Deformatie door onderdruk in het stalen reinwaterreservoir no. 1, inhoud 4000 m³, van het pompstation ir. A. Polstra te Sellingen

Inleiding

In verband met buitenschilderwerk aan dak en wanden van het sinds 1969 in bedrijf zijnde stalen reinwaterreservoir te Sellingen, werd door het schildersbedrijf verzocht dit reservoir leeg te pompen. Dit in verband met eventuele condensvorming op de te schilderen vlakken. De meest gunstige periode voor het uitvoeren van dit soort werkzaamheden ligt tussen april en september.
Door het in produktie nemen van het juist gereed gekomen stalen reservoir nr. 2

IR. B. P. A. JOOSTEN
hoofd produktie NV Waprog

(inhoud 8500 m³) was het buiten bedrijf stellen van reservoir 1 niet bezwaarlijk en werd besloten dit reservoir op 1 augustus leeg te pompen.
Ter voorkoming van besmetting door mijt, staalgrit etc. van het restje water op de bodem, ter dikte van enkele decimeters, via een opening van 300 mm diameter op het dak, werd deze normaliter van een be- en ontluchtingskap voorziene opening afgesloten door een blindflens, nadat in de zijwand van het reservoir een kleinere opening, diameter 63 mm, gemaakt was door demontage van een vlotterschakelaar. Verder bleef de hevelleiding voor het legen van het reservoir geopend (zie afb. 1).
Zolang het reservoir buiten dienst was, zou er geen kans bestaan op onderdruk, terwijl de normale variaties in luchtdruk en drukvariaties ten gevolge van temperatuurwisselingen via deze kleine opening gemakkelijk vereffend konden worden.
Om de kans op uitbreiding van een eventueel toch optredende infectie van het restant aan water op de bodem te verminderen, werd besloten het reservoir om de paar dagen met rein water door te spoelen, mede in verband met de toen juist optredende hittegolf.
Dit doorspoelen vond voor de eerste keer plaats op 5 augustus om ± 15.00 uur.
Vrijwel onmiddellijk na het openen van de reinwaterafsluiter door de dienstdoende machinist werden in het reservoir enkele harde klappen en een zwaar gerommel gehoord. Dit geluid werd door hem toegeschreven aan het op de bodemplaten van het reservoir vallen van het water uit de op circa 10 meter hoogte gelegen opening van de vulleiding.
Volgens ooggetuigen (machinisten, schilders en opzichters) begon vrijwel direkt na het openen van de reinwaterafsluiter de wand van het reservoir heftig te trillen en te plooien, met amplituden van circa 0,5 meter halverwege de bovenrand.
In het reservoir klonken geluiden die te vergelijken waren met donderslagen en gerommel tijdens onweer.
De reinwaterafsluiter werd daarop door de machinist zo snel mogelijk weer dicht gedraaid. Tijdens en ook na dit sluiten bleef het geluid nog enige tijd hoorbaar en bleef ook de wand plaatselijk heen en weer bewegen.
Na vijf à tien minuten begonnen de eerste indeukingen van de wand terug te springen t.g.v. de elasticiteit van het materiaal.
Dit bleef gedurende ongeveer 30 minuten doorgaan, totdat alle, op twee diametraal gelegen deuken na teruggesprongen waren (zie afb. 2).

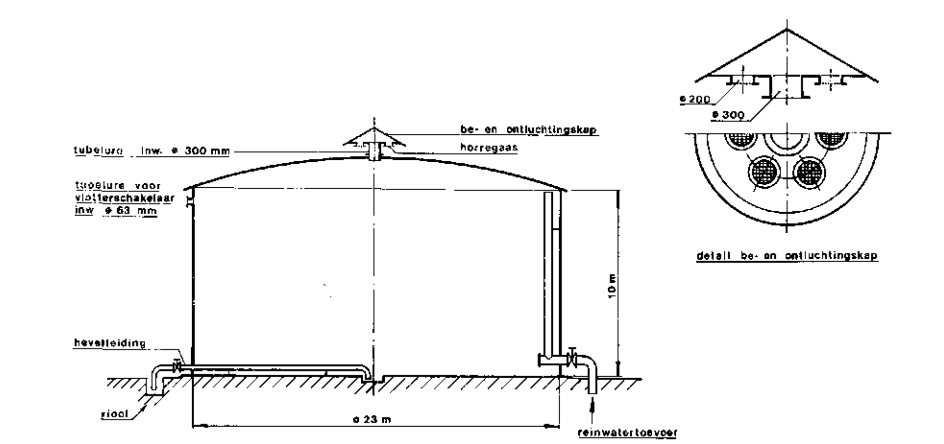
Lijst van gebruikte symbolen

a	=	warmtediffusiecoëfficiënt	m²/s
c	=	geluidssnelheid	m/s
Cp	=	soortgelijke warmte bij constante druk	J/kg °C
D	=	diameter	m
d	=	diameter, dikte	m
F	=	oppervlak	m²
H	=	hoogte reservoir	m
K 1, 2	=	constanten	
k	=	warmtedoorgangscoëfficiënt	J/m²s °C
M	=	massa	kg
m	=	massastroom	kg/s
P	=	druk	Pa (= N/m²)
Q	=	warmte-inhoud per m² plaat per °C	J/m² °C
q	=	warmtestroom per m² plaat	J/m² s
r	=	verdampings- (condensatie) warmte water	(r = 2495 x 10³ J/kg)
R	=	gasconstante	J/kg °C
SPL	=	sound pressure level	dB
T	=	temperatuur	°K of °C
t	=	tijd	s
u	=	acoustische deeltjessnelheid	m/s
V	=	volume	m³
v	=	snelheid	m/s
x	=	vochtgehalte van de lucht	kg/kg
α	=	warmte-overdrachtscoëfficiënt	J/m²s °C
λ	=	warmtegeleidingscoëfficiënt	J/m °Cs
ξ	=	weerstandscoëfficiënt	
ρ	=	soortgelijke massa	kg/m³
σ	=	verdampingscoëfficiënt	kg/m²s
Φ	=	volumestroom	m³/s
τ	=	tijd	s
Δ	=	verschil tussen twee waarden	

Indices:

c	=	gecondenseerd	r	=	(regen) water	w	=	(rein) water
d	=	waterdamp	s	=	staal	1	=	binnenkant reservoirwand
g	=	gemiddelde	t	=	totaal (lucht + waterdamp)	2	=	buitenkant reservoirwand
l	=	droge lucht	v	=	verdampend			

Afb. 1 - Doorsnede stalen reservoir (zuigleiding niet getekend; afmetingen niet op schaal).



1. Verklaring van het verschijnsel

Na het leeg hevelen blijft op de bodem van het reservoir nog een laagje water variërend van enkele decimeters tot enkele centimeters over, afhankelijk van de vlakheid van de bodem.

Ten gevolge van de zonnestraling en de hoge buitenluchttemperatuur in deze hete periode (30 à 35 °C) is de temperatuur van zowel het water op de bodem van het reservoir, alsook die van de lucht in het reservoir fors gestegen.

Uit latere metingen in het reservoir met geopende mangaten is gebleken, dat de temperatuur van het water op de bodem 30 °C bedroeg en de luchttemperatuur boven in het reservoir 45 °C was.

Met gesloten mangaten zullen deze temperaturen enkele graden hoger zijn.

Ten gevolge van deze temperatuurstijgingen van water en lucht zal het vochtgehalte van de lucht toenemen. Uitwisseling met de omgeving via de ontluchtingsopening zal gering zijn.

Zolang de luchttemperatuur hoger is dan de temperatuur van het water op de bodem is deze lucht onderverzadigd. De partiële dampdruk van de waterdamp in deze lucht is dan gelijk aan de verzadigingsdruk behorende bij de temperatuur van het water. Deze stellen we voorlopig voor een grootte orde berekening op 30 °C.

P_d (30 °C) = 4242 Pa (zie tabel I).

TABEL I.

T (°C)	P_d (Pa)	X (kg/kg)	v (m^3/kg)
10	1227	0,00788	0,8393
15	1704	0,01099	0,8584
20	2337	0,01518	0,8790
25	3166	0,02076	0,9018
30	4242	0,02812	0,9275
35	5622	0,03783	0,9569
40	7375	0,05058	0,9912
45	9582	0,06736	1,0321
50	12335	0,08949	1,0820
55	15740	0,11893	1,1442
60	19910	0,15852	1,2237
65	25010	0,21296	1,3286
70	31140	0,28962	1,4712

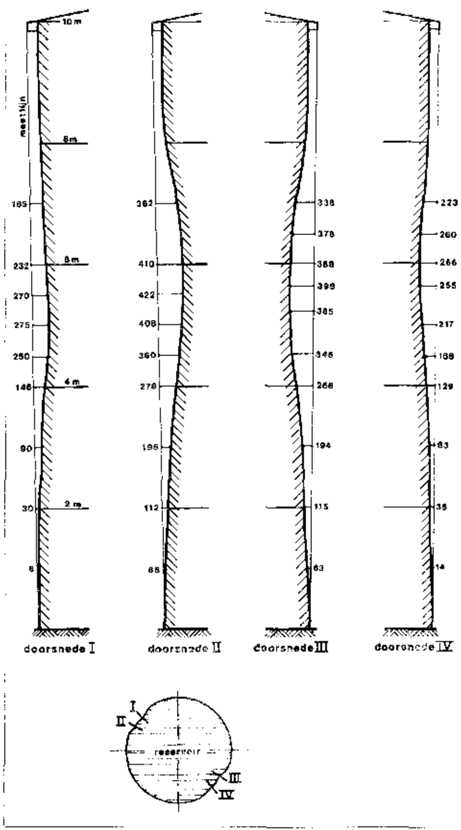
In deze situatie bevindt zich in het reservoir dus 4000 m^3 onverzadigde lucht van 45 °C. De totaal druk van deze lucht kunnen we gelijk stellen aan die van de buitenlucht d.w.z. 10^5 Pa.

De totaaldruk is volgens de wet van Dalton de som van de drukken van de in het reservoir aanwezige (droge) lucht en de dampdruk van de waterdamp, waarbij de waterdamp als een ideaal gas mag worden beschouwd.

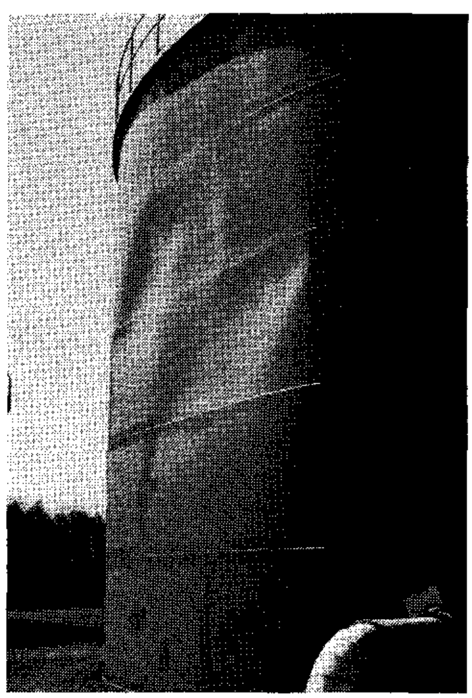
De druk van de in het reservoir aanwezige droge lucht wordt gevonden uit:

$$P_l = P_t - P_d \tag{1}$$

Hier dus P_l = (100.000 — 4242 Pa) = 95758 Pa.



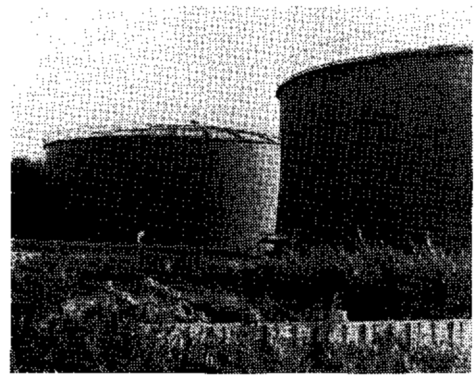
Afb. 2.



De hoeveelheid waterdamp, welke zich in het reservoir bevindt, wordt gevonden m.b.v. de wet van Boyle - Gay Lussac:

$$M_d = \frac{P_d V}{R_d T} \tag{2}$$

In dit geval met V=4000 m^3, P_d=4242 Pa,



T = 318 °K (45 °C) vinden we
$M_d \cong 116$ kg.

Deze hoeveelheid waterdamp neemt een volume V_d in, die berekend wordt met:

$$V_d = \frac{M_d R_d T}{P_t} \tag{3}$$

Uitgewerkt vinden we $V_d \cong 170\ m^3$.

Omdat de vulleiding in het reservoir eindigt op een hoogte van 10 meter, ontstaat tijdens het vullen daar ter plaatse een gordijn van vallend water. De temperatuur van dit water is ± 10 °C. De toevoercapaciteit is circa 2,5 m^3/min.

Door het verschil in temperatuur van het reine water van ± 10 °C en de verzadigingstemperatuur van de lucht in het reservoir, nl. ca. 30 °C, zal de in deze lucht aanwezige waterdamp in de nabijheid van het watergordijn snel condenseren. Ten gevolge van de met deze condensatie gepaard gaande volumevermindering ontstaat daar ter plaatse een plotselinge drukdaling.

Een dergelijke snelle drukdaling zal zich als een geluidsgolf met de snelheid van het geluid door de lucht in het reservoir voortplanten. Door weerkaatsing tegen de wanden gaan onderdrukken over in overdrukgolven en omgekeerd.

Deze acoustische golven zullen de menging van het lucht-waterdampmengsel in het reservoir bevorderen. Hierdoor wordt de condensatie van de resterende waterdamp versneld.

De drukval ter plaatse van het watergordijn is te schatten uit het verschil van de verzadigingsdrukken van waterdamp bij 30 °C en 10 °C.

Uit tabel I volgt:

$\Delta P_d = P_d\ (30\ °C) - P_d\ (10\ °C)$

$\Delta P_d = 3015$ Pa

De geluidssterkte SPL van een drukgolf met een amplitude van 3000 Pa, uitgedrukt in decibels re 2 x 10^{-5} Pa, wordt gevonden uit:

$$SPL = 20 \text{ Log} \frac{\Delta P_d}{2 \times 10^{-5}} \text{ dB} \tag{4}$$

SPL $\cong$ 160 dB

(De pijngrens van het gehoor ligt tussen 130 en 140 dB!)
Door visceuze demping zal de in werkelijkheid opgetreden geluidssterkte lager geweest zijn.

De met een dergelijke geluidsgolf gepaard gaande acoustische deeltjessnelheid kunnen we berekenen met:

$$U = \frac{\Delta P_d}{\rho C} \tag{5}$$

Met $\rho = 1{,}15$ kg/m^3 en $C = 330$ m/s wordt gevonden $U \cong 8$ m/s.

De bij heldere hemel opgetreden donderslagen in het reservoir kunnen dus hieruit worden verklaard.
Dit proces van condensatie zal, indien een voldoende hoeveelheid rein water in het reservoir gestroomd is, doorgaan totdat de verzadigingsdruk behorende bij de reinwatertemperatuur van 10 °C is bereikt.
De totaaldruk in het reservoir is dan, indien geen lucht van buiten het reservoir toegestroomd is, gedaald met 3015 Pa (= 300 mm wk).
De constructief maximaal toegestane onderdruk is 500 Pa (= 50 mm wk).

2. Berekening van het drukverloop in het reservoir na condensatie

Met behulp van verg. (2) en verg. (3) kunnen we de hoeveelheid resterende waterdamp en het volume van deze waterdamp berekenen, er vanuit gaande dat de eindtoestand wordt bereikt bij 10 °C.
Gevonden wordt M_d (10 °C) $\cong$ 37,5 kg en V_d (10 °C) $\cong$ 50 m^3.
Er is dan dus een hoeveelheid ΔM_d = 116 — 37,5 = 78,5 kg waterdamp gecondenseerd. De hiermee gepaard gaande volumevermindering ΔV_d bedraagt 170 — 50 $\cong$ 120 m^3.
Door de opening in de wand van het reservoir zal dit volume aangevuld moeten worden met lucht van buiten om de onderdruk op te heffen.
De bij het afkoelen van de lucht en de bij de condensatie vrij gekomen warmte zal een toename van de temperatuur van het reine water tot gevolg hebben.
Deze temperatuurstijging Δt kan berekend worden met:

$$\Delta t = \frac{\Delta M_d r + M_l C_{pl} \Delta t_l}{M_w C_{pw}} \tag{6}$$

De temperatuurdaling van de (droge) lucht Δt_l verloopt waarschijnlijk minder snel dan de condensatie. We nemen aan dat deze daling tijdens het proces 15° bedraagt.
De hoeveelheid reinwater, welke tijdens het proces in het reservoir gestroomd is, wordt geschat op 5 à 10 m^3.

Met: $r = 2495 \times 10^3$ J/kg; $C_{pl} = 1{,}05 \times 10^3$ J/kg °C; $C_{pw} = 4{,}19 \times 10^3$ J/kg °C; M_w = 5.000 à 10.000 kg en $M_l = V \rho_l \cong 4.000 \times 1{,}15$ = 4.600 kg, wordt gevonden $\Delta t \cong 13°$ à 6,5 °C.

Opm.: Er zou dus minder damp gecondenseerd kunnen zijn dan hiervoor berekend, omdat de eindtemperatuur van het reine water tussen de 16,5° en 23 °C moet liggen.
We mogen echter aannemen dat de begintemperatuur van het water op de bodem enkele graden hoger geweest is, doordat het reservoir vrijwel geheel gesloten was.
Bij condensatie van bijv. 33 °C naar 18 °C condenseert vrijwel evenveel damp als bij condensatie van 30 °C naar 10 °C, terwijl de hoeveelheid condensatiewarmte ongeveer gelijk blijft.
Uit vergelijking van de hierna met deze gegevens berekende tijd, nodig voor het hervullen van het reservoir met lucht met de waargenomen vultijd blijkt, dat de in werkelijkheid gecondenseerde hoeveelheid waterdamp ongeveer gelijk geweest moet zijn aan de hier berekende hoeveelheid.
De vrijgekomen warmte door afkoeling van de in de lucht aanwezige waterdamp is te verwaarlozen.
Na de plotselinge drukdaling in het reservoir zal door het van buiten toestromen van lucht de druk weer geleidelijk gaan toenemen.
De volumestroom $\Phi(\tau)$ door een opening met doorsnede F wordt gevonden uit:

$$\Phi(\tau) \cong v(\tau)\, F \tag{7}$$

De snelheid $v(\tau)$ is bij een turbulente stroming (Re > 2300) evenredig met de wortel uit het drukverschil over de opening op dat ogenblik

$$v(\tau) = K_1 \{\Delta P(\tau)\}^{1/2} \tag{8}$$

De constante K_1 hangt af van de geometrie van de opening en wordt bepaald uit de vergelijking voor het statisch drukverlies over een stromingsweerstand.

$$\Delta P = \xi \tfrac{1}{2} \rho v^2 \tag{9}$$

Uit verg. (9) volgt:

$$K_1 = \{\frac{2}{\rho \xi_1}\}^{1/2} \tag{10}$$

Gaan we er vanuit dat de luchttoevoer door de opening isothermisch plaatsvindt, dan zal de afname van de onderdruk in het reservoir (dus de toename van de totaaldruk) evenredig zijn met de momentane volumestroom $\Phi(\tau)$.
Dus:

$$\frac{d \Delta P(\tau)}{d} = -K_2 \Phi(\tau) \tag{11}$$

De evenredigheidsfactor K_2 is de verhouding tussen de maximum onderdruk ΔP_d na condensatie en het daarbij behorende gecondenseerde volume waterdamp ΔV_d.
Dus:

$$K_2 = \frac{\Delta P_d}{\Delta V_d} \tag{12}$$

Uit verg. (6), (7), (11) en (12) volgt:

$$\frac{d \Delta p(\tau)}{d\tau} = \frac{-K_1 F \Delta P_d}{\Delta V_d} \{\Delta P(\tau)\}^{1/2} \tag{13}$$

Na integratie van deze vergelijking volgt het verloop van de druktoename als funktie van de tijd t:

$$\int_0^t \frac{d \Delta P(\tau)}{\{\Delta P(\tau)\}^{1/2}} = -\frac{K_1 F \Delta P_d}{\Delta V_d} t \tag{14}$$

En na uitwerken en kwadrateren:

$$\Delta P(t) = \Delta P_d - \frac{K_1 F (\Delta P_d)^{3/2}}{\Delta V_d} t + \frac{K_2 F \Delta P_d}{2 \Delta V_d} t^2 \tag{15}$$

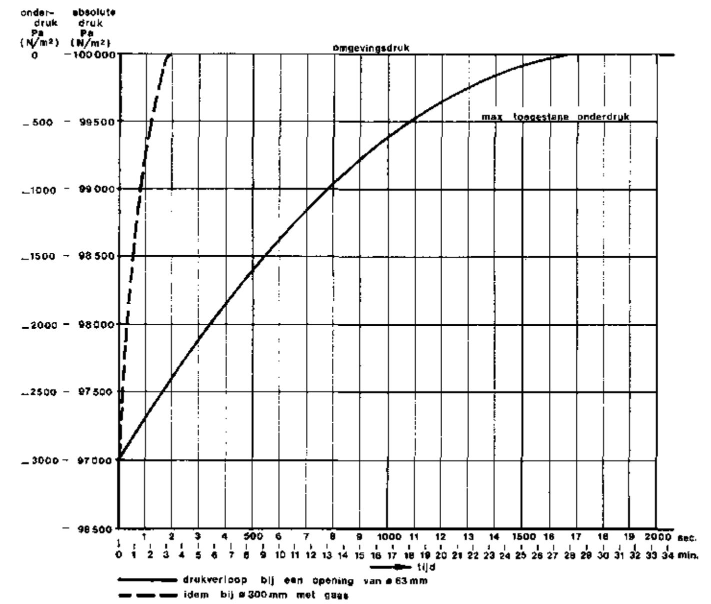
De weerstandscoëfficiënt $\xi \cong 3$ voor een aangelaste tubelure (volgens [1], blz. 482).
In deze tubelure met een inwendige diameter van 63 mm in de wand van het reservoir is in normale omstandigheden een vlotterschakelaar gemonteerd.
Uitgaande van een maximum onderdruk ΔP_d van 3.000 Pa op het tijdstip $t = 0$, wordt het drukverloop dan weergegeven door:

$$\Delta P(t) = 3000 - 3{,}01\, t + 0{,}00075\, t^2 \tag{16}$$

De tijd nodig voor het volledig (her)vullen van het reservoir met lucht van buiten wordt gevonden door $\Delta P(t) = 0$ te stellen. We vinden t = 1700 S. Deze tijd van circa 28 minuten is in goede overeenstemming met de waarneming, dat na het sluiten van de reinwatertoevoer nog gedurende bijna een half uur duidelijk hoorbaar was, dat lucht via deze tubelure naar binnen gezogen werd.
De overgang van turbulente naar laminaire stroming heeft plaats bij een drukverschil van ± 1 Pa en dit effect kan dus in de berekening verwaarloosd worden.
Het verloop van de druk is weergegeven in afb. 3.

3. Vragen, voortgevloeid uit dit opgetreden verschijnsel

Gezien de ernst van de deformaties werd een nadere analyse van dit verschijnsel noodzakelijk geacht.
Bij navraag bij ontwerpers en constructeurs van stalen reservoirs bleek dit verschijnsel hun niet bekend te zijn.
Naast de reeds hiervoor behandelde vragen, betreffende grootte en tijdsduur van de



Afb. 3 - Drukverloop in reservoir na een plotselinge drukdaling van 3000 Pa.

opgetreden onderdruk en het verloop van de druk na de condensatie, bleven de volgende vragen open:

a. Hoe zou het verloop van de druk geweest zijn indien de normale be- en ontluchtingsopening op het dak van de tank aanwezig geweest was?

b. Is deze opening voldoende om de onderdruk in het reservoir binnen het toegestane maximum van 500 Pa te houden?
Dit vooral omdat dezelfde constructie met dezelfde afmetingen ook bij veel grotere reservoirs toegepast wordt (bijv. reservoirs van 8.500 m^3).
Wat is dan de minimum noodzakelijke opening?

c. Bestaat er kans op de grote onderdruk bij condensatie als gevolg van een plotselinge afkoeling van dak en wanden door bijv. een stortbui na een hitteperiode of buisbreuk in de direkte omgeving van het reservoir? Hierbij er vanuit gaande dat een reservoir enige tijd vrijwel leeg heeft gestaan.

Vraag a:

De be- en ontluchtingsopening wordt gedacht als een tubelure met een diameter van 300 mm, voorzien van horregaas, vrije opening 50 %.
De weerstandscoëfficiënt van tubelure met gaas wordt $\xi = 4$ geschat.
Het verloop van de druk na condensatie tot onderdruk van 3.000 Pa wordt in dat geval gegeven door:

$$\Delta P(t) = 3000 - 30{,}1\,t + 0{,}0756\,t^2 \qquad (17)$$

De tijd nodig voor het opheffen van de onderdruk zou in dat geval $\pm$ 170 sec. geweest zijn.

Het verloop van de druk is eveneens in afb. 3 weergegeven.

Vraag b:

Of een dergelijke opening voldoende is om de onderdruk beneden 500 Pa te houden zal afhangen van de snelheid waarmee de waterdamp zal condenseren.
Stellen we dat de condensatie lineair verloopt in 60 sec.
De condensatiesnelheid is in dit geval dan

$$\frac{V_d}{60} = 2\ m^3/s$$

De gemiddelde luchtsnelheid in de toevoeropening bij een (maximum) onderdruk van 500 Pa wordt gevonden met behulp van verg. (8). Gevonden wordt:

$v \simeq 15$ m/s

De vrije doorstroomopening F, nodig om het gecondenseerde volume waterdamp te vervangen door lucht van buiten, wordt dan:

$$F = \frac{2}{15} = 0{,}133\ m^2$$

Zonder horregaas wordt de benodigde diameter van de opening dan d = 410 mm en met horregaas d $\cong$ 580 mm. De nu aanwezige opening van 300 mm Ø is dus te klein om bij een condensatiesnelheid van 2 m^3/s de onderdruk tot de maximaal toelaatbare te beperken.

Opm. 1: De in werkelijkheid optredende maximum condensatiesnelheid is moeilijk vast te stellen.
Tijdens de eerste fase van het vullen met reinwater zal alleen condensatie plaatsvinden direkt bij het watergordijn.

Opm. 2: Grotere reservoirs (tot 8.500 m^3) zijn, zoals reeds genoemd is, met dezelfde beluchtingskappen uitgerust (diam. 300 mm; $F = \frac{1}{2} \times 0{,}07\ m^2$; $\xi = 4$).
De afmetingen van deze kappen zijn gebaseerd op het normale gebruik van de reservoirs, dus vullen of legen met een capaciteit van $\pm$ 1800 m^3/h, d.w.z. $\pm$ 0,5 m^3/s.
De gemiddelde snelheid in de be- en ontluchtingsopening is dan minder dan 15 m/s en ook de onderdruk blijft beneden de maximaal toegestane (verg. (7) en (9)).
Omdat bij condensatie de hoeveelheid te condenseren waterdamp ook groter is, zullen dergelijke reservoirs langer aan te grote onderdrukken bloot staan dan een reservoir met een kleinere inhoud.

Vraag c:

Bestaat er kans op te snelle condensatie ten gevolge van afkoeling van dak en wanden door bijv. een plotselinge regenbui.
De vragen, welke bij dit probleem kunnen worden gesteld, zijn:

1. Hoe snel koelen dak en wanden af tot een zodanige temperatuur, dat condensatie binnen in het reservoir aan deze wanden zal optreden?

2. Is daarna het warmtetransport van binnen naar buiten zodanig, dat bij de ingestelde temperatuurverdeling over de grenslagen en de wand de condensatiewarmte van meer dan 0,5 m^3 waterdamp per seconde kan worden afgevoerd?
Zou dat namelijk het geval zijn, dan kan de onderdruk toenemen tot meer dan de maximaal toegestane onderdruk van 500 Pa (zie vraag b. opm. 2).
De voor deze berekeningen benodigde gegevens, voor wat betreft warmte-overdrachtscoëfficiënten zowel binnen als buiten, alsmede de condensatie-, resp. verdampingssnelheid, zijn slechts in enkele bijzondere gevallen analytisch te bepalen (zie bijv. [2]).
Bij de nu volgende berekeningen gaan we uit van een reservoir met een diameter van 33 meter, hoogte 10 m, inhoud 8.500 m^3.
We nemen aan, dat alleen het dakoppervlak zodanig afkoelt, dat eventueel condensatie kan optreden. Dakoppervlak F_r = 850 m^2, dikte dakplaten 6 mm.
Eerst zal worden nagegaan of een zodanige 'stationaire' temperatuurverdeling over de dakplaat en grenslagen mogelijk is, dat na het afkoelen van de dakplaat tot deze 'stationaire' situatie, gedurende een bepaalde periode de voor de condensatie van 0,5 m^3 waterdamp per seconde nodige warmte-afvoer kan worden gerealiseerd.
Uit deze berekening kan dan eventueel inzicht worden verkregen of ook grotere, ontoelaatbare condensatiesnelheden zouden kunnen optreden.

Uit vergelijking (2) wordt de per seconde condenserende hoeveelheid waterdamp berekend:

$M_d \cong 0{,}35$ kg/s

De per m² dakoppervlak en per seconde af te voeren hoeveelheid warmte q wordt gevonden uit:

$$q = \frac{M_d r}{F_r} \qquad (18)$$

Met r = 2495 x 10³ J/kg en F_r = 850 m² wordt

$$q = 1028 \text{ J/m}^2\text{s} \qquad (19)$$

Dit is dus de maximaal toelaatbare warmtestroom per m² dakoppervlak, opdat de condensatiesnelheid in het reservoir niet te hoog en daarmee de druk niet te laag wordt. Stellen we nu de temperatuur van het regenwater op 10 °C, de hoeveelheid regen 60 mm/h, dit is 1,66 g/m²s en de temperatuurstijging van het regenwater 4 °C, dan wordt door deze opwarming slechts ca. 28 J/m²s afgevoerd.

De resterende hoeveelheid warmte, ca. 1.000 J/m²s, zal door verdamping van het regenwater moeten worden afgevoerd.

Om nu 1.000 J/m²s aan warmte door middel van verdamping af te voeren, zal

$$\frac{1000}{r} = 0{,}4 \times 10^{-3} \text{ kg regenwater per m}^2 \text{ en}$$

per seconde moeten verdampen.

Met de volgende berekening wordt nagegaan of deze hoeveelheid van 0,4 g/m²s bij deze omgevingscondities ook eventueel zal kunnen verdampen.

De verdampingssnelheid m_v aan een nat oppervlak kan worden berekend met ([1], blz. 574).

$$m_v = \sigma_2 (x' - x) \qquad (20)$$

waarin:

m_v = verdampingssnelheid per m² (kg/m²)
σ_2 = verdampingscoëfficiënt (kg/m²)
x' = vochtgehalte in de grenslaag (kg/kg)
x = vochtgehalte van de omgeving (kg/kg)

De verdampingscoëfficiënt σ_2 is zowel voor een turbulente stroming, waarbij warmteoverdracht en stofuitwisseling door turbulente menging plaatsvinden, alsook bij laminaire stroming, waarbij deze verschijnselen resp. door geleiding en diffusie plaatsvinden, te berekenen met de warmteoverdrachtscoëfficiënt α_2:

$$\sigma_2 = \frac{\alpha_2}{C_{pl}} \qquad (21)$$

waarin:

C_{pl} = soortgelijke warmte vochtige lucht $\cong$ 1045 J/kg °C.

De warmte-overdrachtscoëfficiënt α_2, voor stroming langs een vlakke horizontale plaat, wordt bepaald met de vergelijking (zie [1], blz. 595)

$$\alpha_2 = 0{,}93\ K_w (T_w - T_r)^{1/4} \qquad (22)$$

waarin:

K_w = factor afhankelijk van gemiddelde temperatuur $T_g = \dfrac{T_w - T_r}{2}$
T_w = wand temperatuur in °C
T_r = temperatuur van het regenwater in °C

Voor T_w 18 °C en T_r = 10 °C; T_9 = 14 °C en $K_w \cong 230$ wordt de warmteoverdrachtscoëfficiënt

$\alpha_2 \cong 412$ J/m²s °C
en
$\sigma_2 = 0{,}394$ kg/m²

Het vochtgehalte x' van de lucht in de grenslaag is moeilijk vast te stellen.

We nemen aan, dat dit gelijk is aan het vochtgehalte van verzadigde lucht van de gemiddelde temperatuur tussen wand en omgeving, dus bij 14 °C.

Voor het vochtgehalte van de omgeving nemen we aan, dat deze verzadigd is, dus bij 10 °C.

Wij vinden:

$x' - x = 0{,}010300 - 0{,}007882 = 0{,}002418.$

Door subsitutie van deze waarden in verg. (20) vinden we, dat de verdampingssnelheid onder deze aangenomen omstandigheden 0,95 gram/m²s is.

Dit is meer dan het dubbele van de hiervoor berekende minimale hoeveelheid te verdampen regenwater van 0,4 gram/m²s, welke nodig was voor het afvoeren van een hoeveelheid warmte van 1000 J/m²s.

Temperatuurgradiënt over de staalplaat

Om een warmtetransport van 1.028 J/m²s over een staalplaat van 6 mm dikte te onderhouden is een zeker temperatuurverschil ΔT noodzakelijk.

Dit verschil volgt uit de vergelijking:

$$q = \lambda \frac{F}{d} \Delta T \qquad (23)$$

De warmte geleidingscoëfficiënt voor staal λ = 52,3 J/m s °C.

F = oppervlak (m²)
d = dikte plaat (m)

Uit verg. (23) volgt $\Delta T \cong 0{,}12$ °C.

Er is dus slechts een gering temperatuurverschil tussen binnen- en buitenkant dakplaat nodig om deze warmtestroom in stand te houden.

Nu zal nog nagegaan moeten worden of onder deze omstandigheden het warmtetransport van 1.028 J/m²s aan de binnenzijde kan worden bereikt. Tevens zal het stoftransport, in de vorm van condensvorming op de wand, onder deze condities voldoende groot moeten zijn, dat wil zeggen 0,35 kg/s voor het totale dakoppervlak.

Omdat de gegevens in de literatuur voor de warmte-overdrachtscoëfficiënt vooral betrekking hebben op condensatie van verzadigde damp zonder de aanwezigheid van lucht, kunnen deze hier niet zonder meer toegepast worden. Verder is de warmte-overdracht sterk afhankelijk van de manier, waarop de damp op de wand condenseert. Indien dit gebeurt in de vorm van druppels kan de warmte-overdrachtscoëfficiënt 10 à 20 keer zo groot zijn als bij film-condensatie. Voor filmcondensatie worden warmte-overdrachtscoëfficiënten voor stoom gevonden van 2 à 3000 J/m²s °C.

De minimum warmte-overdrachtscoëfficiënt, nodig voor een warmtetransport van 1.028 J/m²s °C, volgt uit de algemene vergelijking voor warmtetransport:

$$q = k F \Delta T \qquad (24)$$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{d}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \qquad (25)$$

waarin:

F = oppervlak (hier per m²)
ΔT = temperatuurverschil tussen binnen en buiten, hier 30 °C — 10 °C = 20 °C.

Uit verg. (24) volgt:

$$k = \frac{20}{1.028} \cong 51 \text{ J/m}^2\text{s °C}.$$

Met $\dfrac{d}{\lambda} = 1{,}15 \times 10^{-2}$ en $\dfrac{1}{\alpha_2} = 0{,}243 \times 10^{-2}$

vinden we:

$\alpha_1 = 165$ J/m²s °C.

Gezien de warmte-overdrachtscoëfficiënt voor verzadigde stoom, is deze waarde waarschijnlijk zeer goed mogelijk.

Berekenen we nu op dezelfde manier als voor de buitenwand de hoeveelheid damp, die in dit geval condenseren kan per m² wandoppervlak, dus met verg. (20) en (21), dan vinden we m_c = 1,36 g/m²s.

Hierbij is voor het vochtgehalte x' van de omgeving uitgegaan van die, welke behoort bij 30 °C en voor het vochtgehalte in de grenslaag die behorende bij de gemiddelde temperatuur T_g = 24 °C.

Over het totale dakoppervlak kan dus condenseren 850 x 1,36 = 1.150 g/s.

Dit is dus ca. 3 x de hoeveelheid bij een condensatiesnelheid van 0,5 m³/s!

Berekening van de tijd nodig voor afkoeling van de dakwand

Ter vereenvoudiging van de berekening

gaan we uit van een uniforme temperatuur in de dakplaat, warmte-afvoer alleen aan de buitenkant, geen warmtetransport aan de binnenkant tijdens de afkoelperiode en een constante warmte-overdrachtscoëfficiënt van wand naar regenwater.
De aanname van een uniforme temperatuur van de plaat tijdens afkoelen is gebaseerd op de grootte van het Fourier-getal.
Het Fourier-getal is gedefinieerd als:

$$Fo = \frac{at}{d^2} \qquad (26)$$

waarin:

$a = \dfrac{\lambda}{\rho C_{ps}}$ de warmtediffusiecoëfficiënt $\left(\dfrac{m^2}{S}\right)$
t = tijd (S)
d = dikte van de wand (m)
λ = warmtegeleidingscoëfficiënt staal (J/ms °C)
ρ = soortelijke massa staal (kg/m^3)
C_{ps} = soortelijke warmte staal (J/kg °C)

Indien dit Fourier-getal, dat de verhouding weergeeft tussen de warmte-geleiding van het materiaal en de warmtecapaciteit, plaatdikte en de tijd, groter is dan 1,5, dan is de temperatuurverdeling in de plaat vrijwel uniform.

Met $d = 6 \times 10^{-3}$ m; $\lambda = 52{,}3$ J/ms °C; $\rho = 7.800$ kg/m^3 en $C_{ps} = 465$ J/kg °C vinden we:

$Fo = 3\,t$

Dus na $t = 0{,}5$ s voldoet het Fourier-getal reeds aan de gestelde voorwaarde voor een vrijwel uniforme plaattemperatuur.
Beschouwen we nu 1 m^2 dakplaat met een begintemperatuur $T_w(0) = 70$ °C.
Deze plaat wordt aan een zijde afgekoeld door regenwater met een temperatuur $T_r = 10$ °C.
De warmte-overdrachtscoëfficiënt wordt met behulp van verg. (22) berekend voor een gemiddelde wandtemperatuur van 40 °C. We vinden:

$\alpha_2 = 600$ J/m^2s °C.

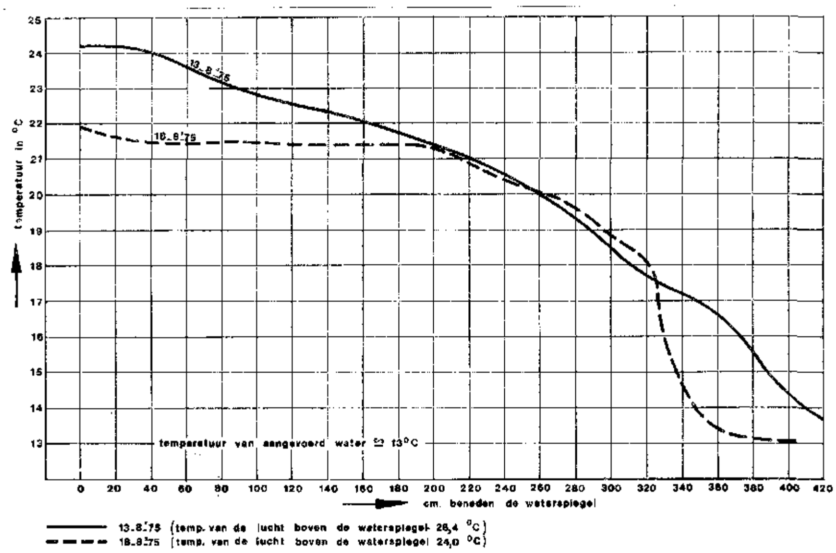
De warmte-inhoud Q van 1 m^2 dakplaat wordt gevonden uit:

$$Q = \rho_s\, d\, C_{ps} \; J/m^2\,°C \qquad (27)$$

Voor een plaat van 1 m^2, die aan een zijde wordt afgekoeld, waarbij de warmte-overdrachtscoëfficiënt α_2 is en de temperatuur van het koelmedium (regenwater) T_r, wordt de warmtebalansvergelijking weergegeven door:

$$Q \frac{d\,T_w(t)}{dt} = -\,\alpha_2\,\{T_w(t) - T_r\} \qquad (28)$$

Hieruit volgt door integratie de temperatuurdaling van de dakplaat als functie van de tijd, volgens:



Afb. 4 - Watertemperatuur in zomerse periode van een reservoir met ondervulling.

$$\frac{T_w(t) - T_r}{T_w(0) - T_r} = e^{-\{\frac{\alpha_2}{Q} t\}} \qquad (29)$$

Met bovenstaande gegevens volgt hieruit:

$$\frac{T_w(t) - 10}{60} = e^{-\{\frac{600}{21800} t\}} \qquad (30)$$

Door in vergelijking (30) $T_w(t) = 18$ °C te stellen, vinden we hieruit de tijd nodig voor afkoelen van de dakplaat van 70 °C naar 18 °C. Deze tijd is ca. 73 seconden.

4. Conclusies

4.1. Hoewel uitgegaan is van extreme omstandigheden wat betreft hitteperiode, leeg reservoir en regenval, kan toch worden gesteld, dat een nader onderzoek naar de minimum afmetingen en de stromingsweerstand van de be- en ontluchtingskappen, met in achtneming van de inhoud van het reservoir, wenselijk is.
Indien we aannemen dat de maximale warmte-afvoer per m^2 en per seconde gelijk is aan de verdampingswarmte van de maximaal te verdampen hoeveelheid regenwater, nl. 0,95 g/m^2s, dan is de maximale condensatiesnelheid:

$$\frac{0{,}95}{0{,}40} \times 0{,}5 \cong 1\ m^3/s.$$

Om de onderdruk in het reservoir beneden de grens van 500 Pa te houden is dan een opening nodig van ca. 400 mm (met $\xi = 4$, opening voorzien van gaas).

4.2. Hervullen van een, gedurende een hitteperiode leegstaand reservoir, dient alleen dan plaats te vinden, indien de temperatuur van de lucht in het reservoir zo laag mogelijk is, dat wil zeggen om plm. 5.00 uur 's morgens. Tijdens het vullen moeten eventueel één of meer mangatdeksels worden verwijderd.

4.3. Indien in de zomer een stalen reservoir voor enige dagen buiten bedrijf moet, dienen eveneens één of meer mangatdeksels te worden verwijderd.

4.4. Bij reservoirs, welke normaal van onderen worden gevuld, kan de temperatuur van de bovenste laag water sterk stijgen (zie afb. 4). Ook onder deze omstandigheden kan bij plotselinge toevoer van kouder water boven in het reservoir of door afkoeling van het dak een onderdruk in het reservoir ontstaan.

Literatuur

1. 'Hütte' Des Ingenieurs Taschenbuch, 27 Auflage Verslag van Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin 1948.
2. Nusselt, W., Zeitschrift Ver. Dtsch. Ing., 60 (1916) 541-6, 569-75.

● ● ●