

## Verdamping, vorming van afzettingen en corrosieschade

Ir. W. M. M. Huijbregts \*

ELEKTROTECHNIEK 50 (1972) 5 2 maart

### SUMMARY

In connection with the extended research into the experimental boiler a study has been made of literature on boiling processes, the formation of deposits and corrosion failures. Some of the results of the experimental boiler research and of some service failures have been described.

### INLEIDING

Corrosieschade in bedrijfsketels wordt vaak ten onrechte alleen maar aan een slechte waterkwaliteit toegeschreven. Corrosie treedt namelijk ook wel op in ketels, waarvan het ketelwater toch van relatief goede kwaliteit is. Het corrosieproces blijkt zo gecompliceerd te zijn, dat - wil men een ketel corrosie veilig kunnen bedienen - naast de ketelwaterchemie ook dient te worden gelet op factoren, zoals circulatiestoringen, de juiste warmtebelastingen en het voorkomen van ketelslibafzettingen. In dit kader zal het verdampings- en kookproces aan de pijp wand worden behandeld, waarna de invloed daarvan op het corrosieproces zal worden aangegeven.

### NORMALE VERDAMPING IN EEN PIJP VAN EEN DOORSTROOMKETEL

Voor al t.b.v. kernenergiecentrales is er al veel aandacht geschonken aan het verdampingsproces, waarbij de onderzoekers de testomstandigheden niet altijd gelijk kozen (1..7). Door deze soms kleine variaties in de testomstandigheden zijn de resultaten niet steeds onderling te vergelijken. Al deze experimenten echter hadden over het algemeen tot doel de relatie vast te leggen tussen de toegevoerde warmte en de pijp wandtemperatuur.

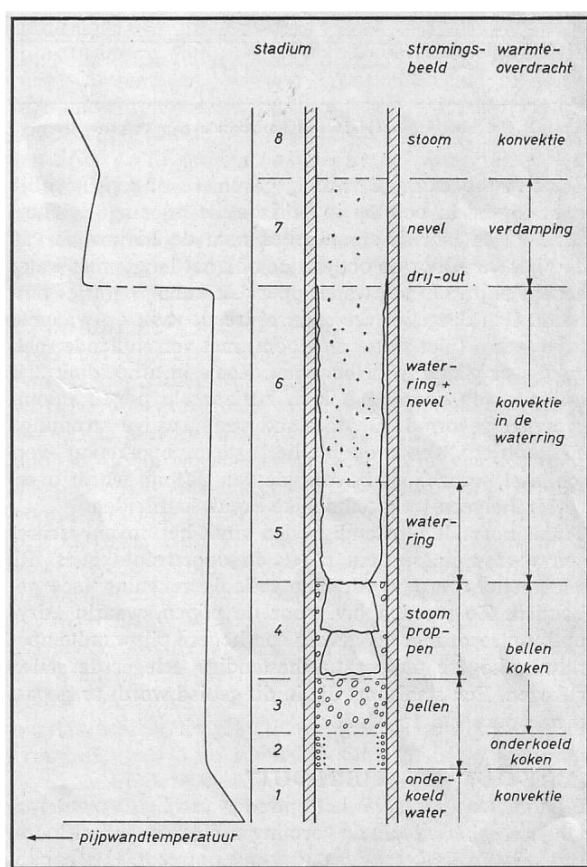
Men kan dit probleem in principe op twee manieren benaderen, namelijk door de pijp wandtemperatuur als de onafhankelijke variabele te kiezen en de hierbij optredende warmtedoorgang te meten of door de warmtebelasting als de onafhankelijke variabele te kiezen en de pijp wandtemperatuur te zien als de daarvan afhankelijke grootte. Beide situaties komen in het praktische ketelbedrijf ook voor.

Zo wordt in een eco-pijp de pijp wandtemperatuur bepaald door de rookgastemperatuur en moet de warmtedoorgang daarbij als de afhankelijke variabele worden beschouwd. In verdamperspijpen echter wordt de warmtebelasting bepaald door de afstelling van de branders. Deze moeten juist zijn afgeregeld, teneinde plaatselijk geen te hoge warmtedoorgang te veroorzaken met als gevolg een ongewenste stijging van de pijp wandtemperatuur, waardoor de vloeigrens van het pijpmateriaal gemakkelijk wordt overschreden en pijpbreuk kan optreden. Bij een te hoge warmtebelasting zou het zelfs mogelijk zijn, dat de pijp wandtemperatuur zo hoog oploopt, dat het materiaal kan smelten (burn-out).

Alvorens nader op dit „burn-out“-verschijnsel te kunnen ingaan dient eerst het normale verdampings- of kookproces te worden besproken. Wordt in een pijp „onderkoeld“ water geleid en vervolgt men het kookproces totdat oververhitte stoom is ontstaan, dan kan men hierbij de volgende 8 stadia onderscheiden (1, 5, 6). In afbeelding 1 zijn deze schematisch aangegeven:

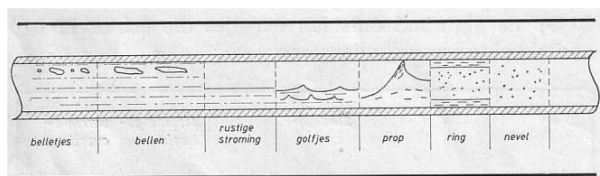
1. In het onderkoelde water vindt de warmteoverdracht plaats door convectie. Aan de pijp wand is een film van oververhit water aanwezig.
2. Op de pijp wand ontstaan belletjes die echter in het onderkoelde water condenseren.

3. De ontstane stoombellen condenseren niet meer, daar het water de kooktemperatuur heeft bereikt. De bellen in het centrum van de pijp verenigen zich tot grotere stoombellen.
4. De stoombellen in het centrum van de pijp worden zo groot, dat stoompropfen ontstaan. Het resterende water wordt naar de pijp wand gedrongen. In deze dunne waterlaag treedt nog een belenkookproces op.
5. De stoompropfen sluiten zich aaneen, zodat het water als een film op het pijpoppervlak wordt gedrongen. De warmteoverdracht treedt op door verdamping.
6. Door de toenemende snelheid van de stoom en de relatief lage snelheid van de waterfilm worden waterdruppeltjes van de waterlaag meegeslurd in de stoom. De warmteoverdracht vindt plaats door verdamping en er ontstaat een zeker evenwicht doordat de waterdruppeltjes uit de stoom weer op de waterfilm neerslaan.
7. Door de verdergaande verdamping verdwijnt de waterfilm ten slotte, hetgeen gepaard gaat met een stijging van de pijp wandtemperatuur. Dit verschijnsel wordt „dryout” genoemd. De waterfilm wordt op zeer wisselende plaatsen afgebroken, zodat de pijp wandtemperatuur ook sterk fluctueert. Over de pijp wand blijven als het ware smalle waterriviertjes (rivulets) stromen. In de pijp bevindt zich stoom met nog enkele waterdruppeltjes.
8. In de oververhitte stoom treedt de warmteoverdracht op door convectie.



**Afb. 1 Schematische voorstelling van de warmteoverdracht in een verticale pijp met een wafstroommengsel.**

Zoals in afbeelding 2 is aangegeven treedt een dergelijk stromingsbeeld ook op in horizontale pijpen (8). Uiteraard stijgen hier de stoombellen naar de bovenzijde van de pijp, waardoor de onderzijde ook het langst met water bedekt blijft. Op het wateroppervlak kunnen golfjes ontstaan. Een dergelijk verschijnsel treedt vaak op wanneer twee media (hier water en stoom) met verschillende snelheid over elkaar voortbewegen. Zoals in afbeelding 2 is weergegeven, worden ook in horizontale pijpen stoompropfen gevormd. De toestand van „rustige stroming” en „golfjes” treedt op bij het „steam blanketing”-verschijnsel, waarbij de bovenzijde van de pijp wordt oververhit, hetgeen tot uiteindelijke breuk kan leiden.



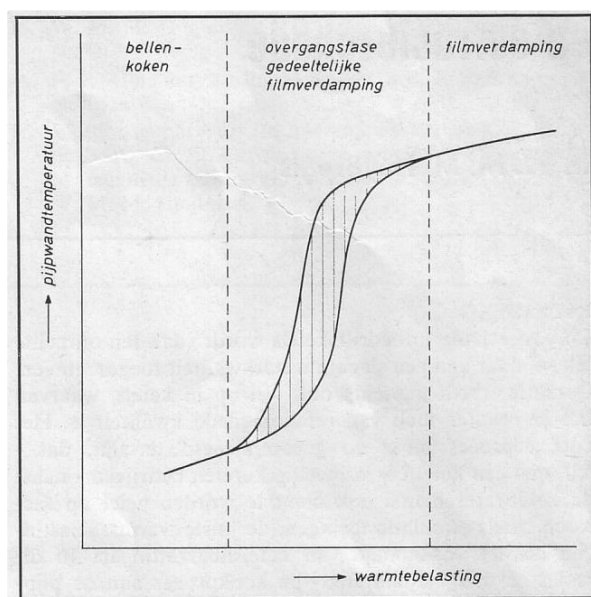
**Afb. 2 Het stromingsbeeld in een horizontale pijp volgens Alves.**

Onder normale omstandigheden vindt het bovenbeschreven verdampfingsproces plaats in doorstroomketels. Bij het ketelontwerp wordt hier volledig rekening mee gehouden. Zo worden b.v. voor de pijpen, waarin „dryout“ optreedt met als gevolg een hogere pijpwandtemperatuur, hogere temperatuurbestendige gelegeerde stalen gekozen. Een staalsoort die in dit gebied wordt toegepast is bij voorbeeld 15 Mo3.

### „DRY-OUT“ EN „BURN-OUT“

Bij doorstroomketels is het optreden van het dry-out-verschijnsel inherent aan de vorming van oververhitte stoom. Het punt in de ketel, waar dry-out optreedt, is afhankelijk van de stroomsnelheid en de warmtebelasting. Normaal gesproken zal het echter plaats vinden bij een hoge stoomfractie en als zodanig is het volledig aanvaardbaar, daar het toegepaste materiaal hiervoor is berekend.

Indien dry-out echter bij een te laag stoompercentage optreedt, (waarbij men dus eigenlijk niet van de eerder gedefinieerde, dry-out-term kan spreken) dan kan dit leiden tot te hoog oplopende pijpwandtemperaturen, met als gevolg vloeien, of zelfs smelten van het staal. In deze gevallen wordt van filmverdamping of „burn-out“ gesproken.



**Afb. 3 De pijpwandtemperatuur bij een toenemende warmtebelasting onder constante sfoomfractie.**

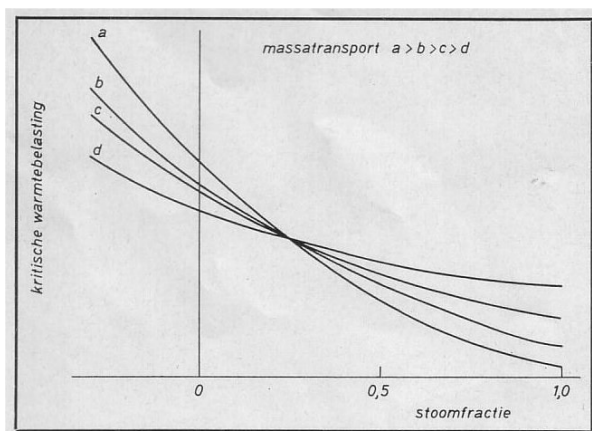
In afbeelding 3 is schematisch het verloop van de pijpwandtemperatuur weergegeven, wanneer de warmtebelasting bij een constant blijvend stoompercentage wordt verhoogd. Uit dit verloop blijkt, dat bij een bepaalde warmtebelasting de pijpwandtemperatuur sterk stijgt en dat hierbij ook temperatuurfluctuaties gaan optreden. Deze fluctuaties zijn het gevolg van het afwisselend droogdampen en herbevochtigen van de pijpwand. Bij een verdere stijging van de warmtebelasting stelt zich dan de stabiele toestand van filmverdamping in. Tussen de pijpwand en het water of water-stoommengsel bevindt zich dan een warmteïsoleerend laagje van oververhitte stoom. De warmtebelasting, waarbij dit verschijnsel optreedt, wordt de kritische warmteflux genoemd. In de literatuur wordt deze kritische waarde op verschillende manieren gedefinieerd en wel als de warmtebelasting

a. waarbij de eerste temperatuurfluctuaties optreden (begin van de partiele filmverdamping);

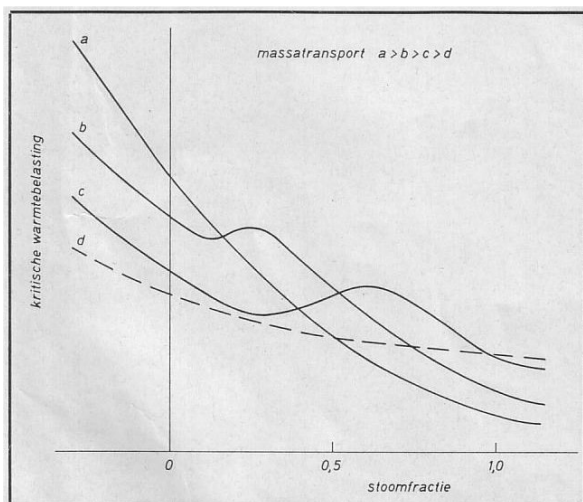
- b. waarbij de maximale temperatuurschommelingen worden gemeten;  
c. waarbij totale filmverdamping optreedt.

De kritische warmtebelasting blijkt, ongeacht de wijze van definiëren, sterk afhankelijk van het medium in de pijp. In afbeelding 4 zijn de meetresultaten van Bell (9) en in afbeelding 5 die van Collier (6, 7) weergegeven. Volgens Bell neemt de kritische warmtebelasting bij verhoging van de stoomfractie en voor de hogere stoomfracties ook bij toenemend massatransport af. Als gevolg van de hogere snelheid wordt het waterlaagje aan de pijpwand als het ware dunner uitgewalst, zodat het dry-out-verschijnsel eerder plaats vindt. Vandaar dat in afbeelding 4 een inversiepoint optreedt.

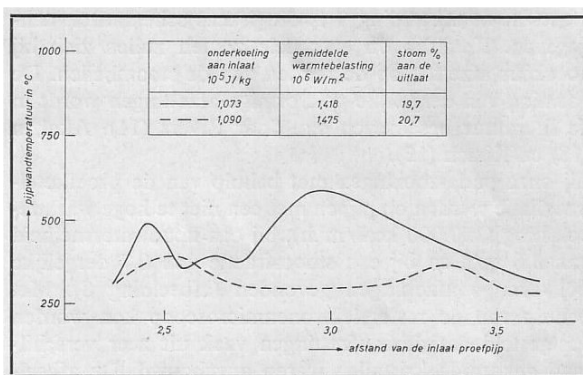
Volgens Collier echter wordt een minimale en maximale kritische warmtebelasting gevonden. Dit minimum en maximum naderen elkaar bij toenemende massatransport. Deze meetresultaten worden door Collier niet direct verklaard. Uit de metingen van Keeys (4) is echter gebleken, dat onder bepaalde omstandigheden twee pijpwandtemperatuurmaxima konden worden gemeten (afb. 6). Bij een stoomfractie van ca. 0,2 werd de warmtebelasting over de proefpijp (inwendige diameter: 12,7 mm) geleidelijk opgevoerd. Het optreden van twee gescheiden temperatuurmaxima wordt verklaard door herbevochtiging (rewetting) van de pijp. Het eerste temperatuurmaximum is een gevolg van filmverdamping. Door de toenemende absolute snelheid van het water-stoommengsel en de hoge turbulentie zullen de nog aanwezige waterdruppeltjes echter weer tegen de wand worden geslingerd. Hierdoor wordt de pijp weer sterk gekoeld en zakt de pijpwandtemperatuur. Hoger in de pijp zal ten gevolge van de toenemende warmtebelasting volledige dry-out optreden. De temperatuur van de stoomfilm is dan zo hoog dat deze een barriere vormt voor de waterdruppeltjes. Deze temperatuur wordt wel de „Leidenfrost“-temperatuur genoemd. Een dergelijk herbevochtigingsproces moet waarschijnlijk ook verantwoordelijk worden geacht voor het eerste minimum in de door Collier gegeven curve (afbeelding 5). Bij hogere stoomfracties neemt de absolute stroomsnelheid toe, zodat daardoor rewetting mogelijk zou kunnen optreden. Bij nog hogere stoomfracties neemt het aantal waterdruppeltjes af en zal het herbevochtigingsproces een minder belangrijke rol spelen. De kritische warmtebelasting zal hierdoor weer dalen. Op deze wijze zou het minimum en het maximum in de kritische warmtebelasting kunnen worden verklaard. Het effect van „rewetting“ zal bij zeer hoge massatransporten groot zijn. In dat geval is slechts het tweede dry-outpunt van belang en wordt de kritische warmtebelasting slechts bepaald door de vorming van een sterk oververhitte stoomfilm tussen de pijpwand en het stoom-watermengsel. Er mag daarentegen worden verwacht dat bij zeer lage massatransporten geen „rewetting“ optreedt. De in het centrum van de pijp aanwezige waterdruppeltjes zullen door de te geringe turbulentie de oververhitte pijpwand niet raken. Het verband tussen de kritische warmtebelasting en de stoomfractie bij dit bij lage massatransporten veronderstelde mechanisme is in afbeelding 5 als een gestippelde lijn ingetekend.



**Afb. 4 De kritische warmtebelasting bij toenemend stoompercentage voor verschillende massatransporten volgens Bell.**



**Afb. 5 De kritische warmtebelasting bij een toenemende stoompercentagie voor verschillende massatransporten volgens Collier.**

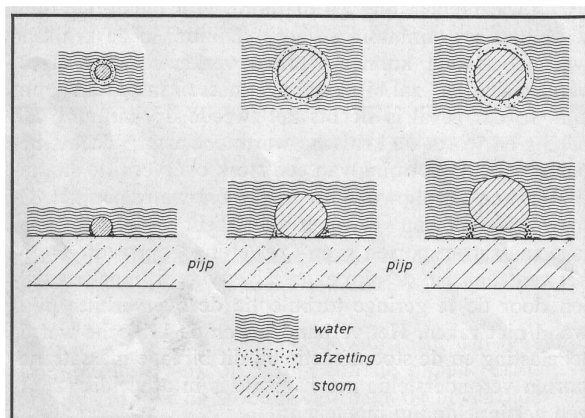


**Afb. 6 De metingen van Keesy bij een massatransport van  $4,06 \cdot 10^4 \text{ kg/m}^3$ .**

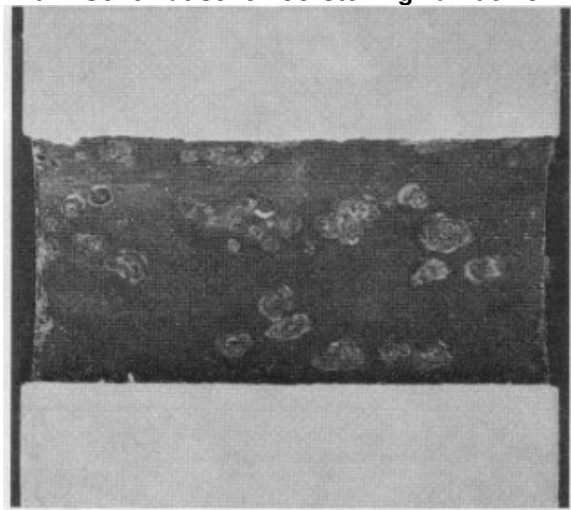
**2. VORMING VAN AFZETTINGEN**

Over het algemeen kan men stellen, dat afzettingen (vooral gesuspendeerde oxyden) ontstaan op plaatsen waar het water tot stoom wordt omgezet. De in het water aanwezige deeltjes en zouten kunnen niet zo gemakkelijk door de stoom worden meegevoerd en blijven achter op de pijpwand. Een dergelijk afzettingsproces zal dus vooral verlopen op plaatsen waar het koken of verdampen in versterkte mate plaats vindt. Een belangrijke invloed bij de vorming van afzettingen hebben dan ook het bellenkook- en het „rewetting“-proces.

Bij het bellenkookproces kunnen stoombellen van verschillende grootte ontstaan. Is het pijppoppervlak egaal dan zullen willekeurig over het oppervlak verdeeld, vooral vele kleine stoombelletjes ontstaan. Is het pijppoppervlak echter niet gelijkmatig (b.v. als gevolg van materiaalfouten of grote ruwheid) dan zullen de bellen bij voorkeur op dezelfde kiemplaatsen worden gevormd. De hoeveelheid stoombellen en de grootte ervan wordt uiteraard ook mede bepaald door de warmtebelasting en het massa transport. Indien er nu voorkeursplaatsen voor belvorming in de pijp aanwezig zijn, dan zal door het herhaald indampen van het water het ketelslib zich hier afzetten. In afbeelding 7 is dit proces schematisch aangegeven. Ketelslib en eventuele zouten zullen zich bij voorkeur afzetten op de randen van de stoombellen. De vorming van dergelijke pokvormige afzettingen wordt in de literatuur beschreven o.a. door Rivers (11), Akolzin (18) en Kirsch (13).

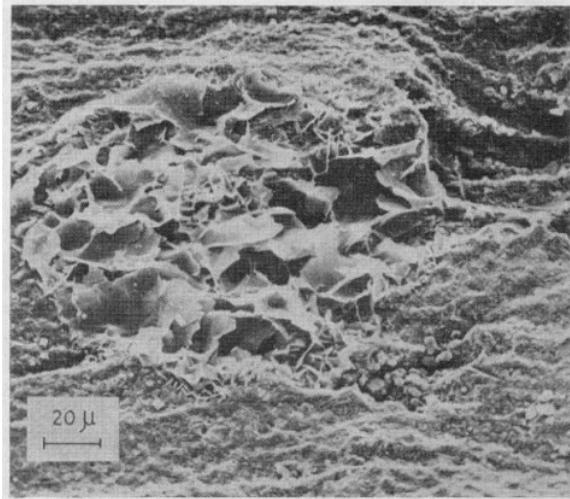
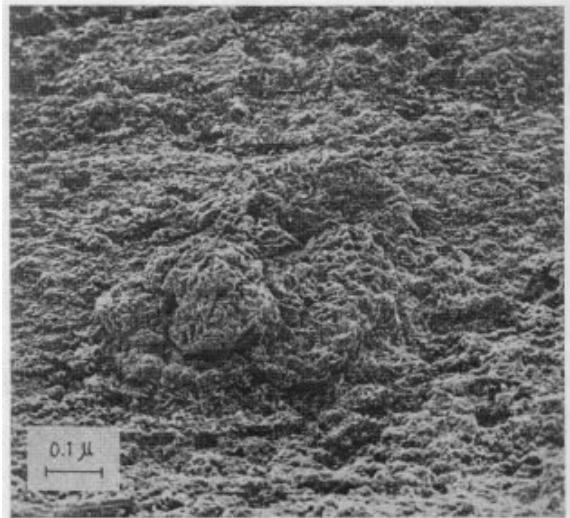


**Afb. 7 Schematische voorstelling van de vorming van afzettingen bij het bellenkookproces.**

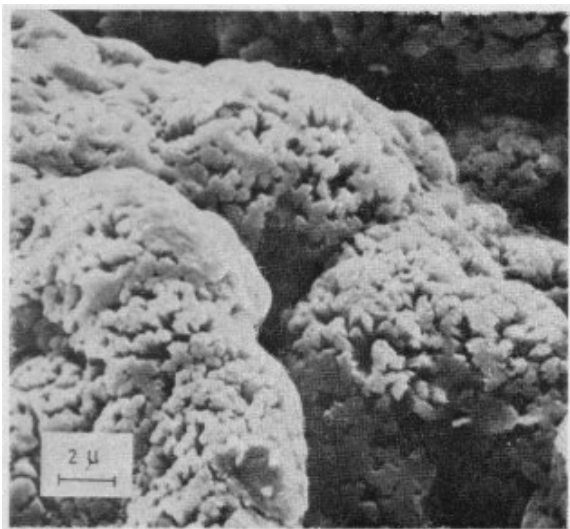


**Afb. 8 Pokvormige afzettingen op een proefpijp geexposeerd onder de volgende omstandigheden: druk: 180 aTm - stoomfractie: 0,7 - koudwatersnelheid: 0,6 m/s - warmtebelasting 150.000 kcal/m<sup>2</sup>.h.**

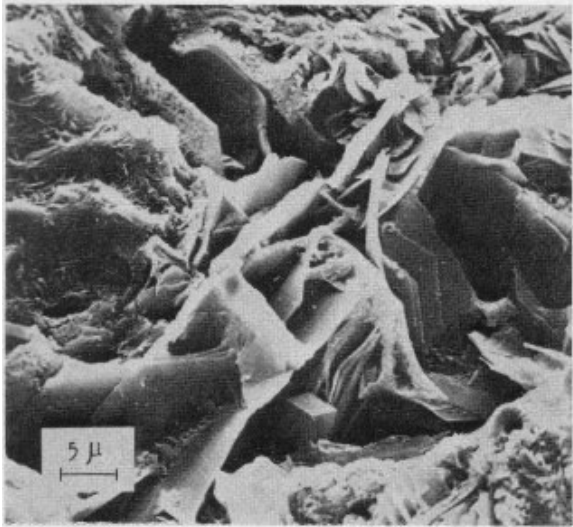
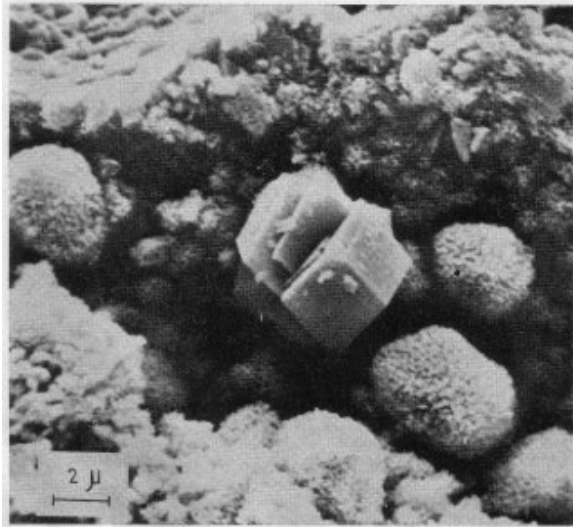
Bij onze onderzoeken met behulp van de proefketelinstallatie werden op pijpen met een niet te hoge warmtebelasting ( $150.000 \text{ kcal/m}^2/\text{h}$ ), bij een koudwatersnelheid van  $0,6 \text{ m/s}$  en bij een stoomfractie van  $0,7$  dergelijke pokvormige afzettingen gevonden (afbeelding 8). Met behulp van de rasterelektronenmicroscop kon worden vastgesteld dat deze afzettingen vaak uit zeer verschillend gevormde kristallen waren opgebouwd. De afbeeldingen 9 . . .13 geven hier ter illustratie een overzicht van. Ook in bedrijfsketels worden dergelijke pokvormige afzettingen aangetroffen. Voorbeelden hiervan worden gegeven in de afbeeldingen 14 en 15. Deze afzettingen zijn ontstaan op een verdamperspijp in een  $140 \text{ atm.}$  natuurlijke circulatieketel. Als gevolg van stroming in de pijp zijn in de afzettingen ook erosiebanen ontstaan.



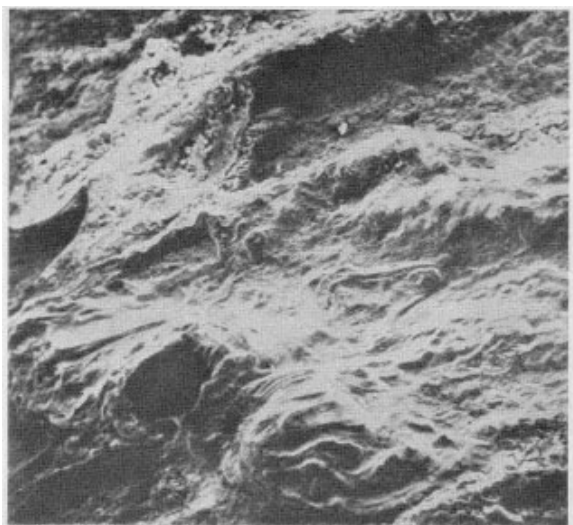
**Afb. 9 en 10 Rasterelektronenmicroscopische opnamen van de pokvormige afzetting op de proefpijp.**



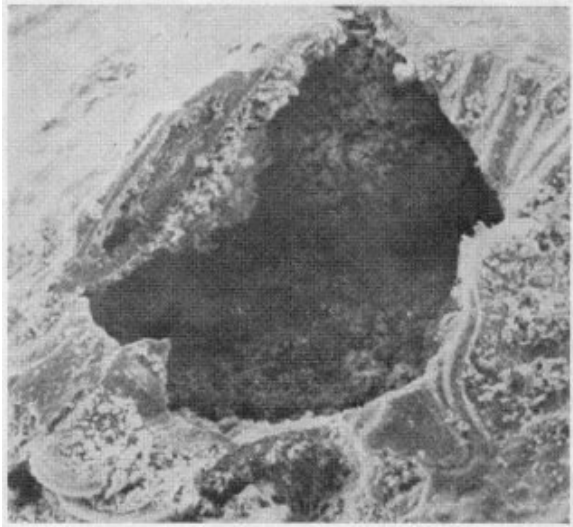
**Afb. 11 Detail uit afbeelding 9.**



Afb. 12 en 13 Details uit afbeelding 10.



Afb. 14 REM-opname van een pokvormige afzetting op een verdamperpijp uit een 140 atm natuurlijke circulatieketel. Vergroting: 20 X.

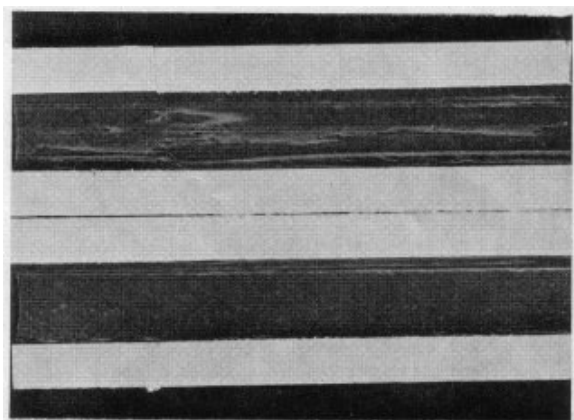


**Afb.15 Detail uit afbeelding 14. Vergroting: 100 X.**

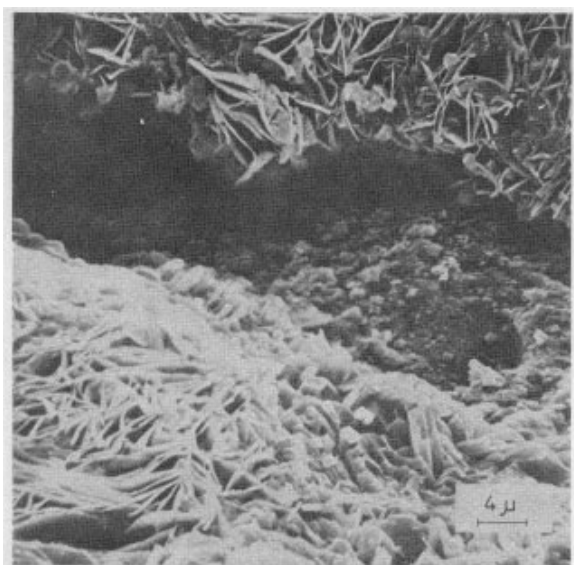
Uit het bovenbeschrevene zou mogen worden afgeleid, dat de pokvormige afzettingen niet alleen bij een lage stoomfractie (onder normale omstandigheden ca. 0,1 in de natuurlijke circulatieketel), maar ook bij hogere waarden (0,7 in de proefpijp) kunnen worden gevormd. In het laatste geval moet dus een bellenkookproces in de ringvormige waterfilm worden verondersteld. Eerder werd een dergelijk proces beschreven als stadium 4 van het normale verdampingsproces.

Het is duidelijk, dat afzetting in mindere mate zal ontstaan, wanneer geen preferente kookplaatsen aanwezig zijn, daar dan het pijppoppervlak regelmatig door het stromende water wordt schoongespoeld. Uiteraard zal een te hoge warmtebelasting of een te lage plaatselijke circulatiesnelheid de vorming van afzettingen bevorderen. Het tweede belangrijke proces, waarbij afzettingen worden gevormd, is de herbevochtiging („rewetting“). De eerder aangehaalde metingen van Keeys wezen uit dat bij de hogere watersnelheden op de pijpwand een homogene afzetting ontstond. De in de waterdruppeltjes aanwezige deeltjes en de meeste zouten moeten op de wand achterblijven, wanneer het water op het oververhitte pijppoppervlak wordt verdampt. Ook bij ons proefketelonderzoek werden homogene afzettingen op de pijpen aangetroffen, waarvan wordt verondersteld dat ze als gevolg van dit „rewetting“-proces zijn ontstaan.

Afbeelding 16 geeft het pijppoppervlak weer van zo'n proefpijp (inwendige diameter  $\pm 13$  mm), die werd geëxposeerd onder een hoge warmtebelasting ( $400.000 \text{ kcal/m}^2/\text{h}$ ) en een hoge koudwatersnelheid (1,8 m/sec).



**Afb. 16** Homogene laag afzetting ten gevolge van rewetting op de proefpijp geexposeerd onder de volgende omstandigheden: druk: 180 atm - stoomfractie: 0,7 - koudwatersnelheid: 1,8 m/s - warmtebelasting: 400.000 kcal/m'.h.



**Afb. 17** REM-opname van de afzettingslaag met een afzettingsvrije baan als gevolg van plaatselijk oververhitting.

Bij een nadere beschouwing van het pijppoppervlak zijn er nog twee bijzonderheden aan te wijzen:

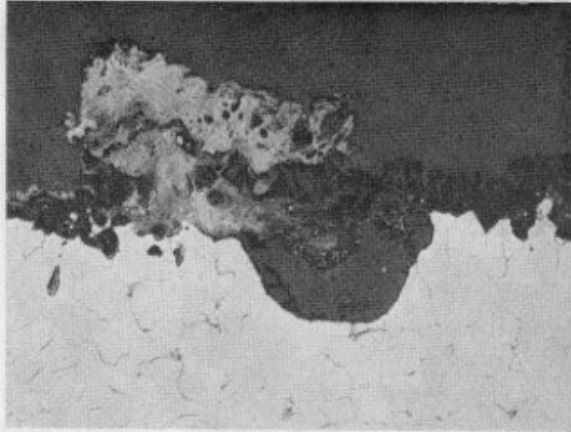
1. Er zijn enkele banen aanwezig waar geen afzetting is gevormd. In afbeelding 17 is een dergelijke afzettingsvrije baan met de rasterlektronenmicroscoop gefotografeerd. Dit verschijnsel zou kunnen worden verklaard met de aanwezigheid van een sterk oververhitte stoomfilm, zodat de waterdruppeltjes niet meer op het pijppoppervlak kunnen verdampen. De oververhitte film werkt dan als een barriere voor de waterdruppeltjes. Dit betekent dus dat hier plaatselijk het volledige „dry-out” punt, eerder genoemd bij de bespreking van de metingen van Keey's en Collier, is gepasseerd, m.a.w. dat plaatselijk de Leidenfrost-temperatuur is overschreden.
2. Onder een hoek van ca. 30° met de lengterichting zijn ribbels gevormd. Ook Keey's heeft bij zijn experimenten dit verschijnsel waargenomen en noemt dit „flow patterns”. Dit zou dus betekenen dat het waterstoommengsel in de pijp draaiend wordt voortgestuwd en dat daarvoor de gevormde afzetting wordt geerodeerd.

Uit de literatuur (11, 13), blijkt, dat de afzettingen in ketels veelal bestaan uit complexe silicaten, fosfaten, ijzeroxyden, koper en sulfaten. Veel voorkomende stoffen zijn o.a.: analicite ( $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot 8 \text{H}_2\text{O}$ ), acmite ( $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2$ ), noselite ( $3\text{Na}_2\text{O} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 2\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), sodalite ( $3\text{Na}_2\text{O} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 2\text{NaCl}$ ), hydroxylapatite ( $\text{Ca}_5\text{OH}(\text{PO}_4)_3$ ) en delafossit ( $\text{CuFeO}_2$ ). Er

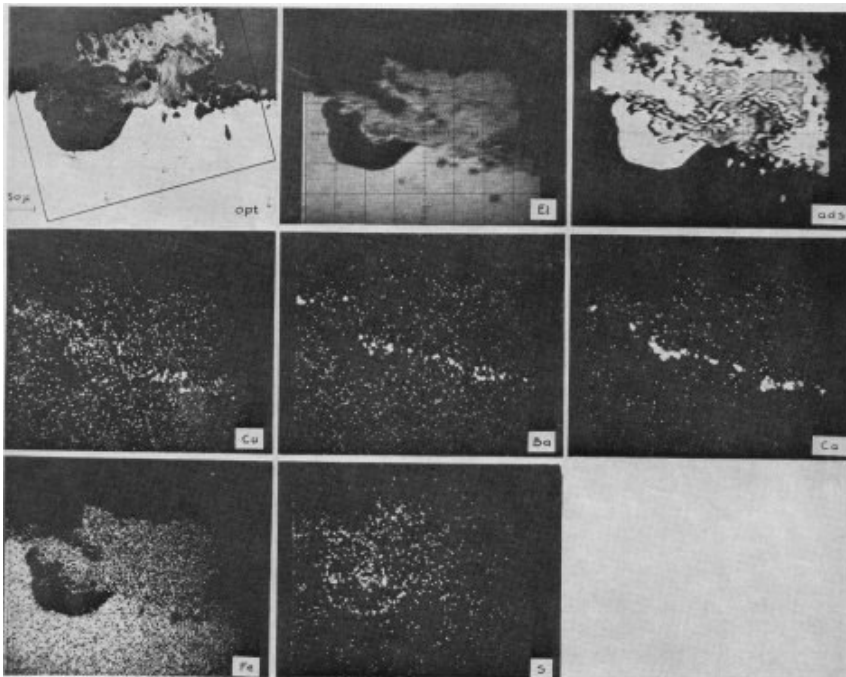
wordt echter geen duidelijk onderscheid gemaakt voor de stoffen die zich met name bij het bellenkook- en het „rewetting“-proces afzetten.

### 3. CORROSIESCHADE

De bij een bellenkookproces gevormde afzettingen blijken vaak ook de plaatsen te zijn waar putvormige aantasting wordt waargenomen. In afbeelding 18 is een dwarsdoorsnede van een afzetting uit afbeelding 8 weergegeven. Men ziet dat onder de afzetting een ca. 150 µm diepe put is ontstaan. Van dit monster werd met behulp van de rontgenmicroscan een elementenverdeling gemaakt. Afbeelding 19 geeft hier een overzicht van. Dit toont, dat op het metaaloppervlak in de put een S-rijke verbinding aanwezig is. Naast S werden ook de elementen Ca en Ba aangetoond.

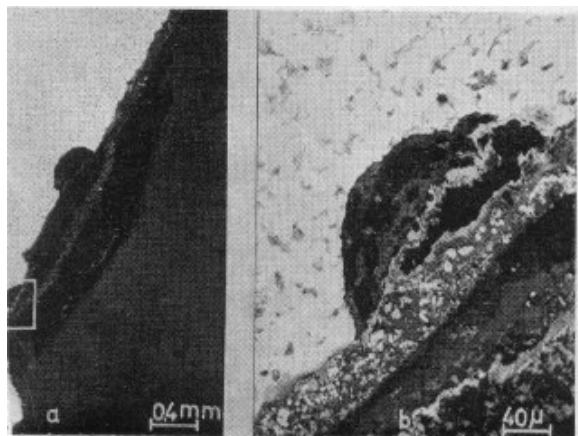


**Afb. 18** Optisch microscopisch beeld van een dwarsdoorsnede van een pokvormige afzetting uit afbeelding 8.



**Afb. 19** De elementenverdeling in de afzetting en de puf.

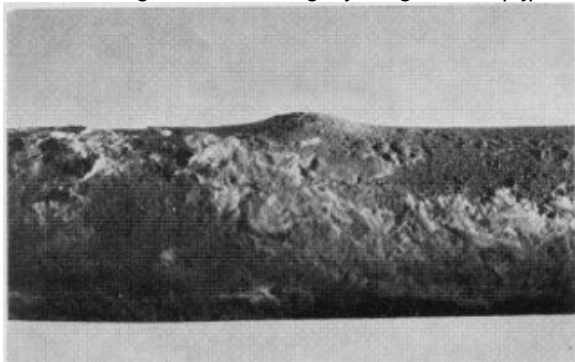
Ook in de afzettingen op de pijp uit de eerder genoemde natuurlijke circulatieketel (afb. 14 en 75) werden Na en S-rijke verbindingen aangetoond. Onder deze afzettingsspokken was een gelijksoortige pitting opgetreden (afbeelding 20) als op de proefpijp.



**Afb. 20. Optisch microscopisch beeld van een dwarsdoorsnede van de afzetting uit afbeelding 14.**

Dergelijke pokvormige afzettingen en de bijgevolg optredende putvormige aantastingen moeten worden gezien als een inleiding tot grotere corrosieschade aan de pijp. In de gevormde afzettingsslagen en in de putten kunnen zich namelijk gemakkelijk corrosieve zouten concentreren. Het moet tevens waarschijnlijk worden geacht, dat stoombelvorming al optreedt in de poreuze lagen en niet alleen op het grensvlak afzetting-water. Als gevolg van vlamfluctuaties en geringe drukvariaties in de ketel kan de poreuze laag afwisselend worden volgezogen met water en weer worden uitgekookt. Hierdoor kunnen zich in de poreuze laag zouten zoals b.v. chloriden, sulfaten en loog concentreren, die de onderliggende beschermende magnetietlaag gedeeltelijk kunnen oplossen, zodat een poreuze niet beschermende laag overblijft (14, 15). De belangrijkste conclusie van een Amerikaans onderzoek met een proefketelinstallatie was dat sterke corrosie slechts optrad in die gevallen waar een slibafzetting op de proefpijpen aanwezig was (14).

Zo moet het dan ook waarschijnlijk worden geacht, dat de pitting die optreedt als gevolg van het bellenkookproces, uiteindelijk kan leiden tot de meer catastrofale „onload” corrosie (16, 17). In ketels van conventionele energiecentrales komt naar onze ervaring „rewetting” niet voor. Schade als gevolg van dergelijke mogelijke afzettingen werd tot dusverre niet gesignaleerd. Evenmin zijn er in Nederland „burnout”-schadegevallen van dien aard dat de pijp wandtemperatuur plotseling zo hoog wordt dat het pijpmateriaal smelt. Er komen in conventionele ketels echter wel veel schadegevallen voor, waarbij de pijp wandtemperatuur geleidelijk zo hoog opgelopen is dat de vloeigrens van het staal wordt overschreden en er uitbuiing of zelfs nog breuk van de pijp optreedt. In afbeelding 21 is een dergelijk uitgebilde pijp weergegeven.



**Afb. 21 Een uitgebilde verdamperspijp als gevolg van een te hoge pijp wandtemperatuur.**

#### 4. CONCLUSIES

Uit een literatuurstudie en eveneens uit de resultaten van het proefketelonderzoek blijkt, dat het kook-verdampingsproces aan de pijp wand een grote invloed heeft op de vorming van afzettingen en het daarmee gepaard gaande optreden van corrosieschade. Een bellenkookproces

geconcentreerd op enkele kiemplaatsen op de pijpwand veroorzaakt versterkte ketelslib- en zoutafzettingen. Onder deze „pokken" treedt over het algemeen pitting op. Deze vorm van corrosie moet als een inleiding worden beschouwd tot de meer catastrofale on-load corrosie. Onderzoekingen aan schadegevallen uit de praktijk bevestigen dit corrosiemechanisme.

#### LITERATUUR

- 1 P. R. Gilli, Mitteilungen der V.G.B. 86, 288-300 (1963).
- 2 P. Pracht, Energie 10, 461-6 (1958).
- 3 K. R. Schmidt, Mitteilungen der V.G.B. 63, 391-401 (1959).
- 4 Rapport AERE - R 6411 (1971), R. K. F. Keeys, J. C. Ralph, D. N. Roberts: Post burn-out heat transfer in high pressure steam water mixtures in a tube with cosine heat flux distribution.
- 5 J. G. Collier, Nuclear Power [6], 61-6 (1961).
- 6 J. G. Collier, Nuclear Power [7], 64-7 (1961).
- 7 F. Hewitt, Engineering and boiler house review 170-4, (1.968).
- 8 E. Alves, Chemical Engineering Progress 50, 449 (1954).
- 9 D. W. Bell, Nucl. Sci. and Eng. 7, [3], 245 (1970).
- 10 D. Parker, R. J. Grosh, Rapport ANL-629 (1961).
- 11 H. M. Rivers, Combustion 4, 57-63 (1952).
- 12 P. A. Akolzin, T. Kh. Margulova, Teploenergetika [17], 4, 110-113 (1970).
- 13 K. Kirsch, Mitteilungen der V.G.B. [89], 4 (1964).
- 14 P. Goldstein, C. L. Burton: A research study on internal corrosion of high-pressure boilers - Final report no. 68-Pror-7, Journal of Engineering for Power Trans. ASME (1968).
- 15 W. M. M. Huijbregts, V.G.B. Speisewassertagung 76-80 (1970).
- 16 F. R. Hutchins, Technical Report Brit. Eng. Boiler and electrical insurance comp. 9 (1969) 34-54.
- 17 Wordt gepubliceerd; 5th international congress on metallic corrosion 1972, Tokio: The protection effectiveness of magnetite layers in relation to boiler corrosion, W. M. M. Huijbregts.