uit}$	9,6g/kg	8,4g/kg
Vochtgehalte, intrede	$x_{a,in}$	14,3g/kg	14,3g/kg
Waterintredetemperatuur	$\theta_{in,nom}$	6°C	9°C
Wateruitredetemperatuur	$\theta_{uit,nom}$	11,8°C	16,6°C

-Tabel 1- Ontwerp koelbatterijen

	Koelbatterij no.1	Koelbatterij no.2
Breedte koelbatterij	0,61 m	0,61 m
Hoogte koelbatterij	0,61 m	0,61 m
Aantal rijen	4	12
Rijafstand	32,8 mm	32,8 mm
Aantal circuits	20	20
Buitendiameter buis	7 mm	7 mm
Binnendiameter buis	6 mm	6 mm
Aantal vinnen	433 m ⁻¹	450 m ⁻¹
Dikte vin	0,165 mm	0,165 mm
Vervuilingweerstand	0 m ² .K/W	0 m ² .K/W
Materiaal buis	koper	koper
Materiaal vinnen	aluminium	aluminium

-Tabel 2- Fysieke afmetingen koelbatterijen

47 wordt weergegeven.

Figuur 1 geeft een breed beeld van de mogelijke combinaties van inredende luchttemperaturen en vochtgehalten van koelbatterij no.1 (zie tabel 1 en 2) in de luchtbehandelingskast. Echter, in het wisselende Nederlands klimaat komt slechts een deel van de combinaties voor met verschillende frequenties. Alleen aan de hand van figuur 1 kan geen uitspraak gedaan worden over kenmerken van het waterzijdig temperatuurverschil over het gehele jaar. De doelen zijn: het inzicht in het deellastgedrag van een koelbatterij verder te vergroten, een handvat aan te reiken om vast te stellen of een stijgend of dalend waterzijdig temperatuurverschil optreedt en een kengetal aan te reiken dat gebruikt kan worden bij het ontwerpen en analyseren van gekoeldwaterinstallaties. De resultaten zijn genormaliseerd met behulp van het nominale vermogen P_{nom} [W], het nominale waterzijdig temperatuurverschil $(\theta_{uit,nom} - \theta_{in,nom})$ [K] en het nominale waterzijdig debiet $q_{m,nom}$ [kg/s], alle bij de ontwerpconditie. Deze genormaliseerde grootheden worden als volgt berekend:

$$P^* = P / P_{nom}$$

waarin:

P^* = het genormaliseerde dimensieloos vermogen [-]

P = het berekende totaal vermogen van de luchtintredeconditie [W]

P_{nom} = het totaal vermogen onder ontwerpcondities [W].

$$T^* = (\theta_{uit} - \theta_{in}) / (\theta_{uit,nom} - \theta_{in,nom})$$

waarin:

T^* = het genormaliseerde waterzijdige temperatuurverschil [-]

θ_{uit} = de wateruitredetemperatuur [°C]

θ_{in} = de waterintredetemperatuur bij de luchtintredeconditie [°C]

$\theta_{in,nom}$ = de waterintredetemperatuur onder ontwerpcondities [°C]

$\theta_{uit,nom}$ = de wateruitredetemperatuur onder ontwerpcondities [°C]

$$q_m^* = q_m / q_{m,nom}$$

waarin:

q_m^* = het genormaliseerde waterzijdige debiet [-]

q_m het berekende debiet [kg/s]

$q_{m,nom}$ het debiet onder ontwerpcondities [kg/s].

Oftewel, voor de intredeconditie geldt: $P^* =$

$$q_m^* = T^* = 1.$$

Daarnaast wordt het gemiddelde genormaliseerde waterzijdig temperatuurverschil T^*_{avg} [-] over een periode van n uren berekend:

$$T^*_{avg} = \frac{\sum_{k=1}^{k=n} T^*_k}{n}$$

waarin:

T^*_k = het waterzijdig temperatuurverschil op tijdstip k [-]

n = het aantal uren gedurende het jaar waar koelenergie wordt afgenomen [-].

Dit waterzijdig temperatuurverschil T^*_{avg} is toepasbaar bij koelmachines.

Bij het gemiddeld gewogen waterzijdig temperatuurverschil T^*_m [-] wordt voor thermische opslagsystemen (WKO) het gemiddeld temperatuurverschil gecorrigeerd voor het debiet en geeft het gemiddelde temperatuurverschil van de warme bron op jaarbasis.

$$T^*_m = \frac{\sum_{k=1}^{k=n} q_m^*_k \cdot T^*_k}{\sum_{k=1}^{k=n} q_m^*_k}$$

waarin:

$q_m^*_k$ = het momentane debiet [-]

T^*_k = het momentane temperatuurverschil op tijdstip k voor n waarden [-].

Dit temperatuurverschil is gerelateerd aan de ontwerpwaarde waarbij de waarde van $T^*_m = 1$ overeenkomt met het waterzijdig temperatuurverschil in vollast. De algemene verwachting is dat deze waarde groter wordt, omdat de retourwatertemperatuur in deellast stijgt [4]. In [1] is reeds besproken dat de retourwatertemperatuur niet uitsluitend stijgt en de invloed op de gemiddelde temperaturen van het water op jaarbasis wordt hier besproken. De ontwerpintredeconditie bedraagt 28°C/60% ($x_{in,nom}=14,3g/kg$) bij een constante luchtdruk van 101,325kPa. In dit artikel wordt gebruik gemaakt van de uurlijkse data van het klimaatjaar 1964/1965 (1 april 1964 – 31 maart 1965), van het meetstation De Bilt [3].

TOELICHTING GRAFIEKEN

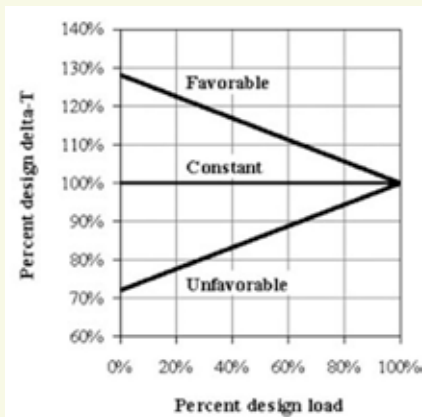
In het eerste artikel zijn de algemene presentaties van een koelbatterij weergegeven in het Mollier-diagram. Hierin is weergegeven hoe de koelbatterij presteert in ontwerp en niet-ontwerpcondities voor een breed scala

van mogelijke luchtintredecondities. Voor het specifieke Nederlandse klimaat geeft dit geen goed beeld. Niet elke luchtintredeconditie komt voor. Zo is een luchtintredeconditie van 30°C/20% niet reëel maar een luchtintredeconditie van 18°C/80% wel. Daarnaast bezit het Mollier-diagram geen tijdslelement. Zo wordt de ontwerpconditie gedurende <1% van de tijd overschreden maar komt een intrede-temperatuur van 18°C veel vaker voor. Om deze redenen is het Mollier diagram voor het specifieke Nederlandse klimaat niet geschikt om de jaarlijkse waterzijdige kenmerken weer te geven. Daarom worden de genormaliseerde waterzijdige debieten q_m^* en genormaliseerde temperatuurverschillen T^* als functie van het totaal koelvermogen P^* uitgezet tegen de achtergrond van drie typische temperatuurverschillen in deellast, zoals te zien in figuur 2 [2]. De lijn *Favorable* geeft het gewenste temperatuurverloop en zorgt voor een dalend debiet, een stijgend temperatuurverschil en komt overeen met het stijgend vermogen bij een dalende lucht-intredetemperatuur van de condensor. Bij de lijn *Constant* blijft het temperatuurverschil constant bij een dalende vermogensvraag, waardoor het debiet stijgt ten opzichte van het *Favorable* verloop bij gelijke vermogens. De lijn *Unfavorable* geeft een dalend temperatuurverschil bij een dalende vermogensvraag die niet wenselijk is. Hierdoor stijgt het debiet en het energiegebruik van de circulatiepompen verder ten opzichte van de lijn *Constant* en functioneren de koelmachines gedwongen in deellast [2]. Ter verduidelijking, in alle gevallen daalt het debiet in deellast ten opzichte van de vollastconditie. De lijnen zijn bepaald uit metingen aan klimaatinstallaties in de Verenigde Staten [2]. In dit artikel wordt inzicht gegeven in de waterzijdige kenmerken voor ontwerp en niet-ontwerpcondities van de koelbatterij voor het Nederlands klimaat. Hiervoor wordt een variantenstudie uitgevoerd op basis van water- en luchtzijdige temperaturen onder ontwerpcondities bij een constante luchthoeveelheid, waterintredetemperatuur en luchtuitredetemperatuur van twee koelbatterijen.

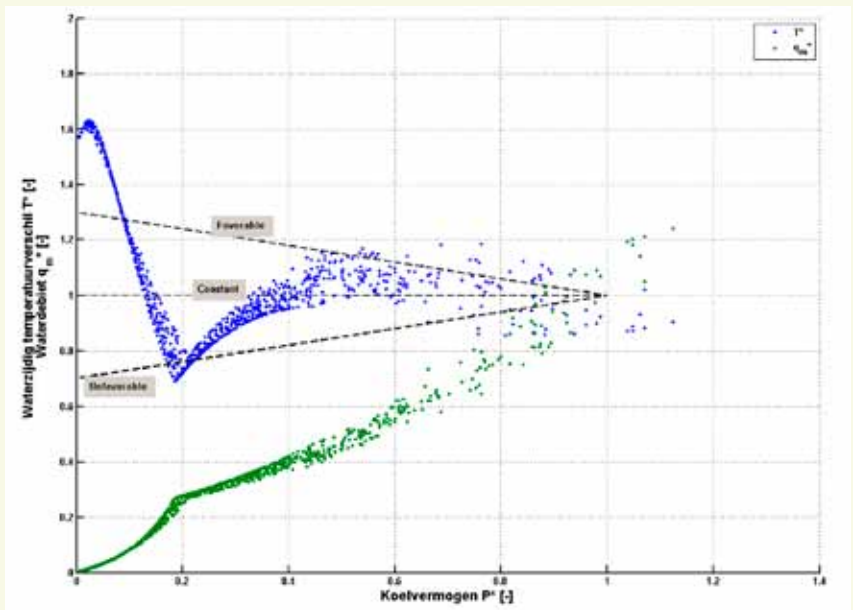
■ KOELBATTERIJ NO.1

Nederlands klimaat met constante lucht-uitredetemperatuur

De waterzijdige temperatuurverschillen T^* (blauw) en debieten q_m^* (groen) worden op de verticale as weer-gegeven als functie van het koelvermogen P^* op de horizontale as. Voor koelbatterij no.1 wordt voor het Nederlandse klimaat dit weergegeven in figuur 3 voor een 24/7 bedrijf bij een constante luchtuitredetemperatuur $\theta_{a,uit,set}$ van 15°C en bij toepassing van de smoorschakeling, module 6 [4].



-Figuur 2- 'Favorable', 'Constant' en 'Unfavorable' waterzijdig temperatuurverschil [2]



-Figuur 3- Waterzijdige temperatuurverschillen T^* (blauw) en debieten q_m^* (groen) voor koelbatterij no.1 voor de ontwerp en niet-ontwerpcondities, klimaatjaar 64/54 De Bilt, smoorschakeling

De volgende aandachtspunten worden benoemd. Gedurende circa 65% van de tijd is het afgenomen vermogen $P^* < 0,2$ (20% van het ontwerpvermogen), gedurende circa 85% van de tijd is $P^* < 0,4$ en gedurende 0,5% van de tijd is $P^* > 1$. Dit onderstreept het belang om het waterzijdig gedrag in deellast goed te kennen. Het verloop van het temperatuurverschil T^* met een typische V-vorm, wordt veroorzaakt door de variabele warmteoverdrachtscoëfficiënt van het water op de binnenzijde van de buis. Het minimum temperatuurverschil $T^*_{min} = 0,69$ is ter plaatse waar de overgangsstroming ($2.300 < Re < 4.000$) overgaat naar laminaire stroming ($Re \leq 2.300$). Hierna stijgt het waterzijdig temperatuurverschil tot een maximum om ten slotte te dalen. Het temperatuurverschil voor $P^* = 0$ nadert de toestand waarbij de wateruitredetemperatuur gelijk is aan de luchtintredetemperatuur en gelijk is aan de luchtuitredetemperatuur: $\theta_{uit} = \theta_{a,in} = \theta_{a,uit}$. Het temperatuurverschil $T^*_{P^*=0}$ in de nullastsituatie wordt nu geschreven als:

$$T^*_{P^*=0} = \theta_{uit} - \theta_{in} / \theta_{uit,nom} - \theta_{in,nom} =$$

$$15 - 6 / 11,79 - 6 = 1,55$$

Het maximum temperatuurverschil $T^*_{max} = 1,63$ is groter dan $T^*_{P^*=0}$ van 1,55. Bij een stijging van het vermogen stijgt het waterzijdig temperatuurverschil doordat de koelbatterij in tegenstroom is aangesloten. De wateruitredetemperatuur θ_{uit} volgt een kort stukje de luchtintredetemperatuur $\theta_{a,in}$ en T^* stijgt van 1,55 tot 1,63. Bij een verdere stijging van de luchtintredetemperatuur daalt de wateruitredetemperatuur om het benodigde vermogen te leveren. Het temperatuurverschil heeft behoudens de daling in de typische V-vorm, een stijgende tendens bij een afnemend vermogen. Deze weergave geeft duidelijk aan dat een dalend vermogen leidt tot een variabel temperatuurverschil T^* in deellast. Voor de vermogensgebieden $0,45 < P^* < 1$ en $0 < P^* < 0,15$ wordt een overwegend stijgend temperatuurverschil gerealiseerd: $T^* > 1$. In gebieden $0,15 < P^* < 0,45$ en $P^* > 1$ wordt een dalend temperatuurverschil waargenomen. De gemiddelde temperatuurverschillen zijn nu afhankelijk van de frequentie en de bijbehorende debieten. Het verschil tussen beide temperatuurverschillen T^*_{avg} en T^*_m is aanzienlijk. Waar het gemiddelde temperatuurverschil T^*_{avg} met 1,17 groter is dan 1, is het

gewogen gemiddelde temperatuurverschil T_m^* met 0,97 kleiner dan 1. Verder is het waterzijdig debiet q_m^* gedurende circa 65% van de tijd minder dan 25% van het ontwerpdebiet. In orde van grootte, dit is het minimum debiet van een toerengeregelde pomp. Een eerdere studie heeft omschreven dat zonder speciale aandacht gedurende deze tijd de warme bron te koud wordt geladen en dat de toepassing van een buffervat een positief effect heeft [5].

■ KOELBATTERIJ NO.2

Een uitsluitend dalend karakter

In het voorgaande voorbeeld is gesproken over een situatie waarbij het waterzijdig temperatuurverschil in deellast varieert. In het volgende voorbeeld wordt koelbatterij no.2 (tabel 1 en 2) weergegeven, waarbij in deellast de waterzijdige temperatuur uitsluitend daalt.

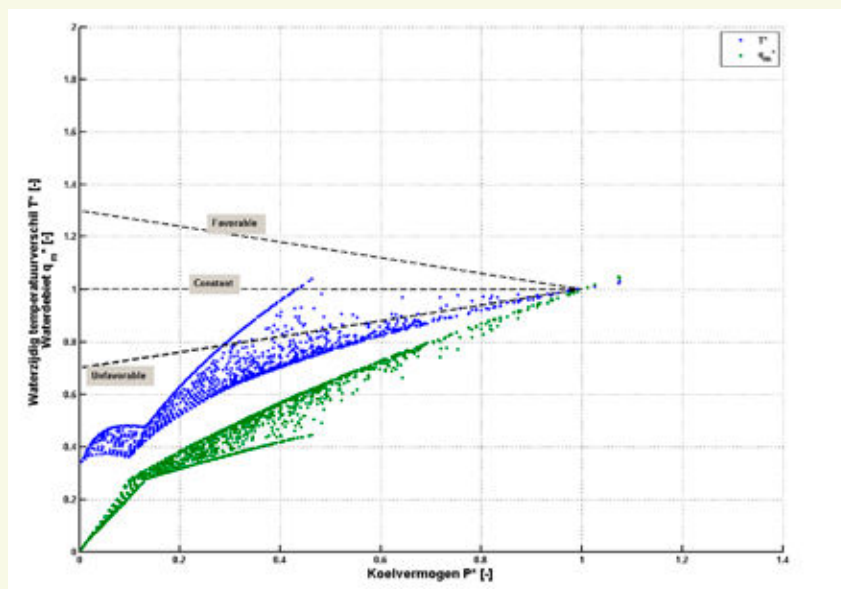
Dit voorbeeld geeft de typische weergave van een koelbatterij waarbij diep wordt gekoeld ten opzichte van de watertemperatuur, bijvoorbeeld bij ontvochtigingsprocessen en de combinatie van hoge watertemperaturen en relatief lage luchtuitredetemperaturen.

Dit zijn typisch koelbatterijen met veel rijen of een grote KA-waarde [W/K]. Het resultaat is weergegeven in figuur 4 voor een 24/7 bedrijf bij een constante luchtuitredetemperaatuur van 11,47°C en een constante waterintredetemperaatuur van 9°C bij toepassing van de smoorschakeling [4]. Ook hier is de typische V-vorm terug te vinden in een weliswaar afgevlakte vorm. Een dalend vermogen leidt hier uitsluitend tot een dalend waterzijdig temperatuurverschil. De conclusie is dat weergave in ISSO-publicatie 47, waarin wordt gesproken over een stijgende retourwatertemperatuur in deellast, onvolledig is.

Het is dus mogelijk om een koelbatterij te selecteren die in het dagelijks gebruik een uitsluitend dalende retourwatertemperatuur heeft ten opzichte van de ontwerpituatie. Ook hier nadert temperatuurverschil voor $P^*=0$ de toestand waarbij de wateruitredetemperaatuur gelijk is aan de luchtintredetemperaatuur en de luchtuitredetemperaatuur: $\theta_{uit} = \theta_{a,in} = \theta_{a,uit}$. Het temperatuurverschil $T_{P^*=0}^*$ in de nullastituatie wordt berekend met de gegevens uit tabel 1:

$$T_{P^*=0}^* = (\theta_{uit} - \theta_{in}) / (\theta_{uit,nom} - \theta_{in,nom}) = 11,47 - 9 / 16,6 - 9 = 0,33$$

De waarde voor $P^*=0$ duidt het temperatuurverloop, stijgend of dalend, van de koelbatterij in deellast aan. Deze waarde wordt direct en alleen bepaald door de luchtuitredetemperaatuur $\theta_{a,uit,nom}$ en de wateruitredetemperaatuur $\theta_{uit,nom}$ in de vollastituatie. Het dalende of stijgende karakter in deellast wordt bepaald door het verschil van beide temperaturen:



-Figuur 4- Waterzijdige temperatuurverschillen T^* (blauw) en debieten q_m^* (groen) van een koelbatterij no.2 voor ontwerp en niet-ontwerpcondities, klimaatjaar 64/65 De Bilt, smoorschakeling

$$\theta_{a,uit,nom} - \theta_{uit,nom} = \begin{cases} \text{positief} & \text{stijgend} & T_{P^*=0}^* > 1 \\ 0 & & T_{P^*=0}^* = 1 \\ \text{negatief} & \text{dalend} & T_{P^*=0}^* < 1 \end{cases}$$

De conclusie is dat het gewenste stijgend waterzijdig temperatuurverschil in deellast uitsluitend wordt verkregen indien de wateruitredetemperaatuur lager is dan de luchtuitredetemperaatuur in ontwerpcondities. Het belang van het voornoemde wordt toegelicht met een voorbeeld. Bij het gebruik van koelbatterij no.2 bedraagt het gemiddeld gewogen temperatuurverschil $T_m^* = 0,66$ en is de gemiddelde temperatuurverschil $T_{avg}^* = 0,58$. Dit betekent dat een WKO-installatie die is ontworpen op het vollasttemperatuurverschil, met de hoge ontwerpwatertemperaturen en een lage luchtuitredetemperaatuur, het temperatuurverschil van de ontwerpituatie niet zal realiseren. Bij een gelijke energiehoeveelheid resulteert dit in een stijgend waterdebiet ten opzichte van de verleende vergunning. Omdat de ondergrondse WKO-installatie is ontworpen op dit debiet, is het onzeker of de gebufferde energie nog teruggewonnen kan worden. Hierdoor komt naast het debiet ook de energiebalans (vergunning) onder druk te staan. Voor de eigenaar van het gebouw betekent dit dat met een energiebalans en een verpompt debiet binnen de gestelde grenzen, er minder energie gebufferd is dan waar de installatie op ontworpen is. Het verschil wordt dan vaak alleen aangevuld op een niet duurzame wijze, bijvoorbeeld met de koelmachine.

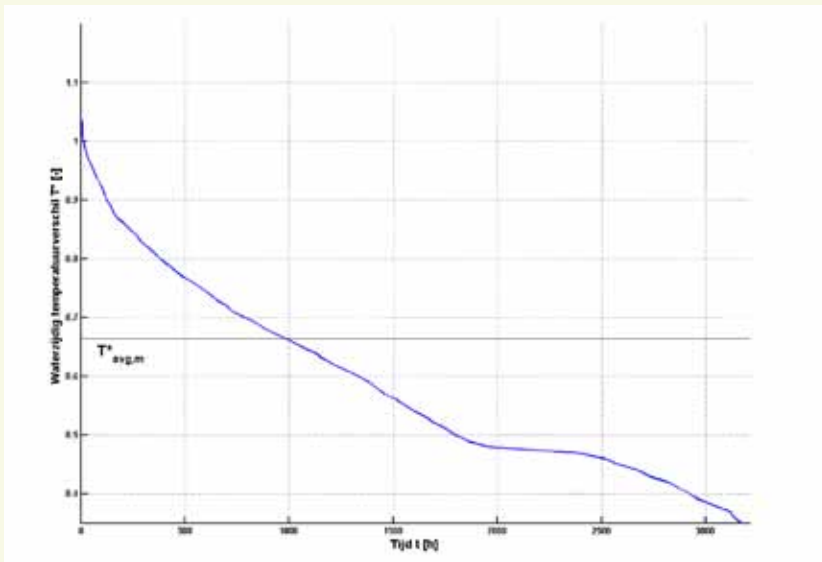
Op basis van de voorgaande beschouwing, is het duidelijk dat het vermogen verdeeld moet

worden in een temperatuur- (figuur 5) en debietdeel (figuur 6). Zeker voor accumulerende systemen waarbij de temperatuurschil de basis is van een goede werking, is meer en beter inzicht noodzakelijk. Hiertoe wordt de beschikbare data uit figuur 4 omgevormd naar zogenaamde duerkrommen. Hierin zijn horizontaal de tijd t weergegeven en verticaal het waterzijdig temperatuurverschil T^* respectievelijk het waterdebiet q_m^* weergegeven. De beide waarden zijn afzonderlijk geordend op basis van grootte en de duerkrommen dienen dus afzonderlijk beschouwd te worden. Voor de samenhang tussen beide figuren dient figuur 4 gebruikt te worden.

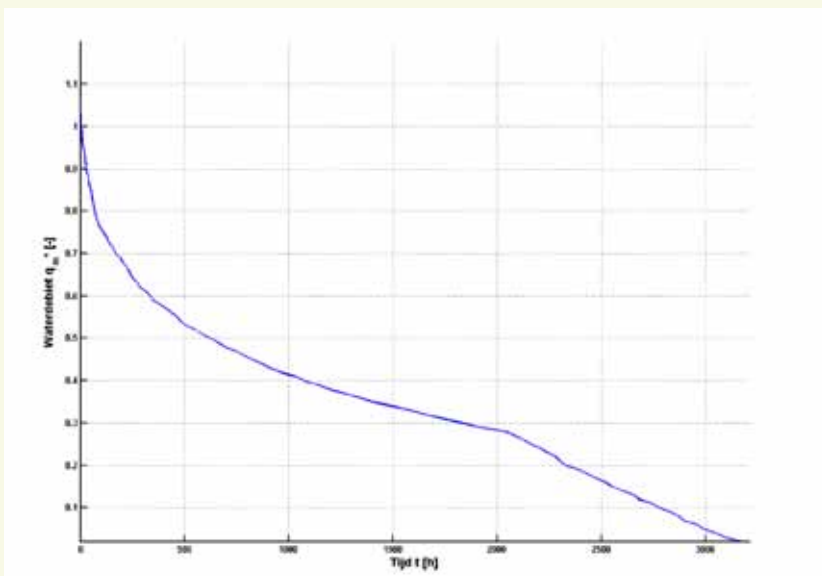
Aan de hand van de figuren kan de ontwerper zich bijvoorbeeld de vraag stellen hoe om te gaan met deze lage retourwatertemperatuur, waar de pomp het beste rendement moet hebben, wat het effect is van het minimum debiet van deze pomp en hoe het geheel past in het totale installatieontwerp.

■ CONCLUSIE

In dit artikel is het waterzijdig deellastgedrag van een koelbatterij in het Nederlands klimaat besproken. Door bij het ontwerpen van gekoeldwaterinstallaties uitsluitend uit te gaan van de kennis in de ISSO-publicatie 47, wordt een installatie ontworpen waarbij na realisatie een addertje onder het gras kan zitten. Het dalend ($\theta_{a,uit,nom} < \theta_{uit,nom}$) of stijgend ($\theta_{a,uit,nom} > \theta_{uit,nom}$) karakter van het waterzijdig



-Figuur 5- Watertemperatuurverschil-duurkromme van koelbatterij no.2, klimaatjaar 64/65 De Bilt, smoorschakeling



-Figuur 6- Waterdebiet-duurkromme van koelbatterij no.2, klimaatjaar 64/65 De Bilt, smoorschakeling

temperatuurverschil in deellast wordt bepaald door de wateruittredetemperatuur $\theta_{uit,nom}$ en luchtuitredetemperatuur $\theta_{a,uit,nom}$ van de ontwerpconditie. Omdat duurzame bronnen gebaseerd zijn op accumulatie, is een verbeterd inzicht in een temperatuurverschil van belang om de grootte van een bron te bepalen. Dit artikel geeft aan dat naast de ontwerpsituatie, vooral de deellast situatie goed beoordeeld moet worden. Om dit te ondersteunen wordt

het vermogen verdeeld in een temperatuurverschil- en een debietduurkromme. Met dit extra inzicht kan de ontwerper een onderbouwde keuze maken.

■ VERVOLGARTIKEL

Dit artikel geeft inzicht in oorzaken van een dalend temperatuurverschil in deellast. Er zijn meer oorzaken die resulteren in een verlaagd temperatuurverschil in deellast maar ook in

vollast. In het vervolg artikel worden diverse oorzaken benoemd en inzichtelijk gemaakt en wordt een handvat aangereikt hoe dergelijke afwijkingen gesignaleerd kunnen worden.

■ LITERATUUR

1. Brink, A.H.T.M. van den, Boxem, G., Schijndel, J., Een koelbatterij in niet-ontwerpcondities, algemene waterzijdige prestaties, TVVL Magazine 03-2013
2. Bahnfleth, W.P., Peyer, E., Variable primary flow chilled water systems: potential benefits and application issues, 2004
3. www.knmi.nl/klimatologie/uurgegevens
4. ISSO-publikatie 47, Ontwerp van hydraulische schakelingen voor koelen, ISBN 90-5044-112-2, 2005
5. Hazenberg, K., Koeling met lange termijn energieopslagsystemen, inzicht in dynamisch gedrag bij knelpunten met koeling, afstudeerverslag TU/e, 2005

■ NOMENCLATUUR

A	Oppervlakte	m ²
k	Warmtedoorgangcoëfficiënt van de koelbatterij	W/m ² .K
P	Vermogen	W
q _m	Debiet	kg/s
Re	Reynoldsgetal	-
t	Tijd	h
T	Temperatuurverschil	K
v	Luchtdebiet	m ³ /s
V	Luchtsnelheid	m/s
x	Vochtgehalte	g/kg
θ	Temperatuur	°C

■ SUB-/SUPERSCRIPTS

a	air (lucht)
avg	gemiddelde (average)
in	intrede
m	gemiddelde, gewogen op massa
max	maximum
min	minimum
nom	ontwerpconditie
P*=0	waterzijdig genormaliseerd temperatuurverschil in de nullastsituatie
prim	primaire zijde
sec	secundaire zijde
set	setpoint (luchtzijdig)
uit	uittrede
*	genormaliseerde waarde van

Genormaliseerde waarden		Koelbatterij no.1	Koelbatterij no.2
Minimum waterzijdig temperatuurverschil	T* _{min}	0,69	0,34
Maximum waterzijdig temperatuurverschil	T* _{max}	1,63	1,04
Gemiddeld waterzijdig temperatuurverschil	T* _{avg}	1,17	0,58
Gemiddeld gewogen waterzijdig temperatuurverschil	T* _m	0,97	0,66

-Tabel 3- Waterzijdige temperatuurverschillen van koelbatterijen in deellast