

## **Gevaarlijk slingeren op zee**

*Af en toe beginnen grote schepen op zee opeens gevaarlijk hevig rond hun lengteas te slingeren. Een wiskundige analyse geeft inzicht in het hoe en waarom van dit gedrag.*

In 1998 voer een groot containerschip over de Stille Oceaan van Taiwan naar Seattle. Het kwam in een hevige storm terecht. Dat zou op zich geen probleem moeten zijn, maar deze keer begon het schip, terwijl de golven recht van voren kwamen, plotseling hevig te schommelen rond de lengteas. Het schommelde van stuurboord naar bakboord met een maximale uitwijking van tegen de veertig graden – een onverwachte vorm van resonantie. Toen de storm was gaan liggen, bleek een derde van de containers overboord geslagen en een derde hevig beschadigd. Dit is het meest extreme voorbeeld tot nu toe van plotseling optredende hevige rolbewegingen van grote schepen om hun lengteas.

In de loop van de afgelopen decennia zijn containerschepen langer geworden en zwaarder beladen, terwijl ze in de breedte vaak niet zijn veranderd. De lengte van zo'n schip kan nu in de buurt liggen van de golflengte van hoge oceaangolven: tweehonderd tot driehonderd meter. Kennelijk kan het dan gebeuren dat er een soort resonantie optreedt die het schip hevig doet rollen. Het Nederlandse maritieme onderzoeksinstituut MARIN in Wageningen onderzoekt onder welke omstandigheden dit gedrag optreedt en wil daaruit leren hoe hevige rolbewegingen voorkomen kunnen worden.

MARIN-onderzoeker Ed van Daalen legt uit hoe raar zulk rolgedrag van een groot schip op het eerste gezicht lijkt: "Als je recht tegen de wind in fietst, dan ga je niet naar links of rechts zwabberen. Als je fietst met zijwind, dan merk je wel dat je gaat zwabberen. Op dezelfde manier verwacht je in eerste instantie niet dat een schip dat de golven precies van voren krijgt, hevig zijwaarts gaat zwabberen. En toch is dat precies wat er gebeurt in een aantal gevallen. Kennelijk ontstaat er een soort mechanische koppeling tussen wat er in verschillende bewegingsrichtingen van een schip gebeurt."

Het MARIN gebruikte tot nu toe numerieke simulatiemodellen die de bewegingsvergelijkingen van zowel de oceaangolven als het schip oplossen. De vorm van het schip wordt daarbij tot in detail gemodelleerd. "Hoewel zo'n model vrij compleet lijkt", vertelt Van Daalen, "vinden we er het resonante rolgedrag niet in terug. In de praktijk treedt dit effect wel degelijk af en toe op, maar onze simulatiemodellen voorspellen het niet. Om toch de vinger achter dit probleem te krijgen, hebben we ons gewend tot de Studiegroep Wiskunde met de Industrie. Onze vraag was om niet met een numeriek simulatiemodel, maar met analytische modellen naar het rolprobleem te kijken. We hoopten dat deze andere kijk ons inzicht zou verschaffen in het hoe en waarom van extreme rolbewegingen."

## **Slingermodellen**

Wiskundige Johan Grasman, hoogleraar aan de Wageningen Universiteit, was een van de negen wiskundigen van diverse Europese nationaliteiten die zich een week lang over het MARIN-probleem heeft gebogen. "Wij hebben het rolprobleem vanuit twee verschillende invalshoeken onderzocht", vertelt Grasman. "Eerst hebben we verschillende mechanische modellen opgesteld bestaande uit een massa, een veer en één of twee slingers. Deze modellen worden gebruikt om het gedrag van een schip bij golven van één bepaalde golflengte te beschrijven. Maar in werkelijkheid krijgt een schip op zee natuurlijk te maken met een superpositie van golven met verschillende golflengten. In een tweede, heel andere aanpak, hebben we daarom onderzocht welke stochastische eigenschappen de golven op zee hebben en wat dat stochastische karakter betekent voor het ontstaan van een extreme rolbeweging."

De beweging van een schip dat op de golven op en neer deint, kun je modelleren als een massa die door een periodieke kracht op en neer wordt bewogen. Omdat de beweging van het schip wordt gedempt, wordt de massa met zowel een veer als een zuiger verbonden aan een denkbeeldig op en neer bewegende bodem. In dit mechanische model heeft het schip – voorgesteld als de massa – maar één vrijheidsgraad: het kan alleen omhoog en omlaag bewegen.

De wiskundigen hebben dit model vervolgens uitgebreid naar twee vrijheidsgraden door aan de massa een slinger te bevestigen, die ervoor zorgt dat de massa ook een rolbeweging om zijn lengteas kan maken. Het schip kan nu zowel op en neer bewegen als roteren naar stuurboord en bakboord. Grasman: "In eerste instantie hangt de slinger stil, maar bij bepaalde frequenties van de golven zet de slinger zich in beweging. Uit dit mechanische model hebben we een formule afgeleid die aangeeft boven welke golfamplitude het schip hevig gaat rollen om zijn lengteas en er een gevaarlijke resonantie ontstaat."

Vervolgens hebben de wiskundigen met deze formule uitgerekend hoe de drempelwaarde van de amplitude afhangt van de frequentie van de golven. Dat hebben ze gedaan voor drie verschillende typen schepen, elk bij verschillende vaarsnelheden. De resultaten van deze berekeningen hebben we in grafieken uitgezet. Grasman: "Deze grafieken laten precies zien bij welke combinatie van vaarsnelheid, golffrequentie en golfamplitude het schip instabiel wordt."

Dit mechanische model kan verder verfijnd worden door het schip drie vrijheidsgraden van beweging te geven. Dat wordt gemodelleerd door aan de massa een tweede slinger te verbinden. Deze slinger neemt het effect mee dat de voor- en achterkant van het schip in wekelijkheid ook op en neer bewegen, een schommelbeweging om een horizontale as in dwarsrichting. "Voor dit model hebben we alleen maar een begin van een analyse gemaakt", zegt Grasman. "Bovendien hebben we de twee slingers onafhankelijk van elkaar verondersteld, iets wat in werkelijkheid niet het geval is. Wiskundig gezien gaat het om een zesde-orde-differentiaalvergelijking, waarbij het de kunst is om in een grote parameter ruimte te zoeken naar een resonantie in de rolbeweging. Omdat er van dit systeem nog geen uitgewerkte analyse bestaat, hebben we het MARIN aanbevolen om hier bijvoorbeeld een afstudeerproject van te maken."

### **Stochastiek van oceaangolven**

In werkelijkheid wordt de toestand van de golven op zee bepaald door de complexe interactie tussen de wind en het oppervlak van de zee. In een tweede aanpak hebben de wiskundigen onderzocht wat het gevolg voor het rolprobleem is wanneer je niet langer golven van één frequentie aanneemt, zoals in de massa-veer-slingermodellen, maar de realistische situatie waarbij het schip een superpositie van golven met allerlei frequenties tegenkomt.

"We hebben twee typen modellen bekeken", zegt Grasman. "Een model waarbij we de zee stationair veronderstellen, en een tweede model waarin we de zee instationair veronderstellen. Het stationaire model geldt meestal maar een paar uur, tot hoogstens een paar dagen. In het algemeen verandert de golfslag op zee natuurlijk in de tijd. Golven hebben tijd nodig om zich op te bouwen. Beide modellen zijn in de literatuur al uitgebreid bestudeerd en uitgedrukt in een functie die aangeeft hoeveel energie in een golf met een bepaalde frequentie zit: het golfspectrum."

Deze spectra hebben de wiskundigen gebruikt om een stochastische simulatie maken van de golven. De uitkomst van deze simulatie hebben ze vervolgens als invoer gekozen voor het slinger-veermodel, waarbij het schip twee vrijheidsgraden heeft. Grasman: "Met deze aanpak hebben we laten zien hoe plotseling heftige rolbewegingen kunnen ontstaan. In een voorbeeldsimulatie was er bij een windsnelheid van 8,3 Beaufort nog geen enkele rolbeweging. Maar bij een kleine verhoging van de windsnelheid naar 8,4 Beaufort bleek er binnen tien minuten een heftige rolbeweging te ontstaan. Dit model biedt nog veel ruimte voor verbetering, want wij hadden alleen maar tijd voor het doorrekenen van een vrij eenvoudig voorbeeld. Een van de interessante vragen die je met zo'n stochastisch golfmodel in principe kunt beantwoorden, is de vraag hoelang het duurt voordat de golfamplitude een bepaalde kritische waarde overschrijdt."

### **Ontwerpprogramma**

"Het is een mooi afgerond stuk werk", reageert MARIN-onderzoeker Ed van Daalen op de resultaten van de studiegroep. "Door achtereenvolgens analytische modellen met één, twee en drie vrijheidsgraden te beschrijven, kom je steeds een stukje dichterbij de werkelijkheid. De modellen zijn grotendeels gebaseerd op bestaand werk, maar van een deel van de literatuur waren wij niet op de hoogte. Ze geven ons een fris inzicht in het probleem van de hevige rolbeweging."

gen. Het voordeel van deze analytische modellen is dat ze meer inzicht geven dan een computersimulatie waarin je ook alle details van het schip meeneemt. De analytische modellen zijn bovendien geformuleerd in grootheden waar we vertrouwd mee zijn en dat maakt de analyses voor ons gemakkelijk herkenbaar.”

Het MARIN heeft nog niet besloten of het met dit werk verder gaat, maar Van Daalen kan zich een aantal wegen voor vervolgonderzoek voorstellen: “We zouden met de inzichten uit het analytische model ons simulatiemodel kunnen verbeteren. Verder kan ik me ook voorstellen dat we een handig rekeninstrument ontwerpen dat voorspelt onder welke condities een schip op zee in de problemen komt. Dat zou een mooi stuk werk voor een toekomstige promovendus kunnen zijn.”



*Voorbeelden van de gevolgen van de rolbeweging van een containerschip.*