

DE STERKTEANALYSE VAN EEN MODELSTOOMKETEL VOLGENS DE EINDIGE ELEMENTEN METHODE (FINITE ELEMENT METHOD - (FEM))

DEEL 1 – DE THERMISCHE ANALYSE

Wim Merks

1. Voorwoord

Deze artikelenserie kwam tot stand dankzij de bereidwillige medewerking van Femto Engineering in Delft.

Direct nadat ik per email contact had opgenomen met dit Ingenieursbureau, waarin ik mijn bedoelingen had uitgelegd, ontving ik een antwoord dat zij daar heel graag aan wilden meewerken. Op hun kantoor in Delft werd ik daarna enthousiast ontvangen door de directeur van Femto, Tom Santegoeds en zijn collega Bas Aberkrom. Na het uitwisselen van gegevens werd toegezegd de gevraagde berekening uit te voeren, welke uiteindelijk is uitgevoerd door Marco Swierstra.

De Stoomgroep Holland is deze heren dus heel veel dank verschuldigd, het uitvoeren van een dergelijke berekening kost relatief veel tijd, die belangeloos aan dit project is besteed.

Femto Engineering is een Ingenieursbureau dat ingenieurs en consultants simulatiesoftware biedt voor analyses volgens de Eindige Elementen Methode en Numerieke Stromingsleer. Voor de website van Femto Engineering zie www.femto.nl

2. Inleiding

Mijn werkzame leven lang ben ik actief geweest in de chemische apparatenbouw. Drukvaten werden berekend volgens de geldende normen als Regels voor Toestellen onder Druk, BS5500 of ASME Section VIII.



Figuur 1 - De rekenliniaal

Omdat er toen geen elektronische hulpmiddelen beschikbaar waren, werden deze berekeningen uitgevoerd met behulp van een rekenliniaal.

U kent dat wel: 2×2 is ongeveer 4.

Als na het nodige rekenen de uitkomsten niet bevielen, begon je gewoon opnieuw, met nieuwe parameters waar mogelijk. Daarna kwamen de elektronische zakrekenmachines, dat werd al een stuk gemakkelijker en vervolgens de programmeerbare rekenmachines, daar moest je dan wel eerst een programma voor schrijven,

voor zover nog niet beschikbaar, maar dat was eenmalig.

Zo rond 1995 werd ik geconfronteerd met een berekeningsprobleem dat met de conventionele methoden niet op te lossen bleek. Dat heeft mij geleid naar een Eindige Elementen Berekening die alleen door een daartoe gespecialiseerd bureau, dat beschikte over de juiste software, kon worden uitgevoerd. Daarmee werd het probleem opgelost.

Zoals bekend worden de stoomketels door de rekenmeesters berekend volgens de gangbare methoden. Sinds dik een jaar heeft de Werkgroep Harmonisatie Ketelreglement van de NVM en de Stoomgroep Holland besloten deze sterkteberekeningen uit te voeren volgens de regels van ASME Section I, Rules for construction of power boilers.

Reeds lang liep ik met de gedachte rond hoe een Eindige Elementen Berekening van een locomotiefstoomketel er uit zou zien, omdat met deze methode ook de thermische invloeden meegenomen worden. Een dergelijke berekening vereist zeer gespecialiseerde kennis en software en is tijdrovend.

U kunt begrijpen dat ik daarom heel erg blij was toen Femto Engineering aanbod dit te gaan uitvoeren. De analyse is uitgevoerd op de ketel van de Crampton locomotief. De constructietekeningen van deze ketel waren voorhanden in 2D en ik heb deze omgezet in een 3D pakket met

behulp van Solid Edge van Siemens.

3. Wat is een eindige Elementen Methode?

De Eindige Elementen Methode is een numerieke techniek die een complex probleem opdeelt in een groot aantal eenvoudiger elementen, die kunnen worden opgelost in relatie tot elkaar. Daarbij wordt gebruik gemaakt van geavanceerde wiskundige technieken om de antwoorden op al die eenvoudige problemen samen te voegen en om tot een benaderde

oplossing van dat complexe probleem te komen. Eenvoudiger uitgedrukt komt het er op neer dat een component, waarvan men het gedrag onder invloed van één of meerdere belastingen wil analyseren, opgedeeld wordt in een **eindig** aantal kleine elementen. Deze elementen zijn met elkaar verbonden door middel van gemeenschappelijke knooppunten of **nodes**. Het patroon dat hierdoor ontstaat, wordt de eindige elementen **mesh** genoemd. Hoe fijner deze mesh, hoe nauwkeuriger de berekening. Een heldere uiteenzetting van de eindige elementenmethode kunt u vinden op de website van Femto Engineering: www.femto.nl/stories/sterkteberekeningen



Figuur 2 - Voorbeeld van een mesh

Om nog even op die rekenliniaal terug te komen: de analyse van de stoomketel resulteerde in een set van ongeveer 3,2 miljoen "eenvoudige problemen". Waar het veel tijd en geduld vergt om die set op te lossen met de rekenliniaal uit figuur 1, heeft een computer daar slechts enkele minuten werk aan.

Femto Engineering heeft dit project uitgevoerd met Simcenter 3D van Siemens. De berekeningen zijn uitgevoerd door Simcenter Nastran, eveneens van Siemens.

4. De artikelen

Gezien de omvang van het rapport van Femto Engineering zal dit beschreven worden in een drietal artikelen welke achtereenvolgens in Onder Stoom zullen worden gepubliceerd:

In dit deel:

- Algemene gegevens, randvoorwaarden en thermische analyse.

In het tweede deel:

- Vervormingen en spanningen tijdens het bedrijven van de ketel.

In het derde deel:

-Vervormingen en spanningen tijdens het afpersen van de ketel.

In deze artikelen komen een aantal eenheden voor die in de sterkteleer, ook wel genoemd toegepaste mechanica, worden gebruikt. De sterkteleer onderzoekt door middel van berekening waaraan constructies (assen, tandwielen, staalconstructies, drukvaten, pijpleidingen en noem maar op) moeten voldoen om niet te bezwijken en voldoende stijfheid hebben.

Omdat niet iedereen met de eenheden uit de sterkteleer die in deze artikelen gebruikt worden bekend zal zijn, is aan het eind van dit eerste deel een toelichting gegeven. De bij de eenheden aangegeven verwijzingen ^{x)} corresponderen met de nummers van de toelichtingen.

5. De modelbeschrijving

Geometrie: De globale afmetingen van de stoomketel zijn: 437 x 108 x 165 mm (l x b x h).

. De symmetrie van de stoomketel is benut door een half model op te zetten. Hierdoor zijn warmtestromen bijvoorbeeld ook gehalveerd t.o.v. de volledige stoomketel.

. Klinknagels (steunbouten) en hemelankers zijn volledig rigide aan de wanden bevestigd.



Figuur 4 - De symmetrie van de ketel

6. Materiaalgegevens

| Materiaaleigenschappen van Cu-DHP R-200 (koper) | | | |
|---|------------|----------------------|------------------------|
| Elasticiteitsmodulus ¹⁾ | E | 125 | GPa ⁴⁾ |
| Factor van Poisson ²⁾ | V | 0,3 | - |
| Rekgrens ³⁾ | σ_y | 40-100* | MPa ⁵⁾ |
| Referentie temperatuur | T_0 | 20 | °C |
| Uitzettingscoëfficiënt | α | $17,3 \cdot 10^{-6}$ | K^{-1} ⁶⁾ |

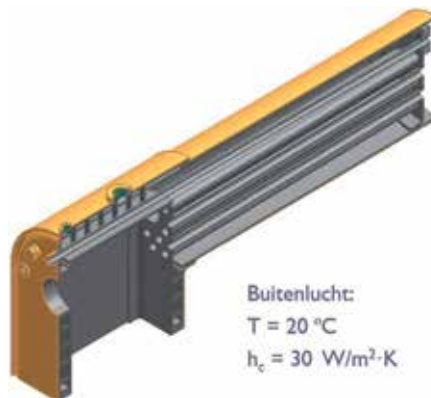
*Geldt voor conditie R200. Voor de overige condities zijn deze waarden hoger (Bron: Deutsches Kupferinstitut)

7. De volgende belastingsgevallen worden geanalyseerd

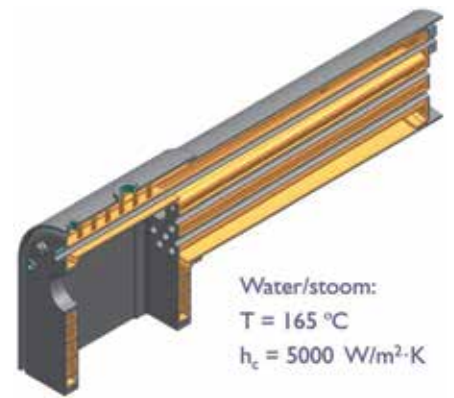
1. Thermische analyse.
2. Werkdruk van 6 bar (0,6 MPa) en een temperatuurverdeling welke verkregen is uit de thermische analyse.
3. Afpersdruk van 12 bar (1,2 MPa) bij een constante (kamer)temperatuur.



Figuur 3 - Het model van de ketel



Figuur 5 - De omgevingscondities



Figuur 6 - Het inwendige gedeelte van de ketel

8. Thermische randvoorwaarden

Voor de berekening is een buitenlucht temperatuur van 20°C aangenomen en een warmteoverdracht (convectie) coëfficiënt ⁶⁾ van 30 W/m²·K. De werkdruk van de stoomketel is 6 bar. De bijbehorende verzadigde stoomtemperatuur 165 °C. Voor deze condities geldt een warmteoverdracht coëfficiënt van water naar stoom van 5000 W/m²·K.

Om een thermische analyse te kunnen maken is inzicht nodig van de warmtestroom

Excel spreadsheet ontwikkeld waarmee op basis van een aantal parameters de gehele warmtehuishouding in een stoomketel kan worden berekend. De Stoomgroep Holland heeft van de auteur toestemming gekregen een Nederlandse vertaling de gehele artikelenreeks te publiceren. In OS292 heeft u het eerste deel van deze artikelenreeks kunnen lezen. Voor de FEM berekening hebben wij alvast een voorschot op de complete artikelenreeks genomen en de gegevens van de Cramp-

| Materiaaleigenschappen van CuSn6 (brons) | | | |
|--|------------|----------------------|----------|
| Elasticiteitsmodulus | E | 118 | GPa |
| Factor van Poisson | V | 0,3 | - |
| Rekgrens | σ_y | 300 | MPa |
| Referentie temperatuur | T_0 | 20 | °C |
| Uitzettingscoëfficiënt | α | $18,5 \cdot 10^{-6}$ | K^{-1} |

ton locomotief ingevuld in het spreadsheet. Het invullen van alle parameters laten wij hier even voor wat het is. In de artikelen van Martin Johnson komt dat uitgebreid aan bod maar voor

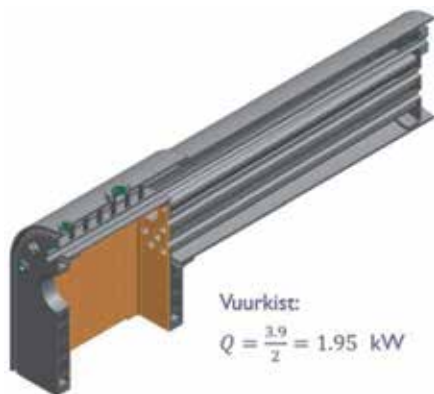
de vuurkist en in de vlam- en oververhitterpijpen. Daar zijn in het verleden door diverse deskundigen uitvoerige berekeningen voor gemaakt. Voor deze berekening hebben wij gebruik gemaakt van de methode die ontwikkeld is door Martin Johnson en in 2018 gepubliceerd is in de Model Engineer. Martin Johnson heeft een

de onderhavige analyse zou een uitvoerige uiteenzetting te ver voeren.

De berekende uitkomsten, geldend voor de Crampton locomotief zijn in de tabel weergegeven. Eveneens gebaseerd op die ingevoerde parameters en de daarbij behorende uitkomsten berekent de spreadsheet de warmtestromen zoals in

de onderstaande afbeeldingen is weer-gegeven. Voor degenen die reeds met de spreadsheet van Martin Johnson kennis gemaakt hebben:

- Voor de binnenwand van de vuurkist is de berekende warmtestroom gegeven op tabblad "calculation" cel C121
- Voor de rookgassen door de vlam- en oververhitterpijpen zie de opmerking bij de onderstaande afbeelding.



Figuur 7 - Warmtestroom in de vuurkist



Figuur 8 - Warmtestroom in de vlampijpen

9. Mechanische randvoorwaarden

De mechanische randvoorwaarden zijn aangegeven als hiernaast. De reactiekrachten in x- en y-richting zijn relatief klein. De randvoorwaarden in deze richting zijn voornamelijk voor de stabiliteit van het model toegevoegd.

10. Resultaat van de thermische analyse Temperatuurverdeling

De warmtestroom door de vlam- en oververhitterpijpen is 2,2 kW voor een half model. De totale warmtestroom is dus 4,4 kW door deze buizen. Deze waarde is de som van de cellen B553 en B558 in het tabblad "calculation" (voor degenen die reeds met de spreadsheet van Martin Johnson kennis gemaakt hebben). De materiaaltemperaturen van de inwendige en uitwendige delen van de ketel zijn in de figuur 10 weergegeven. De schaalverdeling met bijbehorende kleuren staat links in de figuur. De maximum optredende materiaaltem-

| BOILER DESIGN | CRAMPTON LOCOMOTIEF KETEL |
|----------------------------------|---------------------------|
| WORKING CONDITIONS SELECTED | |
| GATE LOADING | 0,0549 kg/m2/s |
| FUEL FLOW | 0,0004840 kg/s |
| STOCHOIMETRIC RATIO | 16,5 Air/coal mass |
| UNBURNT FUEL LOST | 24,50 % |
| FUEL BURNT ON GRATE | 90 % |
| COMBUSTION EFFICIENCY | 97,5 % |
| DRYNESS FRACTION OF STEAM | 99,9 % |
| BOILER WORKING PRESSURE | 6,00 Bar |
| PRESSURE AFTER REGULATOR | 4,00 Bar |
| PREDICTED PERFORMANCE | |
| FLUE GAS FLOW | 6,091E-03 kg/s |
| DRAUGHT(MIN ESTIMATE) | 13,32 mm H2O |
| DRAUGHT(MAX ESTIMATE) | 13,69 mm H2O |
| TOTAL HEAT IN COAL | 16,172 kW |
| MAX. TEMP IN FIREBOX | 1190 Deg. C |
| INLET TEMP TO FLUES | 1109 Deg. C |
| EXIT TEMP FROM FIRETUBES | 344 Deg. C |
| EXIT TEMP FROM SUPERHEATER FLUES | 431 Deg. C |
| AVERAGE SMOKEBOX TEMPERATURE | 378 Deg. C |
| EVAPORATION RATE | 2,870E-03 kg/s |
| CALCULATED EVAPORATION RATE | 5,931 Ratio |
| ENERGY IN STEAM PRODUCED | 8,298 kW |
| BOILER EFFICIENCY | 51,31 % |
| SUPERHEATED STEAM TEMPERATURE | 251 Deg. C |
| SUPERHEAT | 99 Deg. C |
| SUPERHEAT PRESSURE DROP | 10836 Pa |
| AVAILABLE VOLUME FOR POWER | 1,138E-03 m3/second |

Tabel 1 - Resultaten berekening volgens spreadsheet Martin Johnson



Figuur 9 - Verbeelding mechanische randvoorwaarden. Oranje gearceerde delen zijn gefixeerd in één of meer translaterichtingen

peratuur zoals door het FEM programma berekend is 179°C.

Dit is dus iets hoger dan de verzadigde stoomtemperatuur maar ligt nog ruim onder de waarde die bijv. in de voormalige Regels voor toestellen onder druk is vermeld voor een vlamkast in hoofdstuk D0103, tabel 1, te weten de beoordeelingstemperatuur +75°C, dus 165 + 75 = 240°C.

Het Handboek Modelstoomketels geeft hiervoor een waarde van 215°C (zie hoofdstuk 9.1 blz. 66)

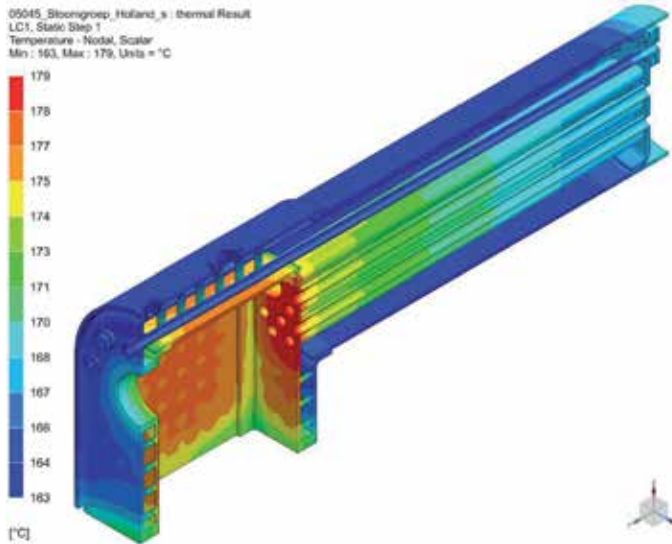
11. Vervormingen ten gevolge van de temperaturen in de ketel

De vervormingen in de ketel, welke het gevolg zijn van ongelijke uitzettingen

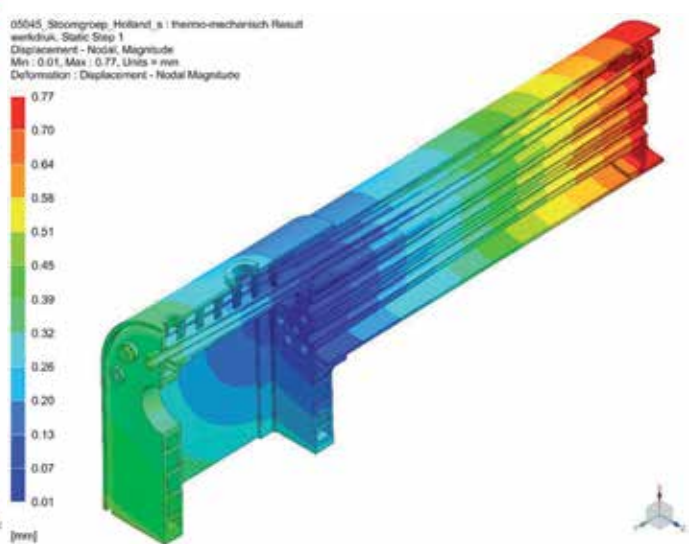
door de temperatuurverschillen tussen de samengestelde en aan elkaar gesoldeerde onderdelen, zijn weergegeven in figuur 11. Volgens de werktekeningen van de ketel is deze aan beide zijden van de vuurkist door middel van een steun vast bevestigd op het frame. Vanaf dit punt kan de ketel in de X, Y en Z richting vrij uitzetten. Het uiteinde van de ketel is glijdend ondersteund in de rookkast.

De schaalverdeling van de uitzettingen, welke loopt van 0,01 tot 0,77 mm is links van de afbeelding in de kleuren van de afbeelding weergegeven.

De vervormingen zijn 100x vergroot weergegeven om duidelijker aan te kunnen geven hoe deze verlopen.



Figuur 10 - Temperatuurverdeling van de thermische analyse



Figuur 11 - Vervormingen thermische analyse

12. Spanningen in het materiaal ten gevolge van de optredende temperaturen

De spanning in de ketel ten gevolge van de optredende temperaturen en de daarbij behorende uitzettingen zijn weergegeven in figuur 12. De ketel is hierbij drukloos. Geconcludeerd kan worden dat de spanningen in de vuurkist hoger zijn dan in het pijpgedeelte van de ketel. Deze hogere spanningen treden op in de hoeken van de vuurkist, in de eerste verticale rij steunen van de vuurkist, rondom het stookgat en aan het uiteinde van de reguleerpijp. Het betreft hier starre verbindingen in de constructie van de ketel die weinig vrije expansie toelaten. In het volgende artikel zullen de resultaten van de spanningsanalyse bij de werkdruk en afpersdruk besproken worden.

13. Toelichting op de gebruikte eenheden

1. Elasticiteitsmodulus

De elasticiteitsmodulus, ook wel genoemd Young's modulus, geeft het verband weer tussen de rek ϵ (verlenging per lengte-eenheid (mm/mm)) en de spanning σ (N/mm²) wanneer een materiaal op trek (of druk) wordt belast.

$$\text{In formulevorm: } \epsilon = \frac{\sigma}{E}$$

2. Factor van Poisson

De factor van Poisson is een materiaalconstante die weergeeft welke rek loodrecht op de trek- (of druk)richting ontstaat wanneer een materiaal aan een trek- (of druk)belasting wordt blootgesteld, de zg. dwarscontractie.

$$\text{In formulevorm: } \nu = \epsilon_{yy} / \epsilon_{xx}$$

3. Rekgrens

De rekgrens (of vloeigrens) geeft het punt aan waar een materiaal dat zich plastisch laat vervormen, begint te vloeien. Ofwel:

het punt waar de plastische vervorming begint.

Bijgaande grafiek is een "typische" weergave van het gedrag van koper wanneer het aan een trekbelasting wordt onderworpen.

4. Pa, MPa en GPa
Op 1 januari 1978 is bij wet het Internationale Stelsel van Eenheden ingegaan, aangeduid als SI (Système International).

Voor de eenheid van druk werd daarvoor de bar gebruikt. In het SI stelsel is de eenheid van druk (kracht/oppervlakte eenheid) de Pa (Pascal).

$$1 \text{ Bar} = 10^5 \text{ Pa} = 0,010972 \text{ kg/mm}^2.$$

$$1 \text{ MPa (Mega Pascal)} = 10^6 \text{ Pa} = 0,101972 \text{ kg/mm}^2 = 10 \text{ Bar}.$$

$$1 \text{ GPa} = 10^9 \text{ Pa} = 101,972 \text{ kg/mm}^2.$$

5. Uitzettingscoëfficiënt K⁻¹

De lineaire uitzettingscoëfficiënt geeft aan hoeveel meter een meter van het materiaal uitzet bij een temperatuurstijging van 1 Kelvin (niet °K zoals bij °C).

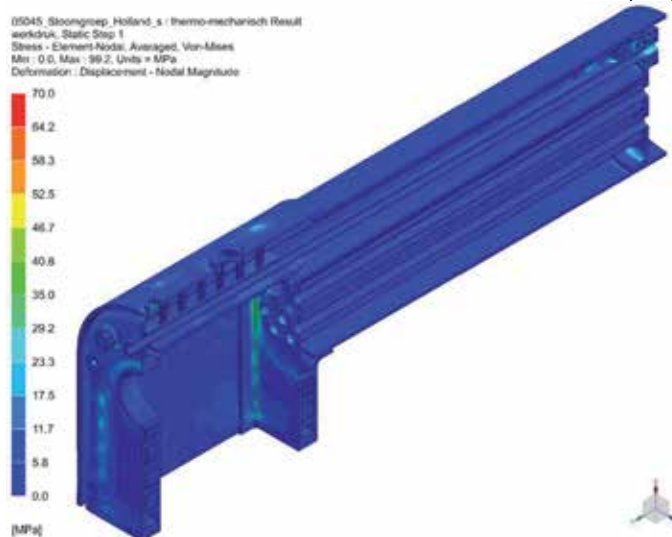
De absolute temperatuur wordt uitgedrukt in Kelvin en is gelijk aan -273,15 °C. Dus: 273,15 K = 0°C.

Voor koper geldt: $\Delta L = 17,3 \times 10^{-6} \text{ m} / (\text{m} \times \text{K}^{-1})$ ofwel na wegstrepen van m/m: $17,3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

6. Convectie coëfficiënt W/m².K

De convectiecoëfficiënt, of warmteoverdrachtscoëfficiënt, is een maat voor de warmteoverdracht via een gas of een vloeistof (zoals bijvoorbeeld bij een radiator in de centrale verwarming). De warmtestroom is gelijk aan: $J = h \times A \times \Delta T$ (Watt), waarin: h = warmteoverdrachtscoëfficiënt in W/m².K, A = convectie oppervlak in m², ΔT = temperatuurverschil in K.

(Wordt vervolgd)



Figuur 12 - Spanningen thermische analyse

