

Toegepaste Analyse in Delft

door

Prof. dr. ir. A. J. Hermans

Rede in verkorte vorm
uitgesproken bij het afscheid als
hoogleraar in de Technische Toepassingen van de Analyse aan de
Faculteit Elektrotechniek, Wiskunde en Informatica
van de Technische Universiteit Delft

op 10 mei 2006

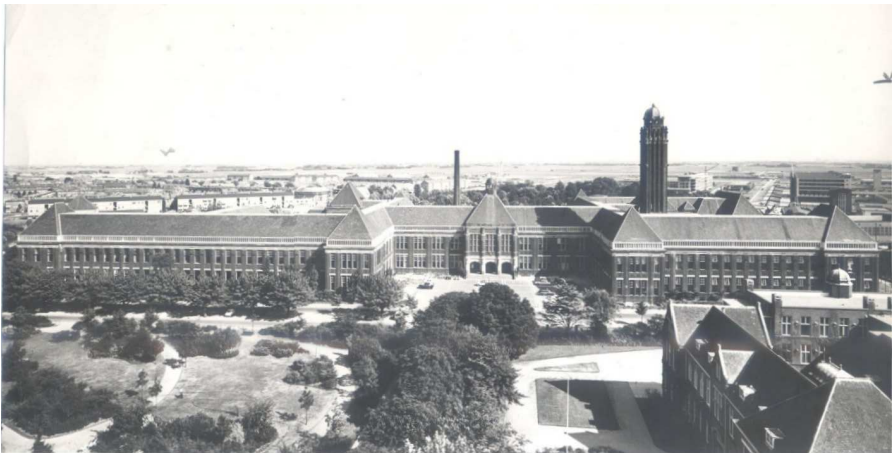
The pictures on page 6,7 and 20 are downloaded from the internet.

© A.J. Hermans, 2006

*"Mijnheer de Rector Magnificus,
leden van het College van Bestuur,
Collegae hoogleraren en
andere leden van de universitaire gemeenschap.
Zeer gewaardeerde toehoorders.
Dames en heren".*

1 Inleiding

Het is traditie dat een hoogleraar aan deze universiteit een afscheidsrede houdt bij het bereiken van de pensioengerechtigde leeftijd. Ruim drie en veertig jaar ben ik als lid van de wetenschappelijke staf verbonden aan deze universiteit. Het leek mij een goed idee om een overzicht te geven van het wetenschappelijke werk dat verricht is onder mijn supervisie. Als ik dit zou doen aan de hand van het werk van mijn ingenieur-studenten, zou ik niet volledig kunnen zijn. Ik zal mij daarom beperken tot het geven van een overzicht van het werk verricht door mijn promovendi. Alvorens hiermee te beginnen een paar opmerkingen over mijn start in de wiskunde.



2 Eerste kennismaking met de toegepaste wiskunde

In maart 1963 behaalde ik het diploma van wiskundig ingenieur. Mijn afstudeerproject heb ik uitgevoerd onder supervisie van prof. R. Timman, die samen met zijn collega prof. F. Loonstra de grondlegger was van de wiskundig ingenieursopleiding in Delft. Na een twee-jarige propedeuse in een van de technische studierichtingen met een standaard wiskundepakket kon men kiezen voor een drie-jarige vervolgstudie in de wiskunde. Ik deed mijn propedeuse in de studierichting elektrotechniek. In het tweede jaar volgde ik twee vakken gegeven door Timman, lineaire algebra en vector analyse. Hij overtuigde mij ervan dat wiskunde meer was dan formules manipuleren en stellingen bewijzen. Dus na het behalen van de propedeuse verhuisde ik naar wiskunde waar tevens meer theoretische vakken, in hoofdzaak onderwezen door Timman en Loonstra, gevolgd konden worden. Na het behalen van het kandidaatsdiploma heb ik ervoor gekozen om mijn afstudeerproject bij Timman te doen. In die periode was Ralph Kleinman juist gepromoveerd op een onderwerp over verstrooiing van akoestische en elektromagnetische golven. Hij beschreef o.a. een elegante nieuwe methode om een grote klasse van problemen op te lossen. Mij werd gevraagd om een soortgelijke methode te ontwikkelen voor het beschrijven van een stationaire stroming over een vleugelprofiel met een snelheid nabij de snelheid van het geluid. De vergelijking die opgelost moest worden was de bekende warmtevergelijking. Het was relatief eenvoudig om met behulp van een nieuwe fundamentele oplossing een klasse van oplossingen te construeren waarbij er meerdere mogelijkheden waren om een integratiecontour in het complexe vlak te kiezen. Dit was ook het geval in het proefschrift van Kleinman. Daar wordt zonder motivatie een contour gekozen. Dit is een typisch geval van een fysisch probleem, met een eenduidige oplossing, dat schijnbaar meerdere wiskundige oplossingen heeft. Je kunt je afvragen wat dit betekent. De verklaring is eenvoudig. Er ontbreekt dan meestal nog een fysische conditie waar niet aan is voldaan. In mijn geval was het eenvoudig aan te tonen dat slechts één keuze aanleiding geeft tot een eindige oplossing van het storingsveld ver weg van het verstorende vleugelprofiel. Als je deze oplossing verder uitwerkt krijg je precies dezelfde formulering welke met andere middelen te construeren is. Als we nu de elegante oplossing van Kleinman bekijken, zien we dat zijn oplossing helaas niet voldoet aan een fysische randvoorwaarde, n.l. de uitstralingsvoorwaarde die stelt dat de verstoring van het invallende veld uit van de verstrooier weglopende golven bestaat. Dus mijn positieve resultaat is: er bestaat geen elegante oplossing van deze vorm. Dit zou zeer frustrerend kunnen werken voor een jong onderzoeker, maar het overtuigde mij er juist van dat er nog veel problemen in de toegepaste technische wetenschappen om een oplossing vragen.

Timman overleed in 1975 en het werd mijn taak om drie van zijn promovendi in de laatste fase te begeleiden. Voor deze drie ben ik als tweede promotor opgetreden.

Twee samen met prof. J. Gerritsma van de afdeling scheepshydronechanica en een met prof. K.H. Ephraïm van de medische faculteit van de universiteit van Utrecht en part-time aan onze universiteit verbonden. Het was het begin van een reeks van promoties in verschillende toepassingsgebieden waar wiskunde een essentiële rol vervulde. De ontwikkeling van meer en meer rekenkracht maakte het mogelijk onderwerpen te bestuderen die tot dusver buiten ons bereik lagen. Doordat ontwerpers van technische systemen efficiënte computercodes zijn gaan gebruiken, is de behoefte aan meer gedetailleerde informatie toegenomen. De wiskundige modellen moeten hiervoor worden aangepast. Vereenvoudigingen die in eerste instantie acceptabel waren kunnen niet meer worden toegepast.

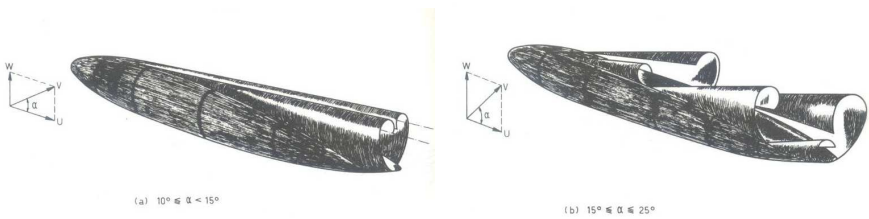
3 Proefschriften

De onderwerpen van de proefschriften kunnen onderverdeeld worden in een aantal categorieën, namelijk scheepshydrodynamica, medische toepassingen, golven in elastische media en signaalanalyse, overige stromingsproblemen en elastische trillingen van slanke constructies.

Scheepshydrodynamica

An estimation of the normal force and the pitching moment of "teardrop" underwater-vehicles by E. van der Pol (1976).

Van der Pol was geïnspireerd door een methode ontwikkeld door Von Kármán aan het begin van de twintigste eeuw om krachten te bepalen die werken op een met constante snelheid vliegende Zepelin. Als marine-officier maakte van der Pol deze



Symmetric and non-symmetric wake for two different angles of attack

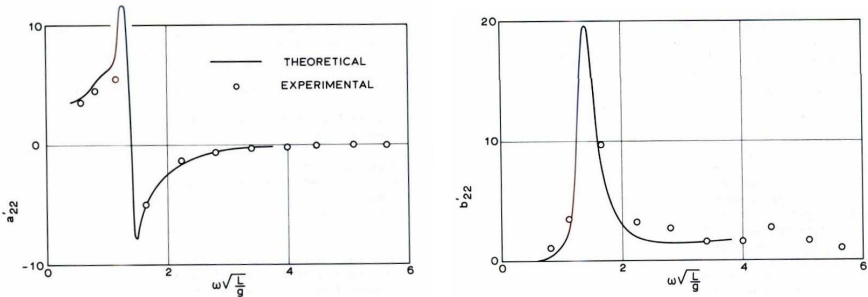
methode geschikt voor een speciaal soort onderwatervoertuigen, varend onder een invalshoek. Het bleek noodzakelijk om visuele waarnemingen te gebruiken om het wiskundig model te complementeren. De noodzakelijke informatie over het loslaten

van de stroming aan de lizijde van het object is, zelfs tegenwoordig, nauwelijks met behulp van de wiskunde te verkrijgen. Door middel van een waargenomen loslatingspatroon kan een bijna perfecte overeenstemming tussen gemeten en berekende data verkregen worden.

The motions of a moored ship in waves by G. van Oortmerssen (1976).

Timman en ik waren betrokken bij het onderzoek van het Nederlands Scheepsbouwkundig Proefstation (tegenwoordig MARIN geheten). Ik was dus bekend met het werk dat van Oortmerssen uitvoerde onder de stimulerende leiding van Timman. Door Hess en Smith was er een methode ontwikkeld om de niet-viskeuze krachten te berekenen werkend op een vleugelprofiel in een uniforme stroming. Besloten is om een soortgelijke methode te ontwikkelen voor het berekenen van de krachten die werken op een schip in golven. Het idee achter deze methode is tamelijk eenvoudig. Als je een verstoring veroorzaakt in een punt in het medium, dan kun je een invloedsfunctie, ook wel bronfunctie genaamd, construeren die het effect op de totale stroming weergeeft. Het effect van een object, schip of vleugel, in een stroming is nu te beschrijven als een superpositie van deze invloedsfuncties. Deze bronnen worden verdeeld over het oppervlak van het object. Er moet nu echter nog een probleem worden opgelost. We moeten de sterkte van de bronnen nog bepalen. We gebruiken hiervoor de conditie dat het object ondoordringbaar is. Op deze manier wordt een stelsel algebraïsche vergelijkingen verkregen welke met behulp van de computer opgelost kan worden. Om een totale ondoordringbaarheid te verkrijgen moet het object zeer dicht met bronnen belegd worden, hetgeen leidt tot een groot stelsel vergelijkingen. Deze methode was met succes toegepast in de aerodynamica. Voor vrije-vloeistofoppervlaktestromingen is er echter een extra complicatie, namelijk het feit dat de invloedsfunctie aan de vrije-vloeistofoppervlakteconditie moet voldoen. Dit lijkt een eenvoudige uitbreiding. In de tekst van Wehausen en Laitone worden verschillende formuleringen gegeven. De invloedsfunctie bevat echter een term die de berekeningen zeer vertraagd. Er moeten daarom verschillende ontwikkelingen van deze term gebruikt worden om tot redelijke rekentijden te komen. In het geval van een object verankerd in golven was van Oortmerssen een van de eersten die deze aanpak volgde om de bewegingen te berekenen. De berekeningen zijn in het frequentie-domein uitgevoerd voor een vaartuig afgemeerd aan een kade. In het ondiepwaterbassin van het MARIN zijn experimenten uitgevoerd. De klassieke testmethode is hier gevolgd, waarbij de coëfficiënten van de bewegingsvergelijkingen voor iedere afzonderlijke frequentie en alle graden van vrijheid worden bepaald met behulp van oscillatieproeven. Deze coëfficiënten kunnen tevens berekend worden met behulp van de nieuwe methode. Met hetzelfde computerprogramma kunnen ook de excitatiekrachten berekend worden. Hoewel de niet-lineaire eigenschappen

van het verankeringssysteem de situatie tamelijk ingewikkeld maken, komen de berekende en gemeten resultaten goed overeen.



Added mass (left) and damping (right)

In de figuur wordt de toegevoegde massa, in verticale richting, van een specifieke configuratie getoond. De toegevoegde massa is de coëfficiënt die aangeeft hoeveel vloeistof versneld wordt in fase met de beweging van een schip dat in verticale richting versneld wordt. We zien dat zowel positieve als negatieve waarden gevonden worden. Bij afwezigheid van de kade is deze waarde altijd positief. De invloed van de kade is dus duidelijk zichtbaar. Een negatieve waarde van de toegevoegde massa betekent dat de in-fase reactiekracht zich in het wiskundig model gedraagt als een lineaire veerkracht.

Laagfrequente Krachten en Bewegingen

Low frequency second order wave exciting forces on floating structures, by J.A. Pinkster (1980).

A simulation model for a single point moored tanker by J.E.W. Wichers (1988).

The mathematical modelling of the mean wave drift forces in current by R.H.M. Huijsmans (1996).

Tegen het eind van de jaren zestig werden we geconfronteerd met een niet eerder beschouwd verschijnsel op het gebied van scheepsbewegingen. Het was algemeen bekend dat ten gevolge van de krachten, uitgeoefend op een schip in golven, dit schip zich beweegt met dezelfde frequentie als de golven. Echter een schip verankerd bijvoorbeeld aan een eenpuntsafmeersysteem reageert totaal verschillend in een zeetoestand bestaande uit een spectrum van golffrequenties. In een aantal gevallen begint het schip zeer laagfrequent te bewegen, waarbij de frequentie geen deel van het spectrum is maar dichtbij de eigen-frequentie van het verankerde systeem ligt.

De amplitude van de beweging kan zeer groot zijn en het schip kan zelfs de boei overvaren. In die tijd begon men dit soort verankeringsystemen te gebruiken voor het laden en lossen van ruwe olie in open zee. In 1969, na een discussie met Hsu en Blenkarn van AMOCO, heeft George Remery een aantal interessante modelproeven uitgevoerd in langzaam variërende golven om onze hypothese te bewijzen dat dit verschijnsel verklaard kon worden door de tweede-orde effecten in de druk en relatieve golfhoogte. Toen Jo Pinkster bij het MARIN kwam, heeft hij de taak op zich genomen om dit verschijnsel meer gedetailleerd op te lossen. Er was nu meer ervaring met de lineaire diffractie computer-code, ontwikkeld door van Oortmerssen. Deze lineaire krachten op een drijvend object konden nu redelijk nauwkeurig berekend worden. Pinkster formuleerde de tweede-orde krachten door middel van een integratie over de gemiddelde positie. In veel gevallen kunnen de tweede-orde langzaam variërende driftkrachten geformuleerd worden in termen van producten van de eerste-orde druk, de bewegingen van het object en de relatieve golfhoogte. Het effect van de tweede-orde potentiaalfunctie wordt met behulp van een benadering in rekening gebracht.

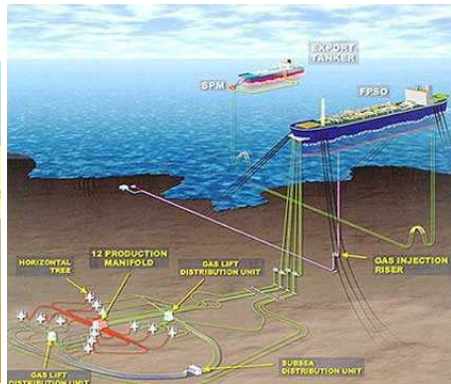
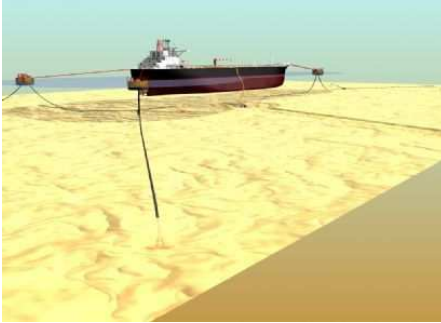


Single buoy mooring systems

Voor een tanker en een drijvend platform (semi-submersible) zijn de resultaten van berekeningen van de laagfrequente krachten vergeleken met modelproeven in regelmatige golfgroepen en onregelmatige golven. Het blijkt uit deze vergelijking dat, mits aan bepaalde voorwaarden is voldaan, de gemiddelde tweede-orde krachten verkregen in regelmatige golven, gebruikt kunnen worden om de langzaam variërende krachten in onregelmatige golven te benaderen.

Om het effect van dit verschijnsel op een dynamisch gepositioneerd vaartuig te minimaliseren heeft Pinkster het idee ontwikkeld om een *wave-feed-forward*

signaal gebaseerd op relatieve hoogtemetingen te gebruiken. Het is aangetoond dat de laagfrequente bewegingen ten gevolge van driftkrachten in onregelmatige golven aanzienlijk gereduceerd worden door zo'n systeem.



Realistic operational situations

Pinkster bestudeerde in zijn proefschrift de langzaam variërende krachten werkend op drijvende constructies. Het bleek dat om de bewegingen van een verankerd systeem in een algemene realistische zeetoestand te beschrijven meer onderzoek noodzakelijk was. Een paar verschijnselen werden nog niet goed begrepen. Onder andere was uit de proeven uitgevoerd door Remery gebleken dat de gemeten demping voor de laagfrequente beweging veel groter was dan de waarde die volgt uit een eenvoudige weerstandsproef in kalm water.

Wichers heeft proeven uitgevoerd voor een aantal soorten drijvende constructies in verschillende zeetoestanden. Het bleek dat de laagfrequente demping van een constructie achter een boei in een lage zeetoestand in hoofdzaak bestaat uit viskeuze demping, terwijl bij een hoge zeetoestand, zoals in de oude proeven van Remery, de laagfrequente golfdriftdemping dominant wordt. Deze laatste demping kan beschouwd worden als een reactiekracht ten gevolge van de snelheidsafhankelijkheid van de langzaam variërende driftkracht. Dit deel van de demping kan berekend worden met behulp van het bestaande computerprogramma. Om dit echter te doen moet de eerder genoemde invloedsfunctie aangepast worden. Deze aanpassing is geen eenvoudige zaak. In principe kan dit gebeuren door het ontwikkelen van de snelheidsafhankelijke invloedsfunctie, die niet direct gebruikt kan worden, in een reeksontwikkeling met betrekking tot kleine waarden van de snelheid.

Modellen om de viskeuze demping te beschrijven zijn uitgewerkt in dit proefschrift en met zorg gevalideerd met behulp van experimenten uitgevoerd in de bassins

van het MARIN. De uiteindelijke validatie van het totale model is uitgevoerd met onafhankelijke proeven. Over het algemeen tonen de resultaten van de simulaties van de bewegingen een redelijke overeenkomst met de resultaten van de modelproeven.

Sindsdien zijn de hulpmiddelen, die hier ontwikkeld zijn, gebruikt voor een groot aantal onderzoeksprojecten. Een resultaat van dit project is dat nu bekend is welke informatie verkregen kan worden uit experimenten en welke uit berekeningen.

In het proefschrift van Huijsmans wordt de wiskundige methode ontwikkeld om in het frequentiedomein de lineaire en laagfrequente tweede-orde krachten, werkend op een langzaam varende vaartuij, te berekenen. Deze excitatie- en reactiekrachten zijn van groot belang voor het berekenen van de bewegingen van een langzaam varende schip, maar ook om de laagfrequente tweede-orde driftkracht en demping te berekenen. Het computerprogramma voor het berekenen van de diffractiekrachten, dat al meer dan tien jaar gebruikt wordt, dient te worden uitgebreid en volledig betrouwbaar gemaakt te worden. Een van de negatieve aspecten van het bestaande programma is dat deze bij bepaalde waarden van de frequentie foute antwoorden geeft. Deze frequenties worden '*irregular frequencies*' genoemd en vinden hun oorsprong in het feit dat men een quasi-fysisch probleem kan formuleren, dat niets van doen heeft met ons probleem, maar dat resulteert in dezelfde integraalvergelijking, waarvan kan worden aangetoond dat het een quasi-fysische resonantie heeft bij deze frequentie. In dat geval geeft de code uiteraard foute antwoorden.

Er zijn verschillende manieren om dit niet-realistische probleem te voorkomen. Hier is aangetoond dat deze moeilijkheid voorkomen kan worden door middel van het toevoegen van extra randvoorwaarden in het niet-fysische gebied, bijvoorbeeld het dek van het schip. Dit resulteert in een formulering met een eenduidige oplossing. Het komt erop neer dat het complementaire probleem aan een *no-flux* conditie voldoet in plaats van de vrije-vloeistofoppervlakteconditie binnen het schip. Met andere woorden we brengen een gesloten dek in rekening. Deze aanpak werkt prima, maar geeft aanleiding tot een iets groter systeem vergelijkingen omdat ook het dek belegd moet worden met bronfuncties. In het gediscretiseerde stelsel vergelijkingen kunnen de matrix-coëfficiënten op dezelfde manier berekend worden als de overige termen. Deze aanpak is zeer efficiënt.

De kleine waarde van de vaarsnelheid, met of zonder drifthoek, wordt in rekening gebracht met behulp van storingsreeksen voor de coëfficiënten, de onbekende bronsterkten en de potentiaalfunctie. Het blijkt dat als we een correctie van de coëfficiënten en de functies willen berekenen, we ook de invloedsfunctie moeten ontwikkelen. Hier blijkt een serieus probleem te liggen. Zoals te verwachten blijkt dat we moeten afrekenen met een typisch niet-uniform gedrag. In het beroemde boek van Poincaré '*Mécanique Céleste*' uit 1898 wordt een soortgelijk niet-uniform

gedrag beschreven bij de vergelijkingen voor het beschrijven van de banen van hemellichamen onder invloed van kleine verstoringen. Hij bewijst dat een correctiemethode van Lindstedt de juiste manier is om deze problemen te behandelen en een uniform-geldige oplossing te verkrijgen. Er is voor gekozen om een correctiemethode gebaseerd op hetzelfde idee te ontwikkelen.

Met behulp van het computerprogramma zijn berekeningen uitgevoerd bij snelheid nul en kleine snelheden en vergeleken met resultaten van zorgvuldig uitgevoerde proeven. Als men de kleine veranderingen ten gevolge van kleine vaarsnelheden wil meten, moet men zich realiseren dat het correcties zijn op grote lineaire termen. Zij kunnen dus verdwijnen in de meetruis. De vergelijkingen laten zien dat berekende resultaten zeer dicht bij de gemeten waarden liggen.

Golfweerstand

De golfweerstand speelt een belangrijke rol bij het ontwerpen van een schip. Lange tijd heeft het werk van Michell (1898) als basis gefungeerd om dit deel van de weerstand te berekenen. Voor het moderne scheepsontwerp zijn de resultaten echter niet nauwkeurig genoeg en voor bepaalde scheepsvormen zijn ze zeer onbetrouwbaar. Daarom zijn er een paar nieuwe theorieën ontwikkeld.

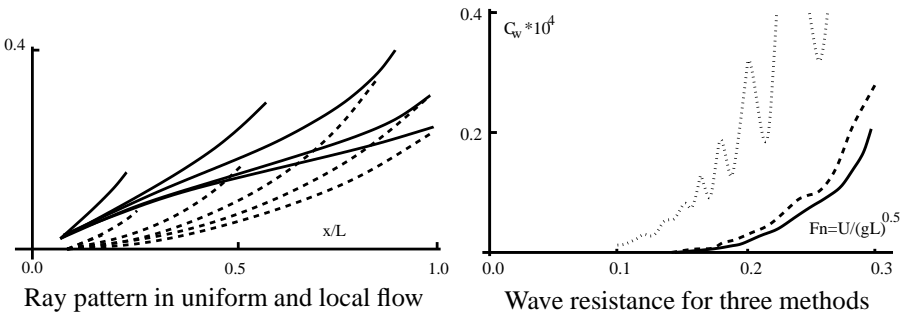
Low Froude number expansions for the wave pattern and the wave resistance of general ship forms, F.J. Brandsma (1987).

A solution method for the nonlinear ship wave resistance problem by H.C. Raven (1996).

Een van de problemen bij het ontwerpen van een niet-slanke schip is, gegeven het lijnenplan, de voorspelling van de weerstand. We willen uiteraard de weerstand zo klein mogelijk houden. Een component van de totale weerstand is de weerstand ten gevolge van het maken van een golfpatroon. In 1898 publiceerde Michell een analytische methode om deze term te benaderen. Zijn theorie is gebaseerd op een benadering waarbij het schip dun verondersteld wordt. Deze methode geeft in veel gevallen een goede benadering van de golfweerstand. Latere verfijningen geven aanleiding tot een goede benadering voor slanke schepen, zelfs met een stompe boeg. Met de introductie van zeer grote supertankers (VLCC's), varende met relatief lage snelheden (klein getal van Froude), werd het duidelijk dat voor lage dimensieloze snelheden de theoretische waarden veel te groot zijn. Een ander probleem is dat voor conventionele schepen de resultaten niet nauwkeurig genoeg zijn om de rompvorm te optimaliseren. Dit probleem komt later aan de orde. We concentreren ons nu op de zogenaamde laag-Froude paradox.

Als we het golfpatroon veroorzaakt door een langzaam varende groot schip

waarnemen, zien we dat de golflengte van de golven klein wordt ten opzichte van de lengteschaal, bijvoorbeeld de lengte van het vaartuig. Dit brengt ons op het idee om een kortegolftheorie, zoals bekend in de theorie van akoestische verstrooiing, toe te passen. In 1970 verbleef ik een jaar aan het Courant Institute. Ik heb toen dit idee besproken met prof. J. B. Keller, die dit probleem ook gesignaleerd had. Het was al snel duidelijk dat een patroon van golffronten gevonden kon worden. Er bleef echter een probleem liggen waarmee onderzoekers zich lange tijd hebben beziggehouden, namelijk hoe vind je beginvoorwaarden voor de amplitudo van de golven. Voor tamelijk gecompliceerde problemen in de akoestiek kon men altijd een 'canoniek' probleem oplossen met dezelfde lokale eigenschappen. De lokale vorm van deze oplossing werd daarna gebruikt als beginvoorwaarde voor de amplitudefunctie. Deze aanpak werd algemeen geaccepteerd. In ons geval was er echter niet zo'n canoniek probleem beschikbaar. Visuele observaties leerden ons dat de golven in hoofdzaak door de boeg en de achtersteven gegenereerd worden. De asymptotische kortegolfontwikkeling van het Michell resultaat bevestigden dit vermoeden.



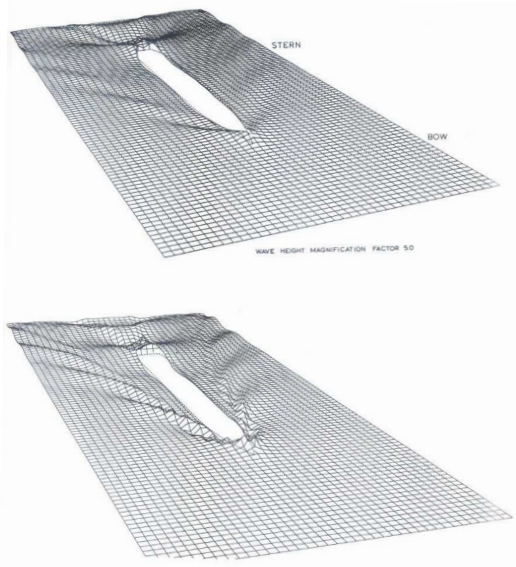
In het proefschrift van Brandsma wordt een afleiding gegeven van een manier om dit probleem op te lossen voor een wigvormige boeg. Er is geen beperking voor de wighoek. Het stralenpatroon wordt gegenereerd door middel van een niet-lineaire vierde-orde gewone differentiaalvergelijking voor de fase-functie. De coëfficiënten van deze vergelijking bevatten de lokale snelheid van het water. Het blijkt inderdaad dat de golven gegenereerd worden door de boeg en de achtersteven van het vaartuig. Een wiskundige techniek om de vergelijking op te lossen is gebaseerd op het begrip karakteristieke lijnen (laten we deze lijnen stralen noemen). Ze zijn oplossingen van een stelsel eerste-orde differentiaalvergelijkingen die met een standaard numerieke techniek opgelost kunnen worden. De amplitudefunctie voldoet eveneens aan een eerste-orde differentiaalvergelijking langs de karakteristieken. Beginvoorwaarden voor deze functie kunnen gevonden worden.

Op deze manier kunnen we het golfpatroon ver van het vaartuig berekenen.

De volgende stap is tamelijk eenvoudig. De wet van behoud van impuls relateert de golfweerstand aan het verre-veld golfhoogte patroon. De uiteindelijke berekeningen zijn in overeenstemming met benaderingen verkregen door E. Baba van de Mitsubishi scheepswerf in Nagasaki.

De hier gevolgde methode was bedoeld om duidelijkheid te verschaffen over de zogenaamde *lage snelheid* paradox. De theorie is ontwikkeld voor eenvoudige prismatische scheepsvormen.

Het onderzoek bij het MARIN had onder andere als doel een betrouwbaar computerprogramma te ontwikkelen voor het berekenen van de golfweerstand voor algemene scheepsvormen varend met normale dienstnelheid. De ontwikkeling van de theorie is begonnen met het pionierswerk van Dawson bij het '*David Taylor Model Basin*' van het '*Naval Ship Research and Develop Center*' te Washington.



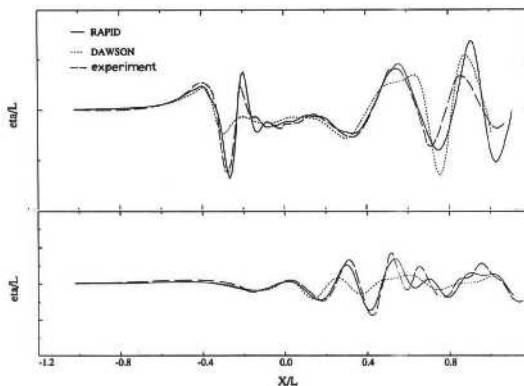
Dawson (top), RAPID (bottom)

Na de dood van Dawson is zijn idee door verschillende onderzoekers, onder andere bij het MARIN, opgepakt. De eerste pogingen leken succesvol. Het bleek echter al snel dat aan deze aanpak een paar fundamentele problemen kleefden. Een verrassend verschijnsel was dat voor bepaalde scheepsvormen de golfweerstand negatief werd. In de oorspronkelijke aanpak werkt men met een lineaire benaderde vorm voor de conditie aan het wateroppervlak. Allereerst worden de stroomlijnen en snelheden van een dubbel-body potentiaal berekend. Hierbij wordt een oneindig

uitgestrekt medium beschouwd waarbij het schip gespiegeld wordt ten opzichte van het ongestoorde vrije-vloeistofoppervlak. Met behulp van dit resultaat wordt een gelineariseerde conditie verkregen, waarbij afgeleiden langs deze stroomlijnen behouden blijven. Dit gaf verbeterde doch soms onbetrouwbare resultaten.

De hier voorgestelde methode gebruikt een verdeling van Rankine bronnen, invloedsfuncties voor een oneindig uitgestrekt medium, panelen op de romp en het vrije-vloeistofoppervlak. Een niet-conventionele keuze is het leggen van panelen op een kleine afstand boven het golfoppervlak terwijl de overeenkomstige controlepunten op het golfoppervlak gekozen worden. Dit heeft een aantal praktische voordelen en verbetert de gladheid van het snelheidsveld. Een theoretische analyse van de numerieke dispersie, demping en stabiliteit laat zien dat door de bronpunten boven het oppervlak te kiezen de numerieke dispersiefouten, veroorzaakt door de brondiscretisatie, vrijwel geëlimineerd worden. De overblijvende numerieke dispersie wordt veroorzaakt door het discretisatieschema in de vrije-vloeistofoppervlakteconditie, derde-orde met betrekking tot de paneelgrootte. Aangezien het optreden van punt-tot-punt oscillaties is verdwenen, wordt met de *'raised-panel'* methode een veel grotere numerieke nauwkeurigheid verkregen dan met een conventionele methode. Om het volledig niet-lineaire vrije-vloeistofoppervlakteprobleem op te lossen wordt een iteratief schema gebruikt. Iedere iteratie lost een lineair probleem op op het daarvoor verkregen oppervlak. Convergentie is in het algemeen snel en robuust. Er zijn tussen de tien en de twintig iteraties nodig.

Speciale aandacht wordt besteed aan de stroming achter een vlakke achtersteven. Er wordt een wiskundig model gekozen dat rekening houdt met de mogelijke zwakke singulariteit. Numerieke en experimentele validaties tonen de bruikbaarheid van het model aan.



wave cuts at $z/L = 0.1$ (top) and $z/L = 0.3$ (bottom)

Het ontwikkelde computerprogramma RAPID, gebaseerd op deze methode, wordt nu routinematig bij het MARIN gebruikt voor het optimaliseren van scheepsvormen.

A variationally optimized vortex tracing algorithm for 3-d viscous flows around solid bodies by J.J.W. van der Vegt (1988).

Het ontstaan van wervels bij stromingen om stompe objecten is een van de klassieke onderwerpen in de stromingsleer. Er wordt al meer dan een eeuw door veel onderzoekers geprobeerd inzicht, zowel experimenteel als theoretisch, te verkrijgen in dit verschijnsel. Het praktisch belang van dit soort onderzoek is groot. Veel constructies hebben last van ongewenste trillingen ten gevolge van wervelafscheiding. Men kan dan denken aan offshore-constructies zoals *riser bundels*, hangbruggen, kabels en schoorstenen.



Ondanks de grote hoeveelheid onderzoek verricht tot dusver zijn er nog veel onopgeloste problemen. Vanuit een experimenteel standpunt bezien zijn er problemen met het nauwgezet modelleren van wervelvorming. Er zijn begrenzingen aan de bereikbare dimensieloze snelheden, uitgedrukt in het getal van Reynolds en de stromingen zijn erg gevoelig voor kleine verstoringen. De liftkracht, de kracht loodrecht ten opzichte van de ongestoorde stroming, laat een grote spreiding zien in de

experimenten. Een ander probleem is dat de resultaten van de experimenten niet te vangen zijn in eenvoudige formules die gebruikt kunnen worden in de ingenieurspraktijk. Zelfs voor het meest simpele geval van de stroming rond een gladde cirkelcilinder, die in een stilstaande vloeistof oscilleert, is het nog steeds niet duidelijk welke formulering geschikt is om de laterale en transversale componenten van de kracht nauwkeurig te beschrijven

De methode die hier ontwikkeld wordt is gebaseerd op een methode zoals oorspronkelijk gesuggereerd door Chorin. In het proefschrift wordt op deze manier een stochastisch proces voor de verplaatsing van discrete wervels afgeleid en er wordt bewezen dat dit proces convergeert naar de oplossing van de bij het probleem passende Navier-Stokes vergelijkingen. Voor een twee-dimensionale stroming geeft deze methode zeer realistische resultaten. De stroming rond een twee-dimensionale cylinder blijkt echter drie-dimensionaal te zijn. Voor het veel gecompliceerdere drie-dimensionale probleem wordt er een uitbreiding van deze methode gepresenteerd. Het blijkt echter dat deze weg nauwelijks verder te volgen is en dat het beter is om met behulp van snellere computers de drie-dimensionale Navier-Stokes vergelijkingen direct met behulp van CFD methodes op te lossen.

A three dimensional method for the calculation of the unsteady ship wave pattern using a Neumann-Kelvin approach by C. van der Stoep (1992).

In dit proefschrift staat de berekening van de golfweerstand van een oscillerend schip centraal. Om de toegevoegde weerstand die hierdoor ontstaat te berekenen is het noodzakelijk om eerst de stationaire golfweerstand te berekenen. Dit is de weerstand die een schip varende in vlak water ondervindt. We beperken ons tot het geval van laagfrequente oscillaties. Hierdoor is het mogelijk om de invloedsfunctie te ontwikkelen in een machtreeks met betrekking tot de kleine waarde van de frequentie. De snelheidspotentiaal functie kan geschreven worden als een oppervlaktebelegging van invloedsfuncties over de romp en een lijnbelegging over de waterlijn. Als we de randvoorwaarde op de romp gebruiken krijgen we een integraalvergelijking. Omdat de invloedsfunctie ontwikkeld kan worden met betrekking tot de kleine parameter, de frequentie, ontwikkelen we tevens de bronsterkte en de potentiaal functie met betrekking tot deze parameter.

We vervolgen nu met een standaardstap uit de theorie van asymptotische ontwikkelingen. We vergelijken de coëfficiënten van gelijke machten in de ontwikkelingen. Dit geeft ons een stelsel integraalvergelijkingen voor iedere term in de ontwikkeling van de bronsterkte. De kern van de integraalvergelijkingen is de invloedsfunctie van het stationaire geval. Resultaten van berekeningen zijn vergeleken met metingen uitgevoerd in het laboratorium voor hydromechanica van de TU Delft. Aangezien metingen bij zulke lage frequenties moeilijk uit te voeren zijn,

werden ze bij iets hogere frequenties uitgevoerd. De resultaten komen redelijk overeen.

Oppervlaktegolven in het tijdsdomein

Nu volgen drie proefschriften behorend bij het watergolfproject uitgevoerd in samenwerking met het MARIN. De proefschriften van Henk Prins en Lisette Sierévogel behandelen het eerder beschreven probleem, namelijk de beweging van een object in golven varend met kleine snelheid, terwijl dat van Tim Bunnik het geval van grotere snelheden behandelt. Een aantal van deze problemen zijn gerelateerd aan het werk van van Oortmessen (snelheid nul) en dat van Pinkster en Wichers (laagfrequente oscillaties).

Time-domain calculations of drift forces and moments by H.J. Prins (1995).

Time-domain calculations of ship motions L.M. Sierévogel by (1998).

Seakeeping calculations for ships, taking into account the non-linear steady waves by T.H.J. Bunnik (1999).

In de klassieke methode voor dit soort problemen beschouwt men het snelheidsveld ten gevolge van golven als een superpositie op de ongestoorde stationaire stroming. Men kan de invloedsfunctie ten gevolge van een lokale verstoring afleiden. Deze invloedsfunctie werkt in een constant stationair parallel snelheidsveld. Deze aanpak geeft een redelijke benadering voor dunne en slanke schepen, bijvoorbeeld het klassieke type passagiers- en marineschepen. Tegenwoordig worden echter scheepsvormen ontwikkeld waarbij het niet te verwachten is dat deze benadering goede resultaten geeft. Experimentele en berekende resultaten verschillen te veel. Er is dus behoefte aan een andere aanpak om het gedrag in zeegang voor zulke vaartuigen te beschrijven.

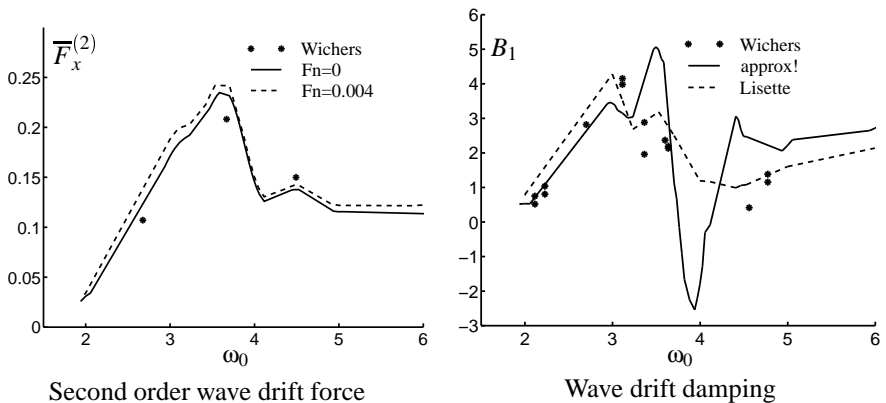
In dit project wordt een methode uitgewerkt en een computerprogramma ontwikkeld om dit probleem op te lossen. Er is echter wel een beperking. We blijven in het gebied van golfhoogtes waar de golf beschreven kan worden met een lineaire theorie. Het is algemeen bekend dat deze hypothese een goed startpunt is voor het bepalen van de bewegingen. Lokale effecten bij een hoge zeetoestand, zoals groen water aan dek en slammings worden niet gedekt door deze aanpak.

Als we een vaartuig langzaam laten varen in vlak water zien we dat het plaatselijke snelheidsveld rondom het schip gedomineerd wordt door het zogenaamde 'dubbel-lichaam' snelheidsveld, de snelheid die men krijgt als de vaste-wandconditie opgelegd wordt aan het vloeistofoppervlak. Hierbij wordt dus het stationaire golfpatroon verwaarloosd. Bij grotere snelheden kunnen we deze vereenvoudiging niet gebruiken. Dit is duidelijk te zien als we het golfpatroon waarnemen. Een ander significant verschil is dat boven een bepaalde snelheid de golven onder een bepaalde

hoek naar opzij en naar achteren verstrooid worden, terwijl dit bij lage snelheid in alle richtingen gebeurt. Deze aspecten moeten op de juiste manier in rekening gebracht worden.

Het basisidee is dat de golfopwekking en de reactiekrachten sterk van het lokale snelheidsveld afhankelijk zijn. In het geval van kleine voorwaartse snelheden tellen we de watersnelheid ten gevolge van golven op bij de watersnelheid van het dubbellichaam. Als we nu de conditie aan het vrije-vloeistofoppervlak beschouwen, zien we dat we een lineaire conditie krijgen op het ongestoorde oppervlak. Dit was ook het geval in vroeger werk zoals het werk van van Oortmerssen. Het verschil is dat de coëfficiënten niet langer constant zijn, maar functies van de lokale snelheid. Hierdoor kunnen we geen invloedsfunctie meer construeren.

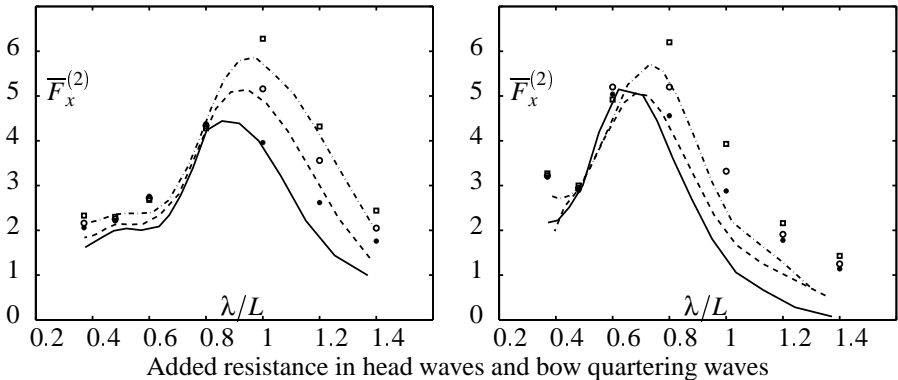
Hoe lossen we dit dilemma op? In de eerste plaats besluiten we om het probleem in het tijdsdomein in plaats van het frequentiedomein op te lossen. Als we een integraalvergelijking formuleren, moeten we een geschikte invloedsfunctie selecteren. We gebruiken hier een invloedsfunctie die geldig is in een oneindig uitgestrekt medium. Deze voldoet dus niet aan de conditie op het vrije-vloeistofoppervlak. We kunnen een integraalvergelijking krijgen met behulp van het Green's theorema, die de potentiaalfunctie en haar normaal afgeleide aan elkaar relateert. Als we



gebruik maken van de condities op de begrenzing van het waterdomein, zoals het wateroppervlak, de scheepsromp en de bodem, krijgen we een integraalvergelijking voor de overblijvende onbekende functies. Omdat we in het tijdsdomein werken, spelen ook de afgeleiden naar de tijd een rol in deze vergelijkingen. Met behulp van differentieschema's worden deze termen uitgedrukt in potentialen uit voorgaande tijdstappen. Het zal duidelijk zijn dat voor een goede keuze van zulke schema's een grondige analyse noodzakelijk is, vooral omdat we een geschikte benadering van de

fasesnelheid en de groepsnelheid willen bereiken.

We moeten ons realiseren dat het vrije-vloeistoppervlak oneindig uitgestrekt is en dat daarom de dimensie van de gediscretiseerde integraalvergelijking oneindig groot wordt. We willen echter een eindig gebied beschouwen. Aan de kunstmatige randen moet daarom een conditie geformuleerd worden waardoor verstrooide golven alleen van binnen naar buiten kunnen gaan. Hiervoor formuleren we een zogenaamde uitstralingsvoorwaarde. Prins formuleerde een voorwaarde waarbij een tamelijk groot gebied in rekening gebracht moest worden. Siervogel daarentegen ontwierp een conditie waardoor het mogelijk was om de afsluiting dicht bij de scheepsromp te kiezen. Zij heeft ook een uitvoerige analyse gepresenteerd van de stabiliteits-eigenschappen van de schema's. Metingen van de langzaam variërende krachten en demping verkregen door Pinkster en Wichers blijken zeer goed met de berekeningen overeen te komen.



In het werk van Bunnik is de opgedane ervaring gebruikt om een soortgelijke aanpak voor vaartuigen varend met grotere snelheid te construeren. De meeste stappen moesten opnieuw gezet worden. Een belangrijk aspect is de formulering van de conditie aan het wateroppervlak. Het is van belang om tot een linearisatie te komen op een geschikt oppervlak. In het geval van lage snelheid is dit het ongestoorde oppervlak. Op dit moment was echter het programma van Hoyte Raven voor het berekenen van de stationaire golfhoogte beschikbaar. Bunnik heeft een linearisatie om dit oppervlak gedefinieerd. Voor de schema's die zo verkregen zijn werden uitvoerige nauwkeurigheds- en stabiliteitsanalyses uitgevoerd. Op deze manier zijn er efficiënte keuzes voor de discretisaties gevonden. Het resultaat is de berekening van de toegevoegde weerstand, de extra weerstand die het schip ondervindt ten gevolge van de golven. Het blijkt dat de resultaten beter zijn dan die van andere methodes.

Zeer grote drijvende elastische platforms

Mega-Float involves building an artificial body of land in calm, shallow ocean waters up to about 30 meters (33 yards) deep by connecting steel boxes-called floating units-that float in the water. Compared to landfill methods, the Mega-Float is less noisy, has fewer safety problems, is less environmentally destructive, and costs less. Also, existing facilities can be easily expanded while the facilities are functioning and they are almost completely unaffected by earthquakes. The Mega-Float concept calls for the creation of bodies of land over 1 kilometer (0.6 miles) long, and at this length they will not move even though they are floating.

*The first phase of corroborative testing, which has now been completed, involved actually floating a floating-body model 300 meters (328 yards) long, 60 meters (66 yards) wide, and 2 meters (2.2 yards) thick in the waters off a shipbuilding yard in Yokosuka City, Kanagawa Prefecture.*¹

Een discussie met Makoto Ohkusu van het researchinstituut voor toegepaste mechanica (RIAM) van de Universiteit van Kyushu in Japan was de aanleiding om met behulp van asymptotische methoden inzicht te verkrijgen in een aantal ontwerp-criteria. Om vliegtuigen veilig te laten landen op zo'n platform is het noodzakelijk dat de vervorming van het platform ten gevolge van golven bekend is. Het werd al snel duidelijk dat het toepassen van bestaande kortegolftheorieën, in analogie met de bekende geometrische optische methoden (vaak stralenmethodes genoemd) geen recht toe recht aan oefening was. In de volgende twee proefschriften wordt een manier beschreven om het interactieprobleem op te lossen met behulp van een nieuwe methode die weinig computerinspanning vergt.

Interaction of free surface waves with elastic and air-cushion platforms by R.A.M. Guéret (2003).

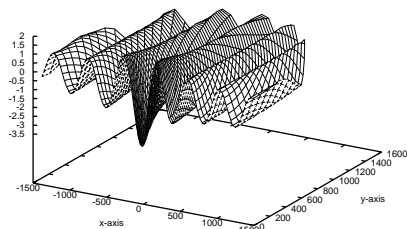
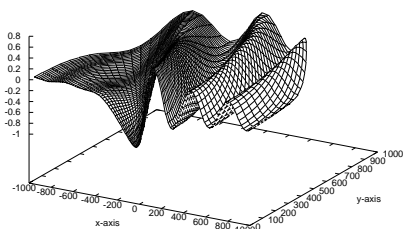
Hydroelastic analysis of very large floating structures by A.I. Andrianov (2005)

In het eerste deel van dit project heeft Renaud Guéret onder andere twee verschillende concepten voor een drijvend vliegveld bestudeerd. Allereerst is een wiskundig model ontwikkeld voor een zeer grote 'mat'-achtige constructie. De dikte van het platform is van de orde van twee tot tien meter. Dit betekent dat we het platform kunnen beschouwen als een vrij-oppervlak op het ongestoorde wateroppervlak waar voldaan moet worden aan de elastische interactievergelijkingen. Deze vergelijkingen worden vereenvoudigd tot de dunne plaat-vergelijkingen. De volgende stap is het afleiden van een vergelijking waarmee zowel het dynamische watergedrag als de elastische interactie voor positie van de plaat beschreven worden. In het rechterlid

¹source: Japan Atlas

van de vergelijking staat de opwekkende kracht, waar de waterdruk een rol speelt. In deze druk speelt de lokale snelheid van het water een rol. Met behulp van een bekend theorema (Green) kunnen we een integraal-differentiaalvergelijking afleiden voor de onbekende positie van het platform. In deze vergelijking speelt de invloedsfunctie, die voldoet aan de vrije-vloeistofoppervlakteconditie, een rol. Er zijn verschillende versies van deze functie beschikbaar, die allemaal dezelfde functie beschrijven. Voor een directe numerieke aanpak maakt het niet uit welke versie gekozen wordt. Het beïnvloedt slechts de numerieke efficiëntie. Voor een analytische behandeling is een specifieke keuze van essentieel belang. In het werk van Guéret is gekozen om de vergelijkingen numeriek op te lossen. In het werk van Andrianov wordt voor een aantal geometrische vormen de vergelijking analytisch behandeld. De numerieke aanpak geeft ook een nieuwe manier om de interactie van golven met elastische dunne schepen op te lossen.

De numerieke methode om het totale probleem in een keer op te lossen is efficiënter dan de klassieke multi-mode aanpak zoals gebruikt wordt in scheepshydrodynamica. Deze methode is ook gebruikt om voor een dun elastisch vaartuig met een drie-dimensionale geometrie de bewegingen samen met de elastische vervormingen te berekenen.



Point disturbance moving below and at critical speed

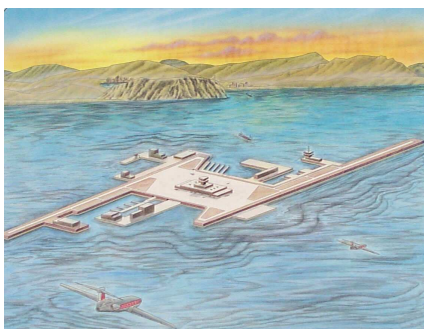
Een belangrijk aspect bij het ontwerpen van een groot drijvend vliegveld is het effect van een landend of opstijgend vliegtuig op de vervorming van het oppervlak. Niet alleen het lokale gedrag is van belang, maar in het bijzonder de voortplanting van de stoorgolf over het oppervlak. Wiskundig kan dit probleem gereduceerd worden tot het numeriek berekenen van een ingewikkelde dubbelintegraal met een snel oscillerende integrand.

Een ander concept voor een drijvend vliegveld is een platform met een groot luchtkussen dat zich uitstrekt over het hele gebied. Een bekend mechanisch probleem in off-shore engineering is dat op grote objecten grote momenten en spanningen

werken. Een constructie met een luchtkussen kan dit probleem grotendeels voorkomen, aangezien de luchtdruk van de ingesloten lucht nagenoeg constant is in de luchtkamer en op die manier worden de krachten en momenten gemiddeld over een groot oppervlak. Het luchtkussen werkt als een lineaire veer met een gunstig effect op het gedrag van de constructie. Er zijn echter ook een paar nadelen. Zo wordt o.a. de statische stabiliteit ongunstig beïnvloed en kunnen er staande golven ontstaan in de luchtkamers. Het gedrag van zo'n platform onder invloed van golven is duidelijk verschillend van die van conventionele constructies. Onze berekeningen komen zeer goed overeen met resultaten verkregen uit experimenten uitgevoerd in het bassin van de sectie scheepshydrodynamica van de universiteit. Ze kunnen dus gebruikt worden voor ontwerpdoeleinden.

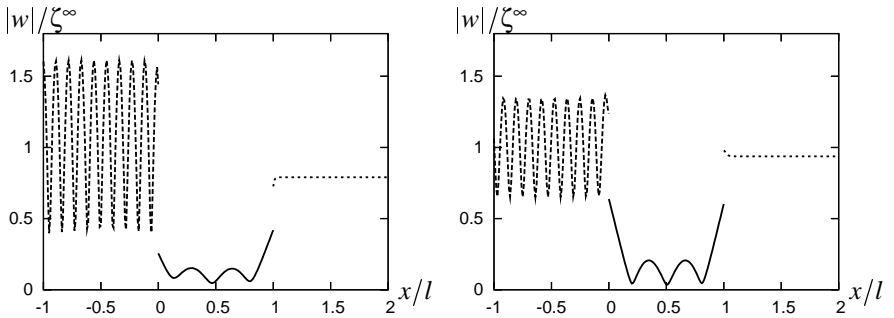
Een hoofdstuk van het proefschrift van Guéret is gewijd aan de interactie van golven met een grote verticale cylinder bevestigd op de zeebodem. Hier wordt een modale ontwikkeling geconstrueerd voor elastische schaalconstructies. De modes die gebruikt worden zijn de eigenmodes van het snelheidsveld in het water, dus niet de eigenfuncties van de schaalvergelijkingen. Met deze nieuwe aanpak worden snel convergerende ontwikkelingen verkregen.

In het proefschrift van Andrianov wordt de interactie van golven met verschillende platformgeometriën bestudeerd. Deze studie heeft ten doel om een analytische oplossingsmethode te ontwikkelen waarmee voor een aantal vormen nauwkeurige berekeningen uitgevoerd kunnen worden. Er wordt gekeken naar rechthoekige en cirkelvormige platforms. Deze nieuwe aanpak is gebaseerd op de eerder genoemde integraal-differentiaalvergelijking. Er worden drie modellen voor de waterdiepte met ieder hun eigen aanpak bestudeerd, namelijk ondiep water voor drijvende constructies dicht bij de kust, de meest voorkomende eindige waterdiepte en het van theoretisch belang zijnde oneindig diep water.



Artist impression and prototype of floating airport

Allereerst wordt het algemene model afgeleid voor het platform waarbij de dikte verwaarloosd wordt. Daarna wordt de halfoneindige plaat en een oneindig lange strip beschouwd, waarbij de golven onder een hoek invallen. Beide problemen worden omgezet in een twee-dimensionaal probleem. Voor deze problemen is het mogelijk om met behulp van analytische methodes de integraal-differentiaal-vergelijking, nadat de dispersie-relatie voor de golven in de plaat gevonden is, tot een stelsel lineaire algebraïsche vergelijkingen te reduceren. De koppeling met het watergebied gebeurt automatisch door middel van het theorema waar we de afleiding mee begonnen zijn. Een standaardroutine wordt gebruikt om de resterende vergelijkingen op te lossen. Door het exponentiële gedrag van ontwikkelfuncties is het voldoende hooguit twintig termen in rekening te brengen om een geconvergeerd resultaat te krijgen. Berekeningen laten een perfecte overeenkomst zien met de paar resultaten die in de literatuur beschikbaar zijn.



Deflection and water height of a strip with (left) zero and (right) four meter draft

Vervolgens wordt een cirkelvormige en ringvormige plaat beschouwd. De analytische manipulaties om een geschikt stelsel algebraïsche vergelijkingen te krijgen is een verre van triviale uitbreiding van het vorige geval. Een zorgvuldige asymptotische analyse van de ontwikkelfuncties en het behandelen van de resterende integralen in het complexe vlak leiden tot een geschikt stelsel vergelijkingen. Er worden resultaten getoond van de vervorming van de plaat en van de hoogte van de verstoring van het niveau van het water. In het geval van de ring laten we zien dat er bij bepaalde frequenties resonantie van het waterniveau binnen de ring optreedt.

In het geval van een rechthoekige plaat wordt een schaduwgebied gegenereerd bij toepassing van de voorgaande methode. Dit houdt in dat er een lijn is waar een discontinuïteit van het veld optreedt. We laten zien dat met een zogenaamde grenslaag-methode we een continue oplossing kunnen verkrijgen. Deze correctie heeft slechts een lokaal effect.

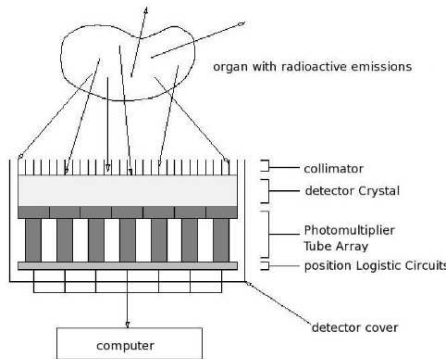
Tenslotte wordt er een methode ontwikkeld waarmee platforms met een eindige

diepgang beschreven kunnen worden. Hier wordt een storingsreeks met betrekking tot de kleine waarde van de diepgang gevonden. De resultaten tonen het effect op zowel het golfgetal als de amplitude van de uitwijking van het platform.

Medische Toepassingen

Digital filtering of scintigrams and an investigation into the application of the Fresnel zone plate in nuclear medicine by C.J.M. van den Berg (1976).

Op het gebied van diagnostiek is men geïnteresseerd in de uitwisseling, verdeling en opname van stoffen. De introductie van radioactieve tracers hebben veel van dit soort studies mogelijk gemaakt. Inwendige stralingsbronnen worden toegevend door middel van farmaceutica waaraan een radioactieve isotoop is gelabeld. Deze zogenaamde radiofarmaceutica, of tracers, worden geïnjecteerd, ingenomen of ingeademd. De radioactieve isotoop vervalt, hetgeen resulteert in het uitzenden van gammastralen. Deze gammastralen geven ons een beeld van wat er binnen het menselijk lichaam aan processen plaatsvinden. Als een radiofarmaceuticum toegevend wordt, is het noodzakelijk om de uitstraling van gammastralen waar te nemen om functionele informatie te verkrijgen.



Gamma camera-setup

Het instrument dat gebruikt wordt in de nucleaire geneeskunde voor het opsporen van gammastralen is bekend als de gammacamera. De componenten die gezamenlijk de gammacamera genoemd worden zijn de collimator, het detectiekristal, een reeks van lichtversterkers, de positiecircuits en een data-analysecomputer. De componenten zijn weergegeven in de figuur.

Ofschoon de verkregen computerbeelden directe projecties zijn van de gewenste

beelden is het moeilijk om details direct waar te nemen. Dit komt door verstoringen door een zeer hoog niveau van ruis. Het is daarom noodzakelijk om de beelden met behulp van wiskundige technieken te verbeteren. Als we een statische camera beschouwen is het beeld een twee-dimensionale projectie van een drie-dimensionaal patroon van het radioisotoop in het betreffende weefsel. Van den Berg heeft verschillende filterkeuzes bestudeerd om de kwaliteit van de informatie in de beelden te verbeteren. Een groot deel van het werk omvat de studie van een optisch instrument, de zogenaamde Fresnel-zoneplaat. Uiteindelijk geeft hij aanbevelingen om afhankelijk van de situatie een geschikt filter te kiezen. Onder supervisie van mijn collega Ephraïm zijn op het gebied van de nucleaire geneeskunde door verschillende onderzoekers een groot aantal richtinggevende studies uitgevoerd. Helaas werd hij een paar jaar later door een ernstige beroerte getroffen.

A single photon ECAT reconstruction procedure based on a PSF model, Ying-Lie O (1984).

Ook op het gebied van axiale emissie-computer-tomografie (ECAT), toegepast in de nucleaire geneeskunde, zijn geschikte correctiemethodes vereist. In dit proefschrift worden correctiemethodes voorgesteld voor de verzwakking, detectorresponse en Compton-verstrooiing. Mevrouw O heeft dit onderzoeksprogramma uitgevoerd aan de afdeling Nucleaire Geneeskunde van het UMC en met de steun van een Fulbright-beurs aan het Donner laboratorium in Berkeley. Een groot deel van het genereren van data en uitvoeren van experimenten is gebeurd aan de afdeling medische fysica van de University College in Londen.

De ontwikkelde methode is gebaseerd op een punt-spreiding-functie (PSF) methode. De parameters voor het model zijn verkregen door middel van experimentele en gesimuleerde data. Een aantal interessante conclusies kunnen worden getrokken.

Ten gevolge van het effect van Compton-verstrooiing en detector PSF leidt correctie voor verzwakking alleen tot overcompensatie. Toepassing van een PSF model blijkt een succesvolle aanpak om het oplossen van de transportvergelijking te reduceren tot het oplossen van een lineair probleem. Metingen, numerieke en Monte Carlo-simulaties zijn samen met theoretische studies van de fysische eigenschappen krachtige hulpmiddelen om het Compton-verstrooiingsproces te begrijpen. De intuïtieve aanpak van aftrek van het Compton-effect blijkt de effecten ten gevolge van Compton-verstrooiing aanzienlijk te verbeteren. Vooral de Compton-PSF is kleiner. De Compton-verstrooiing PSF hangt hoofdzakelijk af van de vorm van de collimator. Daarom zijn verbeteringen in het ontwerp en de constructie van de collimator van groot belang.

Toepassing van de reconstructieprocedure op gesimuleerde data geeft

bevredigende resultaten. Het algoritme heeft echter de neiging om ruis en vervorming van de data te versterken. Het valt daarom te bezien of de methode voor patientstudies bruikbaar is.

Longitudinal emission tomography of the thyroid and heart, J. W. van Giessen (1986).

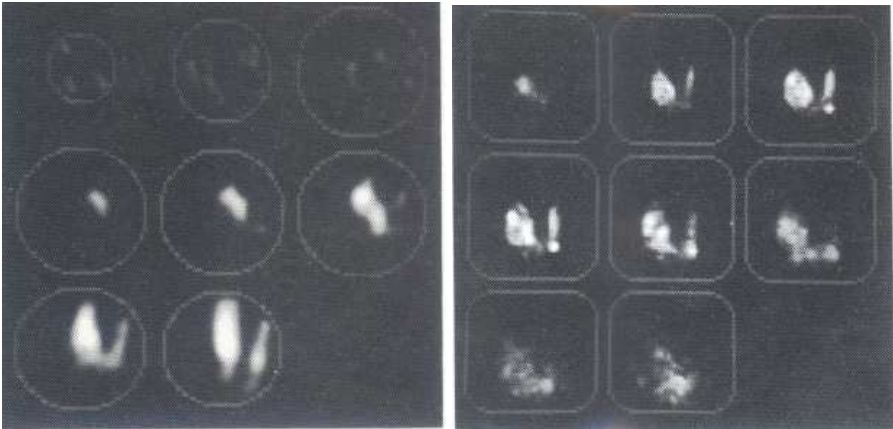
Na zijn promotie onder supervisie van mijn collega prof. J.J. Kalker kwam Max Viergever mijn groep versterken. De samenwerking met de sectie Nucleaire Geneeskunde van de Universiteit van Utrecht kwam nu onder zijn supervisie. Een van de projecten was het ontwikkelen van numerieke algoritmes voor de longitudinale-emissie-tomografie voor de schildklier en het hart.

In de nucleaire geneeskunde wordt voor tomografische beeldvorming meestal een roterende gammacamera met een parallelle gat-collimator gebruikt. Er ontstaat echter een probleem als er beelden gemaakt moeten worden van kleine organen, zoals schildklier en hart, die relatief dicht onder het huidoppervlak gelegen zijn. Om data met hoge resolutie te verkrijgen moet de camera dichtbij het orgaan staan. Voor de schildklier is het dus niet handig om de camera te roteren. We kunnen dan geen nauwkeurige informatie krijgen voor beeldvorming. In mindere mate geldt dit ook voor het hart. Er zijn daarom een aantal collimatoren ontwikkeld, die tomografische informatie verschaffen in combinatie met een statische cameraopstelling, waardoor de camera dichtbij het orgaan geplaatst kan worden. Het zal duidelijk zijn dat met een statisch systeem geen data verzameld kunnen worden over een hoek van 360 graden. De beperkte hoek en de ruis vormen een serieuze beperking voor het verkrijgen van drie-dimensionale beelden van de verdeling van radioactiviteit in het orgaan.

Dit onderzoek richt zich op de ontwikkeling van de collimator en reconstructie-software voor drie apparaten om tomografische beelden te verkrijgen met behulp van een statische camera. De volgende configuraties zijn bestudeerd:

- een zeven-gats collimator voor het maken van beelden van het hart.
- een nieuw ontwerp van een voor de schildklier geoptimaliseerde zeven-gats collimator.
- een tijdsgecodeerde collimator voor schildklierbeelden.

De wiskundige methode is het toepassen van een directe inversie van een zeer grote matrixvergelijking voor de onbekende sterktes van radioactief materiaal in de drie-dimensionale verdeling. Dit lijkt een eenvoudig probleem, maar dat is maar schijn. De grootte van de matrix is bijvoorbeeld 8232×868 . Dit houdt in dat een optimale oplossing gevonden moet worden. Dit kan in principe door middel van de Moore-Penrose gegeneraliseerde inversietechniek. Dit vergt zeer veel computer-capaciteit zoals in die tijd nog niet beschikbaar was. Daarnaast moet ook afgerekend



Images of a thyroid with two hot spots, left 7P and right TCA reconstruction

worden met een hoog ruisniveau in het rechterlid van de vergelijkingen. Daarom is gekozen voor een iteratieve methode. We laten een paar plaatjes zien van de reconstructie van de schildklier met twee hot spots van een 33-jarige patient. Links: 7P reconstructie (750 Kcounts verzameld in 20 minuten). Rechts: TCA reconstructie (6.0 Mcounts in 19 minuten).

Reversible compression of medical images by P. Roos (1991).

Dit project werd gesponsord door Philips Medical Systems. Het is voor een deel uitgevoerd in Delft en na de benoeming tot hoogleraar van Max Viergever voor een deel aan de Universiteit van Utrecht. Het doel van datacompressie is om op een efficiënte manier beelden weer te geven geschikt voor opslag en transmissie. Beeldgegevens kunnen met of zonder verlies opgeslagen worden (respectievelijk irreversibel of reversibel). Irreversibele compressie is veel efficiënter dan reversibele compressie, maar kan of mag niet altijd gebruikt worden. Zo kan verlies van informatie tot legale problemen leiden. Als de gecomprimeerde beelden bewerkt moeten worden kunnen compressieverliezen onacceptabel zijn.

Het blijkt dat reversibele compressie gebaseerd op twee-dimensionale hiërarchische interpolatie (HINT) en Huffman-codering zeer geschikt zijn voor de representatie van multi-modale twee-dimensionale beelden, tijdreeksen van twee-dimensionale beelden en meervoudige doorsneden van drie-dimensionale beelden.

Light transport for medical laser treatments by M. Keijzer (1993)

Lasers worden in verschillende medische disciplines gebruikt, zowel voor diagnostiek als behandeling. Licht dat gefilterd is door weefsel, bijvoorbeeld reflectie of fluorescentie, bevat diagnostische informatie over het weefsel en kan gebruikt worden om een ziekte op te sporen. Voor behandeling wordt de laser gebruikt als energiebron die beter selectief te gebruiken is dan andere bronnen. Dit kan op twee manieren bereikt worden. Allereerst kan de laser door gebruik te maken van bijvoorbeeld optische fibers zeer selectief werken op een specifiek doelvolumen. Daarnaast kan specifiek weefsel zoals bijvoorbeeld een ader veel geel laserlicht absorberen, terwijl weefsel in de omgeving dit slecht absorbeert.

Voor nieuwe behandelingen moeten we de golflengte van het licht, de totale opgenomen energie, de duur van de pulse en de diameter en profiel van de straal optimaliseren. Beide doelstellingen vergen kennis van de plek waar het laserlicht in het weefsel toegediend wordt. Hier wordt vaak naar verwezen als weefseloptica of lichtdosimetrie. In dit proefschrift wordt de nadruk gelegd op dosimetrie in twee- en drie-dimensionale configuraties.

Lichttransport door een verstrooiend medium wordt beschreven door de transportvergelijking. De algemene randvoorwaarden voor deze vergelijking wordt afgeleid. Inbegrepen zijn condities aan oppervlakken die de begrenzing vormen tussen twee verschillende soorten weefsel met verschillende fysische eigenschappen. De algemene transportvergelijkingen kunnen niet in gesloten vorm opgelost worden. In dit proefschrift worden twee methodes besproken waarmee benaderingen van de oplossing voor gecompliceerde configuraties verkregen kunnen worden. Dit zijn de Monte Carlo-methode en de diffusiebenadering gecombineerd met de eindige-elementmethode.

Een belangrijk verschijnsel waar aandacht aan wordt besteed is de invloed van random fluctuaties van een overigens homogeen medium met stuksgewijs constante parameters. We laten zien dat het gemiddelde van de *'fluency rate'* gelijk is aan de *'fluency rate'* in het medium met gemiddelde parameters. De standaardafwijking groeit echter bij toenemende afstand tot de lichtbron. Het ruisniveau neemt dus toe als het licht een grotere afstand door het medium aflegt. Dichtbij de bron is de voor-spelling dus het nauwkeurigst.

Micro- and macroscopic modelling of Boron Neutron Capture Therapy by C. Vroegindewey (1997).

"Boron Neutron Capture Therapy" (BNCT) is een kankertherapie waar onderzoek naar is gedaan. Deze therapie maakt gebruik van twee componenten, die elk slechts geringe schade toebrengen aan het weefsel. De eerste component is een stabiele

isotoop (^{10}B). Door middel van een daarvoor geschikte boriumdrager worden de boriumatomen geconcentreerd in de tumorcellen. De tweede component bestaat uit thermische neutronen met een lage energie. BNCT is gebaseerd op de nucleaire reactie tussen beide componenten. Een boriumatoom vangt een neutron in en vormt aldus een ^{11}B atoom. Dit atoom vervalt naar zijn grondtoestand, namelijk een ^7Li atoom onder uitzending van een α -deeltje. De totale energie die hierbij vrijkomt is 2.79 MeV. Deze α -deeltjes en Li-atomen hebben een weglengte die ongeveer gelijk is aan de diameter van de cel. Omdat deze weglengte zo klein is, wordt er alleen schade toegebracht aan de cellen waar het borium zich bevindt.

Naarmate men dieper in het weefsel komt neemt het aantal thermische neutronen snel af. Daarom is het moeilijk om voldoende neutronen in dieper gelegen tumoren te brengen. Om dit probleem te verhelpen worden epithermische neutronen gebruikt. Dit zijn neutronen met een hogere energie dan thermische neutronen. Deze epithermische neutronen verliezen energie door botsingen met weefsel, waardoor in de tumoren voldoende thermische neutronen aankomen. Tot nu toe kunnen geschikte neutronenbundels alleen gerealiseerd worden door onderzoeksreactoren. In 1987 is het Energieonderzoek Centrum Nederland (ECN) in een Europees samenwerkingsverband begonnen met het bestuderen van de mogelijkheid om patiënten met een hersentumor te bestralen bij de Hoge Flux Reactor (HFR) in Petten. Als ondersteuning van dit project zijn verschillende onderzoeken verricht om de therapie beter te begrijpen en die verder te ontwikkelen.

Dit proefschrift beschrijft theoretische modellen op drie verschillende gebieden:

- de ontwikkeling en het ontwerpen van een thermische faciliteit,
- de karakterisering van de neutronen- en fotonenbundel in een fantoom,
- de ontwikkeling van een microdosimetriemodel om de effecten van BNCT op cellulaire schaal te analyseren.

Voor research op het gebied van BNCT is het noodzakelijk om over een thermische neutronenfaciliteit te beschikken. Zo'n faciliteit was in Petten echter niet beschikbaar. Er is onderzocht hoe de lage flux reactor (LFR) in Petten als thermische faciliteit te gebruiken is. Het ontwerp van de faciliteit is gebaseerd op een optimalisatie met betrekking tot een biologische responsfunctie. De berekening van het neutron- en fotontransport is uitgevoerd met behulp van een Monte Carlo-code. Na realisatie van de faciliteit zijn de berekende parameters vergeleken met gemeten waarden. De berekeningen komen iets hoger uit. Deze verschillen zijn acceptabel mede gelet op de onzekerheden in het mathematisch model en de ingewikkelde calibratie van de LFR bij lage energie.

Het tweede deel van het onderzoek richt zich op het proces in het weefsel. Er is niet veel bekend van de omzetting van micro-dosimetrie resultaten van BNCT in therapeutische effecten. Er zijn micro-dosimetrie berekeningen uitgevoerd voor het beschrijven van de energieafgifte van het boron en de invang-reactie. Om het

effect op het weefsel te bepalen is een *'hit-size-effectiveness'* functie gedefinieerd, die de waarschijnlijkheid weergeeft dat een cel gedood wordt als een functie van de energie. Deze functie wordt daarna gebruikt om de berekende microscopische data om te zetten in verschillende radiobiologische grootheden. Er wordt hier een methode gepresenteerd om deze functie uit gemeten overlevingsfracties en berekende spectra in het model voor de micro-dosimetrie te bepalen.

Ofschoon de wiskundige modellering gebaseerd is op tamelijk vage begrippen, waar toeval een belangrijke rol speelt, is het verbazingwekkend dat de resultaten redelijk goed met experimentele waarnemingen overeenkomen. De resultaten geven meer inzicht in de problemen en kunnen gebruikt worden voor de optimalisatie van de behandeling van patiënten..

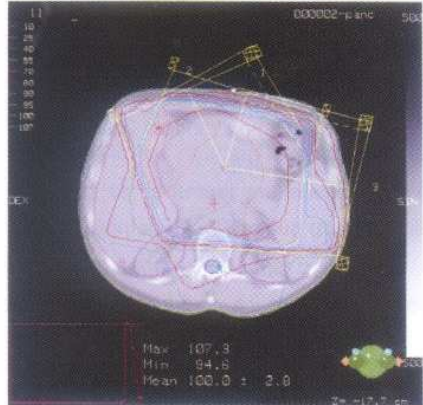
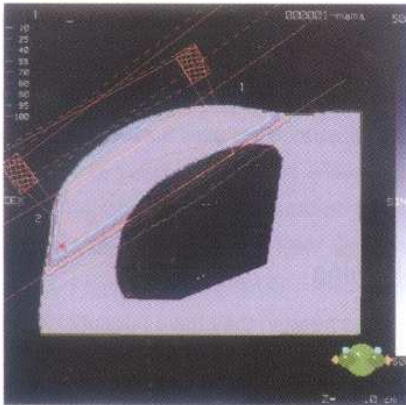
Calculation methods for the prediction of the absorbed dose in radiation therapy physics by P. Storchi (1999).

Radiotherapie met uitwendig opgewekte straling is een ingewikkelde behandeling met een lange en bewerkelijke voorbereidingsfase gevolgd door een behandelfase die zich over een aantal weken kan uitstrekken. Nauwkeurigheid van de bestraling speelt hierbij een belangrijke rol. De nauwkeurigheid, noodzakelijk voor een effectieve behandeling, slaat op verschillende delen van de behandeling. Eerst is er de lokalisatie van de tumor en het vaststellen van het te behandelen gebied. Daarna is er het fixeren van de patient ten opzichte van het behandelingsinstrument. Een goede fixatie van de patient is noodzakelijk om dag na dag de bestraling te kunnen reproduceren in overeenstemming met het behandelplan. Tenslotte is er de voorspelling van de dosisverdeling in de patient, of de a-priori kennis van de energie opgenomen ten gevolge van de bestraling in ieder deel van de bestraalde patient. Het belang hiervan is evident vanwege het feit dat straling niet alleen tumorcellen beschadigt, maar ook gezonde cellen van het omliggende weefsel. Met een nauwkeurige voorspelling van de dosisverdeling kunnen de behandelingsparameters bepaald worden om een optimaal resultaat te verkrijgen. Dit deel van de voorbereidingen voor uitwendige bestraling, samen met de dosisverdeling, wordt het behandelplan genoemd.

Door het grote aantal in te stellen parameters wordt de planning zeer gecompliceerd. Dit kan nauwelijks nog met de hand uitgevoerd worden en de computer moet gebruikt worden om de uiteindelijke optimalisatie uit te voeren. Er moeten efficiënte berekeningen uitgevoerd worden voor het bepalen van de dosis met een zekere parameterinstelling.

Dit project, waarbij nieuwe procedures worden ontwikkeld, maakt deel uit van een langlopend project bij de Dr. Daniel den Hoed Kliniek in Rotterdam.

Voor radiotherapieplanning van fotonenbundels zijn de meest succesvolle methodes gebaseerd op de convolutie van *'pencil beams'*. Gewoonlijk worden



'pencil beams' berekend met behulp van de Monte Carlo-methode, toegepast voor het transport van mono-energetische fotonenbundels in een waterfantoom. Deze berekeningsmethode is onderdeel van het commerciële planningsysteem CadPlan, dat veel in de klinische praktijk wordt gebruikt. De nauwkeurigheid van deze methode is zeer hoog voor homogene vlakke fantomen, ook in het geval van onregelmatige velden en niet-uniforme bundels. In de klinische praktijk met onregelmatige oppervlakken en heterogeniteiten zoals botten, longen en holttes gevuld met lucht is de nauwkeurigheid stukken minder, maar in de meeste gevallen acceptabel. De belangrijkste reden voor de onnauwkeurigheid is dat verschillende aspecten niet gezamenlijk meegenomen worden, maar alsof ze onafhankelijk van elkaar zijn. Omdat de nauwkeurigheidseisen strenger worden bij externe radiotherapie moeten in de toekomst nieuwe rekenmethodes gebruikt worden. In dit proefschrift worden een aantal verbeterde modellen en rekenmethodes gepresenteerd. Het proefschrift is geschreven rond een aantal artikelen, die verschenen zijn in wetenschappelijke tijdschriften.

Golven in elastische media en signaalanalyse

The multi-scale and wavelet transform with applications in well log analysis by P.L. Vermeer (1992).

Dit project is bij het Koninklijke Shell Exploration and Production Laboratorium te Rijswijk uitgevoerd in samenwerking met Jos Alkemade.

Een gemeten signaal kan een bepaald globaal gedrag vertonen met daarop gesuperponeerd lokale verschijnselen, bijvoorbeeld een trend met enkele hoog-frequente oscillaties. Het kan ook zijn dat de frequentie van het signaal behoorlijk varieert als functie van de tijd. In beide gevallen geeft bijvoorbeeld een Fourier-transformatie een slechte beschrijving van het signaal. De meerschalen-transformatie en wavelet-transformatie zijn speciaal ontwikkeld om dit probleem op te lossen.

De meerschalen-segmentatiemethode wordt hier toegepast op de analyse van 'well-logs'. Een well-log is een meting van een zekere fysische grootheid in een boorgat. Voorbeelden van zulke fysische grootheden zijn natuurlijke gammastraling, de snelheid van het geluid of de specifieke dichtheid. Er is een signaal-matching-methode ontwikkeld en getest voor signalen die verschoven, opgerekt en/of gecomprimeerd ten opzichte van elkaar kunnen zijn. Er zijn experimenten op synthetische data uitgevoerd, waarbij de invloed van ruis en andere variaties bestudeerd zijn. Met deze methode zijn ook van elkaar verschillende well-log-signalen met elkaar vergeleken. Ofschoon deze well-logs in verschillende boorgaten in verschillende gebieden zijn verkregen kunnen ze vergelijkbaar gedrag vertonen, maar ook verschillen ten gevolge van andere geologische omstandigheden op de beschouwde locaties. Zo kunnen bijvoorbeeld door een andere sedimentatiesnelheid de well-logs ten opzichte van elkaar uitgerekt of gecomprimeerd zijn. De resultaten van de experimenten laten zien dat als er een overeenkomst aanwezig is in de well-logs de matching-methode in staat is dit te detecteren, zelfs met well-logs van verschillende fysische grootheden.

Als uitbreiding van de matching-methode is een meerschalen-segmentatiemethode ontwikkeld die geschikt is om matching resultaten verder te behandelen. Op deze manier is het mogelijk te bepalen welke segmenten in de well-logs goed met elkaar overeenkomen. Deze segmenten corresponderen met segmenten in de well-logs zelf en ze hebben een behoorlijke lengte. Het blijkt dat een paar uitschieters geen invloed op het resultaat hebben en dat de meerschalen-methode goed kan worden toegepast om gelijkvormige logs op te sporen en dus een nuttige uitbreiding is van de meerschalen-segmentatie methode.

Nabije-opervlakte-effecten en beeldvorming

Deze groep proefschriften zijn een deel van het onderzoeksprogramma opgestart en begeleid door dr.ir. G.C. Herman, die van 1989 tot 2005 bij de sectie mathematische fysica werkzaam is geweest. Gedurende zijn verblijf bij de sectie heeft hij verschillende onderzoeksprojecten opgestart, onder andere het project: *'Techniques for shallow imaging and removal of near-surface effects'*.

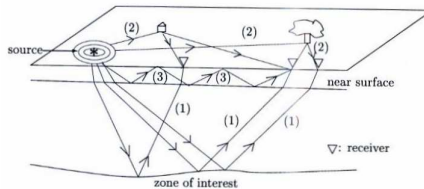
Removal of scattered surface waves from seismic data by B. Blonk (1995).

Modelling, imaging and removal of guided waves by F.E. Ernst (1999).

Imaging and suppressing near-receiver scattered seismic waves by X.H. Campman (2005).

Modelling and inversion of scattered surface waves by C.D. Ryanti (2005).

Bij de exploratie van hydrocarbons is gedetailleerde kennis van de ondergrond noodzakelijk om te voorkomen dat er tevergeefs geboord wordt. De seismische weerkaatsingsmethode is de meest gebruikte methode om een beeld te krijgen van de ondergrond. Een bron op of nabij het oppervlak veroorzaakt een seismisch golfveld dat zich voortplant door de aarde. Als de materiaaleigenschappen veranderen, weerkaatsen de golven. Dit kan bijvoorbeeld optreden aan het scheidingsvlak van twee soorten rots. De gereflecteerde golven worden geregistreerd aan het oppervlak en kunnen daarna bewerkt worden om een beeld van de ondergrond te verkrijgen.



Echter golven die gegenereerd worden aan het oppervlak planten zich niet alleen voort in de diepte. Een groot deel van de energie wordt ingevangen aan of nabij het oppervlak. De term 'geleidingsgolf' wordt gebruikt voor iedere golf die ingevangen wordt in lagen nabij het oppervlak. Voorbeelden van geleidingsgolven, die van belang kunnen zijn voor het verwerken van land-data, zijn oppervlaktegolven van het Rayleigh type. Deze golven geven een sterk signaal en kunnen na verstrooiing ongeveer tegelijkertijd bij de ontvangers arriveren als de gezochte weerkaatsingen in diepere lagen. Zowel directe als verstrooide geleidingsgolven zijn een belangrijke bron van, door het *shot* gegenereerde, coherente ruis in seismische data. Ze moeten uit het signaal

verwijderd worden voordat dit verder verwerkt kan worden. In dit project worden een aantal methodes ontworpen voor het verwijderen van golven die nabij het oppervlak verstrooid worden. Hierbij worden verschillende situaties bekeken.

Voor het geval van oppervlaktegolf-oppervlaktegolf verstrooiing leidt Blonk een efficiënte methode af op basis van Rayleigh-golven in een homogene achtergrond, waarbij de verstrooiers nabij het oppervlak verdeeld zijn. Ernst beschouwt hetzelfde probleem, maar nu met een lateraal variërend medium. Het toestaan van variaties in de achtergrond maakt het probleem veel gecompliceerder en om de theorie handelbaar te houden voor grootschalige problemen benadert Ernst de belangrijkste bijdrage met behulp van een scalaire aanpak.

Om de strooigolven te modelleren maakt Blonk eerst een schatting van de verdeling van nabij het oppervlak gelegen verstrooiers. Dit is een inversieprobleem dat opgelost wordt door een kostenfunctie te minimaliseren. Deze bestaat uit het kwadraat van het verschil tussen het waargenomen verstoorde veld en het gemodelleerde veld. Om de data voordat ze gebruikt worden geschikt te maken wordt eerst de ongestoord aankomende Rayleigh-golf verwijderd, zodat het signaal hoofdzakelijk nog uit verstoorde oppervlaktegolven bestaat. Dit signaal wordt nu voor de inversie gebruikt.

De methode ontwikkeld in het proefschrift van Ernst is een uitbreiding van het werk van Blonk. De formulering is algemener en is geschikt voor lateraal variërende media. Het achtergrond-model wordt dus niet meer beschreven met behulp van één parameter. In beide proefschriften wordt verondersteld dat de verstoorders op grote afstand van de ontvangers liggen.

Het doel van het werk van Campman en Ryanti is om verbetering van het veld te krijgen als de heterogeniteiten zich nabij de ontvangers bevinden. Dit betekent dat we rekening moeten houden met het veld dichtbij de verstrooiers in een gelaagd medium. In het voorgaande werk kon gebruikt gemaakt worden van de verre-veld eigenschappen van de golf. Hier worden echter dichtbij-ontwikkelingen van het veld gebruikt om dichtbij gelegen verstoorders goed te modelleren. Campman gebruikt bij zijn berekeningen zowel metingen verkregen door middel van modelproeven, uitgevoerd in samenwerking met het Physical Acoustics Laboratorium aan de Colorado School of Mines, Schlumberger-data en data van Saudi Aramco, gemeten in de woestijn van Saoedi Arabië. Het computerprogramma en de theoretische uitbreidingen van de methode zijn ontwikkeld door Ryanti. Het blijkt dat de data aanzienlijk verbeterd kunnen worden als er verstrooiers in het nabije veld aanwezig zijn.

Asymptotic seismic inversion by G.J.A. Sevink (1996).

Hier wordt gezocht naar de optimale kwaliteit van het beeld ten opzichte van de kosten bij het oplossen van het inverse probleem. Gewoonlijk vereisen inverse methoden een zeer grote rekentijd. Er is een nieuwe pre-conditioneringsmethode ontwikkeld in de inwendige lus van het rekenschema. Deze pre-conditioner is afgeleid met behulp van een afbeeldingsmethode (Born-inversie) en versnelt de convergentiesnelheid aanzienlijk ten opzichte van bestaande methodes. Deze nieuwe methode is gebaseerd op het minimaliseren van een geschikte foutennorm. Iedere iteratie in deze methode vergt ongeveer het dubbele van de rekentijd van een afbeeldingsmethode zoals Born-inversie. Als we echter de resultaten vergelijken blijkt dat met een redelijke toename van de rekentijd de resolutie aanzienlijk verbeterd is.

Acoustic waves in cracked media, by A.J.H. Muijres (1998).

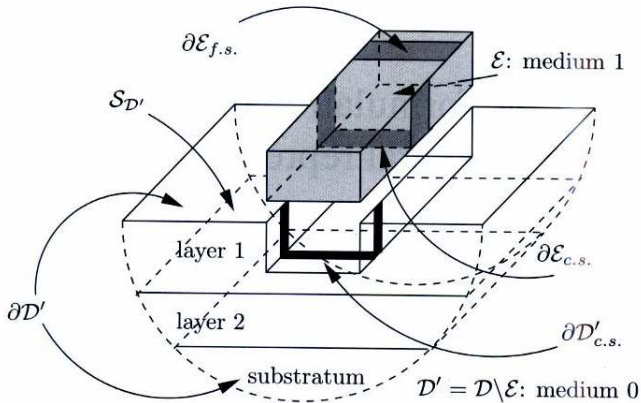
Muijres bestudeert de voortplanting van akoestische golven in een medium, dat een groot aantal kleine versturende objecten bevat. Hij beschouwt in een onbegrensd homogeen medium verschillende soorten verstrooiende objecten zoals breukvlakken en doordringbare heterogeniteiten.

Gebaseerd op een integraalvergelijking wordt een voorwaartse modellering voor de verschillende problemen afgeleid. Met behulp van geschikt gekozen ontwikkel-functies kan ieder type heterogeniteit in rekening gebracht worden, waarbij slechts één functie voldoende is. Op deze manier kunnen modellen, die veel verstoorders bevatten, beschouwd worden. Aangezien iedere afzonderlijke verstoorder goed in rekening gebracht wordt, is deze methode nauwkeuriger maar ook rekenintensiever dan de effectieve medium methode.

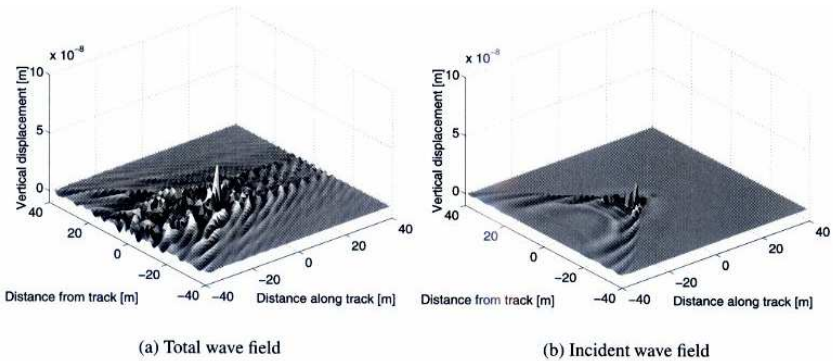
Als we doorgelaten velden verkregen in modellen met verschillende correlaties tussen breuken vergelijken, zien we dat ruimtelijke correlaties aanleiding zijn voor tweede-orde verstoringeffecten zoals dispersie. De frequentieafhankelijkheid bij effectieve-media methodes is geen aanleiding tot dit dispersiegedrag. Aangezien dispersieve snelheidsmodellen in tomografische experimenten gemeten kunnen worden, kan dit twee-dimensionale model informatie verschaffen over de aanwezigheid van kleine schaal heterogeniteiten en kleinschalige ruimtelijke verstoringen van het medium.

Train-induced ground vibrations: modeling and experiments by A. Ditzel (2003).

Met de introductie van de hogesnelheidstrein in dichtbevolkte gebieden maakt men zich zorgen over intensieve trillingen van de ondergrond. Deze trillingen kunnen schade toebrengen aan gebouwen en apparatuur in de nabijheid van het spoor. Tevens kan het ontstaan van een sterk golfveld de veiligheid van het



voertuig in gevaar brengen of schade toebrengen aan de bedding en de fundatie in de ondergrond. Omdat we in Nederland te maken hebben met een slappe bodem kan het trillingsniveau hoog zijn. Het kan gebeuren dat de trein sneller rijdt dan de snelheid van het geluid van de langzaamste golf in het medium. In dat geval kan het trillingsniveau zeer hoog zijn. In dit proefschrift wordt een methode ontwikkeld om



de door de trein veroorzaakte trillingen te berekenen. Het model is gevalideerd met behulp van data verkregen uit veldexperimenten.

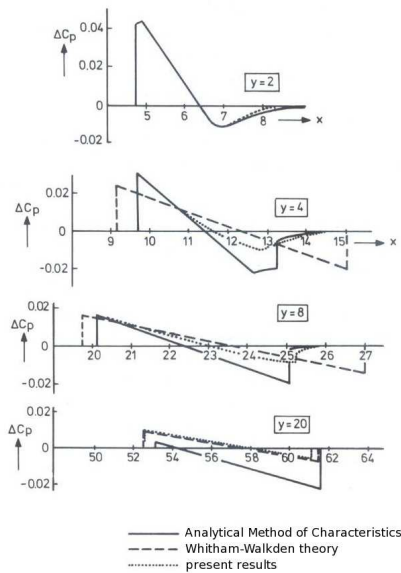
Het trillingsprobleem kan worden opgesplitst in vier subproblemen, namelijk de trilling van het voertuig, de spoorbaan, de bedding en de ondergrond. Hier wordt in hoofdzaak de trilling van de bedding en de ondergrond beschouwd. De interactie tussen het voertuig en de spoorbaan wordt bekend verondersteld en in het model weergegeven door een externe harmonische kracht. We veronderstellen dat oneffenheden in de spoorbaan en de wielen de bronnen zijn van een oscillerende beweging. Deze bronnen bewegen over een horizontaal gelaagde drie-dimensionale halfruimte. Het veld van een bewegende bron kan verkregen worden door het optellen van het golfveld gegenereerd door een niet bewegende bron. Ieder van deze bronnen wordt gecorrigeerd met de geschikte fase ten gevolge van snelheid en oscillerende beweging van de trein. Op deze manier kunnen we een domein-integraal-representatie van het golfveld maken. Met de zo bepaalde invloedsfunctie kan het uiteindelijke verstrooiingsprobleem als een integraalvergelijking geformuleerd worden. Deze vergelijking kan vervolgens numeriek opgelost worden. De resultaten komen goed overeen met experimentele gegevens.

Verskillende onderwerpen uit de stromingsleer

A method of characteristic surfaces by Th.P.M. Hendriks (1981).

Het is algemeen bekend dat de schokgolf veroorzaakt door een vliegtuig met een snelheid groter dan de geluidssnelheid een van de redenen is dat dit soort commerciële vluchten niet populair zijn. De vaak gehoorde opmerking '*door de geluidsbarrière gaan*' leidt bij het publiek tot misverstand over dit verschijnsel. Mijn collega prof. S.F.A.H.P. Erdmann van het laboratorium voor hoge snelheid aerodynamica heeft lange tijd naar middelen gezocht om deze supersone knal te verminderen. Echter de theorie van Whitham en Walkden zegt dat een drie-dimensionaal object met of zonder lift-kracht leidt tot een drukverdeling die een supersone knal veroorzaakt. Door middel van een equivalent rotatiesymmetrisch lichaam kan dezelfde verre-velddrukverdeling beschreven worden. Dit betekent dat er altijd een supersone knal zal zijn en dat deze bepaald wordt door de verdeling van het doorsneden oppervlak en de lift-kracht. Aangezien dit niet hard bewezen was, is men lange tijd op zoek geweest naar configuraties die hier niet aan voldoen. Een twee-dimensionaal vleugelprofiel met lift is een configuratie die duidelijk niet aan de door de theorie gestelde eisen voldoet. Oswatitsch, een voormalige collega van Erdman, heeft samen met Sun aan de Universiteit van Aken laten zien dat zo'n twee-dimensionaal profiel op grote afstand geen sonische knal veroorzaakt. Je zou kunnen zeggen dat de compressie-golf veroorzaakt aan de voorkant opgegeten wordt

door de expansie-golf veroorzaakt door de achterkant. De vraag is nu of deze theorie uitgebreid kan worden naar een drie-dimensionale configuratie en hoe het resultaat dan vergeleken kan worden met het resultaat van Whitham-Walkden. De theorie van Oswatitsch is gebaseerd op een twee-dimensionale karakteristieken-methode. In de gelineariseerde supersone stromingstheorie plant de verstoring van de stroming zich voort langs rechte lijnen, waarvan de richting bepaald wordt door het Mach-getal van de ongestoorde stroming. De aanpak van Oswatitsch is gebaseerd op een soortgelijk idee. De voortplantingsrichting wordt echter bepaald door de snelheid ter plekke. Er moeten schokgolven geïntroduceerd worden indien deze karakteristieken elkaar snijden. Dit is het geval voor de lijnen gegenereerd aan de tip van het profiel. Aan de achterzijde wordt een expansie-golf gegenereerd. Op eindige afstand van het profiel interfereren de compressie- en expansiegolf met elkaar, waardoor de schokgolf van de voorkant afzwakt en uiteindelijk verdwijnt.



Hendriks heeft een soortgelijke weg gevolgd voor het drie-dimensionale geval. In plaats van voortplanting van de verstoring langs lijnen gebeurt dit nu langs kegels. Deze kegels moeten nu vervormd worden ten gevolge van de lokale snelheid. Als er een verstoring langs een willekeurige lijn gegeven wordt, verplaatsen de verstoringen zich langs het omhullend oppervlak van deze kegels. Het idee is nu om deze correctie-procedure numeriek uit te voeren. We beginnen met een lijn

met verstoringen en verplaatsen deze een klein stukje over de omhullende van de kegels waarvan de tophoek bepaald wordt door de lokale snelheid. Op de nieuwe positie wordt dit proces herhaald. Op deze manier wordt de eindigheid van het object vanzelf in rekening gebracht. Voor het geval van een deltavleugel laten we in de figuur de vergelijking zien van de hier verkregen resultaten met die van de theorie van Whitham en Walkden. We zien dat ten gevolge van de eindige afmetingen van de vleugel de verre-veld resultaten nagenoeg aan elkaar gelijk zijn. Zoals verwacht zijn de resultaten nabij de vleugel verschillend. In het proefschrift worden meer voorbeelden behandeld. Zo ontstaat er onder andere in het geval van een deltavleugel in een supersone stroming een schokgolf aan de bovenkant van de vleugel. Berekeningen met deze nieuwe methode geven de correcte positie en sterkte van deze golf.

Spreading of particles in some displacement probability field, R. Soerjadi (1986).

Geïnspireerd door het werk van mijn collega prof. G. de Josselin de Jong op het gebied van diffuse grondwaterstroming heeft Soerjadi een nieuwe wiskundige aanpak ontwikkeld. De afleiding van de vergelijking is gebaseerd op de hypothese dat het fysische verschijnsel vergelijkbaar is met de verspreiding van een wolk deeltjes. Aangezien de spreiding van deeltjes een random proces is, is het model een waarschijnlijkheidsmodel. Een belangrijke vraag is hoe men kennis van de fysica gebruiken moet in dit type modelvorming. Het is bekend dat waarschijnlijkheidsmodellen in verband gebracht kunnen worden met integraalvergelijkingen van het convolutie-type. De eigenschappen van het medium worden door de zogenaamde kernfunctie in rekening gebracht. Met behulp van een standaardtechniek kan deze vergelijking omgezet worden in een partiële differentiaalvergelijking van het diffusie-type. In dit proefschrift wordt een interessante uitbreiding gegeven resulterend in hogere-orde vergelijkingen. Zo kan bijvoorbeeld een heterogeen medium met een derde-orde vergelijking beschreven worden. In dat geval wordt de stroming a-symmetrisch. Er zijn een aantal numerieke experimenten uitgevoerd om te laten zien dat op deze wijze realistische simulaties verkregen kunnen worden.

Two-phase flow of Newtonian and non-Newtonian fluids in a porous medium applied to water coning by F.T.J. Floris (1991).

Dit project is uitgevoerd bij TNO in hoofdzaak onder supervisie van Hans van Duin, mijn latere collega aan de Technische Universiteit van Eindhoven.

Ruwe olie wordt gevonden in bekkens in de ondergrond. Vaak bevindt zich gas boven de olie en water onder de olie. Het scheidingsvlak tussen water en olie is

oorspronkelijk horizontaal. Als het oliereservoir aangeboord is en begonnen wordt met de winning van de olie, zijn aan het scheidingsvlak de viskeuze krachten die werken op de vloeistof direct onder de put groter dan op enige afstand. Het is wel zo dat aangezien water zwaarder is dan olie de zwaartekracht dit proces tegenwerkt. Lokaal komt het scheidingsvlak echter omhoog. Dit resulteert in het ontstaan van een kegel van water, hetgeen na verloop van tijd aanleiding kan zijn tot het winnen van water in plaats van olie.

We zijn geïnteresseerd in een optimale productie van olie. Het is daarom van belang te weten met welke snelheid de olie geproduceerd kan worden met een zo klein mogelijke kans op de productie van water. In dit proefschrift wordt een mathematisch model afgeleid waarmee de vorming van een waterkegel beschreven kan worden. Dit niet-lineaire model bevat een groot aantal fysische parameters waarmee het transport van olie en water in de bodem beschreven wordt en een beschrijving van de beweging van het scheidingsvlak. Het is een voordeel dat we voor het weergeven van dit verschijnsel slechts het lokale gedrag in rekening hoeven te brengen. De berekeningen laten een goede overeenstemming zien met bekende situaties. Dit soort lokale modellen kan gebruikt worden als onderdeel van de simulatie van een compleet reservoir met meerdere productieputten.

Water waves over uneven bottoms by M.W. Dingemans (1994).

Als senior onderzoeker bij het Waterloopkundig Laboratorium Delft in de Noord-Oost Polder heeft Dingemans veel originele resultaten op het gebied van voortplanting van watergolven verkregen. Dit heeft geresulteerd in een enorme stapel interne rapporten op dit gebied. Het proefschrift is een eerste versie van wat later een boek van meer dan duizend pagina's is geworden.

Het belangrijkste doel van het boek is een overzicht te geven van technieken, die beschikbaar zijn voor het beschrijven van golven in gebieden met variërende diepte. Bijvoorbeeld nabij de kust zijn variaties in de waterdiepte van grote invloed op de golfvoortplanting. De gepresenteerde technieken zijn in een ingenieursomgeving direct toepasbaar. Er wordt de nadruk gelegd op het precies formuleren van de onderliggende fysische principes, zodat de methodes geëvalueerd kunnen worden voor realistische problemen. Het eerste deel bestaat hoofdzakelijk uit lineaire golfvoortplanting en in het tweede deel worden methodes voor niet-lineaire problemen besproken. Het is niet mogelijk om hier alle onderwerpen aan de orde te laten komen. Ik beperk me daarom tot het maken van een paar opmerkingen over hoofdstuk vijf, waar Boussinesq-modellen voor ongelijke bodems besproken worden.

Golven planten zich voort in het horizontale vlak, de zogenaamde *propagatie-ruimte*. In de verticale richting, de zogenaamde *dwars-ruimte*, is het karakter van de oplossing totaal verschillend. De propagatie-ruimte en dwars-ruimte

zijn wel aan elkaar gerelateerd. Het doel van het onderzoek is om een scheiding van de propagatie-ruimte en de dwars-ruimte tot stand te brengen. In de lineaire golftheorie wordt voor een ongelijke bodem gebruik gemaakt van de verticale structuur van het vlakke bodem-probleem om vergelijkingen in het horizontale vlak af te leiden.

Voor het niet-lineaire probleem zijn echter geen vlakke bodem-oplossingen beschikbaar en zijn de twee ruimtes sterker aan elkaar gerelateerd dan in het lineaire geval. In het geval van lange golven is het snelheidsveld nauwelijks afhankelijk van de diepte-coördinaat. Het is daarom voor de hand liggend om een storingsaanpak te volgen waarbij gebruik gemaakt wordt van het feit dat de intrinsieke schaal van de golfbeweging, de golflengte, veel langer is dan de karakteristieke diepte. Dit beperkt echter ook de grootte van de mogelijke helling van de bodem. Onder bovengenoemde beperkingen kunnen de zogenaamde *Boussinesq-achtige* (1872) vergelijkingen afgeleid worden. Er is een hele klasse van Boussinesq-modellen en afhankelijk van de specifieke eigenschappen kunnen ze gebruikt worden voor bepaalde ingenieursproblemen. Er wordt aandacht besteed aan de uitbreiding van dit soort modellen naar dieper water. Hierbij moet in ieder geval gezorgd worden dat de zogenaamde *dispersie*-relatie in het model zo goed mogelijk overeenkomt met de werkelijke situatie. Dit houdt in dat naast de golfsnelheid, de snelheid van de golftop, ook de voortplantingssnelheid van de golfenergie correct weergegeven moet worden. Een aantal van de uitgewerkte ideeën zijn oorspronkelijk door Dingemans bedacht en worden tegenwoordig door andere onderzoekers gebruikt.

In het daarop volgende hoofdstuk worden zogenaamde één-richting golfvoortplantingsmodellen gepresenteerd. De bron van dit soort modellen is het originele artikel van de Amsterdamse onderzoekers *Korteweg* en *de Vries* (1895). Het is interessant om te zien dat moderne ontwikkelingen nog steeds gebaseerd zijn op dit klassieke artikel; er wordt naar gerefereerd als KdV.

The aerodynamics of horizontal axis wind turbine rotors explored with asymptotic expansion methods by G.J.W. van Bussel (1995).

Gedurende ruim twintig jaar is er veel aandacht voor het gebruik van windenergie. In tegenstelling tot de vroegere toepassingen is nu de aandacht in hoofdzaak gericht op de opwekking van elektriciteit. Dit vereist de ontwikkeling van een totaal nieuwe generatie windmolens of windturbines zoals ze tegenwoordig genoemd worden. De rotorbladen worden ontworpen met behulp van moderne aerodynamische inzichten. Men kan vaak gebruikmaken van de kennis en ervaring opgedaan in de vliegtuig-aerodynamica. Er zijn echter een aantal belangrijke verschillen tussen beide toepassingen. Dit maakt het noodzakelijk om een nieuwe tak van de aerodynamica te ontwikkelen, de zogenaamde windturbineaerodynamica.

Een belangrijk verschil met de klassieke vliegtuigaerodynamica is het feit dat

windturbines constant blootgesteld worden aan sterk wisselende wind, zoals wordt aangetroffen in de onderste 150 meter van de atmosferische grenslaag. Grote wisselingen in de windsnelheid geven gelijksoortige wisselingen in de dynamische belasting van de windturbine. Vooral de bladen van de rotor ondervinden een sterk fluctuerende belasting.

Aangezien experimenteel onderzoek veel tijd vergt en arbeidsintensief is, wordt gebruik gemaakt van omvangrijke aerodynamische berekeningsmethodes. Zulke methodes zijn echter zeer complex en vergen een grote computerinspanning.

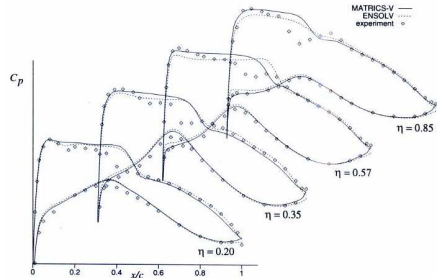
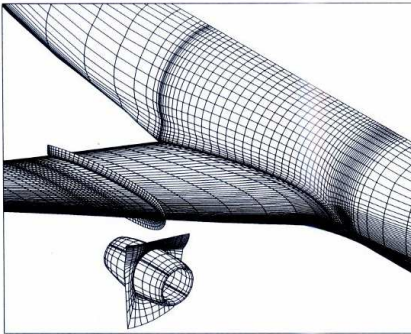
Het werk in dit proefschrift is uitgevoerd bij het instituut voor windenergie aan de Universiteit van Delft en is gebaseerd op de versnellingspotentiaaltheorie, waarbij gebruik gemaakt wordt van lokale asymptotische ontwikkelingen. De ontwikkelde numerieke codes maken het mogelijk om de belasting van de bladen en de lokale snelheidsverdelingen zeer gedetailleerd te bepalen. De berekeningen vergen niet veel computerinspanning, zodat ze op een gewone PC uitgevoerd konden worden.

Uiteindelijk is er een grote overeenstemming tussen berekende en experimentele resultaten. Daarnaast is het van groot belang dat er met behulp van de stromingsberekeningen veel gedetailleerde informatie verkregen kan worden.

An industrially, applicable solver for compressible, turbulent flows by J.C. Kok (1998)

Dit project is uitgevoerd bij het Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium (NLR), hoofdzakelijk onder leiding van mijn collega prof. J.W. Boerstoel. In dit proefschrift wordt een computerprogramma voor de stationaire samendrukbare Reynolds-gemiddelde Navier-Stokes stromingsvergelijkingen besproken. De solver is bedoeld voor industriële toepassingen, in het bijzonder voor het simuleren van samendrukbare, turbulente stromingen rond vliegtuigen van het transport-type. Het doel is om het voortstuwingssysteem met de vleugel en romp te integreren. Het startpunt voor de nieuwe solver is een bestaande solver voor stationaire, samendrukbare wrijvingsloze Euler stromingen. Viskeuze en turbulentie effecten worden in rekening gebracht met behulp van, in een dunne laag werkende, Reynolds-gemiddelde Navier-Stokes vergelijkingen en algebraïsche turbulentie modellen. Op deze manier wordt de grenslaag van de vleugel en het effect hiervan op de drukverdeling op de vleugel in rekening gebracht.

De reeds bestaande Euler solver is algemeen geaccepteerd en wordt intensief in de industrie gebruikt. Het is daarom belangrijk om deze methode en software maximaal voor deze uitbreiding te hergebruiken. De solver is gebaseerd op het gebruik van een multi-blok verdeling van het rekenrooster, zodat willekeurige geometrische vormen behandeld kunnen worden. Voor een recht toe recht aan toepassing zijn verschillende verbeteringen, zoals bijvoorbeeld het gebruik van een multi-grid schema



en een multi-blok schema, noodzakelijk. Er wordt ook aandacht besteed aan een robuuste numerieke implementatie van het algebraïsche turbulentiemodel.

Tenslotte wordt gekeken naar de numerieke nauwkeurigheid en wordt de toepasbaarheid op een typisch transportvliegtuig getoond.

Elastische trillingen van slanke constructies

Dit project is een deel van het *'Indonesië project'*, oorspronkelijk gestart door Adriaan van den Burgh. Ik ben betrokken geraakt bij de afronding van het project. De eerste twee promoties zijn begeleid door Wim van Horssen en de laatste door Timber Haaker. De drie behandelde onderwerpen hebben betrekking op trillingen van mechanische systemen.

On Asymptotic approximations of first integrals for a class of nonlinear oscillators by S.B. Waluya (2003).

A mathematical analysis of a belt system with a low and time-varying velocity by G. Suweken (2003).

Aero elastic oscillations of several types of seesaw oscillators by H. Lumbantobing (2003).

Waluya heeft een klasse van niet-lineaire trillingsvergelijkingen bestudeerd. Er worden asymptotische ontwikkelingen van eerste integralen voor niet-lineaire differentiaalvergelijkingen geconstrueerd, waarbij gebruik gemaakt wordt van storingsmethodes toegepast op integrerende vectoren.

Het bestaan en de stabiliteit van periodieke oplossingen kunnen bepaald

worden met behulp van deze asymptotische benaderingen van de eerste integralen en de oplossingen van de trillingsvergelijkingen. Zowel autonome als niet-autonome vergelijkingen worden behandeld. In combinatie met een fase-vlak analyse en een door Poincaré geïntroduceerde afbeeldingstechniek geven de huidige storingsmethodes goed inzicht in het globale gedrag van de oplossingen van de oscillatorvergelijkingen.

Alle niet-lineaire vergelijkingen die hier bestudeerd worden zijn eenvoudige modellen waarmee oscillaties van bovengronds hangende elektriciteitsleidingen, waarop zich ijs heeft afgezet, beschreven kunnen worden.

Suweken geeft in zijn proefschrift een wiskundige analyse van een model waarmee de transversale trillingen van een transportband beschreven kan worden. Verondersteld wordt dat de snelheid van de band varieert in de tijd en klein is met betrekking tot de golfsnelheid in de band. Er worden niet alleen lineaire snaar- en balk-achtige maar ook niet-lineaire modellen bestudeerd. In alle gevallen worden beginwaardeproblemen geformuleerd en daarna geanalyseerd met behulp van meer-tijdschalenmethodes. Er worden formele benaderingen van de oplossingen gemaakt. Voor verschillende waarden van de parameters van de transportband wordt getoond of er al dan niet interactie tussen de trillingsvormen plaatsvindt. Voor een paar lineaire modellen vertonen de oplossingen instabiel gedrag. Dit verschijnsel verdwijnt echter als niet-lineaire termen in het model in rekening gebracht worden. Hij laat zien voor welke waarden van de parameters in de niet-lineaire modellen een vereenvoudiging van de formulering al dan niet bereikt kan worden met behulp van zogenaamde Kirchhoff aannames.

Lumbantobing bestudeert door wind geïnduceerde trillingen van slanke constructies, '*galloping*' genaamd. Dit zijn laag-frequente zelf-opgewekte trillingen, hoofdzakelijk loodrecht op de luchtstroming. Het mechanisme van zelf-excitatie is het onttrekken van energie aan het windveld door wisselende aero-elastische krachten. Deze krachten kunnen de beweging van de kabel versterken resulterend in een aan-groeiende beweging. Niet-lineaire effecten begrenzen dit verschijnsel, zodat een stabiele oscillatie met een eindige amplitude het resultaat is. Als de amplitude toeneemt met de windsnelheid is *galloping* een potentieel gevaar. Ijsafzetting op de kabel kan dit verschijnsel veroorzaken. Het verandert de bijna cirkelvormige doorsnede van de kabel en daardoor de aerodynamische eigenschappen zodat de aero-elastische krachten nu de oscillaties versterken. Dit kan ook optreden bij grote constructies zoals gebouwen, schoorstenen, torens en bruggen. Ook hier kan *galloping* optreden. In het proefschrift worden verschillende uitbreidingen van de zogenaamde *wiposcillator*-modellen gepresenteerd en geanalyseerd. Er worden een aantal praktische suggesties besproken om grote *galop*bewegingen te dempen.

4 Slotwoord

Allereerst ben ik dank verschuldigd aan de leidinggevenden van de universiteit en faculteit. *U heeft mij altijd de vrijheid gegeven om mijn wetenschappelijk onderzoek naar eigen inzichten in te vullen.*

Ook de collega's waar ik prettig mee heb samengewerkt in commissies, de faculteitsraad en het bestuur dank ik van harte.

Zonder de steun van de medewerkers verbonden aan de leerstoel Mathematische Fysica, zoals mijn leerstoel in de loop der jaren is gaan heten, zou het niet mogelijk geweest zijn mijn taken naar behoren te vervullen. Henric Corstens, Kees Korving en Marleen Keijzer hebben een belangrijk deel van het groepsgebonden en dienstverlenend onderwijs verzorgd. Max Viergever, die opgevolgd werd door Gerard Herman en Wim van Horssen, die een paar jaar geleden aan mijn sectie werd toegevoegd, hebben naast hun onderwijstaken voor een belangrijk deel aan de wetenschappelijke productie bijgedragen. Vooral de vriendschappelijke sfeer in de groep heeft ervoor gezorgd dat ieder naar behoren zijn taken heeft kunnen uitvoeren. Ik betreur het echter dat er door abrupte veranderingen in het rangenstelsel voor een van de mensen van onze groep, achteraf gezien, een verkeerde keuze is gemaakt. Ik ben altijd zeer tevreden geweest over de ondersteuning van de secretaresses.

Ik dank de directie en medewerkers van het MARIN te Wageningen voor de jarenlange plezierige samenwerking. Het begon in 1969 met een onderzoeksproject samen met George Remery en Jan Hooft. Dit was een inspiratiebron voor een aantal proefschriften en een reeks publicaties. Vooral de samenwerking met René Huijsmans is aanleiding geweest tot een groot aantal afstudeerprojecten op het gebied van de scheepshydrodynamica. Hierbij konden we ook een beroep doen op andere medewerkers van het MARIN.

Mijn dank gaat ook uit naar een groot aantal research-instituten waar afstudeerprojecten uitgevoerd zijn. Het gaf mij de kans om kennis te maken met 'uw' interessante problemen, waarbij 'onze' wiskunde een bijdrage kon leveren.

Voor het functioneren van een hoogleraar is het van groot belang dat hij omringd wordt door enthousiaste studenten en promovendi. Ik heb altijd met veel plezier met u samengewerkt. Ik heb er in ieder geval veel van geleerd.

Tot slot dank ik mijn vrouw en kinderen, die mij altijd hebben gesteund.