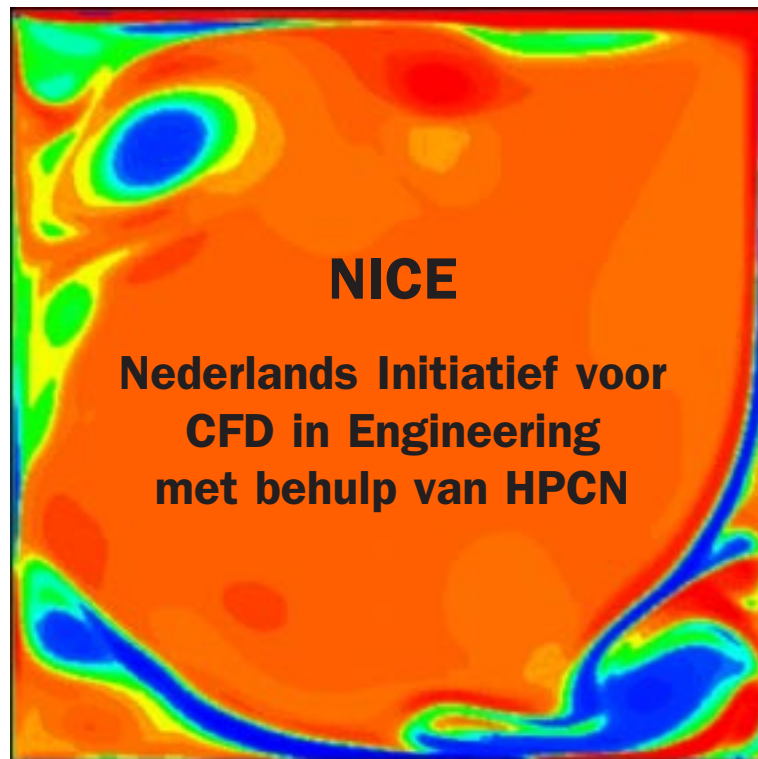




NLR-TP-99093

## Simulaties verschaffen inzicht in zuigerkoeling

J.J. Nies, A.E.P. Veldman en H. van der Ven



**MARIN**

J.M. Burgerscentrum





NLR-TP-99093

## **Simulaties verschaffen inzicht in zuigerkoeling**

J.J. Nies\*, A.E.P. Veldman en H. van der Ven

\* *Wärtsilä NSD Nederland*

Dit onderzoek is uitgevoerd gedeeltelijk in opdracht van de Stichting HPCN, contractnummer 96009, en gedeeltelijk als onderdeel van het NLR-speurwerkprogramma, Werkplannummer I.1.A.1.

Dit rapport is gebaseerd op een artikel, dat is aangeboden voor publicatie in "De Constructeur".

Uit dit rapport mag worden geciteerd onder de voorwaarde dat volledige bronvermelding plaatsvindt.

|                           |  |
|---------------------------|--|
| Hoofdafdeling:            | Informatie en Communicatie Technologie |
| Datum:                    | februari 1999                          |
| Rubricering van de titel: | ongerubriceerd                         |



## **Samenvatting**

De drijvende kracht achter ontwikkelingen is veelal een noodzaak tot verandering. Naarmate de noodzaak sterker wordt, neemt ook de inspanning om te verbeteren toe, en in het algemeen ook het succes. In de ontwikkeling van dieselmotoren zijn er een drietal hoofdprikkels tot verandering: kosten, emissies, en, als vanouds, betrouwbaarheid. Binnen de verbrandingskamer leidt deze ontwikkeling tot steeds verder oplopende drukken en temperaturen van de inhoud van de verbrandingskamer, en dientengevolge ook tot hogere belasting van de wanden. Het tegengaan van deze kwalijke gevolgen kan principieel gebeuren door of de invloeden te verzachten of de weerstand tegen die invloeden te verhogen. Dit artikel handelt over de gevolgen van de toenemende warmtebelasting van de zuigerkroon en hoe is geprobeerd de kwalijke invloed van deze warmtebelasting weg te nemen door de koeling te optimaliseren. Deze optimalisatie is uitgevoerd door de stroming van de koelolie in de holtes van de zuigerkroon numeriek te simuleren.



## **Inhoudsopgave**

|          |                                     |           |
|----------|-------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Verbranding</b>                  | <b>4</b>  |
| <b>2</b> | <b>De zuiger</b>                    | <b>5</b>  |
| <b>3</b> | <b>Probleemstelling</b>             | <b>7</b>  |
| <b>4</b> | <b>Numerieke simulatie</b>          | <b>9</b>  |
| <b>5</b> | <b>Toegang tot de supercomputer</b> | <b>11</b> |
| <b>6</b> | <b>Resultaten</b>                   | <b>13</b> |
| <b>7</b> | <b>Conclusies</b>                   | <b>16</b> |
| <b>8</b> | <b>Literatuur</b>                   | <b>17</b> |



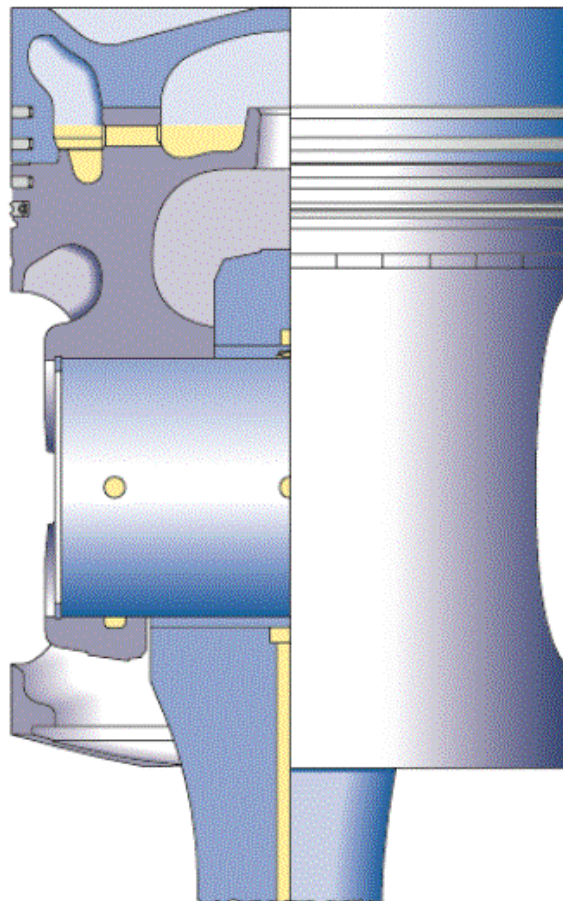
## **1 Verbranding**

Binnen de oliesector is er een duidelijke scheiding tussen de gewenste raffinage producten als benzine en gasolie, en residuën. Omdat de eerste groep breder en met geringere investeringen bruikbaar is dan de tweede, is de marktprijs ervan hoger. Het residuale deel wordt door verbeterde raffinagetechnieken kleiner, maar het bevat hogere concentraties ongewenste producten als asfalthenen, zwavel en zware metalen. De steeds strenger wordende eisen aan de emissies, veelal uitgedrukt in brandstofverbruik en NO<sub>x</sub> uitstoot, brengen de belasting in de verbrandingskamer nog eens extra omhoog. Samenvattend neemt de chemische, thermische en mechanische belasting van de verbrandingskamer toe met de jaren.

## 2 De zuiger

De constructie van de zuigers in de soort motoren die Wäertsilä NSD Nederland BV produceert is geënt op de functie die het vervult: het overbrengen van de druk in de verbrandingskamer naar de drijfstang in een door de krukas opgelegde beweging. Ondersteunende functies daarbij zijn onder te verdelen in prestatie vermogen:

- afdichting door zuigerveren,
  - glijden in de cilindervoering,
- en levensduur verlengend:
- koeling,
  - reiniging van delen bevuild met verbrandingsprodukten.



*Figuur 1: Doorsnede van een zuiger; linksboven de holtes waardoorheen de koelolie stroomt.*



In Figuur 1 is een zuiger van een middel-snel lopende Dieselmotor schematisch weergegeven. Bovenaan treffen we de kroon met een vorm die nauw sluit om de onderzijde van de stralen van de brandstofinjectie. Deze gesmede kroon is met lange bouten op het hemd bevestigd. Het hemd glijdt in de voering, en wordt daartoe van smeerolie voorzien. De toevoer van de olie geschiedt via een systeem onder druk. De olie wordt via boringen in de krukas, de drijfstang en de zuigerpen in de zuiger gebracht. Het vervult er de koeling in de holtes tussen kroon en hemd.

Eenmaal in de buitenste zuigerholte vult het niet meer het totale volume, maar slechts een deel ervan. De beweging van de zuiger is zo heftig, dat de olie beurtelings tegen onder- en bovenzijde klotst, vandaar de engelse benaming 'shaker'. De extra beweging van de vloeistof tegen de wand zorgt voor een betere warmteoverdracht van de kroon op de olie dan in het geval van een volledig gevulde ruimte. Ook wast het de olie, die door hoge temperaturen aankoekt, van de shakerwand.

De olie wordt via overloopgaten naar de binnenste shaker getransporteerd. Dit transport geschiedt voornamelijk doordat in onderste of bovenste dode punt (ODP of BDP) er zich een bad olie vormt dat via een kanaal overloopt in de binnenste shaker, mits daar geen tegendruk (ook via een bad) geleverd wordt. Na in de binnenste shaker zijn werking te hebben gedaan, loopt de olie alweer via een bad over in de afvoerpijp. Hier kan, meer dan bij de overloop van buitenste naar binnenste shaker, de golfbeweging van de olie zorgen voor extra afvoer.

### 3 Probleemstelling

Door de toegenomen belasting van de zuiger bleek de grens van de belastbaarheid van deze zuigerbouwvorm in zicht. De problemen uit zich door een te hoge temperatuur, waardoor

- spelingen verminderen,
- de zuigerkroon chemisch aangetast wordt,
- de koelolie aankoekt op de shakerwanden.

De koollaag die ontstaat, isoleert de koelolie waardoor het systeem in temperatuur verder omhoog loopt. Een bijkomend probleem vormen de brandstofresten die zich via de cilindervoeringwand ophopen in de smeerolie en waarvan de resten zich nog veel sneller afzetten op de hete oppervlakken.

Het blijkt uit het bovenstaande dat het verlagen van de temperatuur een sleutel is tot het verleggen van de belastingsgrens. Nu brengt het verlagen van het warmteaanbod ons weer terug bij af, en dus zal als eerste de koeling geoptimaliseerd moeten worden. De beweging van de olie speelt zich in het onrustige en duistere binnenste van de motor af, en het is zeer lastig om zonder gereedschap te voorspellen hoe de olie beweegt. Centrale vragen blijken:

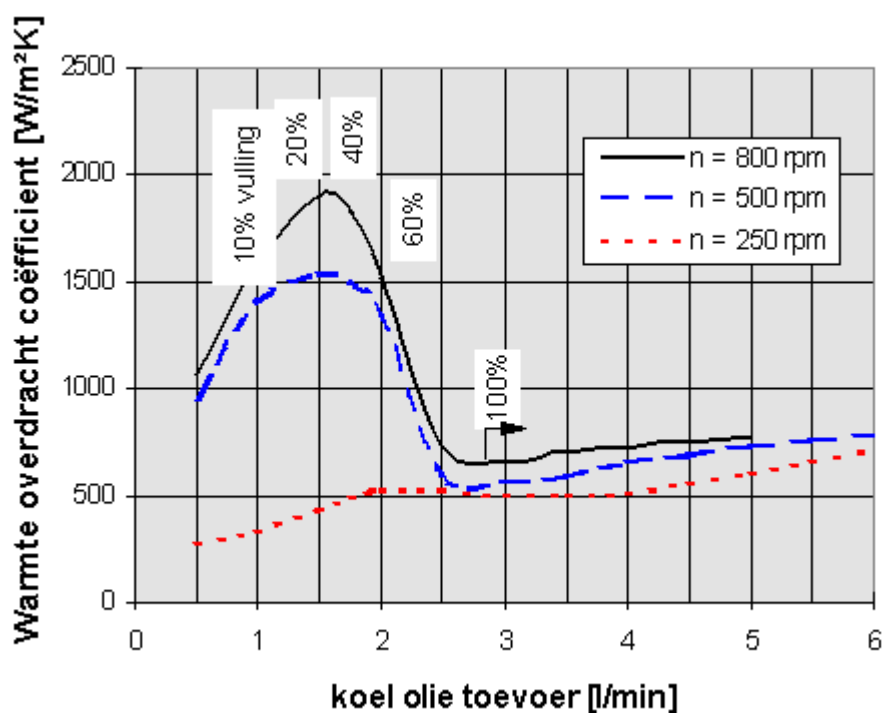
- wat zijn de overheersende krachten die de oliebeweging bepalen,
- wat zijn de relevante parameters die de beweging van de olie beschrijven,
- hoe beïnvloeden deze de koeling,
- in hoeverre is de koeling te optimaliseren?

Bush en London [1] hebben in 1965 een vereenvoudigde relatie voor warmteoverdracht in verticaal oscillerende shakers gepubliceerd, die neerkomt op

$$Q \text{ is evenredig met } b^{0.81} h^{0.33} n^{0.57} \quad (1)$$

Hierin is  $Q$  de hoeveelheid overgedragen warmte,  $b$  de breedte van de shakerholte,  $h$  de hoogte en  $n$  het toerental van de motor. Bovenstaande relatie toont al een aantal belangrijke parameters. Echter de vullingsgraad blijft buiten beschouwing, terwijl bij een volledig gevulde shaker toch geen aanvullende beweging meer te verwachten is. De publikaties van de firma Mahle [2] hebben op dit punt duidelijkheid verschaft. In deze weergave van meetresultaten blijkt wederom een duidelijke invloed van het motortoerental, maar ook van de vullingsgraad (Figuur 2). Met deze achtergrondkennis is het wel mogelijk enkele trends aan te wijzen, maar overduidelijk komt hier de onzekerheid over de vullingsgraad naar voren. In ontwikkelingslaboratoria van zuigerleveranciers is in het verleden een aantal experimenten uitgevoerd om de mogelijkheden ter beïnvloeding van de vullingsgraad in de vingers te krijgen. Het blijkt echter in de praktijk erg kostbaar, en de resultaten zijn bepaald niet direct bruikbaar.





Figuur 2: De experimenteel gevonden warmteoverdrachtscoëfficiënt als functie van de vullingsgraad bij verschillende motortoerentallen.

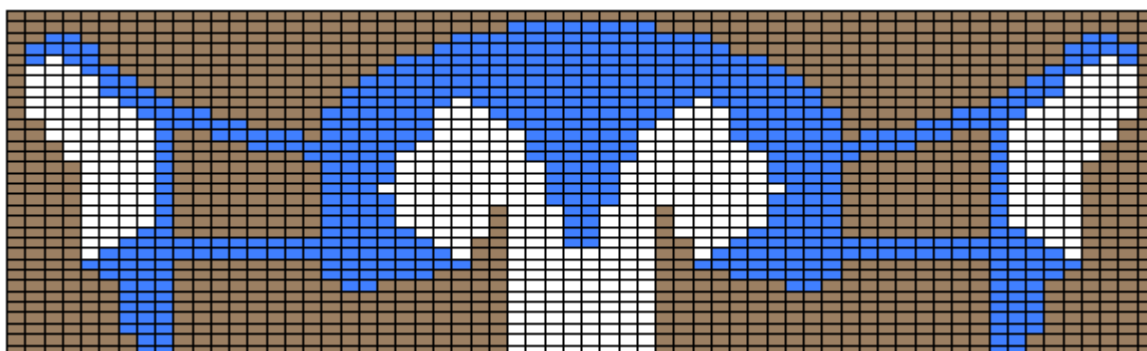
Er is toen gezocht naar methoden om langs theoretische weg meer inzicht in de vloeistofbeweging te verkrijgen. Uit een analyse van de aard van de stromingen bleek echter al snel dat in shakers dusdanig heftige vloeistofbewegingen te verwachten zijn, dat papier en potlood en zelfs spreadsheets geen verder inzicht bieden.



#### 4 Numerieke simulatie

Waren in het verleden experiment en theorie de enige mogelijkheden om fysische verschijnselen zoals stromingen te analyseren, tegenwoordig biedt simulatie met behulp van computers een belangrijk aanvullend alternatief. Kennis van de stromingsleer, van numerieke wiskunde en van informatica wordt hierbij gecombineerd. De betreffende tak van wetenschap heet Numerieke Stromingsleer, of met een engels woord Computational Fluid Dynamics (CFD).

Het idee achter CFD is als volgt. Begonnen wordt om de natuurkunde achter de stromingsverschijnselen te formuleren als een wiskundig model: behoudswetten voor massa, impuls en energie. Zo'n behoudswet zegt in beginsel dat voor elk (klein) gebiedje een netto instroom van bijvoorbeeld impuls door de rand tot een toename zal leiden van de totale hoeveelheid impuls die in het gebiedje aanwezig is. Daarnaast zullen ook uitwendige krachten uitgeoefend op het gebiedje de hoeveelheid impuls doen toenemen (2<sup>e</sup> Wet van Newton). Door Navier en Stokes zijn de behoudswetten voor stromingen al in de eerste helft van de vorige eeuw opgesteld, maar vanwege hun complexiteit is men nog steeds niet uitgerekend op het oplossen van deze vergelijkingen.



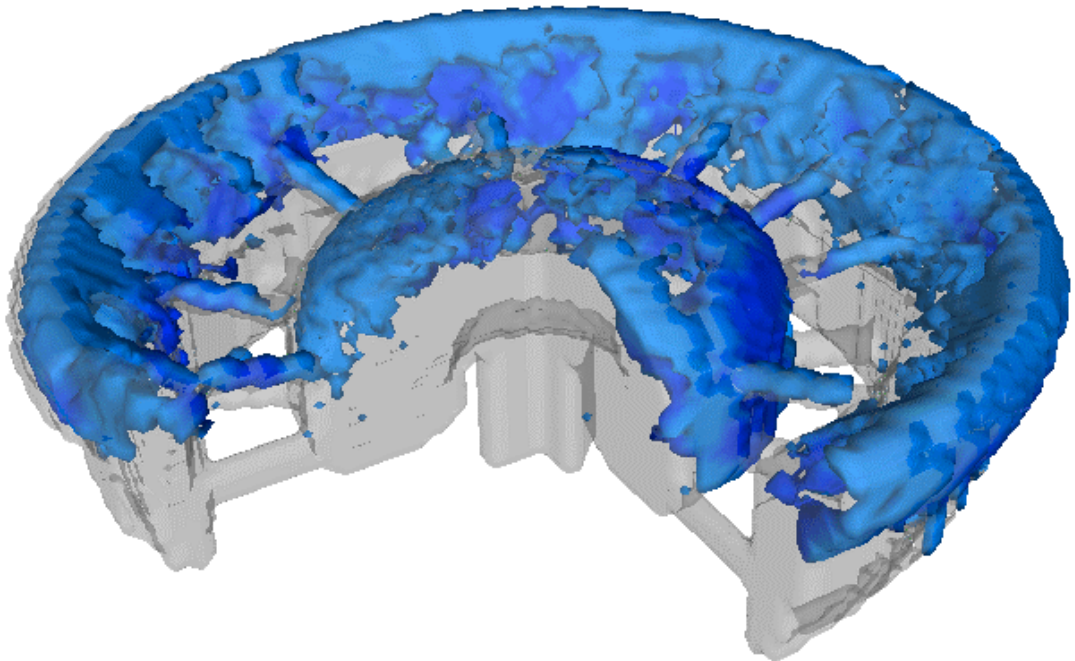
*Figuur 3: Shaker met rekenrooster (grover dan gebruikt in de simulaties).*

Vervolgens wordt het gebied waarin de stroming plaatsvindt opgedeeld in een groot aantal kleine blokjes; Figuur 3 toont zo'n blokjesverdeling (= rekenrooster) voor een shaker. Verder wordt ook de tijd in kleine stukjes gebroken: tijdstappen. Per blokje en per tijdstap worden nu de behoudswetten toegepast. In het geval van de behoudswet voor impuls bijvoorbeeld, wordt daarbij eerst bepaald hoeveel impuls gedurende een tijdstap door de randen van het blokje naar binnen stroomt, en hoeveel uitwendige krachten er worden uitgeoefend. Uitgaande van de bekende hoeveelheid impuls op het huidige tijdstip volgt daarmee meteen de nieuwe

hoeveelheid impuls op het volgende tijdstip. Dit is een eenvoudig recept dat goed te automatiseren is.

Bij navraag bleek binnen het Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium (NLR) een onderzoeksproject te lopen naar klotsende vloeistoffen in tanks van ruimtevaartuigen, waarin o.a. simulatieprogrammatuur is ontwikkeld. Aan de Rijksuniversiteit Groningen is deze programmatuur geschikt gemaakt voor het simuleren van de stroming in shakers. In de onderhavige studie zijn voornamelijk simulaties uitgevoerd op basis van een twee-dimensionaal axisymmetrisch model; als afsluiter is een drie-dimensionale simulatie uitgevoerd. Om een idee te geven van de omvang van zo'n simulatie: het rekenrooster dat voor de axisymmetrische shakersimulaties is gebruikt bestaat uit ongeveer tienduizend blokjes. Verder zijn er per krukasonwenteling ruwweg drie- tot zesduizend tijdstappen nodig om de beweging nauwkeurig genoeg te beschrijven.

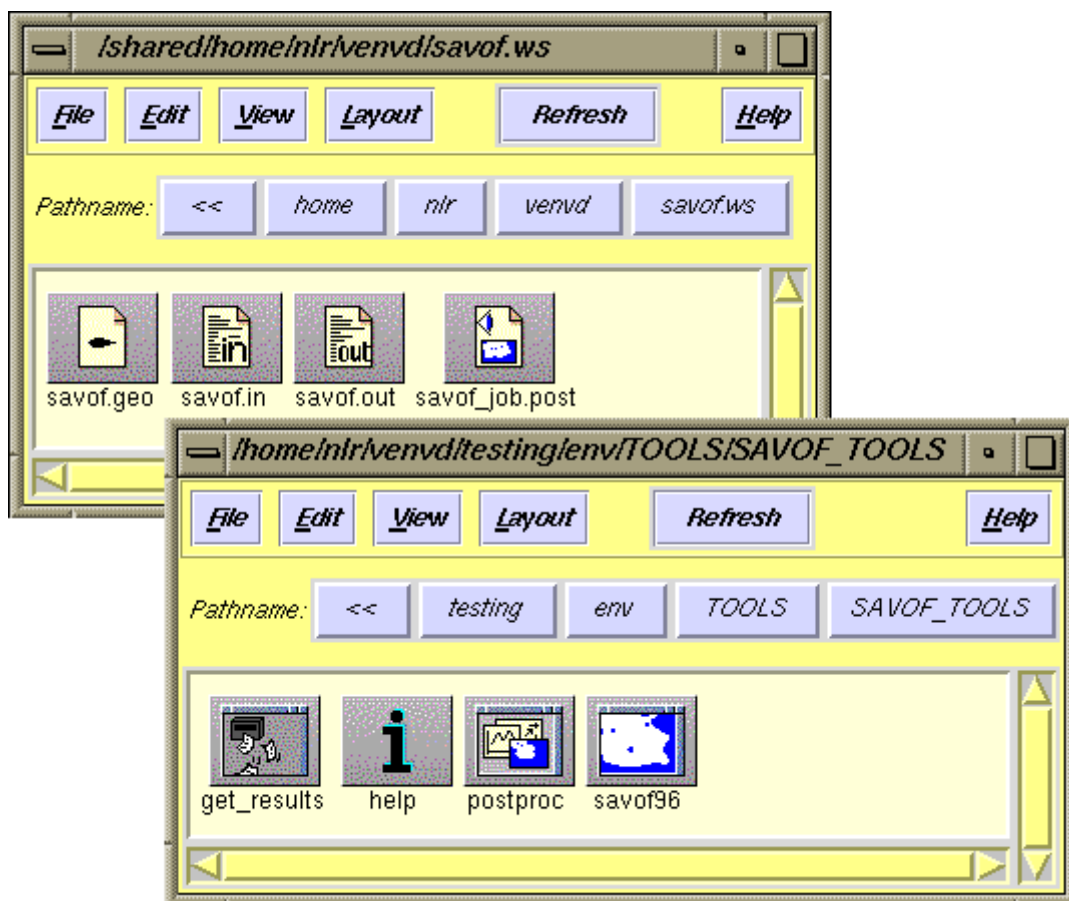
Tijdens een onderzoek als dit is het gewenst een groot aantal (meerdere tientallen) simulaties uit te voeren bij wisselende stromingscondities en zuigerholtegeometrieën. Om de doorlooptijd van een dergelijke parameterstudie acceptabel te houden zijn de berekeningen uitgevoerd op de NEC SX-4 van het NLR. Op deze supercomputer vergt een berekening twee tot vier uur rekentijd, bij een gemiddelde snelheid van 600 miljoen rekenkundige bewerkingen per seconde. Een drie-dimensionale simulatie (Figuur 4) duurt langer: zo'n 30 uur SX-4 rekentijd.



*Figuur 4: Momentopname van een drie-dimensionale simulatie (een kwart van de shaker is voor presentatiedoeleinden weggesneden).*

## 5 Toegang tot de supercomputer

Vroeger waren supercomputers complexe grote machines die enkel door experts geprogrammeerd en gebruikt konden worden. De experts moesten de hardware van de machine door en door kennen om de snelheid van de computer optimaal te kunnen benutten. Tegenwoordig nemen compilers voor de meeste toepassingen deze taak over. Ook de toegang tot supercomputers is de laatste jaren sterk verbeterd. Het is nu mogelijk dat een leek op het gebied van supercomputers een supercomputer bedient met een gemak alsof het een PC op kantoor is: enige vereiste is een internetaansluiting.



*Figuur 5: Werkomgeving: de iconen `verbergen' de toegang tot de supercomputer.*

Een op windows gelijkend user interface, de `werkomgeving' (Figuur 5), maakt het mogelijk om met een druk op de knop een som op de supercomputer te starten met de data die op de PC aanwezig zijn. Als de som klaar is, komen de resultaten vanzelf weer terug op de PC. Binnen dezelfde werkomgeving kunnen dan de op de PC aanwezige visualisatieprogramma's gestart



worden. Met deze werkomgeving is het ook niet meer nodig machine-specifieke commando's te kennen. Het bedieningsgemak is mogelijk met behulp van het door het NLR ontwikkelde pakket SPINeware (zie <http://www.spineware.nl>).

De werkomgeving integreert het software model van de RuG en de supercomputer van het NLR, en maakt deze eenvoudig toegankelijk voor een gebruiker als Wärtsilä NSD. Alle hiernavolgende resultaten zijn door Wärtsilä NSD op locatie uitgevoerd met behulp van deze werkomgeving.

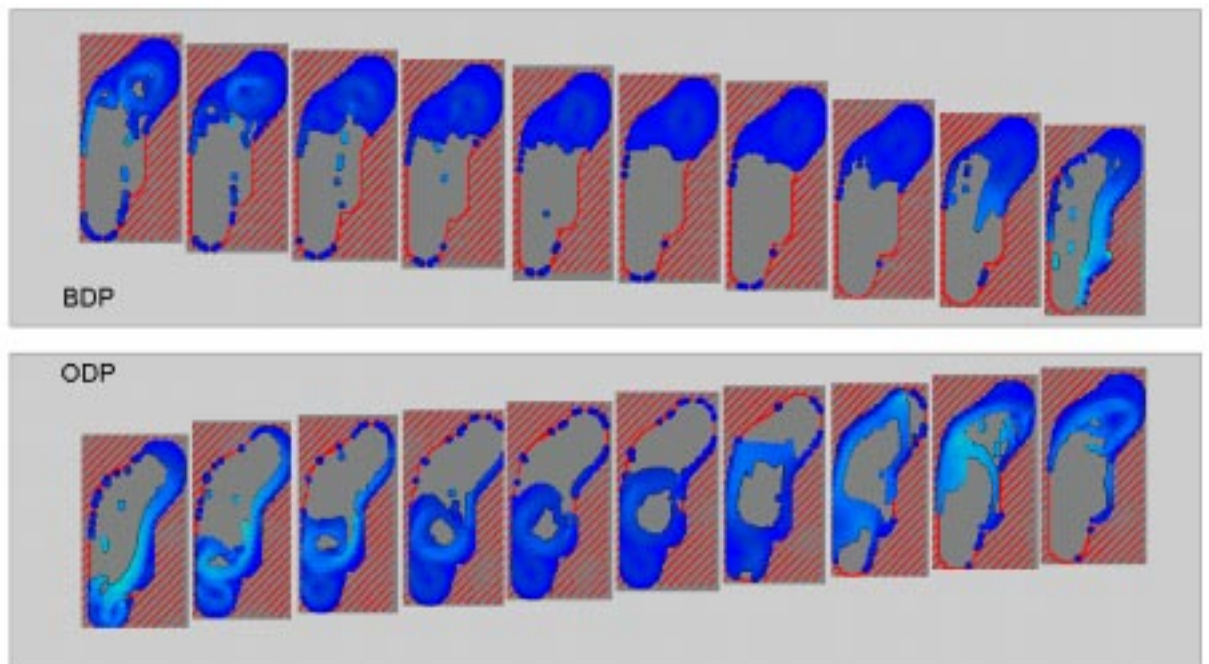
## 6 Resultaten

Uit een simulatie van de beweging van de vloeistof in een shaker zijn een aantal gegevens te destilleren:

- de locatie waar de vloeistof zich bevindt, ofwel de vloeistofconfiguratie,
- het snelheidsveld van de vloeistof,
- de drukverdeling in de vloeistof.

Al naar gelang de opzet van de som (vaste vullingsgraad of een die zichzelf instelt) is daaruit de volgende afgeleide informatie te halen:

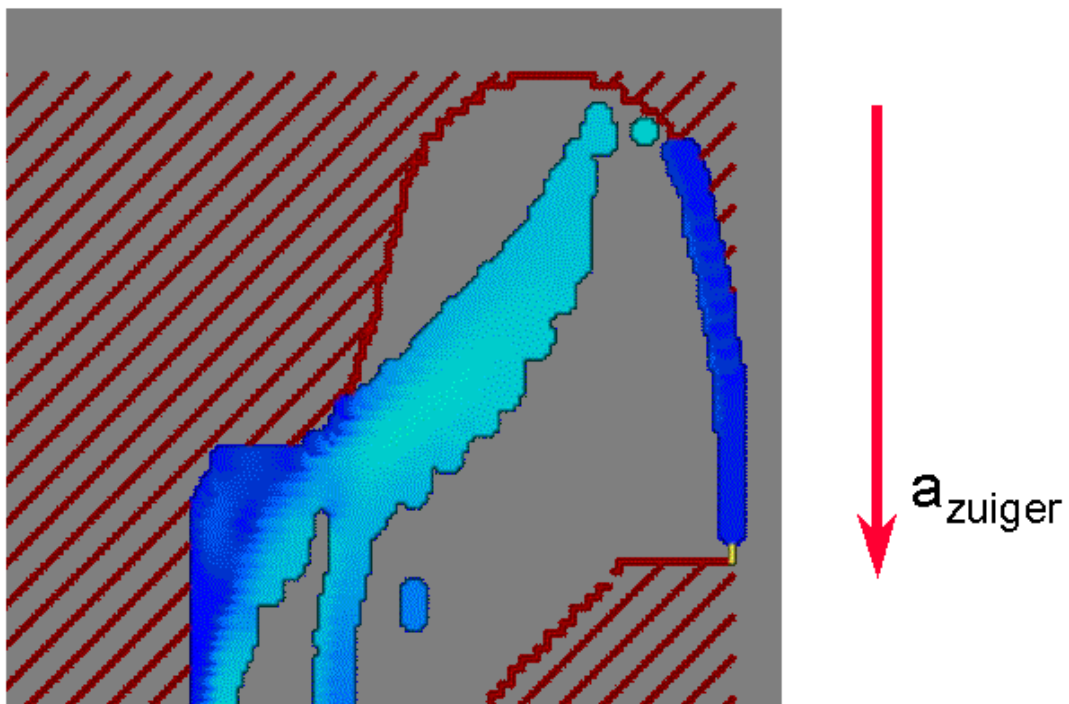
- de vullingsgraad in binnenste en buitenste shaker,
- de volumestroom door overloop en afvoerkanalen,
- de snelheid van de olie op de te koelen plaatsen,
- tijdsvensters waarin er zich geen bulk olie bevindt aan een oppervlak,
- animatie van de vloeistofbeweging.



*Figuur 6: Vloeistofconfiguratie in de buitenste shaker tijdens één slag van de motor.*

Om met de laatste te beginnen, de animaties hebben sterk bijgedragen aan het vat krijgen op de oliebeweging (Figuur 6). De vullingsgraad blijkt redelijk te voorspellen via het model van het overstromende bad. De verschillen tussen opeenvolgende krukasomwentelingen zijn aanzienlijk, slechts met de ogen bijna dicht blijkt het stromingsbeeld zich te herhalen.

Hoofdvraag blijft echter: is dit koelsysteem te verbeteren? Daartoe moet de invloed van constructieve maatregelen leiden tot een gunstiger snelheidspatroon, dat leidt tot een betere warmteoverdracht, wat uiteindelijk een lagere temperatuur van de zuiger oplevert. Met relatie (1) van Bush en London in het achterhoofd is een poging gedaan om via een 25% hogere shaker een gunstiger snelheidsverdeling te creëren. De verhoging van de snelheid blijkt niet erg groot te zijn. Volgens de relatie van Bush en London was  $1.25^{1/3}$  d.w.z. 7.6% toename te verwachten voor de verhoogde variant, tegen 8.1% snelheidswinst volgens deze simulatie. Als parallelstudie is een shaker met een gladdere shakerwand doorgerekend, met het oogmerk de vloeistof in haar beweging zo lang mogelijk langs de heetste wand te laten stromen, zonder snelheid te verliezen aan obstakels als in Figuur 7. De gladdere variant gaf een snelheidswinst 3.8%. Na nog een aantal optimalisatie slagen is geschat dat wanneer het ontwerp volledig geoptimaliseerd zou zijn, deze snelheidswaarden 20% hoger kunnen komen liggen.



*Figuur 7: 'Springschans': de vooruitstekende rand verhindert dat de (koele) olie langs de (warme) wand stroomt.*

Het vertalen van deze snelheidsverandering in gevolgen voor de warmteoverdracht loopt langs twee wegen:

- bepaling van de warmteoverdracht aan de film die in een 'droge' periode aan het oppervlak kleeft,
- bepaling van de overdracht tijdens de natte periode, wanneer er een golf langskomt.



Om een inschatting te maken van de indringdiepte van de warmte in de olie die aan de wand kleeft, is deze vergeleken met de dikte van een laag olie die zich afbouwt als de olie van de wand druipt. De duur van de droge periode is relatief kort. De thermische indringdiepte bleek in orde grootte gelijk te zijn aan de dikte van de achtergebleven olielaag, hetgeen een belemmering voor de warmteoverdracht zal betekenen daar in deze droge periode de dunne film tot ongeveer de wandtemperatuur opgewarmd wordt. De vergroting van het aandeel warmteafvoer in de natte periode kan geschat worden met behulp van algemene regels voor warmteoverdracht aan vlakke platen. Een door Sieder en Tate [3] opgestelde relatie geeft dat hier de warmteoverdracht evenredig is met  $Re^{0.8}$ , waarbij het getal van Reynolds  $Re$  is gebaseerd op de snelheid van de stroming. Met een 20% hogere snelheid zoals geëxtrapoleerd uit de numerieke simulaties leidt dit tot een mogelijke verbetering in oliezijdige warmteoverdracht van  $1.2^{0.8} = 1.16$ . De temperatuur van de zuigerkroon reageert slechts marginaal op zo'n verbeterde koeling.



## 7 Conclusies

Computersimulaties vormen een uitstekend alternatief voor dure experimenten om de vloeistofstroming binnen zuigerholtes te onderzoeken. Met name de animaties van de rekenresultaten hebben essentieel bijgedragen tot het verhogen van het inzicht in de vloeistofdynamica. Middels een op de eigen PC geïmplementeerde werkomgeving kan op eenvoudige wijze toegang verkregen worden tot de voor deze simulaties benodigde software en hardware. De kosten voor deze berekeningen, een paar honderd gulden voor een tweedimensionale simulatie tot een paar duizend gulden voor een drie-dimensionale simulatie, zijn alleszins in goede verhouding tot de zeggingskracht van de resultaten.

Zoals boven blijkt kent zuigerkoeling via shakers een natuurlijk optimum dat niet steeds hoger gelegd kan worden. Tegelijkertijd blijkt het de moeite waard zeker te stellen dat men nabij het optimum opereert. De koeling van de zuiger holt met rasse schreden achteruit wanneer men parameters verkeerd kiest.

Het is telkens weer verbazingwekkend hoeveel onderzoekers met vergelijkbare problemen bezig zijn, hoewel vrijwel niemand direct met de exacte oplossing van het te onderzoeken probleem aan komt dragen. Het geduldig zoeken naar deze bronnen, gevolgd door gezamenlijk de handen ineenslaan, blijkt echter steeds de juiste aanpak.

### **Dankbetuiging**

Deze publikatie kon niet tot stand komen zonder de enthousiaste medewerking van R. Ewalds, Ir. B. de Groot, Ir. Drs. G.E. Loots, Ir. H.J. Sneller, Dr.-Ing. P. Reipert en Dr. Ir. J.P.B. Vreeburg. De auteurs danken hen hierbij nog eens hartelijk. Wärtsilä NSD is bij dit onderzoek ondersteund door een subsidie van het Ministerie van Economische Zaken, uitgevoerd door Senter.



## 8 Literatuur

[1] Bush, J.E. en London, L.A., "Design Data for Cocktail Shaker Cooled Pistons and Valves", SAE paper 650727, 1965.

[2] Mahle GmbH/Havam technische inkoopmaatschappij b.v., Technische leergang "Zuigers, schades en hun oorzaken", 1991.

[3] Sieder, E.N. en Tate, G.E., Ind. Eng. Chem. 8, 1936, blz. 1429-1435.