



ONDERZOEKSRaad
VOOR VEILIGHEID

Dodelijk ongeval na scheuren expansiestuk in stoomleiding

Lessen uit het voorval aan boord van de
Nieuw Amsterdam



Dodelijk ongeval na scheuren expansiestuk in stoomleiding

Lessen uit het voorval aan boord van de Nieuw Amsterdam

Den Haag, oktober 2025

De rapporten van de Onderzoeksraad voor Veiligheid zijn openbaar en beschikbaar op www.onderzoeksraad.nl.

Foto cover: Onderzoeksraad voor Veiligheid

De Onderzoeksraad voor Veiligheid

Als zich een ongeval of ramp voordoet, onderzoekt de Onderzoeksraad voor Veiligheid hoe dat heeft kunnen gebeuren, met als doel daar lessen uit te trekken. Op die manier draagt de Onderzoeksraad bij aan het verbeteren van de veiligheid van Nederland. De Raad is onafhankelijk en besluit zelf welke voorvallen hij onderzoekt. Daarbij richt de Raad zich in het bijzonder op situaties waarin mensen voor hun veiligheid afhankelijk zijn van derden, bijvoorbeeld van de overheid of bedrijven. In een aantal gevallen is de Raad verplicht onderzoek te doen. De onderzoeken gaan niet in op schuld of aansprakelijkheid.

Onderzoeksraad

Voorzitter: mr. C.J.L. van Dam MPM

dr. E.A. Bakkum

dr. S.C. Douglas

Secretaris-directeur: mr. C.A.J.F. Verheij

Bezoekadres: Lange Voorhout 9, 2514 EA Den Haag

Postadres: Postbus 95404, 2509 CK Den Haag

Telefoon: 070 333 7000

Website: www.onderzoeksraad.nl

E-mail: info@onderzoeksraad.nl

INHOUD

1	Inleiding	5
1.1	Het voorval	5
1.2	Classificatie.....	5
1.3	Doelstelling en onderzoeksvragen.....	5
1.4	Onderzoeksaanpak.....	6
1.5	Afbakening	6
2	Toedracht	7
2.1	Inleiding.....	7
2.2	Toedracht voorval.....	7
2.3	Reddingsactie.....	11
2.4	Schadebeeld.....	11
3	Achtergrondinformatie.....	13
3.1	Inleiding.....	13
3.2	Het schip.....	13
3.3	Stoomsysteem	17
3.4	Bemanningssamenstelling.....	22
3.5	Procedures en training	23
4	Analyse	25
4.1	Inleiding.....	25
4.2	Reparatie aan de stoomverwarmer	25
4.3	Het scheuren van het expansiestuk	26
4.4	Stoomsystemen in opleidingen.....	28
5	Acties rederij na voorval.....	30
6	Conclusies	31
7	Aanbevelingen	33
	Bijlage A Scheepsgegevens Nieuw Amsterdam	35
	Bijlage B Reacties op het conceptrapport	36
	Bijlage C Rapport Element Material Technology	37

1 INLEIDING

1.1 Het voorval

In de ochtend van 22 maart 2024, rond 09.15 uur lokale tijd¹, vond een dodelijk ongeval plaats aan boord van het Nederlandse cruiseschip Nieuw Amsterdam toen het Half Moon Cay op de Bahama's aan deed. In een ruimte van de machinekamer scheurde een expansiestuk van de hoofdstoomleiding. Door het ontstane gat in het stoomsysteem vulde de ruimte zich snel met stoom met een temperatuur van meer dan 100 °C.

De stoom² kwam vrij aan bakboordzijde, terwijl in dezelfde ruimte aan de stuurboordzijde twee bemanningsleden aan het werk waren. Aangezien het schip niet voor de kant lag, waren de deuren aan de voor- en de achterzijde van deze ruimte volgens procedure gesloten.³ Door de snelheid waarmee de ruimte zich vulde met de hete stoom, konden de twee bemanningsleden de deuren en de nooduitgang niet meer bereiken en raakten ze fataal gewond.

1.2 Classificatie

Het betreft een ongeval dat geclassificeerd wordt als een *Very Serious Marine Casualty*, zoals bedoeld in de *Casualty Investigation Code* van de *International Maritime Organization* (IMO) en EU-richtlijn 2009/18/EG. Op basis van het Besluit Onderzoeksraad voor Veiligheid, dat is gebaseerd op de *Casualty Investigation Code*, heeft de Onderzoeksraad voor Veiligheid de plicht om dit voorval te onderzoeken.

1.3 Doelstelling en onderzoeksvragen

De Onderzoeksraad wil aan de hand van dit onderzoek achterhalen hoe de veiligheidsrisico's van het stoomsysteem op het schip waren beheerst en hoe het expansiestuk kon scheuren. Dit om herhaling van dit voorval te voorkomen of de gevolgen ervan te kunnen beperken.

¹ De tijden in dit rapport zijn lokale tijd, lokale tijd Bahama's = UTC -5 uur.

² Stoom is water in gasvorm en niet zichtbaar, zichtbare "stoom" is een nevel van kleine waterdruppeltjes die ontstaan wanneer waterdamp afkoelt en condenseert. In dit rapport gebruiken we voor beide fases het woord stoom.

³ In overeenstemming met MSC.1/Circ.1564 *Revised Guidance For Watertight Doors On Passenger Ships Which May Be Opened During Navigation*.

In het onderzoek staan daarom de volgende onderzoeksvragen centraal:

1. Hoe heeft het expansiestuk kunnen scheuren?
2. Welke factoren hebben een sleutelrol gespeeld in het scheuren van het expansiestuk?
3. Welke achterliggende factoren hebben een sleutelrol gespeeld in het overlijden van de twee bemanningsleden als gevolg van de vrijgekomen stoom?

1.4 Onderzoeksaanpak

De Onderzoeksraad ontving de melding van het ongeval op de avond van het voorval. Twee onderzoekers van de Onderzoeksraad zijn ter plaatse gegaan en hebben in de dagen na het ongeval onderzoek gedaan aan boord van het schip. Aan boord zijn diverse interviews afgenomen. De ongevalslocatie in de machinekamer is onderzocht evenals de veiligheidscentrale op de brug van het schip. Het gescheurde onderdeel is mee naar Nederland genomen voor technisch onderzoek. Terug in Nederland zijn gesprekken gevoerd met diverse andere betrokken partijen.

Op 15 december 2024 brachten twee onderzoekers van de Onderzoeksraad een vervolfbezoek aan het schip om aanvullende onderzoeksinformatie (waaronder een schouw van het stoomsysteem en inzage van de onderhoudslogboeken) te verzamelen en aanvullende gesprekken te voeren.

De Onderzoeksraad heeft het expansiestuk laten onderzoeken door materiaalkundig bureau Element Material Technology. Wij hebben gevraagd om vast te stellen in welke staat het expansiestuk verkeerde en om daarbij specifiek te letten op afwijkingen in en om het gebied van de scheur. We hebben de resultaten van deze analyses verwerkt in dit rapport. Het rapport van Element Material Technology is opgenomen in de Bijlage C.

1.5 Afbakening

Het onderzoek richt zich op drie hoofdlijnen:

- ▶ Het scheuren van het expansiestuk.
- ▶ De reden voor de aanwezigheid van het expansiestuk.
- ▶ De risico's van een stoomsysteem aan boord van een schip, inclusief de mogelijkheden om deze te beheersen.

2 TOEDRACHT

2.1 Inleiding

In dit hoofdstuk beschrijven we de toedracht van het voorval. In paragraaf 2.2 beginnen we met een korte beschrijving van het voorval. In paragraaf 2.3 beschrijven we de reddingsactie die de bemanning heeft ondernomen. In paragraaf 2.4 sluiten we dit hoofdstuk af met een beschrijving van het schadebeeld.

2.2 Toedracht voorval

Op 22 maart 2024, rond 08.00 uur, arriveerde de Nieuw Amsterdam bij Half Moon Cay, in de Bahama's. Het schip bleef voor de kust drijven, in positie gehouden met behulp van de Azipods.⁴ Aangezien het schip niet afmeerde in een haven, bleven alle waterdichte deuren in de machinekamer, volgens de procedure⁵, gesloten.

Voorafgaand aan het voorval op 22 maart, werd op 17 maart een reparatie verricht aan een verwarmers van water voor de accommodatie, omdat deze lekte. Voor de reparatie van de verwarmers was het noodzakelijk dat deze verwijderd zou worden. Voor het kunnen verwijderen van de verwarmers werd eerst een afsluiter in de stoomtoevoerleiding, welke een klein stukje open stond, dicht gezet. Na de reparatie werd de verwarmers op 21 maart terug geplaatst. De afsluiter in de stoomtoevoerleiding bleef gesloten.

Rond 08.30 uur gingen een derde werktuigkundige en een machinekamergezel aan het werk in de voorste afvalwaterruimte (forward sewage room), zie figuur 1. Zij voerden gepland routinematig onderhoud uit aan het afvalwatersysteem⁶ aan stuurboordzijde van deze ruimte.

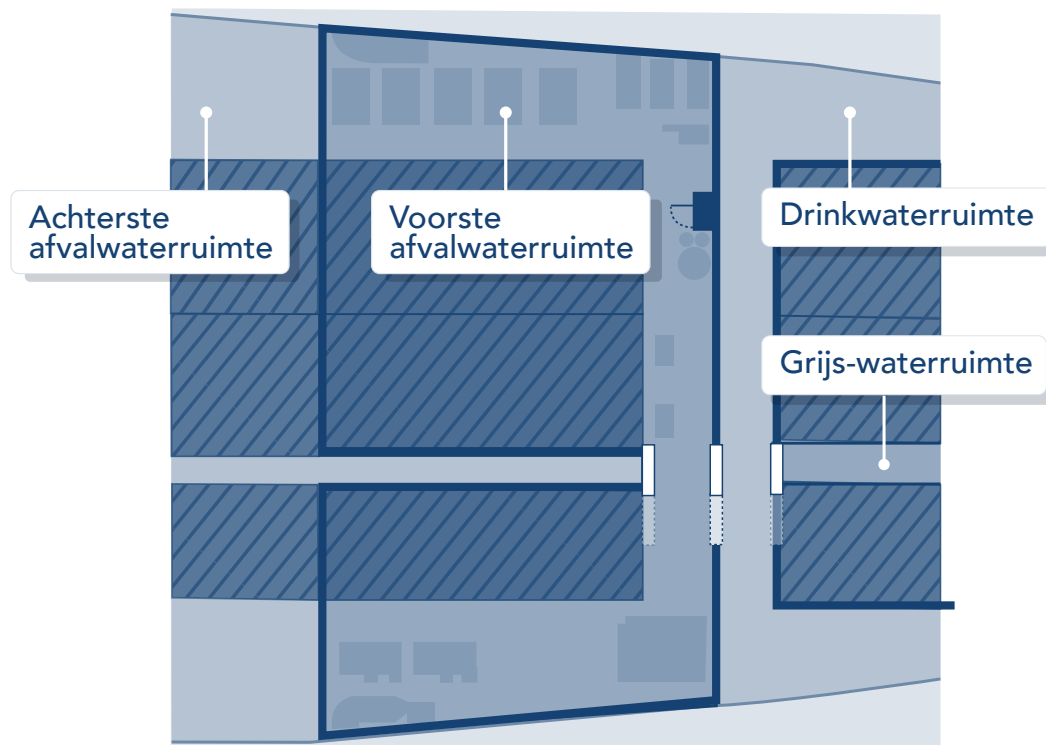
Om 09.13 uur waren er een aantal harde knallen bij het schot tussen de voorste afvalwaterruimte en de aangrenzende drinkwaterruimte aan bakboordzijde. Op datzelfde moment werkte de eerste werktuigkundige in de achterste hoofdmotorenruimte aan een van de voedingspompen van het stoomsysteem.⁷ Deze pomp begon ineens te draaien, alsof er een groot drukverschil tussen de beide zijden van de pomp was ontstaan. Op dat moment vulde de voorste afvalwaterruimte zich met stoom.

⁴ Een azipod is een roerpropeller, een schepsschroef die in een pod is geplaatst en in elke horizontale hoek kan worden gedraaid, waardoor een roer overbodig wordt.

⁵ In overeenstemming met MSC.1/Circ.1564 *Revised Guidance For Watertight Doors On Passenger Ships Which May Be Opened During Navigation*.

⁶ Het afvalwatersysteem is een geavanceerde afvalwaterzuiveringsinstallatie die rioolwater en grijs water zuivert en dit op aangewezen plekken overboord pompt..

⁷ Deze voedingspompen pompen voedingswater naar stoomketels, voor het produceren van stoom.



▲ Figuur 1: Bovenaanzicht van de indeling van de voorste afvalwaterruimte (bron: Onderzoeksraad voor Veiligheid).

Rond 09.13 uur, ten tijde van de knallen, ging in de machinecontrolekamer een *low insulation alarm*⁸ af als ook het machinekamerbrandalarm. Het *Safety Management and Control System* (SMSC)⁹ gaf aan dat alle rookmelders in de voorste afvalwaterruimte waren geactiveerd.

Om 09.14 uur gaf de stafkapitein op basis van de meldingen uit het SMCS een eerste fase noodhulpverleningalarm af, zoals vastgelegd in de scheepsprocedures. Dit zette de brandrol¹⁰ in werking en liet de bemanning weten dat alle vier de brandploegen zich moesten verzamelen.

In de machinecontrolekamer gaf het *Integrated Alarm Monitoring and Control System* (IAMCS)¹¹ om 09.14 uur aan dat de druk in het stoomsysteem was afgenomen van 8 naar 5 bar. De aanwezige werktuigkundige van de wacht en hoofdwerktuigkundige stelden hierop vast dat het om een stoomlek ging en niet om brand. De hoofdwerktuigkundige gaf daarom opdracht om de stoomisolatieklep (S39; zie figuur 7 in paragraaf 3.3) in de airconditioningruimte te laten sluiten om de stoomafvoer naar het lek af te sluiten. Ook informeerde de hoofdwerktuigkundige de brug dat er in de voorste afvalwaterruimte een stoomlek was in plaats van brand.

8 Een *low insulation alarm* geeft aan dat er een aanzienlijke hoeveelheid elektrische stroom langs de isolatie lekt, met verhoogde kans op kortsluiting.

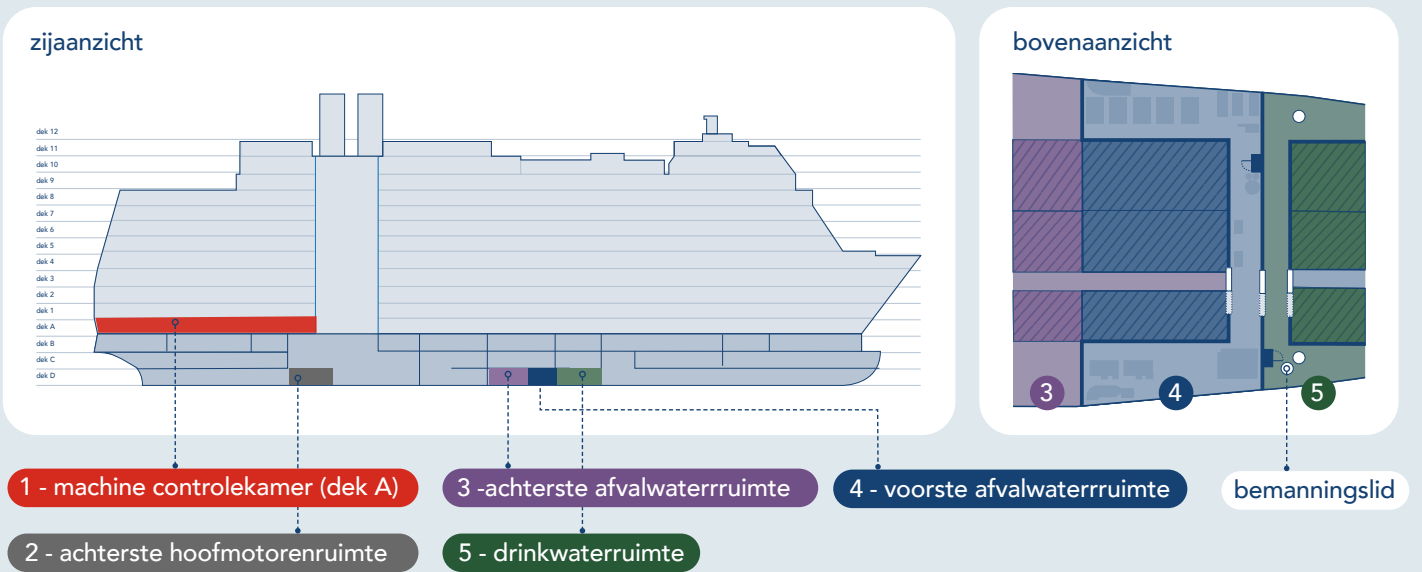
9 Het SMCS is een digitaal informatie voorzieningssysteem ontworpen voor crisismanagement op cruiseschepen. Het ondersteunt de bemanning bij het managen van de veiligheid tijdens verschillende fasen van een noodsituatie, van het eerste alarm tot het oplossen van de gebeurtenis.

10 Op koopvaardij- en passagiersschepen de procedure met de algemene en individuele taken van de bemanning in geval van brand.

11 Het IAMCS is een digitaal systeem wat een overzicht geeft van de status van de technische scheepssystemen en van waaruit deze scheepssystemen kunnen worden bediend.

Tijdlijn gebeurtenissen Nieuw Amsterdam

Ruimtes:



Gebeurtenissen:

17 maart

- de bemanning draait de stoomtoevoer naar verwarmers in de drinkwaterruimte dicht
- de bemanning start reparatie van de verwarmers

21 maart

- de reparatie is afgerond, de stoomtoevoer blijft afgesloten

22 maart

08.00

- het passagierschip arriveert bij Half Moon Cay.

08.30

- 2 bemanningsleden gaan aan het werk in de voorste afvalwaterruimte

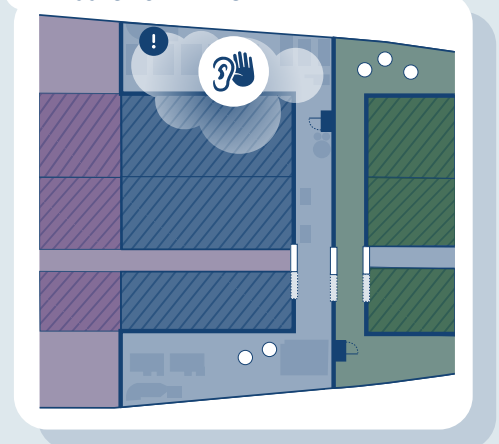
09.13

- 3 bemanningsleden in de drinkwaterruimte horen 5 luide knallen uit de voorste afvalwaterruimte
- een pomp in de achterste hoofmotorenruimte begint onverwacht te draaien
- een expansiestuk scheurt; stoom vult de voorste afvalwaterruimte

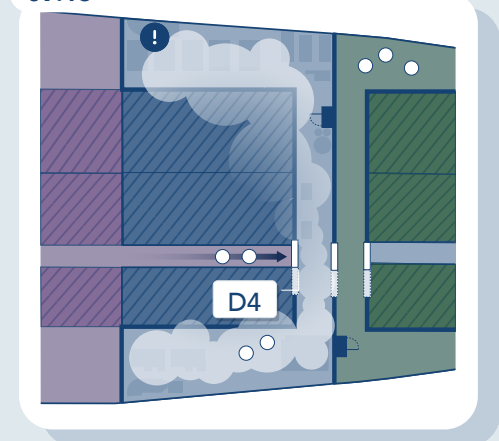
09.14

- het *low insulation* alarm gaat af in de machine controlekamer
- het machinekamer-brandalarm gaat af in de voorste afvalwaterruimte
- de bemanning verzamelt zich voor brandbestrijding conform de brandrol

22 maart 2024 9:13



09.18



▲ Figuur 2: Tijdlijn (bron: Onderzoeksraad voor Veiligheid).

09.18

- 2 bemanningsleden openen deur D4 vanuit de achterste afvalwaterruimte
- stoom ontsnapt uit de voorste afvalwaterruimte en raakt de bemanningsleden. Zij doen een stap terug en de deur sluit met een knal

09.20

- Een 3e werktuigkundige wordt vermist

09.22

- de *On Scene Commander* (OSC) krijgt de vraag de vermiste te gaan zoeken

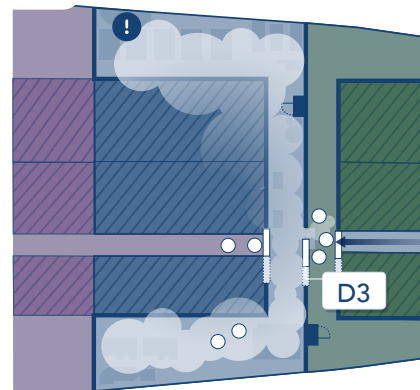
09.26

- de OSC probeert deur D4 te openen, maar dit lukt niet

09.30

- de machinekamergezel wordt vermist

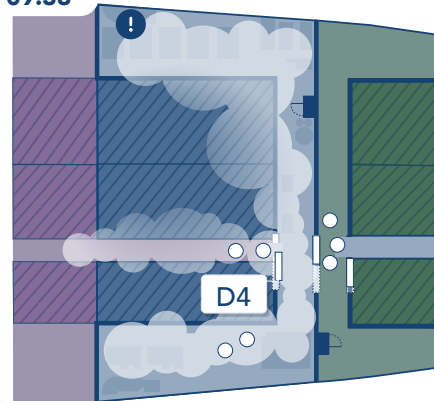
09.33



09.33

- brandploeg 2 opent deur D3 vanuit de drinkwaterruimte. Stoom ontsnapt en raakt de brandploeg. Zij doen een stap terug en de deur sluit met een knal

09.38



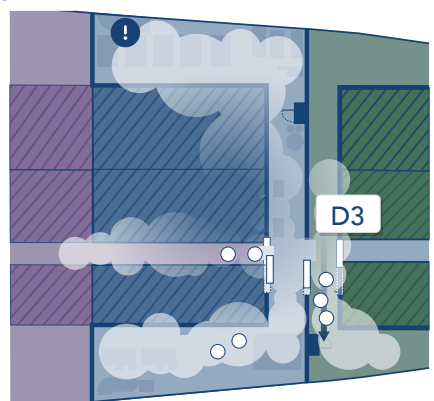
09.38

- brandploeg 3 opent deur D4 een stukje. Achterste afvalwaterruimte loopt vol met stoom.

09.44

- brandploeg 4 opent deur D3 een stukje. De drinkwaterruimte vult met stoom. Brandploeg 4 moet zich door een nooduitgang terugtrekken.

09.44



09.55

- Brandploeg 1 opent vanaf de voorste machinekamerruimtes: eerst deur D1 en dan deur D2
- de bemanning verhoogt de ventilatie op de voorste machinekamerruimtes om de stoom te verwijderen

10.08

- brandploeg 1 opent deur D3 volledig en vindt 1e slachtoffer in de voorste afvalwaterruimte

10.13

- 1e slachtoffer wordt geëvacueerd

10.16

- brandploeg 3 en 4 beginnen deur D4 verder te openen

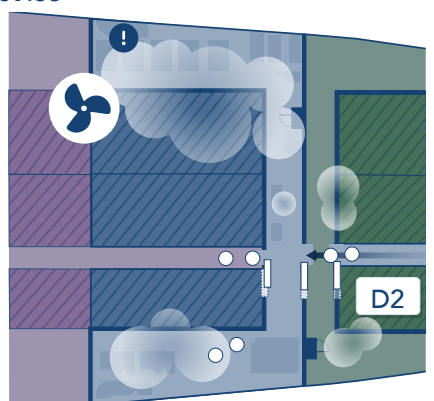
10.22

- deur D4 is voldoende open, het 2e slachtoffer wordt gevonden in de voorste afvalwaterruimte

11.13

- de voorste afvalwaterruimte wordt geïnspecteerd en bemanning vindt het gescheurde expansiestuk

09.55



▲ Figuur 2: Tijdlijn (bron: Onderzoeksraad voor Veiligheid).

2.3 Reddingsactie

Nadat de stafkapitein om 09.14 uur het alarm had geactiveerd, verzamelde de bemanning zich op de aangewezen verzamelpunten. De vier brandploegen gingen uit van brand in de machinekamer en trokken hun brandpakken en ademluchtbescherming aan.

Om 09.18 uur probeerde een aantal bemanningsleden vanuit de aangrenzende achterste afvalwaterruimte deur D4 te openen. Op het moment dat de deur zich een beetje opende, ontsnapte er stoom uit de voorste afvalwaterruimte. De bemanningsleden werden hierdoor geraakt en zagen zich genoodzaakt de bediening van de deur los te laten. Hierop klapte de deur onmiddellijk weer dicht.

Om 09.20 uur werd duidelijk dat een derde werktuigkundige vermist werd, hij had zich niet gemeld op zijn verzamelpunt. De eerste werktuigkundige was aangewezen als *On Scene Commander* en startte met de brandploegen een zoektocht. Ze begonnen bij de voorste afvalwaterkamer. Hij arriveerde om 09.26 uur in de achterste afvalwaterruimte en probeerde de deur naar de voorste afvalwaterkamer te openen. Met een thermische camera werd de temperatuur van deze deur op 100 °C gemeten. Om 09.30 uur waren alle bemanningsleden geteld en bleek ook een machinekamergezel te worden vermist.

De vier brandploegen probeerden zowel vanaf de voorkant (deur D3) als de achterkant (deur D4) de voorste afvalwaterruimte te openen. Iedere keer als een deur zich een beetje opende, ontsnapte er stoom die de brandploegen dwong de bedieningshendels los te laten. Om 09.33 uur lukte het om ook deur D3 een stukje te openen, waarop de aangrenzende drinkwaterruimte zich vulde met stoom. De daar aanwezige brandploeg trok zich daarop terug via een nooduitgang. Om 09.38 uur slaagde een ploeg erin deur D4 een stukje te openen en open te houden waarna de ruimte waarin de ploeg zich bevond vol liep met stoom. Deze ruimte werd verlaten door de brandploegen.

Een van de brandploegen opende vanaf de voorste ruimte in de machinekamer de deuren D1 en D2, waarmee de nog aanwezige stoom in de verschillende machinekamerruimtes werd weg geventileerd. Om 10.08 uur lukte het om deur D3 volledig te openen. Daarop werd het eerste slachtoffer gevonden en geëvacueerd, zie figuur 4 voor de locatie. Om 10.22 uur lukte het ook om deur D4 voldoende te openen en werd het tweede slachtoffer gevonden en geëvacueerd. Geen van beide slachtoffers heeft het incident overleefd. Op basis van gegevens van het automatische branddetectiesysteem is op te maken dat de ruimte zich na de eerste alarmering binnen 86 seconde vervulde met stoom.

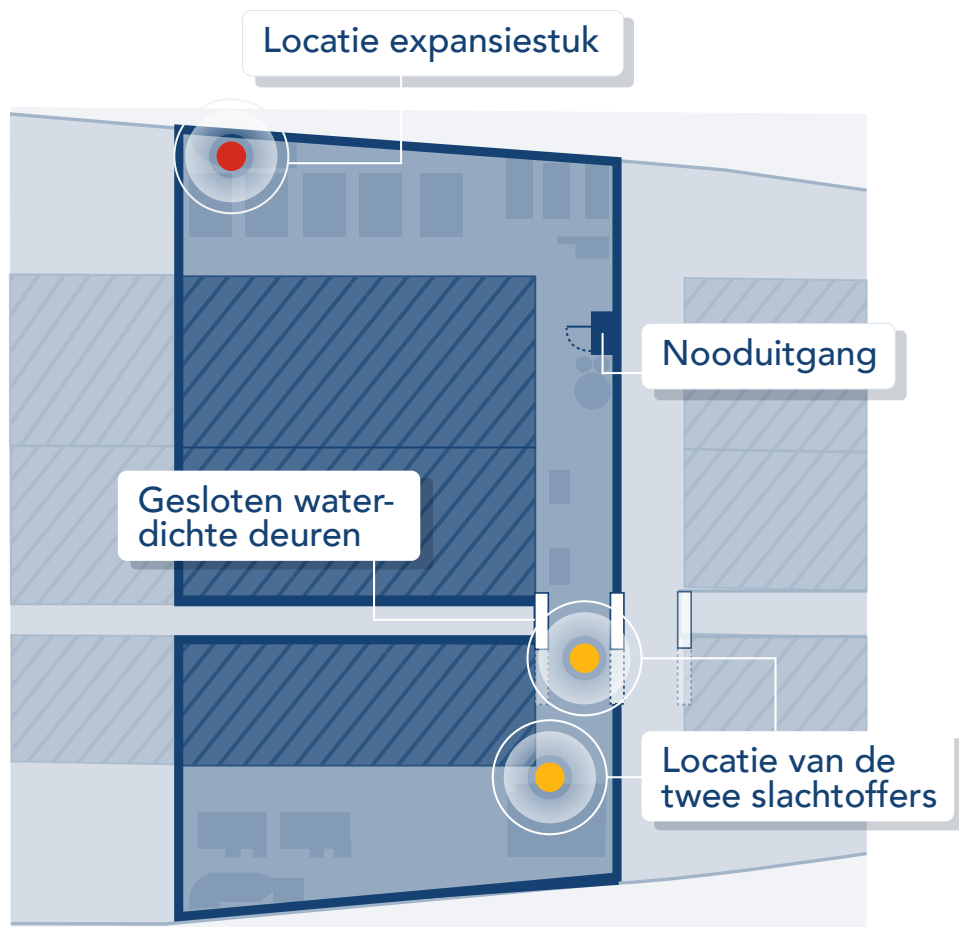
2.4 Schadebeeld

Ongeveer twee uur na het voorval kon de voorste afvalwaterruimte worden geïnspecteerd. Men stelde aan bakboord veel schade aan de isolatie van de stoomleidingen (zie figuur 3 links), de verf, ventilatiekokers en andere apparatuur vast. Men vond achterin de ruimte, aan bakboordzijde, een gescheurd expansiestuk in de stoomleiding die daar liep (zie figuur 3 rechts). Diverse plastic onderdelen waren door hitte vervormd en de rookdetectors en lampenkappen waren gesmolten. Aan stuur-

boord was een van glasvezel gemaakte tank gebarsten. Zie figuur 4 voor een overzicht van de ruimte.



▲ *Figuur 3: Links de situatie in voorste afvalwaterruimte na het voorval (bron: Onderzoeksraad voor Veiligheid). Rechts: Het expansiestuk zoals het werd aangetroffen (bron: Holland America Line).*



▲ *Figuur 4: Locaties van de twee slachtoffers en het expansiestuk (bron: Onderzoeksraad voor Veiligheid).*

3 ACHTERGRONDINFORMATIE

3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk geven we de achtergrondinformatie van het voorval. We beginnen in paragraaf 3.2 met informatie over het schip en de exploitatie door de rederij. Het stoomsysteem leggen we uit in paragraaf 3.3. In paragraaf 3.4 volgt de bemannings-samenstelling. Ten slotte behandelt paragraaf 3.5 de diverse procedures en relevante training aan boord.

3.2 Het schip

3.2.1 Eigenaar

De Nieuw Amsterdam maakt onderdeel uit van de vloot van de Holland America Line (HAL), een van oorsprong Nederlandse rederij. Het bedrijf werd in 1873 opgericht in Rotterdam en onderhield decennialang passagiers- en vrachtverbindingen tussen Nederland en Amerika. Vanaf de jaren 70 van de vorige eeuw richtte de rederij zich meer op de cruisevaart, alle andere activiteiten werden afgestoten. Op het moment van het voorval had de HAL elf passagiersschepen in de vloot (zie tabel 1). De HAL is sinds 1989 een dochteronderneming van Carnival Corporation & plc, die ook een kantoorvestiging in Rotterdam heeft. Carnival Corporation & plc beheert meer dan 90 passagiersschepen van verschillende rederijen waaronder de HAL, Carnival Cruise Line, Costa Cruises, P&O cruises en Cunard lines. De schepen van de HAL varen onder de Nederlandse vlag.

▼ Tabel 1: Overzicht vloot Holland America Line (met jaar van oplevering).

Klasse	Naam	Jaar van opleveren
R-klasse	Volendam	1999
	Zaandam	2000
Vista-klasse	Zuiderdam	2002
	Oosterdam	2003
	Westerdam	2004
Signature-klasse	Noordam	2005
	Eurodam	2008
	Nieuw Amsterdam	2010
Pinnacle-klasse	Koningsdam	2016
	Nieuw Statendam	2018
	Rotterdam	2021

3.2.2 Bouw

De Nieuw Amsterdam was een van de nieuwere schepen van de rederij. De kiel werd op 15 juli 2008 gelegd op de Marghera-scheepswerf van Fincantieri in Venetië (Italië) als tweede schip van de Signature-klasse, bestaande uit twee schepen naar hetzelfde ontwerp. Eerder was het zusterschip de Eurodam in deze klasse opgeleverd. Het passagiersschip was het veertiende schip dat de rederij door het Italiaanse Fincantieri op de Marghera-scheepswerf liet bouwen. In november 2009 werd het passagiersschip uit het droogdok gesleept voor verdere afbouw langs een afbouwkade. In 2010 kwam het passagiersschip in de vaart.

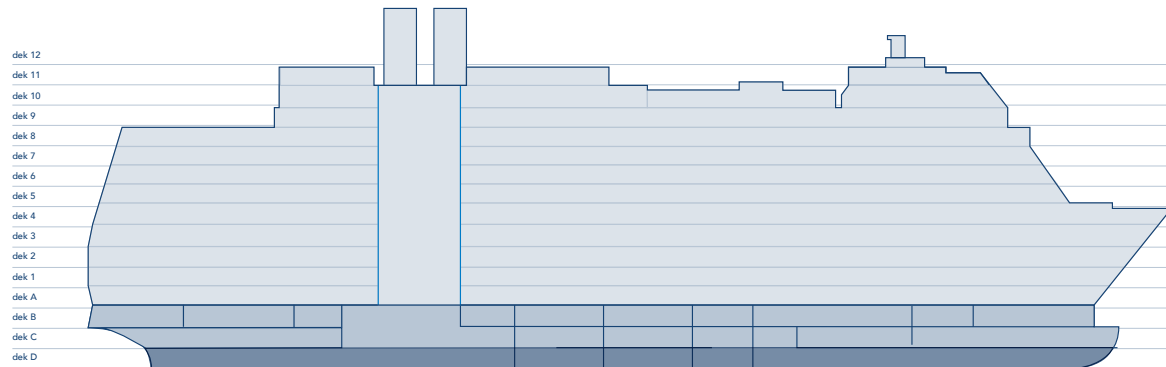
De bouw van het schip vond in secties plaats bij verschillende werven. Vervolgens werden deze secties bij de Marghera-scheepswerf aan elkaar gekoppeld. Dit is een gebruikelijke werkwijze bij het bouwen van dit formaat schepen. De secties worden niet alleen opgebouwd uit het benodigde staal, maar worden ook al zoveel als mogelijk ingericht met leidingsystemen, voor onder meer brandstof, water en stoom. Dit betekent dat het leidingwerk bij het verbinden van de secties ook op elkaar moet worden aangesloten.

Het schip wordt van elektriciteit voorzien door zes diesलगeneratoren. De generatoren omvatten vier MaK 12 M 43 C-motoren en twee MaK 8 M 43 C-motoren, die 64.000 kW kunnen genereren. Het schip wordt voortgestuwd door elektrisch aangedreven Azipods en beschikt over dynamische positioneringssysteem.¹²

¹² Een dynamisch positioneringssysteem is een systeem dat de positie en koers van een schip automatisch beheerst houdt door gebruik te maken van de eigen schroeven, veelal roerpropellers.

3.2.3 Dekindeling

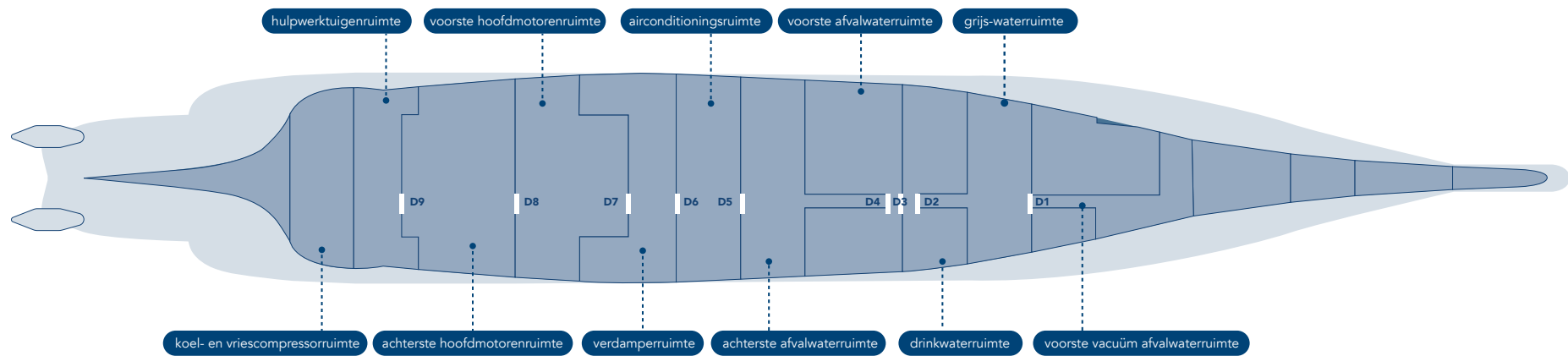
Het schip heeft een passagiersaccommodatie van veertien dekken en is geschikt voor 2.106 passagiers. Daaronder bevinden zich vier dekken met technische ruimtes en accommodatie voor maximaal 874 bemanningsleden. Deze dekken worden van boven naar beneden aangeduid met dek A t/m D. Op dek A bevindt zich de machinecontrolekamer. Op dek B en C bevinden zich de accommodatie voor de bemanning. De machinekamer zelf bevindt zich helemaal onderin het schip, op dek D. Figuur 5 geeft de dekindeling schematisch weer.



▲ Figuur 5: Dekindeling (bron: Onderzoeksraad voor Veiligheid).

3.2.4 Indeling machinekamer

De machinekamer is ingedeeld in elf waterdichte secties. Deze zijn weergegeven in figuur 6.



▲ *Figuur 6: Indeling machinekamer (bron: Onderzoeksraad voor Veiligheid).*

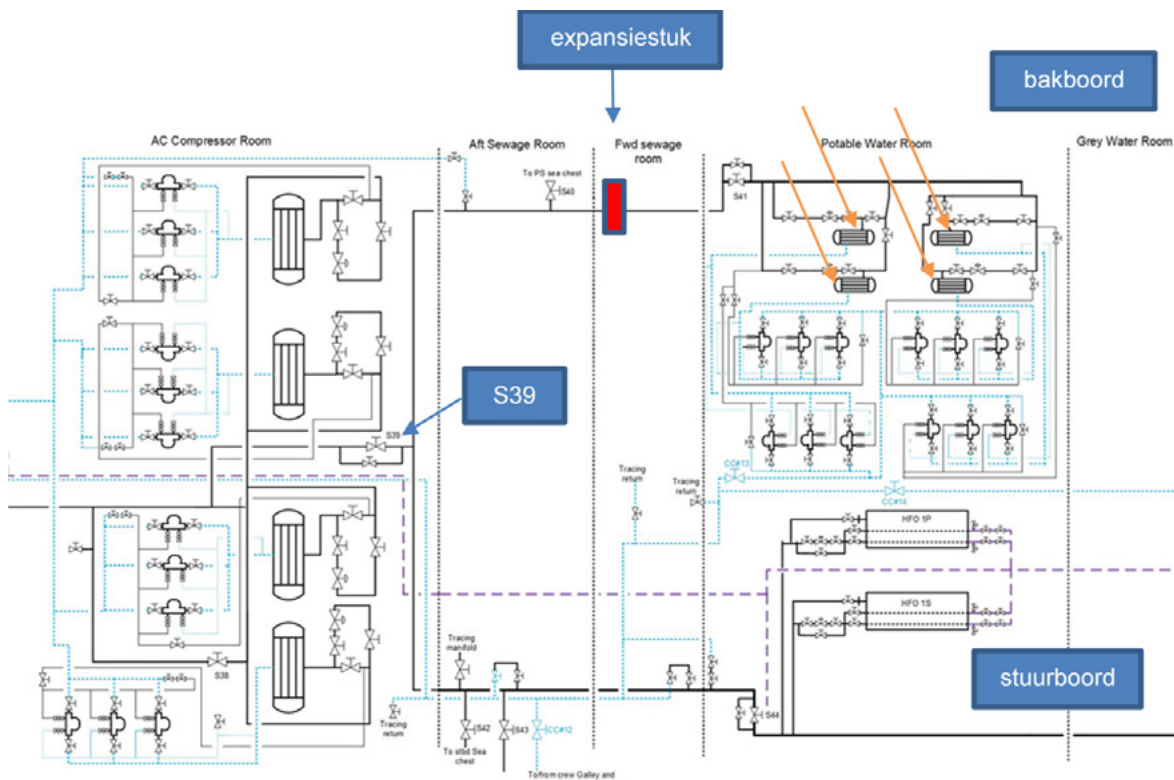
3.3 Stoomsysteem

Aan boord van het passagiersschip wordt een stoomsysteem gebruikt als warmte-transportmiddel. Het stoomsysteem werkt bij een druk van 8 bar en een temperatuur van 170 °C. Nadat de stoom is opgewekt wordt deze verdeeld naar de verschillende gebruikers. Dit zijn onder andere de verwarming van de brandstoftanks, de verwarming van de accommodatie, het warm water systeem, de zwembaden, de (stoom)wasserij en de verschillende keukens aan boord.

3.3.1 Werking van het systeem aan boord

De stoom wordt opgewekt in de twee ruimtes in de machinekamer waar de dieselgeneratoren staan. Als de motoren van deze generatoren draaien wordt gebruik gemaakt van uitlaatgassenketels om de stoom op te wekken. Hierbij wordt de warmte van de uitlaatgassen van de motoren gebruikt om stoom te maken. Naast de uitlaatgassenketels zijn er ook twee olie gestookte hulpketels beschikbaar om stoom op te wekken.

Vanaf de twee ruimtes in de machinekamer waar de stoom wordt opgewekt, loopt een hoofdstoomleiding naar voren. In de airconditioningsruimte bevindt zich een stoom-isolatieklep in de hoofdstoomleiding (aangeduid met S39 in figuur 7). Na deze klep splits het systeem zich in twee takken. Eén tak gaat vanuit het midden naar stuurboord en dan naar voren, door de achterste en voorste afvalwaterruimtes. Deze leiding voorziet vervolgens de wasserij van stoom. De tweede tak loopt naar bakboord en vervolgens ook naar voren door de achterste en voorste afvalwaterruimtes en verder naar de drinkwaterruimte waar vier verwarmers staan voor de warmwatervoorziening. In deze tak bevond zich ten tijde van het voorval aan de achterkant van de voorste afvalwaterruimte een expansiestuk (zie ook paragraaf 3.3.4). In de drinkwaterruimte splitst de bakboords hoofdleiding zich in twee kleinere leidingen, een voor de accommodatieverwarmers en een voor de keukenverwarmers. In figuur 7, dat een overzicht geeft van het stoomsysteem van de airconditioningsruimte naar de drinkwaterruimte, is met een rood blok aangegeven waar het expansiestuk ongeveer in de stoomleiding was geplaatst. De verwarmers zijn aangegeven met oranje pijlen.



▲ Figuur 7: Overzicht ter illustratie van de vertakkingen van het stoomsysteem. De stoomleidingen zijn zwart aangegeven, de condensaat(retour)leidingen in blauw. S39 geeft de stoomislatieklep in de hoofdstoomleiding aan (bron: Holland America Line).

3.3.2 Gebruik stoomleiding naar verwarmers

Het water voor de accommodatie en de keukens wordt in normaal gebruik (gedurende de grootste periode van het jaar) verwarmd met koelwater van de hoofdmotoren (hierna te noemen koelwaterverwarmers). Een van de uitzonderingen is wanneer de hoofdmotoren af staan. Dan wordt voor het verwarmen van het water stoom gebruikt (hierna te noemen stoomverwarmers). Dit gebeurt slechts een paar dagen per jaar, wat in de praktijk betekent dat de leiding met het expansiestuk 'niet in gebruik' is. De term 'niet in gebruik' betekent in dit geval niet hetzelfde als 'afgesloten'. Om te voorkomen dat de leiding af zou koelen, stonden twee¹³ afsluiters naar de stoomverwarmers altijd een klein stukje open.

Gevaren van stoom

Stoom heeft bij normale atmosferische omstandigheden een temperatuur van 100 °C. Bij direct contact kan het ernstige en blijvende verwondingen veroorzaken, met in sommige gevallen zelfs de dood tot gevolg. Inademing van stoom kan de longblaasjes verbranden, wat leidt tot een ernstige belemmering van de longfunctie.

Als een liter water tot stoom wordt verwarmd, wordt het volume ongeveer 1600 keer zo groot. Wanneer water in aanraking komt met een extreem heet oppervlak,

¹³ Een afsluiter naar de accommodatieverwarmers en een naar de keukenverwarmers.

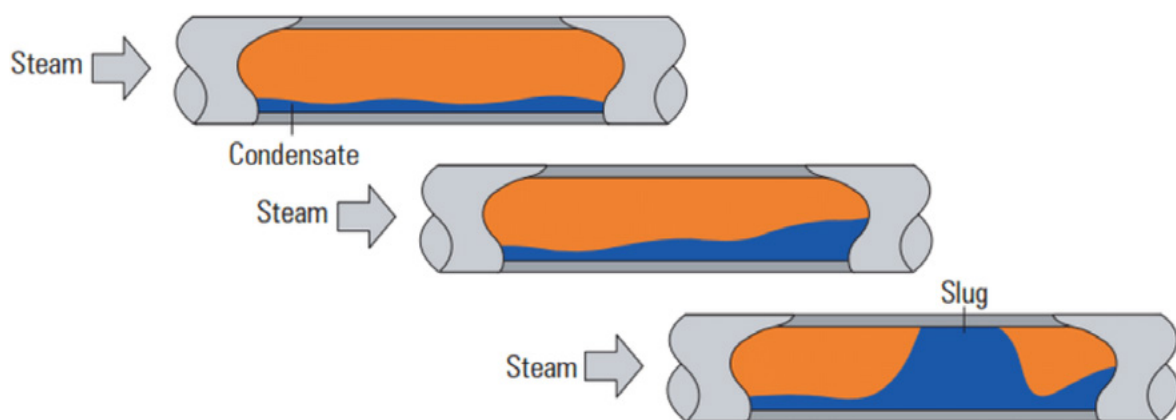
verdampt het water razendsnel en neemt de druk exponentieel toe, waardoor een stoomexplosie kan optreden.

3.3.3 Condensaat

Wanneer de stoom zijn warmte afgeeft, koelt deze af en ontstaat er in de stoomleidingen water. Dit gebeurt ook in een stoomsysteem. Men spreekt dan van condensaat. In het stoomsysteem aan boord wordt het condensaat afgetapt middels condensaatpotten, waarin het condensaat wordt gescheiden van de stoom. Het condensaat wordt teruggeleid naar een tank, van waaruit het weer terug door de ketels wordt geleid om opgewarmd te worden tot stoom.

Condensaat in een stoomsysteem kan gevaarlijk zijn. Zo kan het leiden tot thermische schok. Wanneer stoom in contact komt met een koud oppervlak, zoals een stalen pijp, condenseert het snel, waardoor het volume drastisch afneemt en een vacuüm ontstaat. Dit vacuüm zuigt water aan, wat kan leiden tot een kettingreactie van verdere condensatie en snelle waterbewegingen. Deze snelle bewegingen kunnen pijpen doen barsten of zelfs exploderen. Om dit te voorkomen, worden tijdens het opstarten van stoomsystemen procedures gevolgd waarbij de druk geleidelijk wordt verhoogd en ontluchtingskleppen worden geopend om condensaat veilig af te voeren.

Een ander gevaar van condensaat in een stoomsysteem is differentiële schok. Dit kan optreden bij goed functionerende stoomsystemen, omdat er in stoomsystemen altijd een bepaalde hoeveelheid condensaat ontstaat door warmteverlies. Dit condensaat wordt meestal afgevoerd via condensaatpotten en door de stoompijpen schuin (met afschot) te plaatsen, zodat het water kan wegstromen. Als deze condensaatpotten echter afgesloten zijn, verstopt raken of defect zijn, kan condensaat zich ophopen. De snelstromende stoom boven het stilstaande water kan golven veroorzaken die uiteindelijk een waterprop (*slug*) vormen. Deze prop wordt door de stoomdruk als een projectiel door de pijp geduwd en kan bij obstakels of bochten enorme drukpieken veroorzaken, zie figuur 8.



▲ Figuur 8: Waterprop die gevormd wordt door snelstromende stoom boven stilstaand water (bron: Spiraxsarco).

De drukpieken die door thermische of differentiële schok kunnen optreden leiden in de meeste gevallen tot luide knallen in het systeem. Drukpieken veroorzaakt door de aanwezigheid van condensaat wordt om die reden 'stoomslag' genoemd.

3.3.4 Expansiestuk

Expansiestukken worden in stoomleidingen aangebracht om de thermische uitzetting van de leidingen te kunnen opvangen. In de praktijk worden de expansiestukken soms ook gebruikt wanneer twee stukken pijp uit verschillende nieuwbouwsecties niet precies op elkaar aansluiten. In figuur 9 is een nieuw expansiestuk te zien. Figuur 10 toont het gescheurde expansiestuk. In figuur 11 zijn met isolatiemateriaal ingepakte stoomleidingen te zien.

Het expansiestuk was gemaakt van twee lagen roestvrijstaal en ontworpen voor een werkdruk van maximaal 11 bar. Het expansiestuk wordt bij keuring onderworpen aan een testdruk van anderhalf keer de ontwerpdruk: 16,5 bar. Voor certificering¹⁴ is door de fabrikant een aantal testen gedaan met eenzelfde type expansiestuk.



▲ Figuur 9: Nieuw expansiestuk voor stoomsysteem (bron: Onderzoeksraad voor Veiligheid).

¹⁴ Er is een expansiestuk uit de serie aan diverse testen onderworpen om een prototypecertificaat te krijgen voor de serie. De expansiestukken zijn niet individueel onderworpen aan alle testen.



▲ Figuur 10: Het gescheurde expansiestuk na demontage (bron: Onderzoeksraad voor Veiligheid).



▲ Figuur 11: Stoomleidingen verpakt in isolatiemateriaal (bron: Onderzoeksraad voor Veiligheid).

3.3.5 Keuring stoomsysteem

Het stoomsysteem wordt periodiek getest en gekeurd als onderdeel van het *Harmonized System of Survey and Certification*¹⁵ (HSSC). Deze keuring wordt uitgevoerd door een klassebureau, voor het passagierschip was dit Lloyd's Register.

Tijdens deze keuringen worden onder andere alle veiligheidssystemen getest, waaronder de overdrukventielen en de alarmen en wordt er steekproefsgewijs stukken van de stoomleiding geïnspecteerd. Expansiestukken worden beschouwd als onderdeel van een stoomleiding.

Het klassebureau voerde de laatste keuring van het stoomsysteem ten behoeve van het HSSC uit op 18 december 2023. De rederij handelde alle gedane aanbevelingen naar aanleiding van deze keuring naar tevredenheid van het klassebureau af.

3.4 Bemanningssamenstelling

De nautische afdeling op het schip bestond uit zestig bemanningsleden. De scheepsleiding lag bij de kapitein. Onder hem stond de stafkapitein, die onder andere verantwoordelijk was voor het afhandelen van noodsituaties vanaf het controlecentrum op de brug (*Command Emergency Operations*).¹⁶

De technische afdeling op het schip bestond uit 84 bemanningsleden, aangestuurd door de hoofdwerktuigkundige. Onder hem stond de stafwerktuigkundige, die onder andere verantwoordelijk was voor het afhandelen van noodsituaties in de machinekamer (*Command Emergency Operations Engineering*)¹⁷ en meerdere werktuigkundigen. In tabel 2 is aangegeven hoe de wachturen zijn verdeeld. De wacht van 00.00 uur tot 06.00 uur was verantwoordelijk voor het stoomsysteem. De wacht van 12.00 uur tot 18.00 uur was verantwoordelijk voor het afvalwaterverwerkingssysteem. De wacht van 18.00 uur tot 24.00 uur was verantwoordelijk voor de drinkwatersystemen. Het overige technische personeel liep niet in de wachten mee.

Door bovenstaande verdeling ligt de verantwoordelijkheid voor het gedeelte van het stoomsysteem naar de stoomverwarmers bij twee verschillende wachtteams. De wachtleider van de wacht verantwoordelijk voor het drinkwater, liep sinds een maand deze wacht en was nog niet eerder verantwoordelijk geweest voor de stoomverwarmers.

¹⁵ HSSC is onderdeel van de veiligheidswetgeving en –certificering van zeeschepen zoals vastgelegd door de International Maritime Organisation.

¹⁶ Doordat de stafkapitein verantwoordelijk is voor het afhandelen van noodsituaties, kan de kapitein zich bij noodsituaties blijven concentreren op de veilige navigatie van het schip.

¹⁷ Doordat de stafwerktuigkundige verantwoordelijk is voor het afhandelen van noodsituaties in de machinekamer, kan de hoofdwerktuigkundige zich bij noodsituaties blijven concentreren op de werking van de voortstuwingssystemen van het schip.

▼ Tabel 2: Bemanningssamenstelling machinekamerwachten.

	Tijd	Wachtsamenstelling	Aanvullende verantwoordelijkheid
1	dagwacht	Hoofdwerktuigkundige	
2		Stafwerktuigkundige	
3		Milieu officier	
4	00.00-06.00	Tweede werktuigkundige	Stoomketels
5		Derde werktuigkundige	Stoomketels
6		Machinekamer gezel	
7	06.00-12.00	Eerste werktuigkundige	
8		Derde werktuigkundige	
9		Machinekamer gezel	
10	12.00-18.00	Tweede werktuigkundige	Afvalwaterzuivering
11		Derde werktuigkundige	Afvalwaterzuivering
12		Machinekamer gezel	
13	18.00-24.00	Tweede werktuigkundige	Drinkwater
14		Derde werktuigkundige	Drinkwater
15		Machinekamer gezel	

3.5 Procedures en training

3.5.1 Procedure

Voor het onderhoud (waaronder ook reparaties) aan de technische installaties gebruikt de bemanning van het passagiersschip een *Lock out Tag out* (LOTO) procedure. LOTO is een veiligheidsprocedure die ervoor zorgt dat de energietoevoer van machines of apparatuur wordt uitgeschakeld tijdens onderhouds- of reparatiewerkzaamheden. Dit proces is bedoeld om werknemers te beschermen tegen onverwacht vrijkomende energie en de gevaren van draaiende machines. Energiebronnen worden geïsoleerd en vergrendeld met sloten, voorzien van een label met de naam van de persoon die de vergrendeling heeft aangebracht. Een LOTO word pas verwijderd nadat alle werkzaamheden zijn afgerond.

De rederij heeft procedures voor werk aan *hazardous stored energy systems*.¹⁸ Voor werk aan dit soort systemen is een werkvergunning (PTW¹⁹) nodig. Voor het aanvragen en goedkeuren van een PTW is het (onder andere) noodzakelijk een *Risk Assessment* (RA²⁰) te maken. Er is een standaard RA beschikbaar voor het werken aan stoomsystemen. Deze richt zich voornamelijk op het vervangen van pakkingen, kleppen of pijpen in het stoomsysteem.

3.5.2 Training

In de familiarisatieprocedures²¹ van de rederij is vastgelegd dat alle werktuigkundigen een technische familiarisatie moeten volgen, voordat zij wacht mogen lopen. Onderdeel hiervan is het opdoen van kennis van de *layout* van het hoofd stoomsysteem.

Ook maakt de rederij gebruik van een *e-learning* systeem om werktuigkundigen aan boord te trainen. Het gebruik van LOTO, PTW en RA is onderdeel van deze *e-learning*. Het stoomsysteem is hierin opgenomen, waarbij de focus ligt op het onderhoud van het stoomsysteem en niet op de achterliggende technische principes. De *e-learning* behandelt onder andere de gevaren van het openen van systemen onder druk en hoge temperatuur.

¹⁸ *Hazardous stored energy*; gevaarlijke opgeslagen energie. Energiebronnen zoals elektrische, mechanische, hydraulische, pneumatische, chemische, thermische (waaronder stoom) of andere bronnen in machines en apparatuur die gevaarlijk kunnen zijn voor werknemers.

¹⁹ Permit to Work is een systeem waarin precies staat welke werkzaamheden wanneer moeten worden uitgevoerd en welke onderdelen veilig zijn. Een verantwoordelijke persoon moet het werk beoordelen en de veiligheid in elke fase controleren. De mensen die het werk uitvoeren, ondertekenen de vergunning om aan te tonen dat ze de risico's en de nodige voorzorgsmaatregelen begrijpen.

²⁰ De RA is bedoeld om alle gevaren te identificeren die verband houden met de omstandigheden op de werklocatie. De RA zorgt er voor dat eventuele aanvullende voorzorgsmaatregelen worden geïmplementeerd voordat iemand mogelijk wordt blootgesteld aan verwachte en onverwachte gevaren.

²¹ Met familiarisatie wordt bedoeld dat de bemanning bekend wordt gemaakt met de veiligheidsaspecten van het specifieke schip. Het gaat dan bijvoorbeeld om de indeling en voorzieningen van het betreffende schip. Verder moeten zij bekend zijn met relevante werkprocedures en veiligheidsmiddelen.

4 ANALYSE

4.1 Inleiding

De twee bemanningsleden kwamen om het leven doordat er hete stoom vrijkwam in de ruimte waar ze aan het werk waren, nadat een expansiestuk in de hoofdstoomleiding scheurde. In paragraaf 4.2 bespreken we de reparatie aan de stoomverwarmer, in paragraaf 4.3 het scheuren van het expansiestuk in de voorste afvalwaterruimte. Tot slot analyseren we in paragraaf 4.4 de aandacht voor stoomsystemen in opleidingen.

4.2 Reparatie aan de stoomverwarmer

In paragraaf 2.2 staat beschreven dat een van de stoomverwarmers op 17 maart 2024 is gerepareerd, omdat deze lekte. Voordat de verwarmer werd verwijderd, werd een afsluiter naar deze stoomverwarmer, welke op een kiertje stond, helemaal dicht gedraaid.

De aanwezige risicoanalyse voor werkzaamheden aan het stoomsysteem was vooral gericht op het vervangen van pakkingen, kleppen of leidingen in het stoomsysteem. De risicoanalyse beschreef de voorzorgsmaatregelen voor de werkzaamheden, zoals ervoor zorgen dat alle stoomdruk werd afgelaten. De risicoanalyse ging niet in op de gevaren die gepaard gaan met het isoleren van delen van een stoomsysteem, zoals de kans op condensaatvorming en het risico op stoomslag.

Voor alle werkzaamheden waarbij het risico bestaat dat gevaarlijke energie vrijkomt, is een isolatieplan vereist. Het verantwoordelijke bemanningslid moest het isolatieplan opstellen en ervoor zorgen dat het wordt nageleefd.

Het LOTO-formulier voor de isolatie van de stoomverwarmer vermeldde het volgende:

- ▶ Sluit de twee stoomtoevoerkleppen.
- ▶ Sluit de kleine aandrijfstoomklep (stoom naar condensaatpotten).
- ▶ Sluit de kleppen van de condensaatpotten.
- ▶ Open de condensaatafvoer van de verwarming.
- ▶ Sluit de in- en uitlaatkleppen voor drinkwater.

Bij het dichtdraaien van de stoomafsluiter en het verwijderen van de stoomverwarmer heeft niemand zich gerealiseerd dat dit leidde tot het isoleren van een gedeelte van het stoomsysteem. Er is dan ook geen werkvergunning (PTW) uit geschreven en geen aanvullende risicoanalyse gedaan. Dit werd mogelijk veroorzaakt door het feit dat de stoomtoevoerleiding naar de stoomverwarmers het grootste gedeelte van het jaar 'buiten gebruik' was (zie paragraaf 3.3.2).

De verwarmers werden op 17 maart verwijderd om gerepareerd te worden en vervolgens op 21 maart weer gemonteerd. Ondanks dat de werkzaamheden hiermee werden afgerond, bleef de LOTO op zijn plaats, waardoor de afsluiter gesloten bleef. We hebben niet kunnen achterhalen waarom de LOTO op zijn plaats bleef. Voorafgaand aan het voorval op 22 maart was de stoomleiding met het expansiestuk zes dagen afgesloten geweest.

Deelconclusie

Ter voorbereiding van de reparatie aan een van de stoomverwarmers draaide een bemanningslid een afsluiter in de stoomtoevoerleiding naar de stoomverwarmers dicht. Betrokkenen wisten dat de afsluiter op een kiertje stond om de leiding warm te houden. Deze betrokkenen wisten echter niet dat de leiding warm gehouden moest worden om condensaatvorming te voorkomen. Zij realiseerden zich daardoor niet dat met het dichtdraaien van de afsluiter een deel van het stoomsysteem werd geïsoleerd en het risico op stoomslag toenam.

4.3 Het scheuren van het expansiestuk

Zoals in paragraaf 3.3.4 is beschreven, was het expansiestuk ontworpen voor een werkdruk van maximaal 11 bar en was de testdruk vastgesteld op 16,5 bar. De gemiddelde druk in het stoomsysteem aan boord was 8 bar. Het expansiestuk is dus niet gescheurd doordat het niet in staat was de werkdruk in het systeem te weerstaan. In deze paragraaf bespreken we twee scenario's die het scheuren van het expansiestuk wel kunnen verklaren: materiaalmoeheid en stoomslag.

4.3.1 Materiaalmoeheid

Om vast te kunnen stellen of er sprake was geweest van materiaalmoeheid, is er materiaalonderzoek gedaan aan de scheurranden van het expansiestuk door Element Material Technology (voor het volledige Engelstalige rapport zie Bijlage C). Zij komen hierin tot de conclusie dat er geen sprake was van materiaalmoeheid:

‘Het metaal zag eruit zoals je mag verwachten bij dun plaatmateriaal van dit type. Er waren geen fouten of zwakke plekken in het materiaal.

De balg was kapotgegaan door scheuren in het metaal. Er waren twee scheuren die rond de balg liepen en één scheur in de lengterichting. Overal waar de balg was gescheurd, was te zien dat het metaal eerst was uitgerekt voordat het kapotging. Dit wijst erop dat het metaal is bezweken door te veel kracht, en niet door bijvoorbeeld roest of scheurtjes door herhaalde belasting (vermoeiing).

De conclusie is dat de balg kapot is gegaan omdat het metaal te veel kracht moest opvangen. Het lijkt erop dat de druk van binnenuit te hoog is geworden, waardoor het metaal is gescheurd. De manier waarop het metaal is gescheurd, vooral in de lengterichting, laat zien dat de druk plotseling of heel snel is opgelopen.’

Deelconclusie

Uit het onderzoek en de conclusies van Element Material Technology kan worden vastgesteld dat er geen aanwijzingen zijn voor materiaalmoetheid en dat het materiaal geen inherente defecten of onvolkomenheden vertoonde.

4.3.2 Stoomslag

Voorafgaand aan de reparatie aan een van de stoomverwarmers voor het drinkwater is op 17 maart 2024 een afsluiter in de stoomtoevoerleiding naar deze warmer, welke op een kiertje stond, helemaal dicht gedraaid (zie paragraaf 4.2).

Doordat de condensaatpotten, waarin het condensaat wordt gescheiden van de stoom, dicht waren kon het condensaat zich ophopen in de leiding. We hebben niet kunnen achterhalen waarom de condensaatpotten van de stoomverwarmers voor de keukens gesloten waren. Dit is niet gebeurd bij de reparatie aan de stoomverwarmers in de dagen voorafgaand aan het voorval. In de maanden daaraan voorafgaand is er, volgens het geplande onderhoudssysteem, geen onderhoud of reparatie gepleegd aan het stoomsysteem.

Als condensaat zich ophoopt, kan het tegen de stoomrichting in terugvloeien. De stoom verwarmt dit water opnieuw, waardoor het weer stoom wordt. Hierdoor neemt het volume ineens sterk toe, wat zorgt voor gevaarlijke drukpieken, 'stoomslag' (zie paragraaf 3.3.3). Dit kan harde klappen in het systeem veroorzaken. De geluiden (knallen) die de bemanningsleden in de drinkwaterruimte hoorden, passen bij dit fenomeen. Het onderzoek van Element Material Technology onderschrijft dat in de leiding sprake was van drukpieken: 'De scheur, met name in de lengterichting, suggereert een snelle of plotselinge drukopbouw. Een langzamere drukopbouw zou normaal gesproken leiden tot veel meer lokale vervorming (insnoering), in plaats van scheuren.' Het optreden van stoomslag verklaart waarom het expansiestuk scheurde.

De stoomverwarmers werden alleen gebruikt wanneer er geen koelwater van de motoren beschikbaar was. Dit gebeurde hooguit enkele dagen per jaar, wanneer het schip bijvoorbeeld aan walstroom was gekoppeld. In het ontwerp is geen rekening gehouden met het niet in gebruik zijn van de stoomverwarmers. Er is geen afsluiter aan het begin van de aftakking naar bakboord aangebracht. Hierdoor kan een lang stuk leiding alleen afgesloten worden bij de stoomverwarmers zelf. Aan boord van het schip was de gewoonte ontstaan om twee afsluiters een beetje open te houden. Niet alleen om het systeem warm te houden maar om de opbouw van condensaat tegen te gaan. Het gevolg hiervan was dat de stoomverwarmers niet in gebruik waren maar ook niet volledig afgesloten waren.

Het stoomsysteem was ontworpen om in totaliteit gebruikt te worden, terwijl de aftakking aan bakboordzijde in de praktijk nauwelijks gebruikt werd. Het systeem is hierop niet aangepast door alsnog een afsluiter te plaatsen. Er is voor een gebruiksoptelling gekozen – te weten het niet geheel dichtdraaien van twee afsluiters.

Deze werkwijze verhoogde het risico op stoomslag, doordat de afsluiter per abuis dichtgedraaid kan worden.

Deelconclusie

Doordat de afsluiter in de stoomtoevoerleiding naar de stoomverwarmers geheel werd gesloten, was de leiding met het expansiestuk doodlopend geworden. Hierdoor kon de aanwezige stoom afkoelen tot condensaat. Omdat de condensaatpotten ook dichtstonden kon het condensaat zich ophopen in het doodlopende stuk. Ophopend condensaat kan leiden tot stoomslag. De waargenomen knallen en het type scheur in het expansiestuk wijzen ook op het optreden stoomslag. De daarbij gepaard gaande drukgolven hebben het expansiestuk hebben doen scheuren.

Het systeem was ontworpen om in gebruik te zijn, dit was het echter niet. Om het systeem op temperatuur te houden en opbouw van condensaat en daarmee stoomslag te voorkomen werden er een aantal afsluiters niet volledig gesloten. Deze werkwijze verhoogde het risico op stoomslag.

4.4 Stoomsystemen in opleidingen

In de wettelijk verplichte veiligheidstrainingen zijn geen scenario's opgenomen voor een groot stoomlek. Die zijn er wel voor brandbestrijding, schip verlaten, overleven op zee en eerste hulp. De noodscenario's, die aan boord werden geoefend, liepen parallel aan de wettelijke vereisten. De bemanning had daarom geen veiligheidstraining gehad voor een groot stoomlek.

Er zijn nog maar weinig schepen die stoom gebruiken voor de voortstuwing. In de opleidingen voor werktuigkundige worden stoomsystemen nog wel behandeld als hulpsystemen. In de opleiding over het stoomsysteem als hulpsysteem wordt aandacht besteed aan het efficiënt gebruik van de stoomsystemen en het veilig opstarten en stopzetten van het systeem. Er is in de wettelijk vereiste²² opleidingen geen specifieke aandacht voor gevaren van het werken met stoomsystemen, zoals stoomslag.

De interne trainingen en procedures van de rederij voor de bemanning sluiten aan op de wettelijk vereiste. Er is een procedure voor het opstarten en stopzetten van het stoomsysteem. Aangezien het bij de reparatie voorafgaand aan het voorval niet nodig was om (een gedeelte van) het stoomsysteem stop te zetten, is deze procedure niet gebruikt.

In de stoomtoevoerleiding naar het stoomsysteem stonden twee afsluiters naar de stoomverwarmers op een kiertje om de leiding warm te houden. Ondanks dat dit bij de bemanningsleden van de machinekamer bekend was, was niet bekend dat dit was om

²² Standards of training, certification and Watchkeeping - STCW

te voorkomen dat er condensaat in de leiding zou ontstaan wat tot stoomslag zou kunnen leiden. Er was geen expliciete aandacht voor condensaatvorming in het stoomsysteem anders dan bij opstarten van het stoomsysteem en was het geen onderdeel van het interne opleidingstraject.

Deelconclusie

De bemanning heeft geen training of opleiding gehad over het ontstaan, de gevaren en het voorkomen van stoomslag in stoomsystemen. Dit is geen wettelijke vereiste in het curriculum van een zeevaartopleiding.

Aan boord werd het risico op condensaatvorming en stoomslag enkel erkend in de opstartprocedure van het stoomsysteem. Dat dit in andere situaties ook kon optreden was niet bekend en daar werd de bemanning dus ook niet op getraind of in opgeleid.

5 ACTIES REDERIJ NA VOORVAL

In dit hoofdstuk volgt een korte opsomming van de door de rederij ondernomen acties na het voorval.

Reeds voltooide acties

1. Een herontwerp van de stoomleiding in de voorste afvalwater ruimte van de Nieuw Amsterdam en de Eurodam. Het expansiestuk is vervangen door een U-bocht (goedgekeurd door het klassebureau).
2. Op alle schepen in de vloot zijn de stoomleidingen geïnspecteerd om eventuele niet eerder bekende expansiestukken te identificeren. Ook is er geverifieerd dat alle expansiestukken in het onderhoud planningssysteem zijn opgenomen.
3. Er is een werkgroep Machinekamer veiligheidsbeheer opgericht op het hoofdkantoor kantoor in Seattle.

Acties in uitvoering

4. Het vervangen van mechanische condenspotten door elektronisch aangestuurde condenspotten.
5. Bij de inspecties uitgevoerd onder punt 2 zijn op de vloot vervormde expansiestukken aangetroffen. Deze worden vervangen en waar nodig worden de stoomleidingen uitgelijnd.
6. Het bijwerken van de risicobeoordelingen van de machinekamer, waarbij onder andere wordt gekeken naar nooduitgangslocaties en noodsignalering.
7. Standaardisatie van waterdichte deur bewegwijzering in de HAL-vloot.
8. Een onderzoek naar de mogelijkheid om een locatietagsysteem voor de machinekamer te installeren met locatie *trackers* voor het machinekamerpersoneel.

Acties die worden onderzocht

9. Het installeren van temperatuur en vochtigheid sensoren in de ruimtes waar het stoomsysteem zich bevindt.
10. De mogelijkheden om de bestaande overdruk in de machinekamer op te lossen.

Daarnaast worden door de scheepbeheerder de bestaande noodscenario's en -oefeningen geëvalueerd en waar nodig aangepast. Ook loopt er een traject om in de toekomst door het nieuwbouwteam te laten valideren dat alle geïnstalleerde expansiestukken daadwerkelijk op tekening staan en in het onderhoud planningssysteem zijn opgenomen.

6 CONCLUSIES

Op 22 maart 2024 kwamen twee bemanningsleden van het Nederlandse passagierschip de Nieuw Amsterdam om het leven, nadat een expansiestuk in een stoomleiding scheurde en de ruimte waarin zij zich bevonden binnen 86 seconden vervulde met stoom. Door het vrijkomen van het mengsel van water en stoom van meer dan 100 graden Celsius, ontstond er een conditie in de ruimte waarin de twee bemanningsleden de waterdichte deuren en de nooduitgang niet meer konden bereiken en ze niet konden overleven.

Scheuren van het expansiestuk door stoomslag

Door stoomslag in het stoomsysteem begaf de stoomleiding het op een zwakke schakel. Dat was in dit geval het expansiestuk. De scheur in het expansiestuk was zo groot dat de voorste afvalwaterruimte zich in korte tijd volledig vervulde met stoom.

Onderhoud voorafgaand aan het voorval

De stoomslag kon ontstaan, doordat een afsluiter, die normaal gesproken op een kiertje stond, volledig dicht was gedraaid. Dit gebeurde op 17 maart 2024, in voorbereiding op een reparatie aan een van de verwarmers in het stoomsysteem. Betrokkenen wisten dat deze afsluiter normaal gesproken op een kiertje stond om de leiding warm te houden, maar niet dat met het dichtdraaien van de afsluiter de leiding met het expansiestuk doodlopend werd en zich aldaar condensaat kon ophopen. Als condensaat zich ophoopt, kan het tegen de stoomrichting in terugvloeien. De stoom verwarmt dit water opnieuw, waardoor het weer stoom wordt. Hierdoor neemt het volume ineens sterk toe, wat zorgt voor gevaarlijke drukpieken, oftewel stoomslag. Het gevaar van de opbouw van condensaat in dit deel van de stoomleiding is door geen van de bemanningsleden onderkend.

Stoomverwarmers niet in gebruik, maar niet volledig afgesloten

De stoomverwarmers waren tijdens normale bedrijfsvoering (op enkele dagen per jaar na) niet in gebruik. Dat betekende niet dat alle afsluiters van de stoomverwarmers volledig gesloten waren. De noodzaak om de afsluiters op een kier te laten staan was niet meegenomen in de werkprocedures aan boord. Hierdoor is het risico van de opbouw van condensaat door het volledig dichtdraaien van de stoomtoevoer niet meegenomen in de *Lock-out-Tag-out* procedure noch in de risicoanalyse voor onderhoud aan het stoomsysteem.

Stoomslag niet in opleiding

De bemanning heeft geen training of opleiding gehad over het ontstaan, de gevaren en het voorkomen van stoomslag. De interne opleidingen en trainingen van de rederij die gaan over het stoomsysteem sluiten aan bij de internationale wet- en regelgeving. In deze wet- en regelgeving is geen aandacht voor het risico van stoomslag in een stoomsysteem.

Het risico van de opbouw van condensaat en de daarmee het ontstaan van stoomslag werd zowel in de interne opleiding als de procedures aan boord alleen aangenomen te bestaan tijdens het opstarten van (delen van) het stoomsysteem.

Ontwerp versus gebruik van het stoomsysteem

Bij het ontwerp van het stoomsysteem is geen rekening gehouden met mogelijkheid om een deel van het systeem niet in gebruik te hebben. In de praktijk betekende dit dat de afsluiters van de aftakking naar bakboord niet volledig dichtgedraaid werden, om de opbouw van condensaat tegen te gaan. Deze werkwijze verhoogde het risico op stoomslag, doordat de afsluiter per abuis dichtgedraaid kan worden.

7 AANBEVELINGEN

Voorkom structurele workarounds in stoomsystemen

Bij het normale gebruik van het stoomsysteem aan boord van de Nieuw Amsterdam was een structurele *workaround* nodig (een afsluiter werd een klein stukje open gehouden) om opbouw van condensaat in het systeem te voorkomen. Hoewel een *workaround* in de praktijk soms onontkoombaar is, dient het langdurige gebruik ervan voorkomen te worden.

Aanbeveling aan de Holland America Line (HAL)

Om te bevorderen dat er geen structurele *workarounds* meer worden gebruikt in stoomsystemen op schepen van de HAL, doen we de volgende aanbeveling:

1. Ga bij al uw bestaande schepen na of er tijdens de normale bedrijfsvoering van het schip structurele *workarounds* worden toegepast in het stoomsysteem. Indien een structurele *workaround* wordt aangetroffen, dient het systeem of de procedure te worden aangepast, zodat het voor de bemanning niet meer nodig is om de *workaround* te gebruiken.

Aanbeveling aan NMT-IRO²³

Om te voorkomen dat in nieuw te bouwen schepen stoomsystemen worden geplaatst waarbij structureel gebruik moet worden gemaakt van een *workaround*, doen we NMT-IRO de volgende aanbeveling:

2. Breng bij uw leden onder de aandacht dat voorkomen moet worden dat in nieuwe schepen stoomsystemen worden geïnstalleerd waarbij tijdens de normale bedrijfsvoering van het schip structureel gebruikt gemaakt moet worden van een *workaround*.

Aanbeveling aan de Koninklijke Vereniging van Nederlandse Reders (KVRN)

Om te bevorderen dat ook andere rederijen van dit voorval kunnen leren, doen we de KVRN de volgende aanbeveling:

3. Breng bij uw leden en internationale contacten onder de aandacht dat het gebruik van structurele *workarounds* in stoomsystemen voorkomen moet worden.

²³ NMT-IRO is een brancheorganisatie voor de maritieme maak- en offshore energie industrie in Nederland.

Breng risico's van opbouw condensaat en stoomslag in stoomsystemen beter in beeld bij bemanningen

De bemanning aan boord van de Nieuw Amsterdam was beperkt op de hoogte van de risico's van condensaatopbouw en stoomslag in stoomsystemen. Deze risico's waren geen onderdeel van de procedures en trainingen. Ook in opleidingen van bemanningen wordt weinig aandacht besteed aan deze risico's.

Aanbeveling aan de Holland America Line (HAL)

Om de kennis van risico's van condensaatopbouw en stoomslag in stoomsystemen bij bemanningen op schepen van de HAL te vergroten, doen we de HAL de volgende aanbeveling:

4. Pas uw procedures en trainingen rondom het werken met stoomsystemen aan, zodat de risico's van condensaatopbouw en stoomslag beter in beeld zijn bij bemanningen.

Aanbeveling aan de minister van Infrastructuur en Waterstaat (I&W)

Om de risico's van condensaatopbouw en stoomslag in stoomsystemen onderdeel te laten worden van opleidingen van zeevarenden, doen we de minister van IenW de volgende aanbeveling:

5. Dien bij de Internationale Maritieme Organisatie een verzoek tot aanpassing van de *Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers* (STCW) in, zodat de risico's van condensaatopbouw en stoomslag in stoomsystemen aan bod komen in opleiding van bemanningsleden. Breng deze risico's en deze casus, vooruitlopend op een aanpassing van de STCW, bij de zeevaartscholen in Nederland onder de aandacht, zodat zij hier in het onderwijs alvast aandacht aan kunnen besteden.

BIJLAGE A

Scheepsgegevens Nieuw Amsterdam



Scheepsgegevens	Nieuw Amsterdam
Roepletters	PBWQ
IMO	9378450
Vlaggenstaat	Nederland
Scheepstype	Passagiersschip
Bouwjaar	2010
Werf	Fincantieri (Italië)
Lengte	285 m
Breedte	32 m
Diepgang	8.2 m
Gross Ton	86.273 ton
Passagiers	2106
Bemanning	1735
Hoofdmotor	6 dieselelektrische MaK M 43 C-motoren
Voortstuwing	Azipod roerpropellers
Maximum voortstuwingsvermogen	64.000 kW
Scheepscertificaten	Allen geldig

BIJLAGE B

Reacties op het conceptrapport

Het conceptrapport (zonder aanbevelingen) is voorgelegd aan de betrokken partijen. Deze partijen is gevraagd het rapport te controleren op feitelijke onjuistheden en onduidelijkheden. De volgende partijen hebben een reactie gegeven op het conceptrapport:

- ▶ Holland America Line
- ▶ NMT-IRO
- ▶ Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

De binnengekomen reacties zijn op de volgende manier verwerkt:

- ▶ Als de Onderzoeksraad heeft besloten reacties over te nemen, dan zijn deze verwerkt in de definitieve versie van het rapport.
- ▶ Als de Onderzoeksraad reacties niet heeft overgenomen, dan is toegelicht waaromdaartoe is besloten.

De reacties en de toelichting van de Onderzoeksraad zijn opgenomen in een tabel die te vinden is op de website van de Onderzoeksraad (www.onderzoeksraad.nl).

BIJLAGE C

Rapport Element Material Technology



REPORT

ANALYSIS OF A FAILED STAINLESS STEEL EXPANSION JOINT

© Copyright Element Materials Technology Rotterdam B.V. All rights reserved.

This report (including any enclosures and attachments) has been prepared for the exclusive use and benefit of the addressee(s) and solely for the purpose and under the terms of the contract for which it is provided. Unless we provide express prior written consent, no part of this report may be reproduced, distributed, communicated to, used or relied upon by any third party. We accept no liability, duty or responsibility (in contract, tort (including negligence) or otherwise) to any person other than the named addressee(s) of, this report. The content of this report may not be used in any other document, circular or statement or used in litigation without our prior written consent.

Client : De Onderzoeksraad Voor Veiligheid

Client's reference : ---

Element Project : ERO042123P

Report no : ERO042123 Rev. 0

Investigation period : April 24 - May 24, 2024

Report date : June 06, 2024

Revision date :

Investigator/Author : 

Classification : ---

Distribution : De Onderzoeksraad Voor Veiligheid
 (pdf)

Element, file (pdf)

1 Introduction and background information

An expansion joint from a vessel has failed during service.

The following information was submitted by De Onderzoeksraad Voor Veiligheid ("Onderzoeksraad"):
The expansion joint was part of a steam conduit. The saturated steam had a working pressure of 7 to 8 bar.
As far as could be determined the working pressure at the time of failure was 7.6-7.8 bar.
The materials of the expansion joint were not specified.

For the investigation the failed expansion joint has been submitted to Element Materials Technology Rotterdam B.V. ("Element", location Amsterdam).

Element was requested to determine the nature, and if possible, the cause of failure of the expansion joint.

2 Experimental details

The failed expansion joint was first examined visually in the as received condition. The complementary fracture surfaces were subsequently examined in more detail by stereomicroscopy. Selected fracture surface segments were examined by Scanning Electron Microscopy (SEM) to determine the fracture mechanism. The chemical composition of the failed material was analysed by an Energy Dispersive X-ray (EDX) microanalysis probe of the SEM. Cross section samples were cut from the failed expansion joint to examine the material in relation to the fracture by optical microscopy.

3 Results and discussion

3.1 Visual and stereomicroscopic examination

The expansion joint consisted of a metal bellows in between two flange rings. The metal flange rings had an outer diameter of 340 mm, an inner diameter of 220 mm and a thickness of 20 mm. A type plate on the flange confirmed the production company as "steelflex" and the expansion joint as type "AFX 3F".

The bellow section, in the as received/failed condition, had a length of ~15 cm. The bellows was double walled with both plates having a thickness of ~0.5 mm. The bellows appeared to have a total of 15 convolutions, due to the deformation and fracture in the bellows they were difficult to identify. The expansion joint in the as received condition is presented in figure 1.

The expansion joint appeared to have failed due to overlapping circumferential cracks and an axial crack in both bellows, accompanied by significant material deformation leading to a blown-out lip further referred to as "fracture". To form the blown-out lip, the fracture most likely started in the axial section to progress in to circumferential cracks to form the complete lip.

As far as still could be determined, the internal diameter of the bellows had been 20 cm, the external diameter 24 cm, and the number of convolutions has been 15. The original width ("wavelength") of the convolutions (and thereby also the original distance between the flanges), could not be determined with any accuracy. Both the internal and external bellows showed (non-overlapping) axial welds. The formed cracks however clearly did not relate to these longitudinal welds.

The fracture itself showed the following dimensions and details:

The fracture had a width of 115 mm across 9 convolutions with 3 unfractured convolutions on each side. The fracture length was roughly 230 mm along the circumference of the bellows. An overview of the fracture is presented in figure 2.

On the fractured side of the bellows the fractured convolutions were expanded ("blown up"), while the same convolutions were compressed on the opposite side of the bellows. Similarly, the unfractured convolutions were compressed adjacent to the fracture and expanded on the opposite side, see figure 3. The plate material

of the bellows showed some corrosion products, however, these appeared superficial and unrelated to the fracture.

In both the external and the internal bellows plate the fracture followed the exact same fracture path. The fracture path is illustrated in figure 4 for the fracture across the width of the bellows (axial crack direction). The fracture along the side of the convolutions of the bellows (two circumferential cracks) is illustrated in figure 5.

Due to the thin nature of the plate materials used for the bellows, little characteristics of the crack surfaces could be distinguished by visual and stereomicroscopic examination. Additionally, some corrosion appeared to have occurred on the fracture surfaces further obscuring fracture characteristics. Details of the fracture surfaces in the axial direction of the bellows are presented in figure 6. Here corrosion indeed obscured the details of the fracture. The circumferential fracture surfaces appeared slightly less corroded, see figure 7. Some plastic deformation of the material, most likely a form of necking, appeared to be visible.

3.2 Scanning Electron Microscopy (SEM)

Sections were cut from the fractured bellows material to enable an examination of the crack surfaces by Scanning electron microscopy. Sections were cut from both circumferential cracks (inner and outer bellows sections) as well as a section taken from the axial crack section in the bellows.

In all examined crack surfaces, both from the internal and external bellows, only a dimple morphology was observed. The dimple morphology is characteristic for a ductile cracking mechanism. Representative images of the fracture surfaces with dimple morphology are presented in figures 8 to 12. Some corrosion products were present on the fracture surfaces, as was also determined visually.

All examined crack surfaces only revealed evidence of ductile failure, no evidence was found for stress corrosion cracking or fatigue cracking. The corrosion of the crack surfaces was superficial and thus appeared to have occurred after cracking (secondary damage).

3.3 Energy Dispersive X-ray microanalysis (EDX)

To confirm the alloy type that was applied for the bellows clean samples were analysed for chemical composition. Due to the limited thickness of the material the analysis was performed in the SEM equipped with an Energy Dispersive X-ray microanalysis (EDX) probe. The analysis was performed at relatively low magnification to cover a larger surface area and at an accelerating voltage of 20 kV. An analysis was performed for both the inside and outside bellows plate. The results of the analysis are presented in table 1.

Table 1. Chemical composition (mass %) as determined with EDX* analysis.

sample / element	C	Si	Mn	Cr	Ni	Ti	Fe
Plate outside	little	0.7	1.9	18	9.0	0.6	70
Plate inside	little	0.7	1.7	18	9.3	0.6	70

* Remark: EDX (EDS, energy dispersive X-ray microanalysis) is a semi quantitative analysing method. Depending on the accelerating voltage, in principle all elements, except those lighter than boron, can be detected. The detection limit depends on the measured element, the composition of the surrounding matrix and the used accelerating voltage. In general, it can be said that the detection limit is approx. 0.1 mass% to 0.5 mass%. The accuracy of the results also depends on element and matrix and is approx. a few tenths of a weight percent up to a few weight percent (absolute value). EDX analysis is performed on relatively small surfaces. This implies that local variations in the chemical composition may influence the results. The carbon content cannot be determined with sufficient accuracy. The carbon content therefore is estimated, judged by experience based on the relative size of the carbon peak in the spectrum. The carbon content is reported in terms of "much" or "little". In the calculation of the percentages of the other elements (a total of 100% is assumed) the carbon content is not included. When a large quantity of carbon is present this therefore will influence the calculated results for the other elements significantly. Thus, in EDX analysis of substances consisting mainly of carbon (e.g. polymers), the estimated carbon content is reported in [m%] with an uncertainty of +/- 10%.

Based on the compositional analysis by EDX it is concluded that the failed bellows plate materials of the expansion joint are stainless steel type AISI 321 or an equivalent such as alloy X6CrNiTi18-10 (1.4541) in standard EN 10088-2.

3.4 Microscopic examination

Cross section samples were cut over the fracture surfaces of the axial and circumferential cracks in the internal and external bellows. The samples of the internal and external bellows plates were sampled at roughly corresponding positions. The cross-sectional samples were subsequently prepared for examination by optical microscopy. To reveal the microstructures the samples were electrolytically etched in 10% oxalic acid solution (following standard ASTM E407, no. 13).

The general microstructures of the bellows plates were similar for both the internal and external bellows. The plates had an austenitic microstructure with a deformation texture and TiN particles. The texture is the result of the plate and bellow forming process. The texture was most pronounced in the sample taken over the axial cracks in the bellows. Representative images of the general microstructure are presented in figure 13.

At the fracture surfaces plastic deformation was clearly visible in the material. In all instances a ductile type fracture was observed in the microstructures; a predominantly shear type fracture was observed in the cross-sectional samples. Apart from the deformation there were no deviations from the general microstructures at the fractures. Representative images of the cross-sectional samples at the fracture are presented in figures 14 and 15. No material degradation or defects were observed in the examined cross-sectional samples.

4 Overall discussion

The bellows of the expansion joint were a double walled construction and both walls were made out of stainless steel of type AISI 321 (or an equivalent alloy). The microstructures of the material followed expectations for thin plate material of this alloy type. The material did not show any inherent defects or imperfections.

The bellows showed plastic deformation in that the convolutions of the bellows were either compressed or completely expanded (blown up). The bellows failed by cracking of the material. Two cracks ran circumferential and were combined with one axial crack, thereby forming a lip ("fracture"). The fracture ran through both walls of the expanded sections in the bellows and the fracture path was identical for both the internal and external bellows wall.

At all positions the examined crack surfaces of both the bellows showed evidence of plastic deformation (dimples) that had resulted in shear, thus pointing to failure by ductile overloading. No evidence was found for stress corrosion cracking or fatigue cracking, and the observed (superficial) corrosion of the crack surfaces had occurred after cracking (secondary damage).

It is concluded that the materials of the bellows in the expansion joint failed due to a fully ductile overload of the material. It appears that a too high internal pressure has led to the occurred ductile failure. The ductile failure apparently has started with axial cracking, almost instantaneously progressing in two circumferential cracks, together making a blown-out lip. Material stresses due to internal pressure are highest in the circumferential direction thereby promoting an initial axial rupture.

The predominantly shear type fracture, especially in the axial direction, suggests a rapid or sudden pressure build-up. A slower pressure build-up would normally lead to much more local deformation (necking) at the fracture surface, instead of the shear type fracture.

5 Conclusions

The materials of the bellows in the expansion joint failed due to a fully ductile overload of the material.

The ductile failure was caused by a high internal pressure build-up in the expansion joint.

All characteristics of the above object(s) have, as far as accessible and relevant, been verified by Element Materials Technology Rotterdam b.v. (Element). Other information was provided by the purchaser. This information was verified as far as possible and has been copied into this report, unchanged. Element does not bear responsibility for the correctness of this submitted information. Any kind of "witnessing" and conclusions by a third party is not covered by the RVA accreditation L063 and is no part of the Element report. We hereby certify that the reported test data is correct and that the above object(s) was (were) tested/examined in accordance with purchaser's requirements and/or the above procedure(s) and/or code(s)/specification(s). If a declaration of conformity is issued in the report with regard to compliance with a specification or standard, this declaration is only applicable to the product(s) examined. In this assessment, the decision rule is applied that assumes that the expanded measurement uncertainty is not included in the assessment. Uncertainty budgets for quantitative tests have been determined. Some of these are available on the laboratory's website ([Link](#)), for all others contact the laboratory for details. Unless otherwise stated in the test standard or accreditation rules, the rounding rule according to ASTM E29 is used for tests according to ASTM/ASME and ISO 80000-1 Annex A Rule B is used for tests according to all other standards. All tested products are examined in as received condition unless otherwise stated in the test report. On occasion a test is subcontracted by Element, the accreditation number of the subcontracted party is reported. Interpretations, opinions, conclusions and advice are partly based on the examination results and partly on information supplied by the purchaser. This report has legal value only when furnished with an authorized signature. If, upon reproduction, only part of this report is copied, Element will not bear any responsibility for content, purport and conclusions of that reproduction.

The research objects of material testing and non-relevant parts of damage research will be kept for 2 months, relevant parts of damage research will be kept for 2 years and replicas will be kept for 5 years, starting from the report date as mentioned on the title page of this report. When no other instructions are received from our client before the end of this standard period of storage, we assume that our client has no objections that the objects concerned will be disposed of by Element at will.

Amsterdam, June 06, 2024

Author: [REDACTED]
Consultant failure analysis
[REDACTED]

Authorised: [REDACTED]
Group leader failure analysis NL

p.p. [REDACTED]
Sr. Consultant failure analysis
[REDACTED]



Figure 1. The failed expansion joint as received by Element Materials Technology, Amsterdam.



Figure 2. Overview of the fracture in the bellows with visibly expanded and compressed convolutions, the fractured double plate segment is still connected to the bellows.



Figure 3. The unfractured side of the bellows with expanded convolutions adjacent to the central compressed convolutions. The central convolutions are obscured by the expanded convolutions on each side.



Figure 4. The fracture across the width of the bellows illustrating the exact same fracture path through both bellows plates.



Figure 5. The fracture across along the side or circumference of the bellows illustrating the exact same fracture path through both bellows plates.

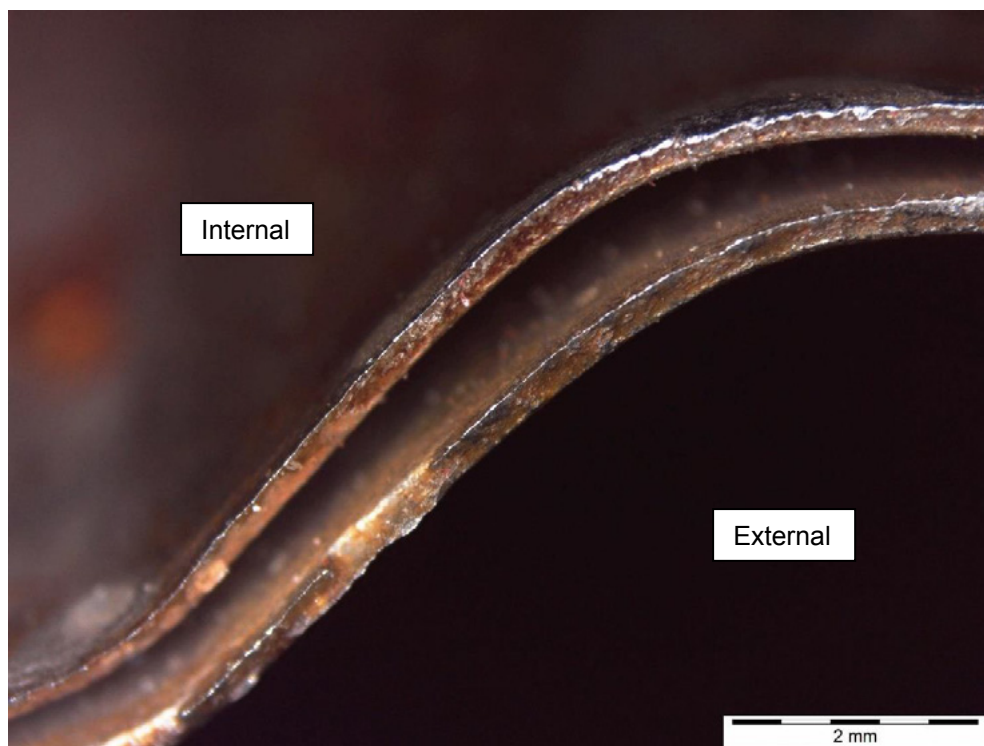


Figure 6. The fracture surfaces of the bellows plates in the fracture across the width (see figure 4 for reference). Mostly corroded fracture surface, no visible details.



Figure 7. Detail of the fracture surfaces along the circumference, some plastic deformation appeared to be visible.

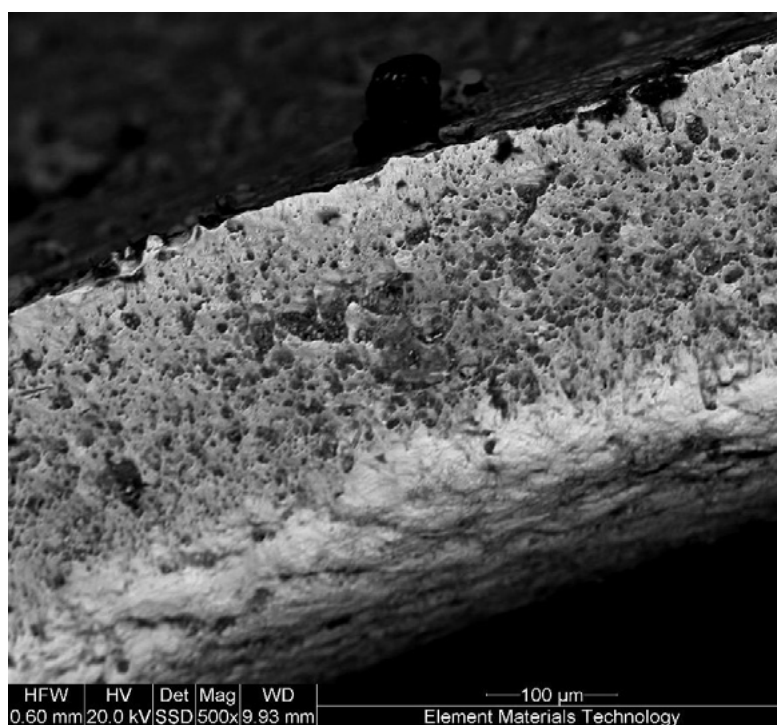


Figure 8. Typical fracture surface in bellows plate: dimple morphology and slightly corroded fracture surface.

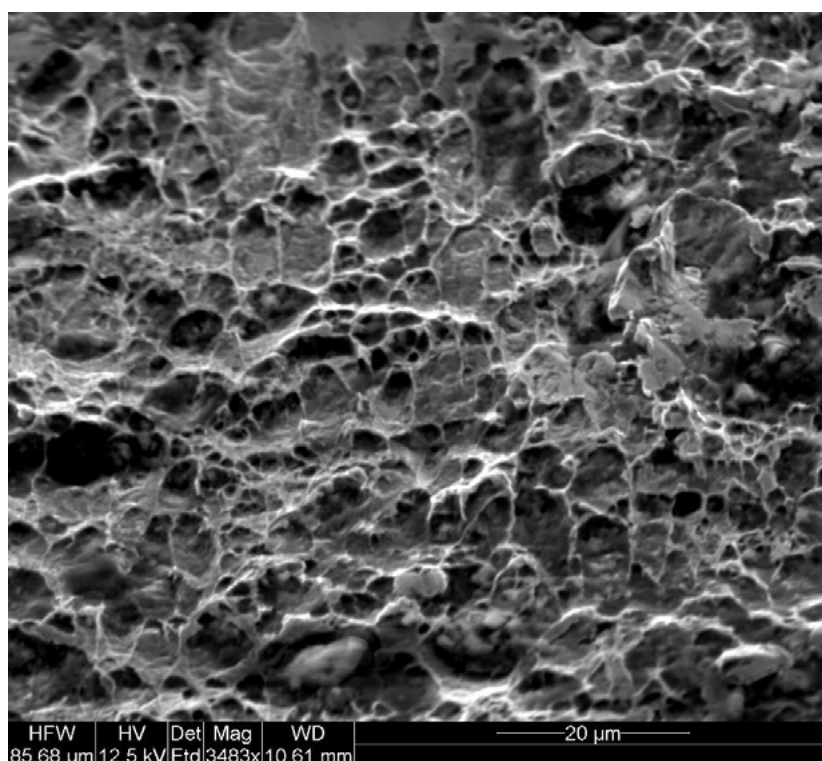


Figure 9. Internal bellow plate width section: dimple morphology indicative of ductile fracture.

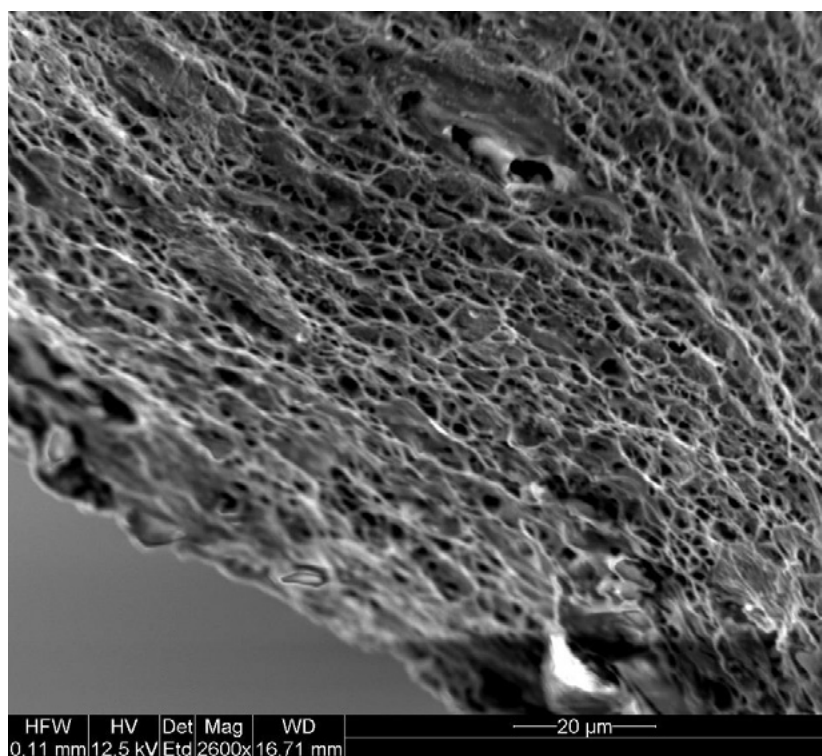


Figure 10. External bellow plate width section: dimple morphology indicative of ductile fracture

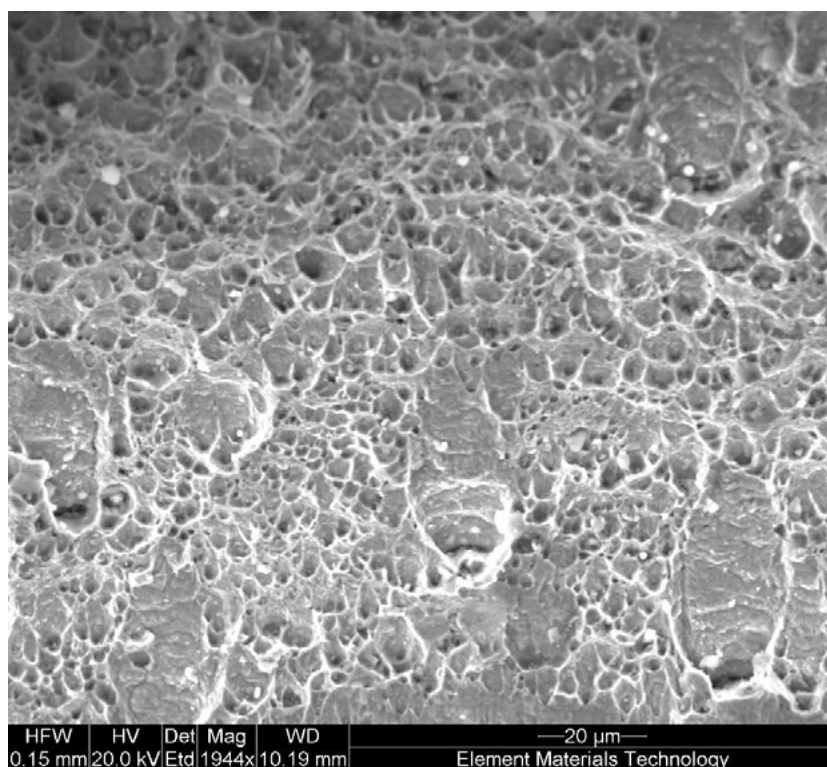


Figure 11. Internal bellow plate circumferential section: dimple morphology indicative of ductile fracture.

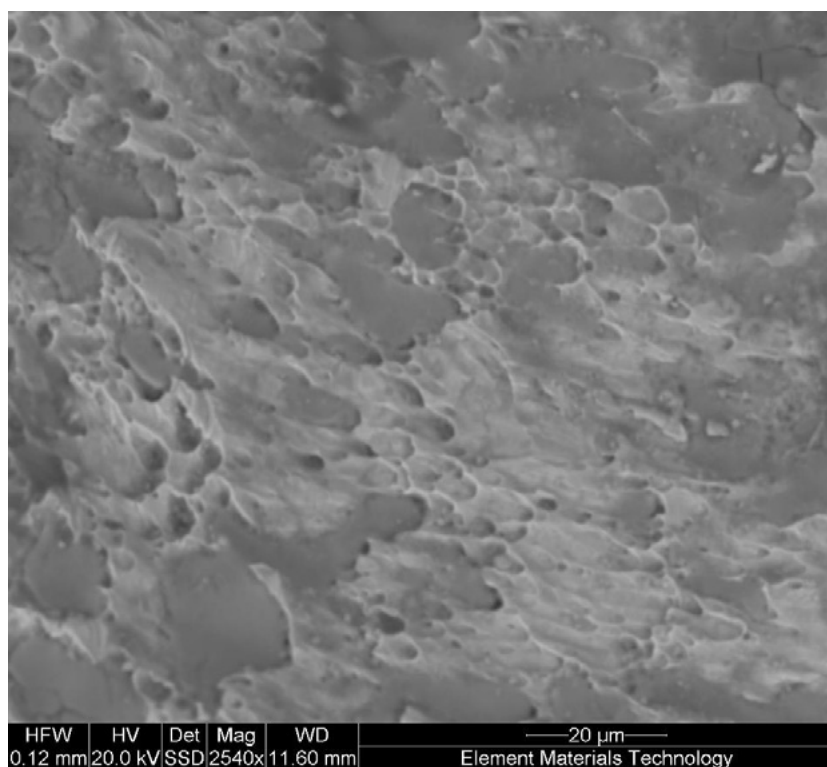


Figure 12. External bellow plate circumferential section: dimple morphology indicative of ductile fracture and some corrosion products present in the fracture surface.

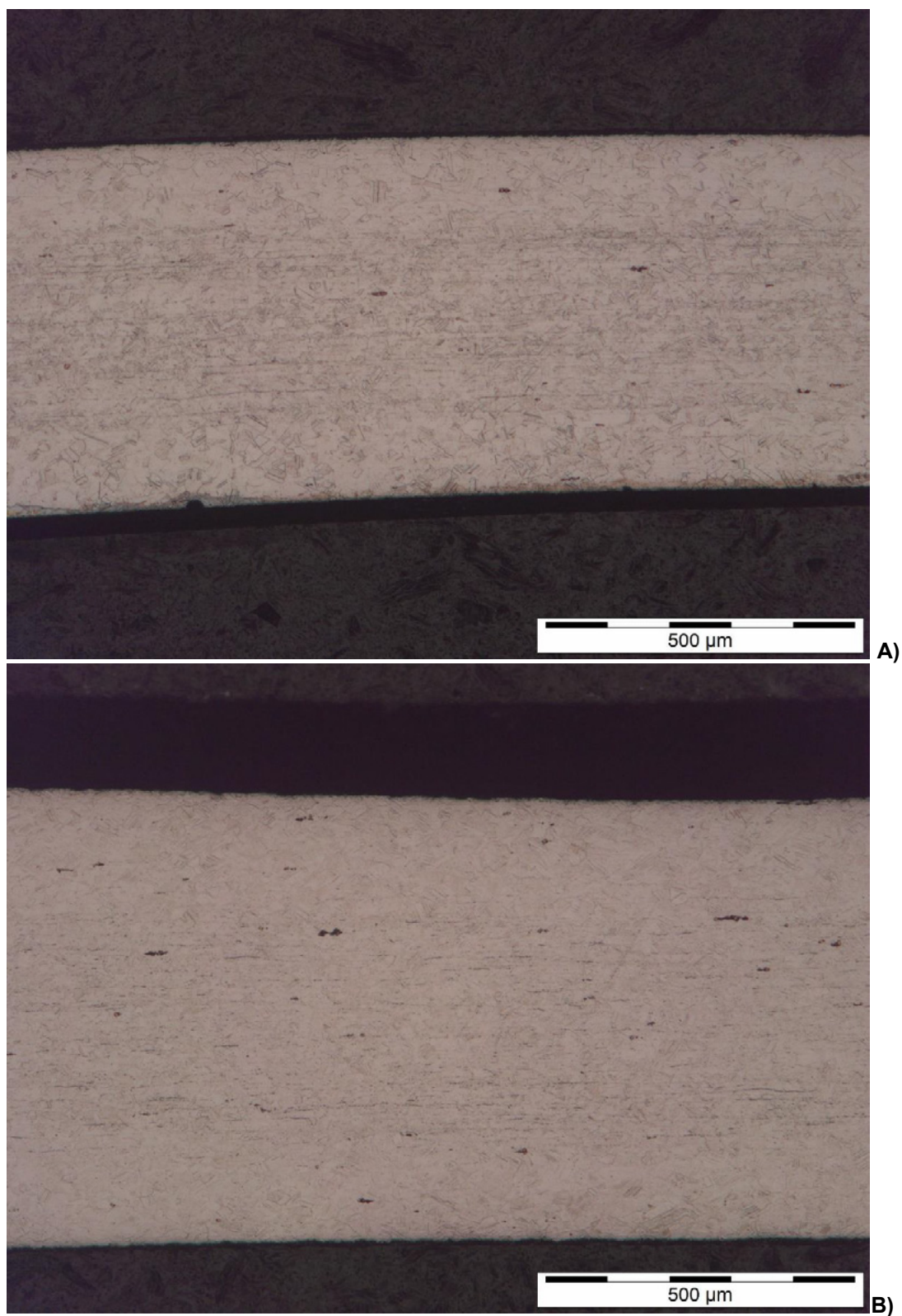


Figure 13. The general microstructures of the bellows plates, A) Internal and B) external: austenitic microstructure with deformation texture and TiN particles. (Oxalic acid etch, magn ~100x)

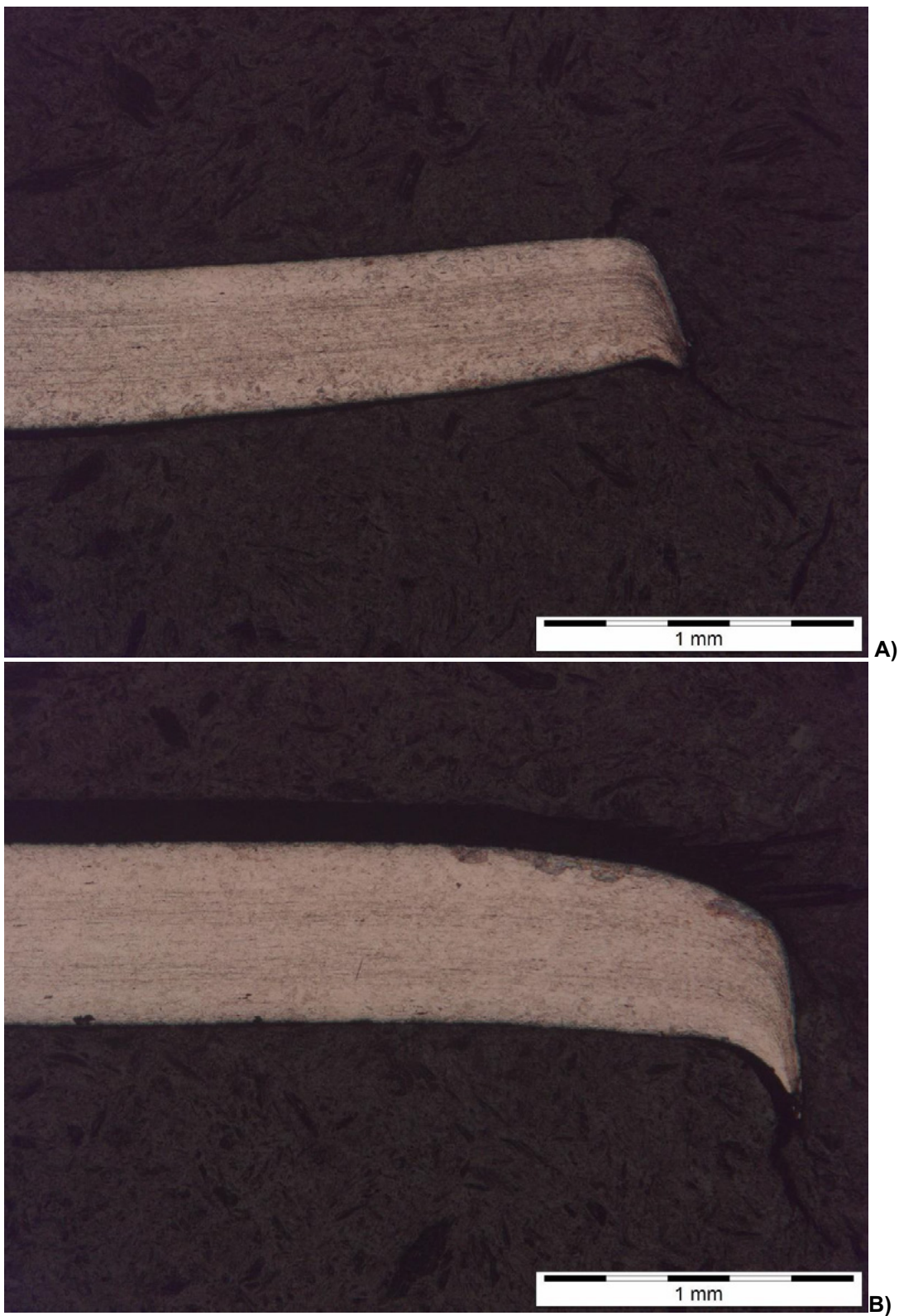


Figure 14. Fractures in cross section along the width of the bellows plates, A) Internal and B) external: plastic deformation visible at the fracture, shear type ductile fracture. (Oxalic acid etch, magn ~50x)

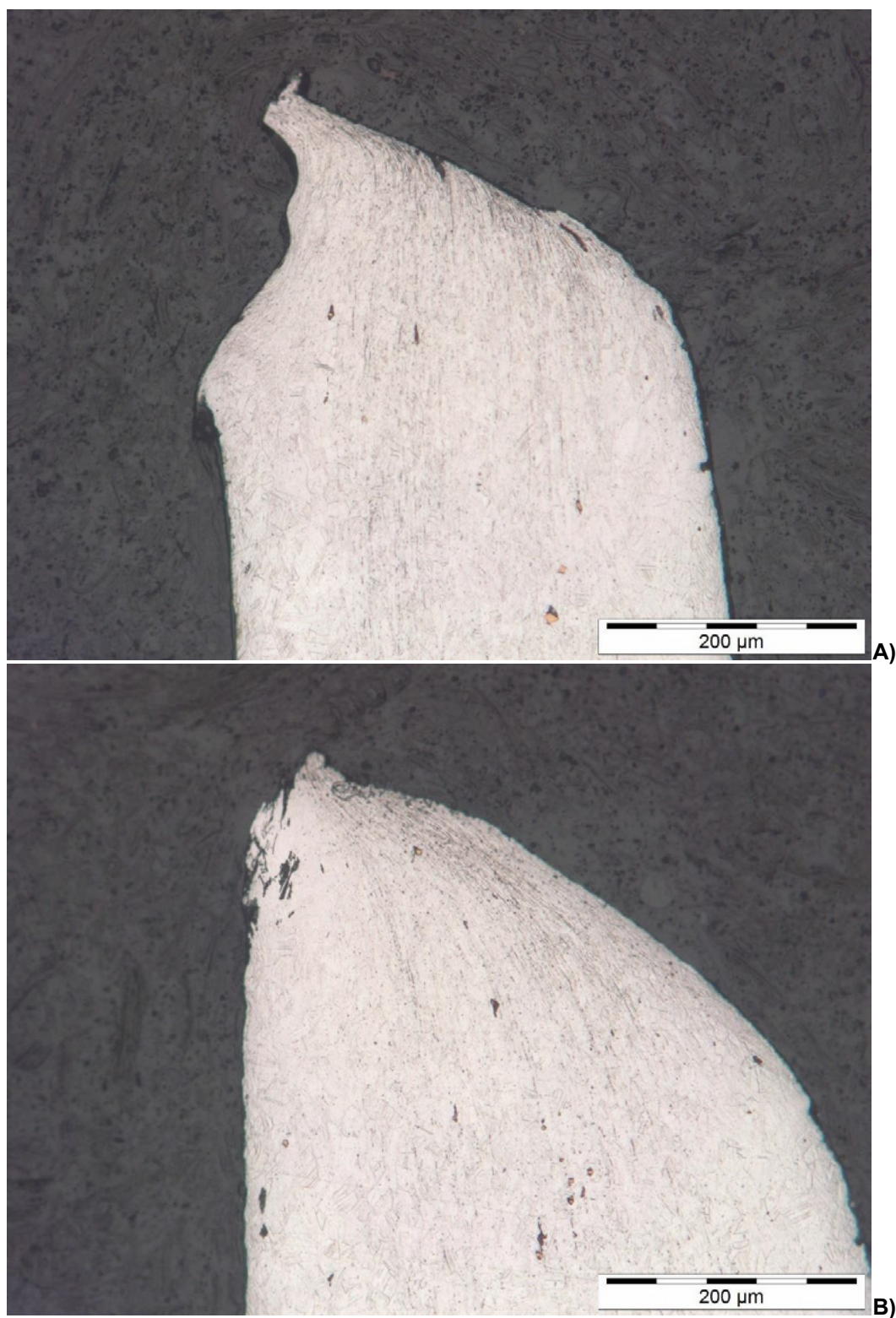


Figure 15. Fractures in cross section along the circumferential section of the bellows plates, A) Internal and B) external: plastic deformation visible at the fracture, predominantly shear fracture. (Oxalic acid etch, magn ~200x)



Bezoekadres

Lange Voorhout 9
2514 EA Den Haag
T 070 333 7000

Postadres

Postbus 95404
2509 CK Den Haag

onderzoeksraad.nl