

# Verlaagd waterzijdig temperatuurverschil

Bij veel gekoeldwaterinstallaties (GKW-installaties) blijft het waterzijdig temperatuurverschil in deellast achter bij de verwachtingen. In veel gevallen is de retourwatertemperatuur te laag, het debiet te hoog en kan de koelmachine niet maximaal belast worden. Zo'n bedrijfssituatie moet zeker worden voorkomen voor systemen waarin het temperatuurverschil bepalend is voor de goede werking, bijvoorbeeld bij warmte- en koudeopslag (WKO). In dit artikel wordt een aantal oorzaken genoemd die het waterzijdig temperatuurverschil in deellast verlagen. Voorbeelden geven aan wat de invloed is op het waterzijdig debiet.

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

Voor een maximale besparing op het transportdebiet is het van belang dat het waterzijdig temperatuurverschil stijgt bij een afnemende vermogensvraag (deellast), waardoor de koelmachine in vollast kan functioneren [1]. Dit is in figuur 1 weergegeven als het Favorable (gewenste) temperatuurverloop in deellast [2]. Er zijn oorzaken aan te wijzen die de retourwatertemperatuur verlagen en een verzamelnaam voor deze klachten is het Low  $\Delta T$ -syndroom (laag  $\Delta T$ -kwaal). De definitie hiervan luidt: 'A condition whereby a low chilled water return temperature (CHR) causes an excessive amount of chilled water to circulate to meet system cooling loads and chillers receiving the low temperature CHR cannot be loaded to their design capacity' [3]. De vertaling luidt: een situatie waarbij een lage retourwatertemperatuur leidt tot een excessief debiet over de gebruikers om aan de koelvraag te voldoen en waardoor de koelmachines die de lage retourwatertemperatuur ontvangen het ontwerpvermogen niet kunnen leveren. Dit verschijnsel komt voor bij de meeste GKW-installaties in

de Verenigde Staten. Onderzoeken hebben aangetoond dat het energiegebruik van de circulatiepompen en de koelmachines door dit verschijnsel stijgen [4]. Daarnaast wordt er ook economische schade geleden doordat het geïnstalleerd koelvermogen van de koelmachines niet beschikbaar is en het leidingwerk te klein is voor het werkelijk debiet. Er zijn voorbeelden waarbij een extra koelmachine is geplaatst en/of een tweede parallelle leiding is gemonteerd [13]. Diverse (Engelstalige) artikelen beschrijven de oorzaken en dragen mogelijke oplossingen aan. Oorzaken worden gevonden in het ontwerp, de componenten, de instellingen, het gebruik en onderhoud van de installatie [1][3][5]. Enkele oorzaken die genoemd worden zijn:

- lager setpoint dan waar de installatie voor ontworpen is [5];
- slecht geselecteerde koelbatterij [5][6];
- economisers en 100% buitenluchtkasten [5][6];
- verhoogd setpoint wateraanvoertemperatuur in deellast [5][6];

- laminaire stromingstoestand in de koelbatterij [6];
- toepassen van 3-wegkleppen.

Dit laatste voorbeeld is een bekende oorzaak van problemen in WKO-installaties. De andere oorzaken geven vergelijkbare klachten maar zijn minder bekend. Ook in Nederland komen genoemde oorzaken voor en enkele ervan zijn door de auteur in de ontwerpfase en na realisatie geconstateerd. Ondanks het genoemde negatieve effect op de koelinstallatie is dit verschijnsel in de Nederlandse open literatuur en handboeken niet terug te vinden. De (vertaalde) definitie spreekt van een 'excessief debiet' en een 'lage retourwatertemperatuur' waarbij deze begrippen niet worden gekwantificeerd. Met de verkregen inzichten [2][7] is het mogelijk de oorzaken van deze verstoringen te achterhalen en kan er een diagnose worden gesteld. Vanuit de definitie wordt ingegaan op het waterzijdig debiet waarmee de kwaal objectief gedetecteerd kan worden en wordt aangegeven welk effect dit heeft op het debiet.

In de kadertekst op de volgende pagina's is deze kwaal op een eenvoudige wijze uitgewerkt en weergegeven.

## VASTSTELLEN KWAAL

Er is bij de auteur geen methode bekend waarmee de laag  $\Delta T$ -kwaal daadwerkelijk objectief is vast te stellen. De definitie spreekt van een kwaal (disease) en duidt daarmee op een afwijking ten opzichte van een normaal of referentiegebruik. Het referentiegebruik is het waterzijdig temperatuurverschil (blauw) en debiet (groen) zoals bijvoorbeeld is weergegeven in figuur 1 [2] voor het klimaatjaar 1964/1965. De waterintredetemperatuur, de luchtuitredetemperatuur en het luchtzijdig debiet zijn constant en gelijk aan de ontwerpcondities. Dit referentie waterzijdig debiet in deellast wordt nu  $q_{m,*ref}$  genoemd. Het werkelijk en mogelijk afwijkend debiet wordt berekend of gemeten en wordt  $q_{m,*}$  genoemd. Per luchtintredeconditie is nu het mogelijk om de laag  $\Delta T$ -kwaal te detecteren door de onderstaande definitie [8]:

$$\Delta m_{low} \equiv \frac{q_{m,*ref}}{q_{m,*}}$$

De waarde van  $\Delta m_{low}$  is een relatief massadebiet. Het resultaat van deze berekening is dat een waarde groter dan 1 een verbetering is, een waarde van 1 overeenkomt met normaal gebruik en een waarde kleiner dan 1 een verslechtering is. Bij een waarde kleiner dan 1 daalt het waterzijdig temperatuurverschil en is er sprake van de laag  $\Delta T$ -kwaal. Ondanks het feit dat de naamgeving in de definitie spreekt van een temperatuur, is alleen aan de hand van het debiet de laag  $\Delta T$ -kwaal vast te stellen [8]. Met deze definitie wordt voor enkele oorzaken de gevolgen op het debiet inzichtelijk gemaakt.

## VERLAGEN LUCHTUITTREDE-TEMPERATUUR

### Zonder debietbegrenzing

Afwijkend waterzijdig gedrag van de koelbatterij onder ontwerpcondities en niet-ontwerpcondities kan veroorzaakt worden door een afwijkende instelling van de koelbatterij in de gebruiksfase ten opzichte van de ontwerp-temperatuur. Eén van de genoemde oorzaken van de laag  $\Delta T$ -kwaal is het verlagen van het setpoint van de luchtzijdige uitredetemperatuur van de koelbatterij tot beneden de ontwerp-temperatuur [5]. Hiervoor worden drie oorzaken genoemd uit de dagelijkse praktijk:

1. foutief ontwerp. De klimaatinstallatie is niet goed ontworpen en/of de uitgangspunten uit de ontwerp-fase wijken af van gebruiksfase;
2. foutieve selectie. De koelbatterij wordt gedimensioneerd op basis van de luchtuit-

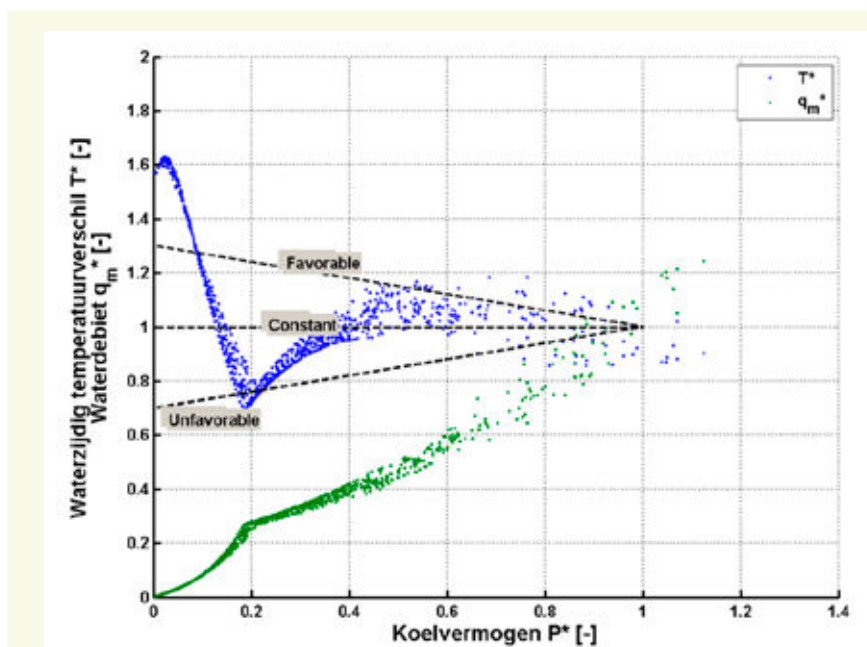
trede-temperatuur van de koelbatterij en niet op basis van de luchtuitredetemperatuur van de luchtbehandelingskast. Hierdoor wordt de opwarming van de motor-ventilatorcombinatie niet meegenomen waardoor de gewenste ontwerp-uitredetemperatuur van de lucht niet wordt gerealiseerd [5][6];

3. opwarming van de toevoerlucht in het kanaal.

De meest eenvoudige en toegepaste ingreep in de gebruiksfase is om het setpoint van de luchtuitredetemperatuur te verlagen. De volgende uiteenzetting is strikt genomen alleen geldig voor een foutief ontwerp en ongewenste opwarming in het toevoerkanal. Bij een foutieve selectie is namelijk een kleinere koelbatterij geselecteerd. Dit levert afwijkende

resultaten op, maar de hierna geschetste trend blijft gelijk. Merk op dat tijdens het in bedrijf stellen van deze installatie de genoemde kwaal al wordt geïntroduceerd.

Van de koelbatterij no.1 (tabel 1, figuur 1) wordt het setpoint van de luchtuitredetemperatuur met 1K verlaagd naar 14°C. De bijbehorende (afwijkende) temperatuurverschillen  $T^*$  en debieten  $q_{m,*}$  zijn weergegeven in figuur 2 (volgende pagina). Het waterzijdig temperatuurverschil is voor de meeste vermogens in vergelijking met figuur 1 gedaald en ligt voor een groot gedeelte onder de lijn van het constante temperatuurverschil  $T^*=1$ . Hierbij is het gemiddelde gewogen temperatuurverschil  $T^*_m$  (op jaarbasis) met 11,3% gedaald tot 0,86. Er is geen debietbegrenzing en dit debiet stijgt tot 175% van het ontwerpdebiet  $q_{m,nom,*}$ . Dit geeft duidelijk aan dat deze verlaging van het



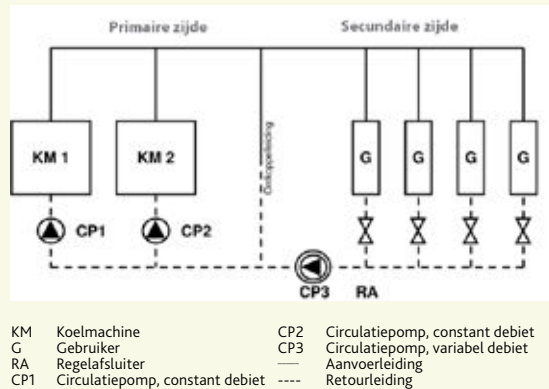
-Figuur 1- Referentie waterzijdig temperatuurverschillen  $T^*$  en debieten  $q_{m,*ref}$  voor ontwerp en niet-ontwerpcondities, klimaatjaar 64/54 De Bilt [9], koelbatterij no.1

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

-Tabel 1- Ontwerp koelbatterij

In dit kader wordt de laag  $\Delta T$ -kwaal toegelicht voor een constant (primaire) variabel (secundair) debietsysteem, zoals weergegeven in figuur a. Het gevraagd vermogen door de gebruikers (rechts) wordt geleverd door de opwekkers (links). Dit geldt voor de vollastsituatie en deellast situaties. Indien het gevraagd vermogen niet geleverd kan worden door de opwekkers, kan er sprake zijn van de laag  $\Delta T$ -kwaal.

Het vermogen wordt gesplitst in een temperatuurverschil en een debiet. In figuur b is de vollast-situatie grafisch voorgesteld door



-Figuur a- Constant/variabel-debietsysteem met meerdere koelmachines en gebruikers

op de horizontale as het debiet  $q_m^*$  en op de verticale as het temperatuurverschil  $T^*$  weer te geven. Aan de linkerkant zijn de koelmachines weergegeven en aan de rechterkant de gebruikers. Het weergegeven oppervlak is nu een maat voor het vermogen. Hiervoor geldt:  $P^* = q_m^* \cdot T^*$

In figuur c is een willekeurige gewenste deellastsituatie gegeven zoals deze wordt verwacht. Aan de gebruikerszijde is het totaal

-Kader- Toelichting laag  $\Delta T$ -kwaal

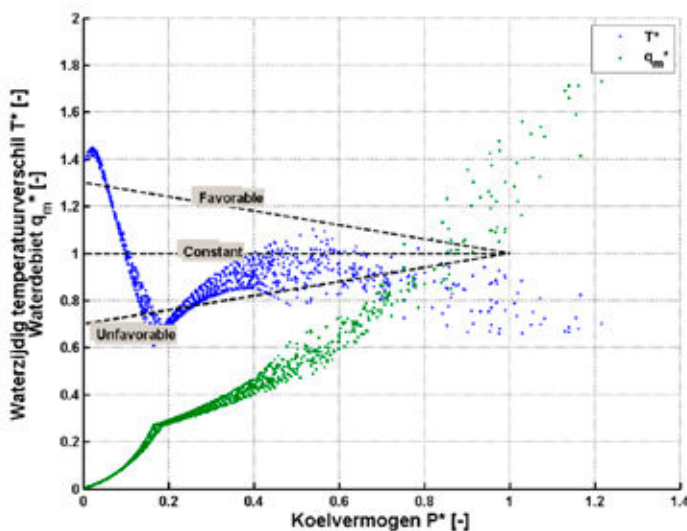
debiet over de gebruikers kleiner geworden doordat de regel(tweeweg)kleppen dichtlopen en het temperatuurverschil is toegenomen. Het afzonderlijke debiet van de gebruikers is gesommeerd. Aan de opwekkerszijde is het debiet gelijk aan de gebruikszijde, waarbij het waterzijdig temperatuurverschil is toegenomen. Dit wordt bijvoorbeeld veroorzaakt doordat de koelmachine meer vermogen kan leveren door de gedaalde buitenluchttemperatuur. Dit gewenste gedrag in deellast, het stijgen van de temperatuur en het dalen van het debiet, wordt weergegeven

door de rode pijl. Dit is het Favorable temperatuurverloop van figuur 1 in de hoofdstekst. Andere verhoudingen zijn mogelijk waarbij het vermogen door één of twee koelmachines wordt geleverd. Dit is afhankelijk van het debiet en temperatuurverschil aan de secundaire zijde. Er zijn situaties mogelijk waarbij het niet mogelijk is om het opgesteld vermogen te leveren naar de gebruikers. Er kan dan sprake zijn van de laag  $\Delta T$ -kwaal

In figuur d is de deellastsituatie gegeven met het laag  $\Delta T$ -kwaal. Op basis van alleen het vermogen verwacht men geen problemen. Het gevraagd vermogen van de gebruikers is kleiner dan het beschikbare vermogen. Echter, de regelkleppen van de gebruikers zijn geopend om aan de koelvraag te voldoen waarbij het temperatuurverschil is gedaald. Het probleem aan de secundaire zijde: het debiet door de gebruikers is maximaal en een

verdere stijging van het vermogen kan alleen geleverd worden door een stijging van het temperatuurverschil en niet door een stijging van het debiet. Op dat moment kan de gevraagde uitreideconditie niet meer gerealiseerd worden bij een verdere toename van de koelvraag. Het debiet van de toerengeregelde pomp CP3 uit figuur a daalt niet, wat leidt tot een verhoogd energiegebruik.

Het probleem aan de primaire zijde: om aan de vermogensvraag van de gebruikers te voldoen, moeten beide koelmachines KM1 en KM2 vermogen leveren, waarbij het te leveren vermogen begrensd is. Immers, het debiet door de koelmachines is constant, waarbij het maximaal te leveren vermogen wordt bepaald door het maximaal aanwezige waterzijdig temperatuurverschil. Dit zijn de secundaire retourwatertemperatuur van de gebruikers en de primaire aanvoertemperatuur van de koelmachines. Dit betekent dat het te leveren vermogen is gelimiteerd. Het opgesteld vermogen dat niet beschikbaar is, is als blanco oppervlak weergegeven (links). Deze situatie is een kantelmoment, waarbij de primaire en secundaire debieten maximaal, maar met elkaar in evenwicht zijn. Een verslechtering treedt op bij een verdere stijging van het secundair debiet. Dit wordt bijvoorbeeld veroorzaakt door een of meerdere inregelventiel(en) verder te openen. Het water stroomt nu door de hydraulische ontkoppelleiding van figuur a van de retour (onder) naar de aanvoer (boven). De vervolgens ontstane situatie is weergegeven in figuur e met de ingekleurde kaders. Aan de primaire zijde blijft de situatie en het geleverd vermogen door de koelmachines in beginsel gelijk. De secundaire retourwa-



-Figuur 2- Afwijkende waterzijdige temperatuurverschillen  $T^*$  en debieten  $q_m^*$  voor ontwerp en niet-ontwerpcondities, klimaatjaar 64/54 De Bilt [9], koelbatterij no.1,  $\theta_{a,uit,set} = \theta_{uit,nom} - / - 1K$

setpoint met 1K een behoorlijke invloed heeft op de hydraulische balans van de installatie. Het maximum vermogen  $P^*$  stijgt tot 120% en wordt veroorzaakt doordat aan de lucht meer voelbare en latente warmte wordt onttrokken. Het minimum temperatuurverschil  $T^*_{min}$  is gedaald met 11,6% en treedt op bij een lagere waarde van  $P^*=0,17$  in plaats van  $P^*=0,19$ . Dit wordt veroorzaakt door de hogere watersnelheid die nodig is om het extra vermogen te leveren. Hierdoor vindt de overgang naar de laminaire stromingstoestand plaats bij een lager vermogen. De laag  $\Delta T$ -kwaal wordt als volgt inzichtelijk gemaakt. De (referentie) waterzijdige debieten (groen) van figuur 1 worden als  $q_{m,ref}^*$  gedefinieerd, de (afwijkende) resultaten bij het

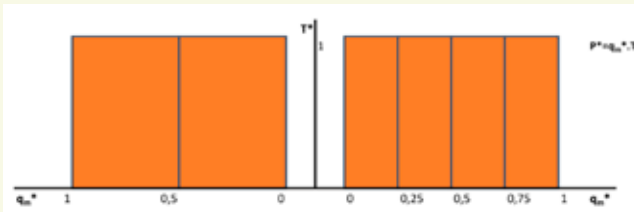
tertemperatuur blijft gelijk en hierdoor blijft ook de intredetemperatuur en het geleverd vermogen van de koelmachine gelijk. Het gedeelte van het secundair debiet dat niet door de koelmachine gaat, gaat via de ontkoppelleiding naar de aanvoer. Deze hoge secundaire retourwatertemperatuur wordt vermengd met de koude primaire aanvoertemperatuur van de koelmachines. Gevolg: de secundaire aanvoertemperatuur is hoger dan de primaire aanvoertemperatuur; de secundaire aanvoertemperatuur is gestegen ten opzichte van de primaire aanvoertemperatuur. Dit is weergegeven door de blanco oppervlakken aan de onderzijde van de gebruikers (rechts). Nu ontstaat er een nieuw evenwicht tussen de opwekkerzijde en de gebruikerszijde.

Daar waar mogelijk zullen de regelkleppen nog verder openlopen om de stijging van de aanvoertemperatuur te compenseren. Dit resulteert in een verdere stijging van het secundair debiet en een verdere daling van het temperatuurverschil (rode pijl, rechtsboven). Hierdoor wordt er meer retourwater gemengd met het aanvoerwater van de koelmachines waardoor de secundaire aanvoertemperatuur ook stijgt (rode pijl, rechtsonder). Het gestegen secundair debiet, de gedaalde secundaire retourwatertemperatuur en de gestegen secundaire aanvoertemperatuur zijn weergegeven door het groen gestippelde kader. Met het verder dalen van de secundaire retourwatertemperatuur daalt ook de primaire retourwatertemperatuur (rode pijl, links boven) en daalt beschik-

bare koelvermogen van de koelmachines. Het nieuwe evenwicht wordt nu voorgesteld door de groen gestippelde kaders. Het is duidelijk zijn dat deze installatie ontregeld is. Dit is een weergave van een situatie waarbij een lage retourwatertemperatuur leidt tot een excessief secundair debiet om aan de koelvraag van de gebruikers te voldoen en waarbij door de lage retourwatertemperatuur de koelmachines niet het maximaal vermogen kunnen leveren. Uit de toelichting volgt dat het verband tussen oorzaak en gevolg uit de definitie niet correct zijn. Het is niet de lage retourwatertemperatuur die het excessief debiet veroorzaakt, het is het excessief debiet dat de lage retourwatertemperatuur veroorzaakt. Enkele oorzaken worden in het artikel uitgewerkt.

Primaire (opwekker)zijde

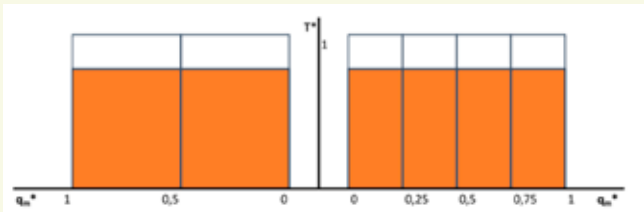
Secundaire (gebruikers)zijde



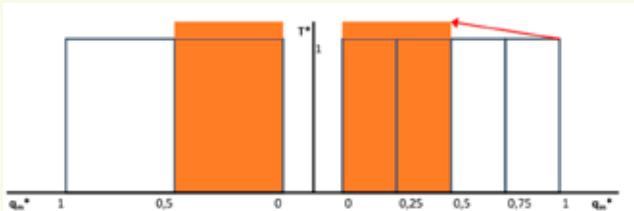
-Figuur b- Vereenvoudig weergave van de vollast- of ontwerpsituatie

Primaire (opwekker)zijde

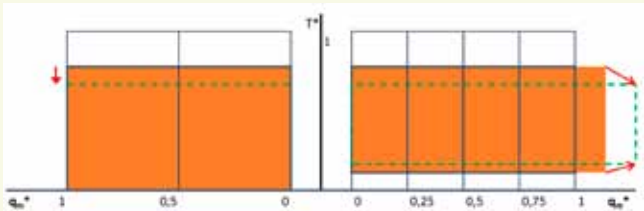
Secundaire (gebruikers)zijde



-Figuur d- Vereenvoudigde weergave van het laag  $\Delta T$ -verschijnsel



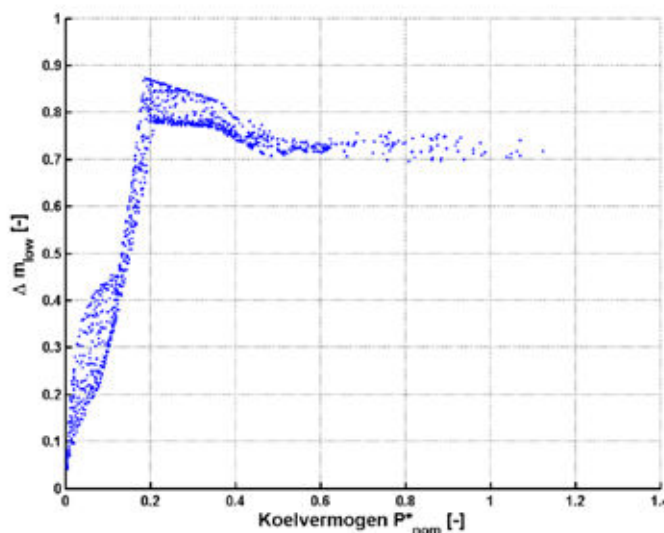
-Figuur c- Vereenvoudigde weergave van een gewenste deellastsituatie



-Figuur e- Vereenvoudigde weergave van het laag  $\Delta T$ -verschijnsel in de meeste ongunstige situatie

verlaagd setpoint van figuur 2 worden als  $q_m^*$  gedefinieerd. Per luchtintredeconditie wordt de laag  $\Delta T$ -kwaal vastgesteld en gekwantificeerd met de hier geïntroduceerde definitie. Alleen de intredetemperaturen boven 15°C worden gebruikt omdat onder deze temperatuur geen referentiewaarden beschikbaar zijn. Het resultaat van deze berekening is weergegeven in figuur 3.

Op de horizontale as staan de genormaliseerd vermogens  $P_{nom}^*$ , gebaseerd op een luchtuitredetemperatuur van 15°C. Er is duidelijk sprake van de laag  $\Delta T$ -kwaal met  $\Delta m_{low} < 1$ . De grafiek geeft duidelijk weer dat de genoemde definitie bruikbaar is voor het hele jaar. Verder is het resultaat niet constant en is de mate ervan afhankelijk van het vermogen. Bij grote



-Figuur 3- Laag  $\Delta T$ -kwaal bij een verlaagd setpoint van de koelbatterij,  $\theta_{a,uit,set} = \theta_{a,uit,nom} - / - 1K$

( $P_{nom}^* > 0,6$ ) en kleine vermogens ( $P_{nom}^* < 0,15$ ) is dit goed te zien. Bij lage vermogens verslechtert het resultaat sterk wat wordt veroorzaakt door het verschil in setpoint. Indien de uittredetemperatuur daalt naar 15°C, daalt het debiet  $q_{m, nom}^*$  naar 0. Echter, het debiet  $q_{m, set}^*$  heeft bij deze intredetemperatuur nog een eindige waarde omdat de uittredetemperatuur is ingesteld op 14°C.

Duidelijk is dat een verlaging van het setpoint met 'slechts' 1K betekent dat de energie efficiëntie van het GKW-systeem vermindert. De koelmachine moet in een lagere deellast functioneren en door het verhogen van het debiet stijgt de pompenergie. In een WKO-installatie daalt de gemiddelde injectietemperatuur van de warme bron  $T_m^*$  en stijgt het totaal debiet. Dit effect is sterker bij de toepassing waarbij in de ontwerpconditie de luchtuitredetemperatuur lager is dan de wateruitredetemperatuur:  $\theta_{a, uit, nom} < \theta_{w, uit, nom}$  [8]. De kritische lezer merkt op dat een installatie is ingeregeld en dat daarmee een ongelimiteerd debiet niet realistisch is. In de praktijk zal het verlagen van de setpoint gevolgd (kunnen) worden door het vergroten van het debiet door de inregelvoorziening verder te openen om aan de klantvraag tegemoet te komen.

### Met debietbegrenzing

De invloed van een constant-debietklep op het waterzijdig gedrag is eerder in het Mollier-diagram weergegeven [7]. De conclusie was dat een regelklep met debietbegrenzing geen verschil laat zien met de onbegrensde situatie totdat het waterzijdig debiet de ontwerpwaarde heeft bereikt. In deze paragraaf wordt de laag  $\Delta T$ -kwaal gegeven voor dezelfde koelbatterij no.1, waarbij het maximale debiet

is begrensd op het ontwerpdebiet:  $q_{m, max}^* = 1$ . In figuur 4 is te zien dat deze kwaal ook voorkomt in een installatie met debietbegrenzing. Vanaf ongeveer  $P_{nom}^* = 0,8$  stijgt het resultaat tot de waarde 1. Dit buigpunt geeft aan waar de constant-debietklep volledig open staat bij het verlaagd setpoint:  $q_{m, set}^* = 1$ . De klep is eerder volledig geopend om aan de gestegen koelvraag te voldoen. De verlaagde luchtuitredetemperatuur van 14°C wordt nu niet meer gerealiseerd en stijgt met het verder stijgen van het vermogen. Bij een ingesteld setpoint van 15°C is de regelklep nog niet volledig geopend. Het referentiedebiet  $q_{m, ref}^*$  stijgt nu met het toemen van het vermogen en nadert de volledig geopende toestand. Indien ook deze klep volledig geopend is, wordt de waarde van  $\Delta m_{low}$  bereikt. Beide debieten zijn nu gelijk aan elkaar en aan de ontwerpwaarde.

Eerder is aangegeven dat de debietbegrenzing ten opzichte van de ongelimiteerde situatie een positief effect laat zien indien  $q_{m, set}^* > 1$  dreigt te worden [7]. In figuur 4 is te zien dat de debietbegrenzing een beperkt positief effect heeft doordat de hydraulische onbalans wordt voorkomen. Echter, de figuur laat ook zien dat een koelbatterij met debietbegrenzing resulteert in een verhoogd debiet indien het setpoint van de luchtuitredetemperatuur wordt verlaagd gedurende een groot deel van het jaar. De conclusie is dat alleen waterzijdig inregelen geen sluitende oplossing is voor waterzijdige problemen maar dat ook de instellingen van de regeltechniek een rol spelen. De claim dat een constant-debietklep een oplossing is voor bovengenoemd probleem is dus maar beperkt geldig [10]. Volledigheidshalve, het traditioneel inregelen geeft een vergelijkbaar beeld.

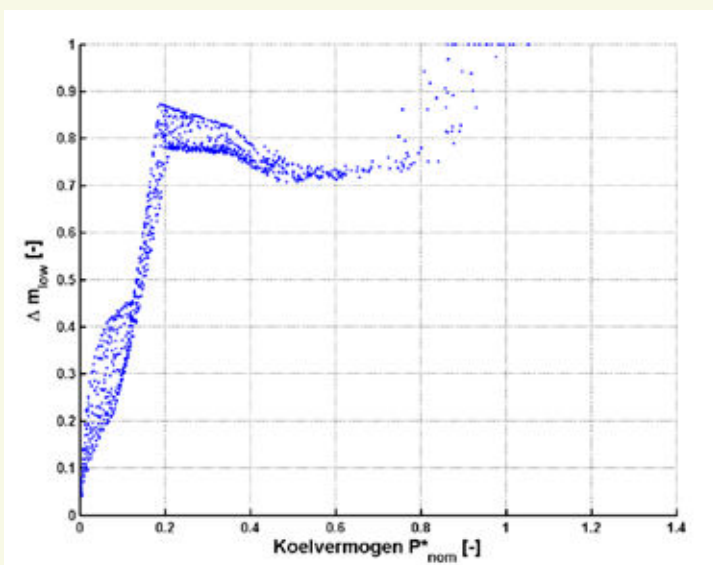
## VERHOGEN WATERAANVOER-TEMPERATUUR

Het verhogen van de aanvoerwatertemperatuur is een andere oorzaak van de laag  $\Delta T$ -kwaal [5][6]. Dit verhogen wordt veroorzaakt doordat bijvoorbeeld het setpoint van de koelmachine hoger wordt ingesteld met de gedachte energie te besparen. Een tweede oorzaak is terug te vinden bij WKO-installaties waarbij de koude bron onvoldoende geladen is en warmer is dan de ontwerp temperatuur. In dit voorbeeld wordt de aanvoerwatertemperatuur van koelbatterij no.2 (tabel 2) met 0,5K verhoogd van 9°C naar 9,5°C waarbij het setpoint van de luchtuitredetemperatuur constant blijft op 11,47°C. De referentie (normale) waterzijdige resultaten van koelbatterij no.2 nu worden als  $q_{m, ref}^*$  gedefinieerd (niet weergegeven, [2]). De nieuwe (afwijkende) resultaten met een verhoogde waterintredetemperatuur worden als  $q_{m, set}^*$  gedefinieerd (niet weergegeven) [8]. De laag  $\Delta T$ -kwaal bij een 'geringe' temperatuurverhoging van 0,5K is in figuur 5 weergegeven.

Deze weergave in figuur 5 is anders dan de weergave van figuur 3 en 4. Dit betekent dat de kwaal niet alleen variabel is maar dat verschillende oorzaken ook verschillende afwijkingen laten zien. Hierdoor is het mogelijk om per gebruiker niet alleen een afwijking maar ook de oorzaak vast te stellen. De toename van het debiet is gering maar loopt op tot circa 12% bij grotere vermogens ( $P_{nom}^* > 0,8$ ). De sprong in de grafiek wordt veroorzaakt door de punt van de typische V-vorm, de overgang van de overgangsstroming naar de laminaire stromingstoestand. Hier ter plaatse is het waterzijdig temperatuurverschil het kleinste. Door het verhogen van de watertemperatuur stijgt het debiet om de gevraagde koeling te kunnen leveren waardoor dit minimum bij een net ander vermogen optreedt. De auteur laat het aan de verbeelding van de lezer over om het effect te visualiseren indien het verlagen van het setpoint en het verhogen van de wateraanvoertemperatuur gelijktijdig optreedt.

## LAMINAIRE STROMING IN KOELBATTERIJ

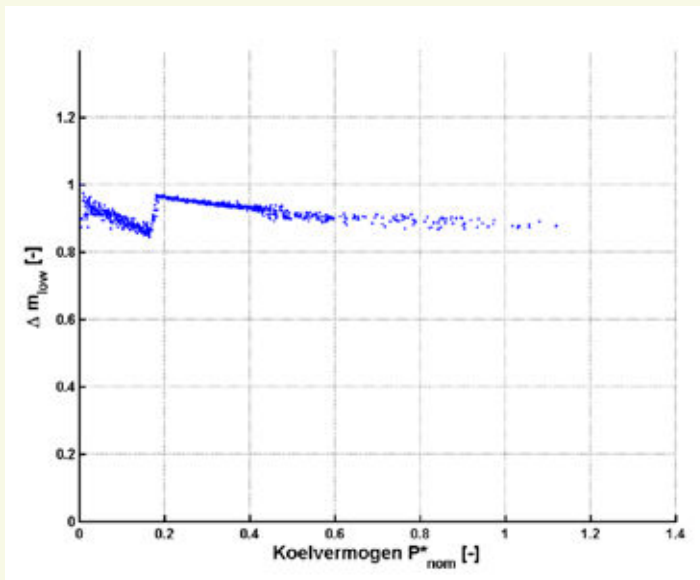
Een van de genoemde oorzaken van de laag  $\Delta T$ -kwaal is het ontstaan van een laminaire stromingsprofiel [6]. Het lage temperatuurverschil wordt veroorzaakt door een koelbatterij die is aangesloten met de smoorschakeling en treedt op bij het reduceren van het vermogen. Dit resulteert in het minimum temperatuurverschil van figuur 1, de onderzijde van de V-vorm. Er is nu geen sprake van een excessief debiet of kwaal, maar uitsluitend van een laag waterzijdig temperatuurverschil dat ervoor zorgt dat de koelmachine niet in vollast kan



-Figuur 4- Laag  $\Delta T$ -kwaal bij een verlaagd setpoint van de koelbatterij met een debietbegrenzing,  $\theta_{a, uit, set} = \theta_{a, uit, nom} - 1K$ ,  $q_{m, max}^* = 1$

	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 <sup>-1</sup>	450 m <sup>-1</sup>
Dikte vin	0,165 mm	0,165 mm
Vervuilingweerstand	0 m <sup>2</sup> .K/W	0 m <sup>2</sup> .K/W
Materiaal buis	koper	koper
Materiaal vinnen	aluminium	aluminium

-Tabel 2- Fysieke afmetingen koelbatterij



-Figuur 5- Laag  $\Delta T$ -kwaal bij een verhoogde aanvoerwatertemperatuur van de koelbatterij,  $\theta_{in} = \theta_{in,nom} + 0,5K$

functioneren. De reden van het dalend temperatuurverschil in deellast wordt veroorzaakt door de dalende warmteoverdracht aan de binnenzijde van de buizen van de koelbatterij. De waarden van beide debieten  $q_{m,ref}^*$  en  $q_m^*$  zijn gelijk aan elkaar en er is geen sprake van een kwaal. Voor een juiste begripsvorming is het nu beter om de term 'disease' (kwaal) te vervangen door 'occurrence' (verschijnsel) en te spreken over een laag  $\Delta T$ -verschijnsel. Verder is de omschrijving laminair weliswaar herkenbaar maar niet correct. Bij het verder afnemen van het debiet en dus een verdere afname van het Reynolds-getal, stijgt het waterzijdig temperatuurverschil juist. Zo stijgt in figuur 1

het waterzijdig temperatuurverschil indien het vermogen daalt van  $P^*=0,2$  tot  $P^*=0$ . Bij een dalend debiet zal, met een warmtewisselaar in tegenstroom, de uittredetemperatuur van het water de intredetemperatuur van de lucht benaderen.

### 100% BUITENLUCHTKASTEN EN ECONOMISERS

Een andere oorzaak van de laag  $\Delta T$ -kwaal zijn economisers en 100% buitenluchtkasten [5] [6]. Bij economisers wordt maximaal gebruik gemaakt van de aanwezige koelenergie in de buitenlucht. Bij volledig geopende buitenluchtklep functioneert deze opstelling als

een 100% buitenluchtkast. Het dalen van de retourwatertemperatuur in deellast treedt op indien in het ontwerp de retourwatertemperatuur lager is gekozen dan de uittredetemperatuur. Dit geeft een dalend temperatuurverschil in deellast [2]. Er is wederom geen sprake van een excessief debiet dat het lage temperatuurverschil veroorzaakt. De kwalificatie kwaal is daarom niet correct. Het dalend temperatuurverschil in deellast wordt veroorzaakt door een koelbatterij die met voornoemde voorwaarde is geselecteerd en wordt gebruikt. Het lage temperatuurverschil zorgt er wel voor dat de koelmachine in een constant/variabel-debietsysteem niet in vollast kan functioneren. Daarom is deze gebeurtenis geen kwaal en de genoemde definitie dekt de lading niet. Ook hier is het beter om te spreken over een laag  $\Delta T$ -verschijnsel. Ofschoon het misschien verwarrend is, is het toch essentieel dit onderscheid te maken. De kwaal is te verhelpen, het verschijnsel niet.

### CONCLUSIE

Dit artikel geeft inzicht in oorzaken waardoor het waterzijdig temperatuurverschil daalt, wat resulteert in een stijgend energiegebruik. Er is een definitie gegeven hoe de laag  $\Delta T$ -kwaal objectief vastgesteld kan worden, waarmee een afwijkend debiet vastgesteld kan worden. Voor de oorzaken van een verlaagd setpoint van de luchtuitredetemperatuur en een verhoogde waterintredetemperatuur zijn de effecten weergegeven op het debiet. Hieruit volgt dat de kwaal niet constant is en dat de verschijningsvorm afhankelijk is van de oorzaak waaruit de mogelijke oorzaak te herleiden is. Er is aangetoond dat ook een goed ingeregelde installatie een verhoogd debiet laat zien indien het setpoint van de luchtuitredetemperatuur wordt verlaagd. Aan de hand hiervan is aangetoond dat de gangbare definitie onvolledig is en voor de oorzaken 100% buitenluchtkasten en laminaire stroming beter gesproken kan worden over een laag  $\Delta T$ -verschijnsel dan een laag  $\Delta T$ -kwaal.

### VERVOLGARTIKEL

In het vierde artikel van deze serie wordt ingegaan op de afgiftekarakteristieken van twee typische koelbatterijen. In de literatuur wordt veelal uitsluitend uitgegaan van een bovenlineaire grafiek. In het artikel wordt aangegeven dat deze aanname niet algemeen geldig is.

### LITERAATUUR

1. Bahnfleth, W.P., Peyer, E., Variable primary flow chilled water systems: potential benefits and application issues, 2004
2. Brink, A.H.T.M. van den, Boxem, G., Schijndel, A.W.M. van, Deellast gedrag

van een koelbatterij in een Nederlands klimaat, TVVL Magazine 06-2013

7. Bullet, J. de, Variable Flow Chiller Plant Design, Technical session #6, 2007, McQuay
8. Kirsner, W., A Check Valve in the chiller bypass line?, 1998, Heating/Piping/Airconditioning (HPAC)
5. McQuay, Chiller Plant Design, Application Guide AG 31-003-1, 2002
6. Taylor, S.T., Degrading Chilled Water Plant Delta-T: Causes and Mitigation, 2002
7. Brink, A.H.T.M. van den, Boxem, G., Schijndel, A.W.M. van, Een koelbatterij in niet-ontwerprichting, algemene waterzijdige prestaties, TVVL Magazine 03-2013
8. Brink, A.H.T.M. van den, Waterzijdige prestaties van een koelbatterij in niet-ontwerprichting, het verhogen van het waterzijdig temperatuurverschil in deel-last, 2012, afstudeerverslag TU/e
9. [www.knmi.nl/klimatologie/uurgegevens](http://www.knmi.nl/klimatologie/uurgegevens)
10. Danfoss, Chiller optimization: The temperatures are the key!, <http://heating.danfoss.com>
11. Brink, A.H.T.M. van den, De hydraulische schakeling van een koelmachine, voorstu-

die naar de mogelijkheden tot energiebesparing door middel van een verbeterd hydraulisch ontwerp, 2011, masterproject TU/e

12. ISSO-publikatie 47, Ontwerp van hydraulische schakelingen voor koelen, ISBN 90-5044-112-2, 2005
13. Krisner, W., Chilled water distribution problems at the NASA Johnson Space Center, 1995

## NOMENCLATUUR

P	Vermogen	W
$q_m$	Debiet	kg/s
T	Temperatuurverschil	K
v	Luchtdebiet	m <sup>3</sup> /s
x	Vochtgehalte	g/kg
$\Delta m_{low}$	Laag $\Delta$ Kwaal	[-]
$\theta$	Temperatuur	°C

## SUB-/SUPERSCRIPTS

a	air (lucht)
avg	gemiddelde (lucht)
in	intrede
m	gemiddelde, gewogen massa
max.	maximum
min	minimum
nom	ontwerprichting
P*=0	waterzijdig temperatuurverschil in de nullastituatie
prim	primaire zijde
ref	referentie
sec	secundaire zijde
set	setpoint (luchtzijdig)
uit	uittrede
*	genormaliseerde waarde



# WE'RE BUILDING CONTROL

Bij gebouwen gaat het om beheersing. Eén manier om alle installaties te benaderen, besturen en beheren. Ongeacht welk merk. Ongeacht waar u bent. Ongeacht welk moment van de dag. Het kan.

Met Webeasy beheert u klimaat- en ruimteregeling, douche-automatisering, energiemangement, toegangscontrole, inbraakbeveiliging, videobewaking en verlichtingsmanagement. Vanuit elke webbrowser. Ook op uw smartphone of tablet.

Wij kunnen alle techniek in een gebouw aansturen. Met eigen producten, producten van derden of een combinatie daarvan. Dat maakt Webeasy het enige plug-and-play gebouwbeheersysteem ter wereld.

[www.webeasy.nl](http://www.webeasy.nl)

