

# TOEGEPASTE MECHANICA

## Wetenschap of gereedschap?

Prof. ir. A.L. Bouma



Delftse Universitaire Pers



TRES Red. 1986

TOEGEPASTE MECHANICA  
Wetenschap of gereedschap?

TOEGEPASTE MECHANICA  
Wetenschap of gereedschap?  
TOEGEPASTE MECHANICA  
Wetenschap of gereedschap?  
TOEGEPASTE MECHANICA  
Wetenschap of gereedschap?  
TOEGEPASTE MECHANICA  
Wetenschap of gereedschap?



Bouma\_  
red\_  
1986



TOEGEPASTE MECHANICA  
Wetenschap of gereedschap?

# TOEGEPASTE MECHANICA Wetenschap of gereedschap?

I Inleiding, doel, scope, invulling van het boek

II Na-cursus periode tot '86. College gegeven bij het afscheid als gewoon hoogleraar in de Toegepaste Mechanica aan de afdeling der Civiele Techniek van de Technische Hogeschool Delft op vrijdag 31 januari 1986

III Periode '86-'87

IV Periode '87-'88

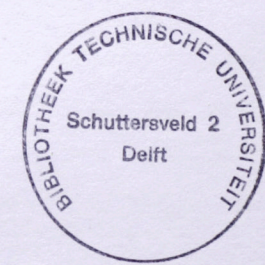
V Periode '88-'89

VI Dynamische versnellingen

VII Deformatieverval - Vastlegging

VIII Bijlagen

door prof. ir. A.L. Bouma





TOEGEPASTE MECHANICA  
Wetenschap of gereedschap?

College  
gegeven bij het Instituut  
voor de Technische Hogeschool  
van de Technische Hogeschool  
op vrijdag 31 januari 1988  
door prof. dr. A.J. Borsari



Delftse Universiteit Febr 1988

I. Inleiding, object, historie, karakter van het vak

Deel I is de inleiding van de cursus. Het is bedoeld om de student te laten zien dat de toegepaste mechanica een wetenschap is die zich ontwikkelt op basis van de natuurwetenschappen. De cursus is bedoeld om de student te laten zien dat de toegepaste mechanica een vak is dat wordt gebruikt in de praktijk. De cursus is bedoeld om de student te laten zien dat de toegepaste mechanica een vak is dat wordt gebruikt in de praktijk.

I	Inleiding, object, historie, karakter van het vak	9
II	Na-oorlogse periode tot '60. Experimenteel onderzoek en de betrokkenheid op de bouwpraktijk	13
III	Periode '60-'70. De invloed van de computer	17
IV	Periode '70-'85. Geavanceerd onderzoek	19
V	Relatie Mechanica - Ontwerpen	24
VI	Dynamische verschijnselen	27
VII	Betrouwbaarheid - Veiligheid	29
VIII	Slotwoord	31

2. Deel II: Na-oorlogse periode tot '60

Deel II is de na-oorlogse periode tot '60. Het is bedoeld om de student te laten zien dat de toegepaste mechanica een vak is dat wordt gebruikt in de praktijk. De cursus is bedoeld om de student te laten zien dat de toegepaste mechanica een vak is dat wordt gebruikt in de praktijk.

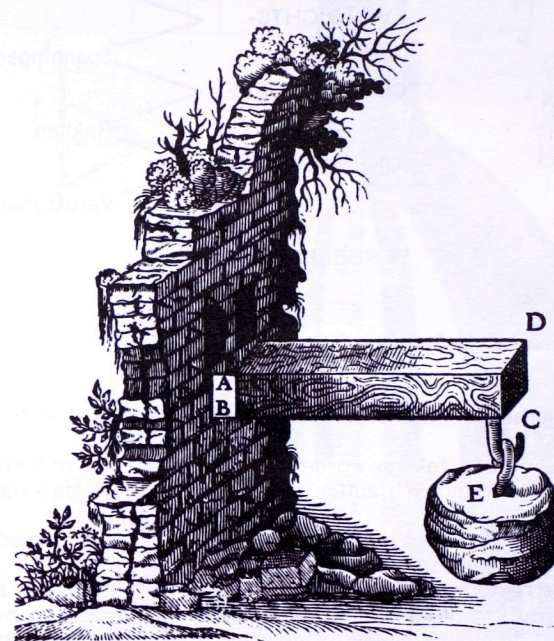


Mijnheer de Rector Magnificus, Dames en Heren

## I. Inleiding, object, historie, karakter van het vak

Het zal U niet te zeer verwonderen, dat het onderwerp van hedenmiddag de Toegepaste Mechanica zal zijn, mijn onderwijsopdracht aan de Technische Hogeschool Delft.

De Toegepaste Mechanica is de mechanica van het bouwen, de wetenschap waarmee het gedrag van constructies onder invloed van belastingen kan worden berekend of voorspeld. Misschien dat niet ieder van U zich bij deze woorden een voorstelling maakt en daarom roep ik een beeld te hulp, namelijk een afbeelding uit het werk van Galilei: "Gesprekken over twee nieuwe wetenschappen", dat in 1638 is uitgegeven in Leiden (Afb.1).



Afb.1. Balk van Galilei.

De balk, die aan de linkerzijde in een muur is ingeklemd, is aan de rechterzijde belast met een gewicht. Bij velen van U zal wel de vraag rijzen: **"Bij welke belasting zal de balk bezwijken of m.a.w. hoe sterk is de balk"?**

Een tweede vraag zou kunnen zijn: **"Hoeveel buigt de balk door bij een bepaalde belasting"?**

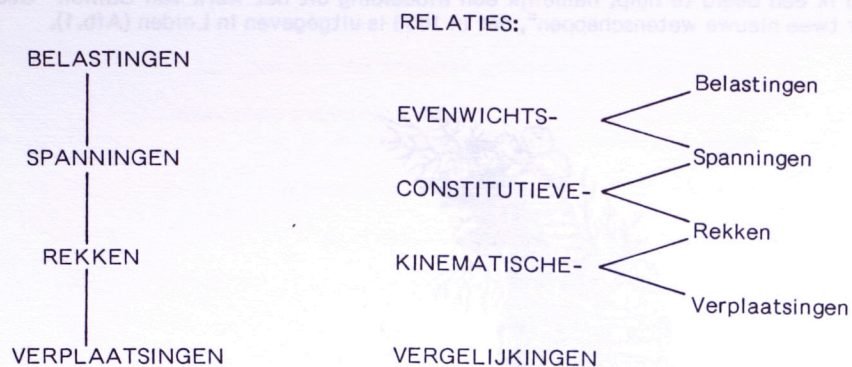
Deze beide vragen zijn nog altijd kernvragen in de Toegepaste Mechanica, typerend voor het vakgebied.

De nieuwe wetenschap waarvan Galilei sprak noemen we thans "Sterkteleer", een deelgebied van de Mechanica. In gesprekken met zijn beide leerlingen beredeneerde Galilei onder meer dat de bezwijklast van de balk evenredig is met de breedte en evenredig met het kwadraat van de hoogte van de balk, een kwalitatief juiste beantwoording van de eerste vraag.

Maar een volledige beantwoording van de beide gestelde vragen zou nog zeer lang niet mogelijk zijn. Daarvoor is nodig begrip voor wat er met en vooral in de balk gebeurt.



Om dit duidelijk te maken toon ik afbeelding 2 waarbij ik mij beperk tot de statica. De belasting op de balk veroorzaakt inwendig krachten of spanningen. Door deze spanningen wordt het materiaal gerekt, d.w.z. er ontstaan verlengingen en verkortingen. De vorm van de balk verandert daardoor, we zeggen "de balk buigt door" en het gewicht aan het uiteinde ondergaat een kleine verplaatsing naar beneden. Tussen de genoemde grootheden bestaan relaties, die in afbeelding 3 zijn aangegeven.



Afb.2. Begrippen in de Toegepaste Mechanica.  
Afb.3. Structuurschema.

De relaties tussen de belasting en de inwendige krachten of spanningen worden evenwichtsvergelijkingen genoemd.

De relaties tussen de spanningen en de rekken worden tegenwoordig met een anglicisme wel constitutieve vergelijkingen genoemd. Wij zullen ze wat eenvoudiger materiaalvergelijkingen noemen.

En de geometrische relaties tussen de rekken in het materiaal en de verplaatsingen worden ook wel kinematische vergelijkingen genoemd.

In deze afbeeldingen ziet U de structuur van het gehele vakgebied in "a nutshell". Ik heb de indruk dat het nu juist de invloed van de computer is geweest, waardoor men over deze structuur beter is gaan nadenken. In elke probleemformulering in de Toegepaste Mechanica zal men deze trits van vergelijkingen kunnen herkennen. En voor de oplossing van een probleem is in beginsel de oplossing van dit stelsel van vergelijkingen vereist.

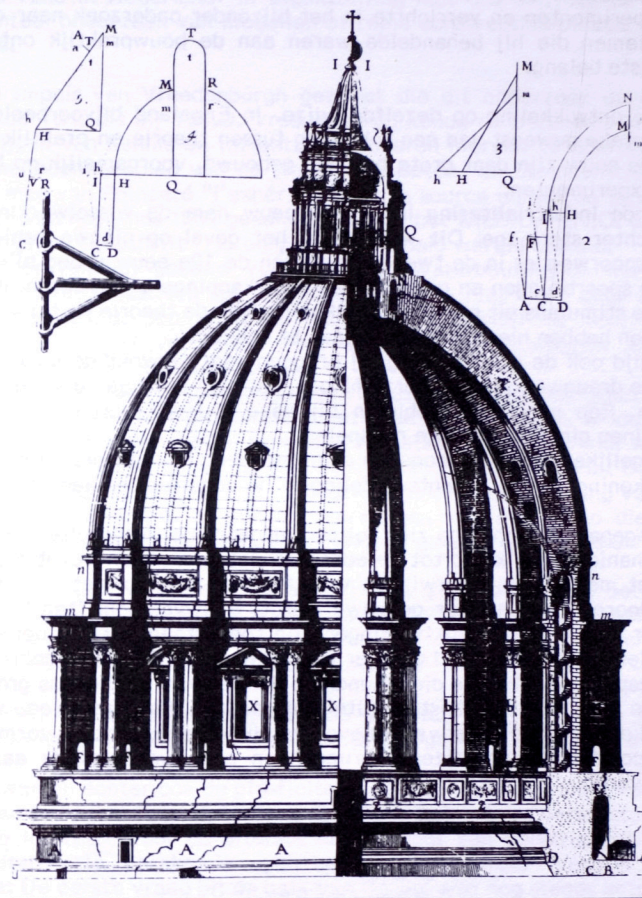
In de groep van vergelijkingen nemen de materiaal-vergelijkingen die het verband geven tussen spanning en rek een centrale plaats in. Het is eerst in het begin van de 19e eeuw dat door Young de elasticiteitsmodulus, een fysisch begrip, de stijfheid van het materiaal, wordt geïntroduceerd. Het begrip wordt vervolgens door Navier geformuleerd op de wijze die wij kennen als de Wet van Hooke, waarmee de evenredigheid tussen spanning en rek -in het Engels stress en strain- werd vastgelegd. Dit was de sluitsteen in de opbouw van het begrippenarsenaal gedurende de voorafgaande 200 jaar. Eerst daarna werd het mogelijk het juiste antwoord te geven op de vraag naar de doorbuiging van de balk.

Meer algemeen gezegd: de weg lag toen open voor de ontwikkeling van enerzijds een mathematisch georiënteerde elasticiteitstheorie, anderzijds een op berekening van reële constructies gerichte mechanica. Voor de berekening van constructies als balken, kolommen, portalen, raamwerken, vakwerken, bogen, werden in de 19e eeuw en de eerste helft van de 20ste eeuw talloze specifieke analytische en ook grafische methoden en technieken ontwikkeld. In het Duits spreekt men in dit verband van "Baustatik", in het Engels van "Theory" of ook "Analysis of Structures".

De beoefening van de mechanica was zeer lang een academische bezigheid van weinigen. Ofschoon de probleemstellingen ontleend konden zijn aan de praktijk van het bouwen was van een beïnvloeding van dit bouwen gedurende lange tijd nauwelijks sprake. In de 18e

eeuw trad in dit beeld langzaam wijziging op.

Bekend is bijvoorbeeld het advies dat door drie geleerde monniken in 1742 werd uitgebracht aan de toenmalige paus over de ernstige scheurvorming in de koepel van de St.Pieterskerk te Rome (Afb.4).



Afb.4. St.Pieterskerk Rome.

Voor een geoefend oog zijn op deze afbeelding de scheuren waarneembaar! Opvallend is hoe voorzichtig de monniken zich in hun rapport uitdrukken, zich verontschuldigen voor het gebruik van theorie. Zij waren zich bewust dat dit iets nieuws was en voerden als verdediging aan dat met zo'n groot bouwwerk geen ervaring was. De kritiek ontbrak dan ook niet. Het gebruik van mechanica werd door de critici modieuze nieuwlichterij gevonden. Nieuwe methoden worden door een bestaande praktijk niet voetstoots geaccepteerd. Tussen theorie en praktijk ligt een spanningsveld. Maar het is aan het advies van de drie monniken te danken dat de koepel van de St.Pieterskerk behouden is gebleven.

In de tweede helft van de 18e eeuw zien we met name in Frankrijk geleerde ingenieurs bij wie van een nauwe binding tussen praktijk en theorie sprake is. Van deze moet in de eerste



plaats Coulomb worden genoemd. Door zijn indrukwekkend oeuvre op zeer uiteenlopende gebieden van de mechanica en de fysica kent welhaast ieder zijn naam. Coulomb die -als genie-officier- was belast met de uitvoering van bouwwerken hield zich ook met fundamentele problemen uit de statica en de sterkteleer bezig. De juiste berekening van de spanningen in de uitgekraagde balk van Galileï bijvoorbeeld, is eerst door hem gegeven. Coulomb deed ook experimenten en verrichtte in het bijzonder onderzoek naar de materiaalsterkte. De problemen die hij behandelde waren aan de bouwpraktijk ontleend en hiervoor van het grootste belang.

Niet overal verliep de ontwikkeling op dezelfde wijze. In Engeland bijvoorbeeld is veel langer en veel meer sprake geweest van een scheiding tussen theorie en praktijk en in de eerste helft van de 19e eeuw zijn daar grote bruggen gebouwd, voornamelijk op basis van ervaring en gerichte experimenten.

Met de voortschrijdende industrialisering in de 19e eeuw nam de wisselwerking tussen praktijk en theorie echter sterk toe. Dit was vooral het geval op nieuwe gebieden. De ontwikkeling van het spoorwagennet in de tweede helft van de 19e eeuw vroeg bijvoorbeeld om de bouw van grote spoorbruggen en grote stationsoverkappingen. Van dergelijke bouwopgaven ging een grote stimulans uit naar de ontwikkeling van de theorie en tal van bekende berekeningsmethoden hebben hieraan hun ontstaan te danken.

Opvallend is in deze tijd ook de ontwikkeling bij bruggen naar eenvoudige structuren, als vakwerken, waarvan de draagwerking zo doorzichtig is, dat men deze aan elke eerstejaarsstudent kan uitleggen. Een specifiek probleem bij deze bruggen vormden de mobiele belastingen. Invloedslijnen gingen een grote rol spelen.

Omgekeerd waren dergelijke grote bouwopgaven ook niet meer te realiseren zonder dat er een betrouwbare berekening van de krachtsverdeling in de constructies aan ten grondslag lag.

Zo ontwikkelde de Toegepaste Mechanica zich tot een uitgebreide wetenschap. Maar vooral ook werd deze mechanica ontwikkeld tot gereedschap dat door velen wordt gebruikt. In deze 20ste eeuw is het mede door onderwijs op verschillende niveaus dat de Toegepaste Mechanica overal is doorgedrongen waar gebouwd wordt. Bouwvoorschriften kunnen niet worden gelezen zonder kennis hiervan. Afwijkingen zijn toegestaan mits de berekening is gegrond op de regels der mechanica stond vroeger in de Gewapend Betonvoorschriften. Het vertrouwen in de Toegepaste Mechanica die steunde op de Wet van Hooke was groot. Maar de voorzichtig gestelde vraag die N.C.Kist als titel gaf aan zijn inaugurele rede van 1917: "leidt een sterkteberekening, die uitgaat van de evenredigheid van kracht en vormverandering, tot een goede constructie van ijzeren bruggen en gebouwen" duidde aan dat er wijzigingen op komst waren.

In het voorgaande heb ik in de ontwikkeling van de Toegepaste Mechanica enkele facetten aangestipt zoals:

- \* De ontwikkeling van de theorie,
- \* het materiaalgedrag als bottle-neck hierbij,
- \* de ondersteuning door experimenteel onderzoek,
- \* de relatie tussen de Toegepaste Mechanica en de bouwpraktijk,
- \* de ontwikkeling van de mechanica als gereedschap.

In het vervolg van het betoog zullen we deze opnieuw tegenkomen.

Dat vervolg zou ik willen laten beginnen in de tweede helft van de 40er jaren.

Het zal een persoonlijke kijk op de ontwikkelingen worden, in hoge mate bepaald door de omgeving waarin ik heb verkeerdt, T.N.O. en de T.H.

## II. Na-oorlogse periode tot '60. Experimenteel onderzoek en de betrokkenheid op de bouwpraktijk

Terugblikkend is de meest opvallende ontwikkeling in Nederland in de na-oorlogse periode de vlucht geweest die het experimenteel onderzoek van civiel-technische en bouwkundige constructies toen heeft genomen.

Voor 1940 vond in Nederland -in tegenstelling met ons omringende landen- vrijwel geen experimenteel onderzoek van modellen of reële constructies plaats. Er was geen ervaring of traditie.

Het is de impuls van Vreedenburgh geweest die dit onderzoek op gang heeft gebracht, zowel op de T.H. als bij T.N.O. Vreedenburgh kende de betekenis van experimenten voor het verkrijgen van kennis en inzicht. Om anderen hiervan te doordringen gaf hij in 1953 aan het mededelingenblad van de Werkgroep Beton- en Staalconstructies van T.N.O., de uitspraak mee van Poincaré "l'expérience est la source unique de la vérité". Dit blad is de voorganger van het sinds 1961 gezamenlijk door het I.B.B.C.-T.N.O. en het Stevinlaboratorium uitgegeven tijdschrift "Heron", over de gehele wereld bekend.

Op de zolder van het gebouw voor Weg- en Waterbouwkunde werd in 1947 een begin gemaakt met foto-elastisch spanningsonderzoek en hier werd door Ligtenberg de moiré-methode ontwikkeld, een bijzonder aantrekkelijke methode voor het bepalen van de krachtsverdeling in stijve platen. Heel wat vlakke plaatbruggen in Nederland zijn met behulp van deze methode onderzocht.

Bij T.N.O. werd in 1947 begonnen met de vervaardiging van een groot stalen model van een paddestoelvloer, waaraan uitgebreide metingen zijn verricht. Modellen van andere constructies volgden, aanvankelijk eveneens van staal, later ook van kunststoffen. Al deze modellen vertoonden bij belasting een lineair-elastisch gedrag. Het doel was het verifiëren van een uit de algemene elasticiteitstheorie afgeleide beschrijving van het gedrag van een bepaald type constructie, of ook het verkrijgen van inzicht in die gevallen waarin de theorie geen uitkomst kon bieden. In dit laatste geval trad het experiment dus in de plaats van de theorie.

De eerste modellen waren een leerschool voor allen die er bij betrokken waren. Meetinstrumenten werden uitgedacht en met succes toegepast, bijvoorbeeld voor het meten van krommingen. Reeds in het begin van de 50er jaren verrichtten verscheidene studenten die in de zogenaamd theoretisch-experimentele richting afstudeerden hun afstudeerwerk bij T.N.O.

De ontwikkelingslijn van de zogenaamde elastische modellen zou later leiden tot zeer verfijnde optische meetmethoden waaronder het gebruik van holografie.

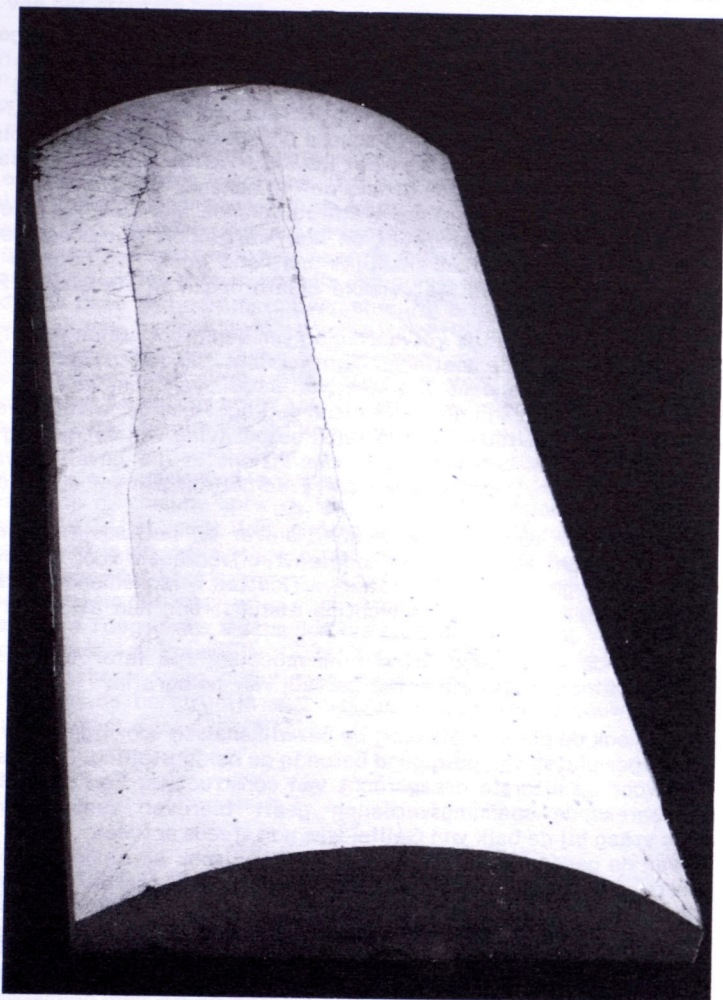
Spoedig kwamen echter ook de plasticiteitsleer, de bezwijkanalyse voor liggers en portalen en de vloeilijntheorie voor platen van gewapend beton in de belangstelling. Er ontstond een bijzondere interesse voor de uiterste draagkracht van constructies. Een op basis van de elasticiteitstheorie berekende spanningsverdeling geeft hierover veelal onvoldoende uitsluitel. De eerste vraag bij de balk van Galileï was nog steeds actueel.

Om de uitkomsten van de genoemde theorieën te toetsen, alsook om inzicht te krijgen in het gedrag van constructies bij bezwijken was modelonderzoek wederom aangewezen. In dit geval dienen de modellen evenwel vervaardigd te zijn van hetzelfde materiaal als de constructie die men op het oog heeft. Voor staal ligt dit eenvoudiger dan voor gewapend beton.

In de 50er jaren zijn bij T.N.O. met name door Boon en Van Riel modellen van zogenaamd micro-beton ontwikkeld waarin de samenstellende delen van gewapend beton op éénzelfde schaal werden verkleind met zo goed mogelijk behoud van de eigenschappen. Begonnen met eenvoudige balkjes werden vervolgens kolommen, portalen, platen en tenslotte schalen vervaardigd en onderzocht.

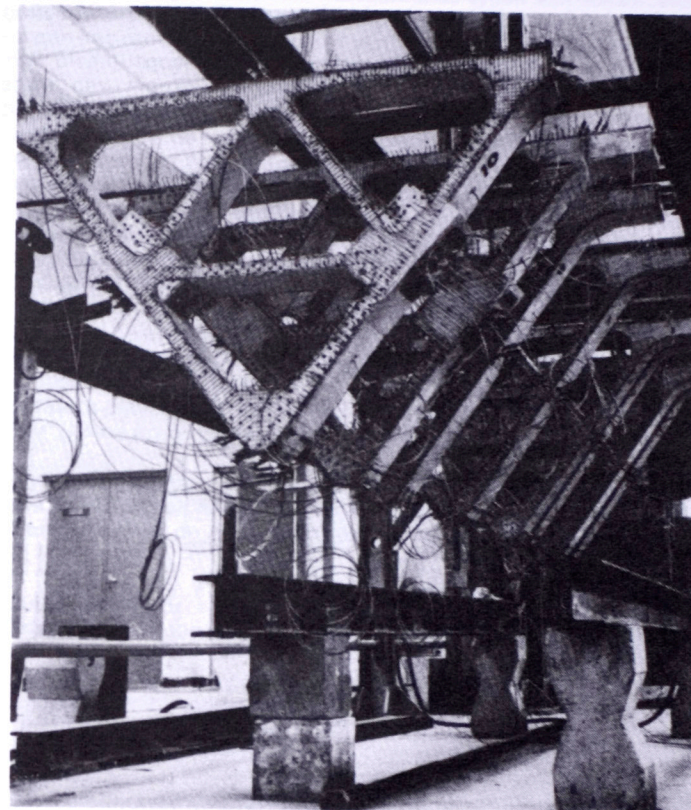


Als voorbeeld toon ik U in afbeelding 5 het model van een cilindrische schaal. Zo'n schaal gedraagt zich in beginsel als een ligger die draagt in de lengterichting. De theorie geeft echter aan dat in het dunne schaaloppervlak in dwarsrichting niet onaanzienlijke buigende momenten optreden. De proef bevestigt dit. Er ontstaan in lengterichting vloeischeuren, waardoor de cirkelvormige doorsnede zijn samenhang verliest en de schaal bezwijkt. Verscheidene schadegevallen en zelfs instortingen zijn op dit verschijnsel terug te voeren.



Afb.5. Model van een tonschaal, na beproeving.

Een hoogtepunt in de ontwikkeling van deze modeltechniek is wel geweest de vervaardiging in 1960 van het aan velen van U bekende model van één van de zogenaamde nablalliggers in de spuisluis in het Haringvliet (Afb.6).



Afb.6. Model van de nablalligger in aanbouw.

Dit zijn liggers van voorgespannen beton met een overspanning van ca 60 meter, opgebouwd uit moten van 2 meter dikte, wat bij de modelbouw zorgvuldig is nagebootst zoals uit deze afbeelding blijkt. In een tijdsbestek van rond 10 jaar had het experimenteel onderzoek zich tot een geavanceerde techniek ontwikkeld.

Over het theoretisch werk in deze periode zal ik kort zijn, het was nog maar het werk van weinigen.

In het begin ging het bij T.N.O. samen met het reeds genoemde modelonderzoek van nieuwe constructievormen als paddestoelvloeren, plaatbruggen, schalen, later kwamen er onderwerpen bij als plasticiteitsleer voor constructies van gewapend beton, de toenmaals nieuwe bouwwijze van voorgespannen beton, de studie van lasverbindingen. Verwerving van inzicht stond aanvankelijk voorop, later gevolgd door het ontwikkelen van berekeningsmethoden, -het eigenlijke gereedschap van de Toegepaste Mechanica-, voor bepaalde typen constructies. Tussen algemene theorie en de oplossing van concrete problemen ligt vaak nog een lange weg voor de ingenieur. In dit verband citeer ik graag de uitspraak van von Karman: "the scientist solves the problems he can, the engineer solves the problems he must". Vaak waren beschikbare theorieën ook bepaald inadequaet en vroegen deze om aanvulling en verbetering. Ik denk in dit verband bijvoorbeeld aan schaalconstructies.



Geleidelijk werd de civiel-ingenieurswereld in Nederland meer research-minded en dit had grote gevolgen. In de eerste plaats mag nog wel eens worden genoemd de oprichting in 1952 van de C.U.R., de Commissie Uitvoering Research van de Betonvereniging, wat een grote stimulans betekende voor research op het gebied van betonconstructies. Heel belangrijk daarbij waren de intensieve contacten die via werkcommissies ontstonden met de bouwwereld, de betrokkenheid van de bouwwereld bij research en de verspreiding van de resultaten van onderzoek in de praktijk.

In de tweede plaats werd door de bouwwereld steeds meer de mogelijkheid van wetenschappelijke adviezen voor concrete problemen gezien. De stroom van uitgebrachte adviezen groeide gestaag waarbij een grote verscheidenheid aan onderwerpen optrad. Zij vormden vaak een grote uitdaging.

Toen in 1956 het Stevinlaboratorium zijn poorten opende, kon men bij de T.H. zijn vleugels wijder uitslaan; sindsdien zijn ook daar vele adviezen, voornamelijk op basis van experimenteel onderzoek, aan de praktijk verstrekt.

Deze sterk toegenomen betrokkenheid van de onderzoekinstellingen bij de bouwpraktijk heeft zeer bevruchtend gewerkt. Het gaf gevoel voor de werkelijke problemen en maakte het werk van de betrokkenen boeiend. Er was sprake van een zeker evenwicht tussen het verwerven van kennis en inzicht enerzijds en het gebruikmaken hiervan bij adviezen anderzijds.

### III. Periode '60-'70. De invloed van de computer

In de 2e helft van de 50er jaren deed de computer of rekenautomaat zijn intrede. Bij de T.H. was dat toen de ZEBRA. Ook op het gebied van de Toegepaste Mechanica zou dit tot geheel nieuwe ontwikkelingen leiden. Omstreeks 1960 waren op het Stevinlaboratorium al standaardprogramma's gemaakt voor verschillende typen van schaalconstructies, die gebaseerd waren op rekenschema's die bij het I.B.B.C. waren ontwikkeld. Het moeizame werk, verbonden aan het opstellen en oplossen van vergelijkingen werd door de computer overgenomen.

De ontwikkeling ging echter snel verder. Matrixrekening werd noodzakelijk en de verplaatsingsmethode kwam op de voorgrond. Constructies opgebouwd uit staven, zoals vakwerken en raamwerken, leenden zich het eerst voor een behandeling hiermee. Spoedig werden continue constructies bijvoorbeeld platen, gediscrètiseerd, door ze te verdelen in een groot aantal kleine elementen met een beperkt aantal vrijheidsgraden. De aanpak bij deze zogenaamde eindige elementenmethode, waarbij het gedrag van de constructie als geheel wordt afgeleid uit het gezamenlijk gedrag van de afzonderlijke elementjes, is een wezenlijk andere dan het langs analytische of numerieke weg bepalen van de krachtsverdeling zoals voordien gebruikelijk was.

Met de komst van de elementenmethode bleek veel mogelijk.

Gecomplieerde constructievormen konden eenvoudig in elementjes worden verdeeld, waarna zij voor berekening toegankelijk werden. Vele typen elementen werden ontwikkeld, niet in de laatste plaats door afstudeerstudenten voor wie dit een dankbaar onderwerp was en ontelbaar zijn de programma's die sinds het begin zijn gemaakt.

Grote programmasystemen waarin programma's kunnen worden ondergebracht zijn gebouwd zoals GENESYS bij R.W.S., terwijl het ICES-systeem bij de T.H.D. verder werd ontwikkeld. Een geheel op de elementenmethode toegesneden systeem is het DIANA-pakket van T.N.O.

Op het gebied van de berekening van constructies kreeg de bouwwereld er een machtig stuk gereedschap bij en de computer heeft de Nederlandse bouwwereld dan ook snel veroverd.

Hiertoe hebben zeker bijgedragen de drie Nederlandse boeken op dit gebied van Nijenhuis, Blaauwendraad en Kok, verschenen in 1973, evenals de talloze door hen al sinds 1965 op dit gebied gegeven cursussen waarbij Loof een voortrekkersrol heeft vervuld. De kennis van de nieuwe ontwikkelingen is hierdoor binnen de civiel-ingenieurs-wereld wijd verbreid. Ook het ontwikkelingswerk van de C.I.A.D. moet in dit verband zeker worden genoemd.

Misschien is het goed ook de keerzijde van de medaille te bezien. Veel van wat in leerboeken van de Toegepaste Mechanica vroeger als theorie werd gepresenteerd betrof in feite methoden voor het bepalen van de krachtsverdeling in constructies, oplostechieken. Als er dan een revolutie op het gebied van de oplostechiek plaats vindt, kan men verwachten dat veel van het oude achterhaald, overbodig is geworden. Een deel van het aanwezige gereedschap raakt verouderd. De velen onder ons zo vertrouwde iteratiemethode van Cross voor de berekening van raamwerken behoort hiertoe, evenals de relaxatiemethoden van Southwell, die in de begintijd bij T.N.O. intensief werden gebruikt. Het verdwijnen van dergelijke rekenmethoden of procedures is geen verlies. In dit veranderingsproces heeft echter niet iedereen hetzelfde tempo, zodat bijvoorbeeld bij het vaststellen van studiestof wel discussies ontstaan, en zeker ook als men de meningen van de praktijk daarbij betreft, want die kunnen ook sterk divergeren.

Ervaring en inzicht, vaak verworven door moeizame berekeningen tellen plotseling minder, een algemeen verschijnsel als nieuwe methoden en technieken hun intree doen. Een eventuele achterstand in ervaring kan met behulp van een computer snel worden ingelopen en zelfs in een voorsprong worden omgezet, omdat een computer problemen kan oplossen die voordien niet voor berekening toegankelijk waren.



Zeer ingrijpend ook zijn de gevolgen geweest voor het experimentele onderzoek. De computer werd een geduchte concurrent en het experimenteel onderzoek naar de krachtsverdeling in constructies met behulp van elastische modellen nam drastisch af.

De computer werd een machtig instrument, maar voor de gebruiker blijven er nog wel problemen over. Hij moet de uitkomsten beoordelen en interpreteren, misschien wel voor constructies waarmee hij geen ervaring heeft. Hoe competent is hij? Hij blijft verantwoordelijk. Hoe overtuigt hij een dienst van Bouw- en Woningtoezicht? Hij wordt geconfronteerd met vragen naar de betrouwbaarheid van de uitkomst, de zekerheid dat er geen fouten zijn gemaakt. Zo mogelijk zal hij met een globale berekening de uitkomsten willen controleren of althans evenwichtscontroles willen uitvoeren. Kloppen deze dan geeft dat wel vertrouwen, maar geen zekerheid. Wellicht geeft een beeld van de vervormingen meer houvast. In de loop van de tijd is het vertrouwen in de uitkomsten van beproefde programma's echter zeer snel gegroeid.

Bij het beschikbaar komen van nieuwe programma's, of het zelf ontwikkelen van programma's voor nieuwe opgaven zal men steeds met de genoemde onzekerheden worden geconfronteerd en bij de toenemende complexiteit van de problemen wordt ook de interpretatie van uitkomsten steeds moeilijker. Hiervoor is veelal een zorgvuldige, diepgaande analyse vereist, op basis van een grondige kennis van de mechanica.

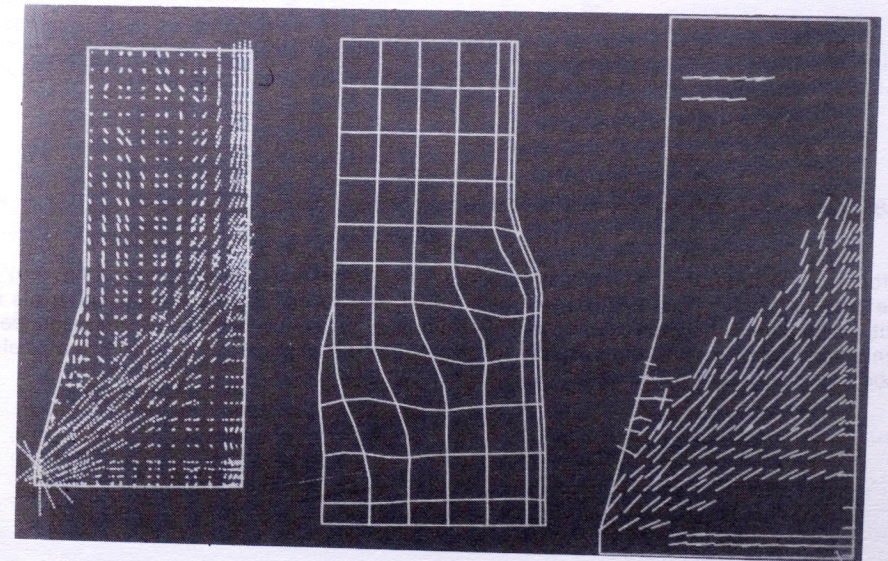
#### IV. Periode '70-'85. Geavanceerd onderzoek

In de 70er jaren ging de ontwikkeling snel verder en werden moeilijker problemen aangevat zoals het tweede orde probleem bij hoge raamwerken, waarbij sprake is van grote verplaatsingen. Er werden programma's gemaakt op basis van de plasticiteitsleer en bezwijkanalyse en er werd -meer algemeen- een begin gemaakt met de behandeling van problemen waarbij het materiaalgedrag niet-lineair is, wat wil zeggen dat spanning en rek niet meer evenredig met elkaar zijn. De Wet van Hooke werd losgelaten. De kern van het probleem kwam daarmee te liggen bij de materiaalvergelijkingen, die zoals al eerder gezegd in het structuurschema een centrale plaats innemen.

Een belangrijk voorbeeld hiervan in de civiel-technische wereld is het project "Beton-mechanica" dat in 1975 is gestart en waarin samenwerken de afdeling Civiele Techniek van de T.H.-Delft, de Afdeling Bouwkunde van de T.H.-Eindhoven, T.N.O.-I.B.B.C., Bouwresearch van R.W.S. en de C.U.R.

Met dit project wordt getracht een beter gefundeerd inzicht te verkrijgen in het gedrag van constructies van gewapend beton bij toenemende belasting. Begonnen werd met het onderzoek van vlakke spanningstoestanden en het lag voor de hand gebruik te maken van de eindige elementenmethode. Voor de beschrijving van het materiaalgedrag is nu modelvorming nodig van verschijnselen als elasto-plastisch gedrag van het beton, zowel als van het wapeningsstaal, van scheurvorming in beton, van de aanhechting tussen wapening en beton en van de werking van de verankering van wapeningsstaven. Deze modellering dient te steunen op experimenteel onderzoek.

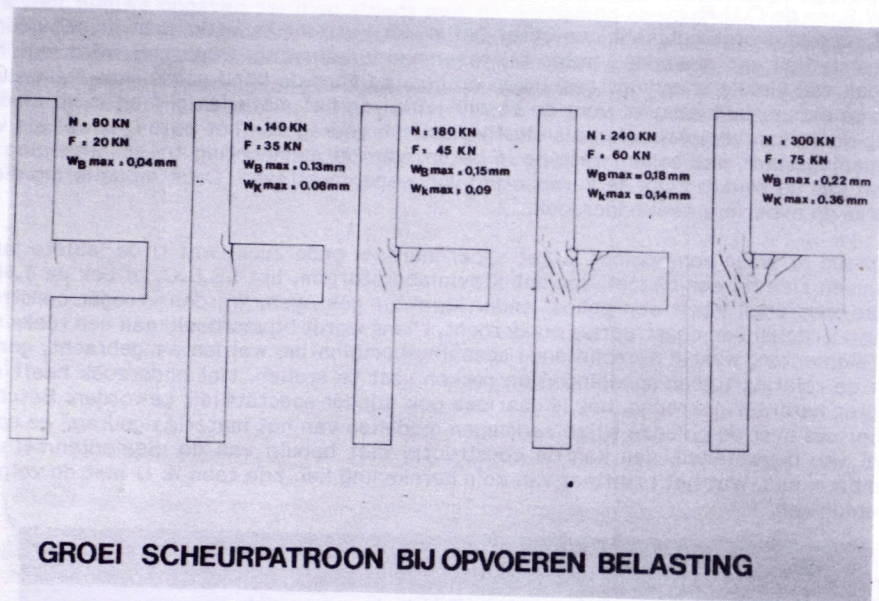
Zo ontstond er weer een opbloei in het experimenteel onderzoek, wat U de laatste jaren hebt kunnen zien bij een bezoek aan het Stevinlaboratorium, het I.B.B.C. of ook de T.H.E. Maar dit onderzoek heeft een geheel ander karakter gekregen. Werden vroeger constructies of onderdelen van constructies onderzocht, thans wordt bijvoorbeeld aan een reeks van vlakke elementen, waarin verschillende spanningscombinaties worden aangebracht, gemeten om de relaties tussen spanningen en rekken vast te stellen. Het onderzoek heeft een abstracter karakter gekregen, het is daarmee ook minder spectaculair geworden. Beschikt de numericus over de op deze wijze verkregen modellen van het materiaalgedrag, we spreken wel van bouwstenen, dan kan de constructie met behulp van de elementenmethode worden berekend. Wat het resultaat van zo'n berekening kan zijn toon ik U met de volgende afbeeldingen.



Afb.7. Tunneldak.

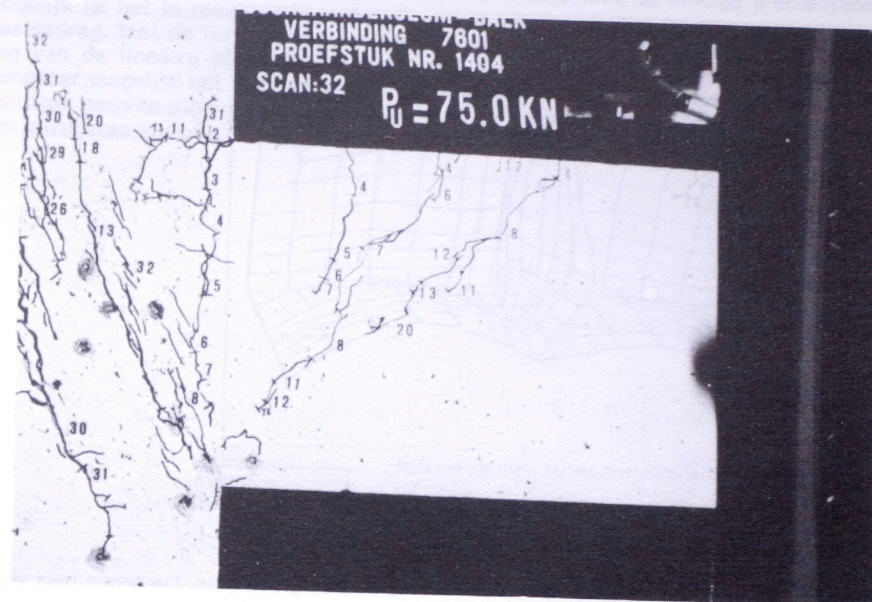


Afbeelding 7 heeft betrekking op het dak van een tunnel, ergens in het buitenland, waarover vanuit Nederland advies is uitgebracht omdat het in slechte staat verkeert. We kunnen het dak beschouwen als een ligger, die aan beide zijden in de wanden van de tunnel is ingeklemd. De afbeelding toont de rechterhelft bij maximale belasting. In de bovenste figuur ziet U dat een gebied met scheuren is ontstaan nabij de rechter inklemming. Er ontstaat hierdoor lokaal een schrankmechanisme, dat in de middelste figuur is weergegeven. In de onderste figuur zijn de hoofdspansingstrajectorieën in het beton getekend. De trekspanningen in het beton zijn door scheurvorming uitgeschakeld en de draagwerking als ligger is overgegaan in een draagwerking als boog. Deze boog is duidelijk waar te nemen. De berekeningen zijn uitgevoerd met het DIANA-programma, waarbij de scheuren a.h.w. zijn uitgesmeerd.



Afb.8. Verbinding balk en kolom: resultaten van de berekening.

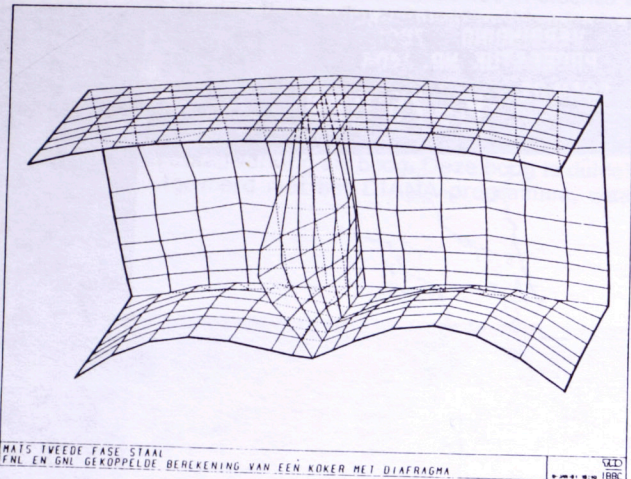
In afbeelding 8 is m.b.v. het zgn. microprogramma gerekend met discrete scheuren. Het betreft de verbinding van een balk en een kolom, die in een normale berekening als stijf wordt aangenomen. De afbeelding toont de groei van het scheurpatroon bij toenemende belasting, waardoor de verbinding wordt verzwakt. Het berekende beeld wordt in afbeelding 9 door een experiment bevestigd.



Afb.9. Verbinding balk en kolom: experiment.

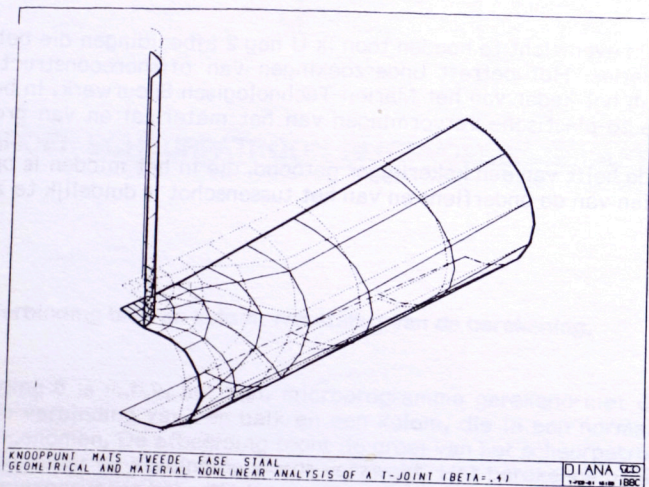
Om de balans enigszins in evenwicht te houden toon ik U nog 2 afbeeldingen die betrekking hebben op staalconstructies. Het betreft onderzoeken van offshoreconstructies, die hebben plaatsgevonden in het kader van het Marien Technologisch Speurwerk. In beide gevallen is sprake van elasto-plastische vervormingen van het materiaal en van grote verplaatsingen. In afbeelding 10 wordt de helft van een kokerligger getoond, die in het midden is opgelegd. Het uitbuigen, het plooiën van de onderflens en van het tussenschot is duidelijk te zien.





**Afb.10. Plaatvelden bij stalen koker.**

In afbeelding 11 ziet U de verbinding van een kleine en een grote buis. De grote buis wordt door de drukkracht in de kleine buis aanzienlijk vervormd.



**Afb.11. Buisverbinding.**

De visuele weergave van de computerresultaten doet denken aan een experiment en men kan inderdaad zeggen dat de computer een experiment simuleert. Als men eenmaal de beschikking over een programma heeft, zijn dergelijke computersimulaties doorgaans goedkoper dan echte experimenten. Het blijft echter verstandig zo nu en dan eens letterlijk de proef op de som te nemen. Binnen de samenwerkingsverbanden die er bestaan gebeurt dit ook.

De getoonde resultaten laten zien wat heden ten dage met de eindige elementenmethode mogelijk is: het in rekening brengen van grote verplaatsingen en van een complex materiaalgedrag. Met de formulering van de Wet van Hooke omstreeks 1825, kon de ontwikkeling van de lineaire elasticiteitstheorie beginnen. Thans wordt het met behulp van de computer mogelijk het gebied van de niet-lineaire problemen te betreden en met de berekeningen nauwkeurige aansluiting bij de vaak complexe werkelijkheid na te streven. Dit is een grote stap vooruit.



## V. Relatie Mechanica - Ontwerpen

Na iets van de mechanica als wetenschap, gericht op het verwerven van kennis en inzicht te hebben getoond, zou ik nog eens de mechanica willen bezien als gereedschap voor de ontwerpende ingenieur.

Met het gereedschap van de mechanica, zo nodig ondersteund door de computer, kan de ingenieur een vóór hem liggend ontwerp analyseren en beoordelen. De opgave van een ontwerpende ingenieur is echter een constructie die aan bepaalde functionele eisen moet voldoen, te ontwerpen. Daarbij zal hij een synthese van deze eisen nastreven.

Hier ligt een tegenstelling: de mechanica als gereedschap voor een analyse is aanwezig, waar om een synthese wordt gevraagd.

Nu is de tegenstelling minder absoluut dan wordt gesuggereerd. Een nieuw ontwerp komt in het algemeen niet zomaar uit de lucht vallen, het stoelt op ervaring en inzicht en het ontwerpproces is veelal een iteratieproces.

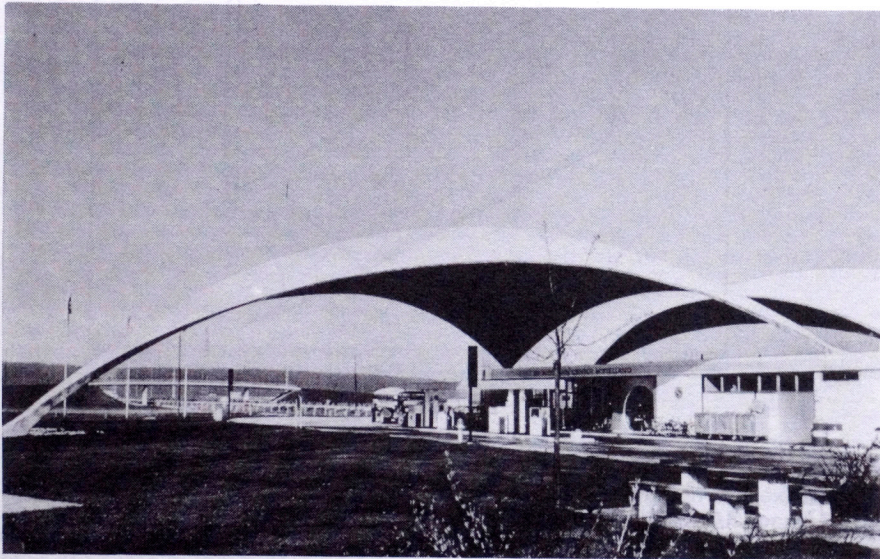
Alvorens verder te gaan is het wellicht goed in dit ontwerpproces twee fasen te onderscheiden:

Een eerste fase, waarin een voorontwerp, een globaal ontwerp, tot stand komt en een tweede fase waarin dit voorontwerp als het ware wordt bijgeschaafd en verder wordt uitgewerkt.

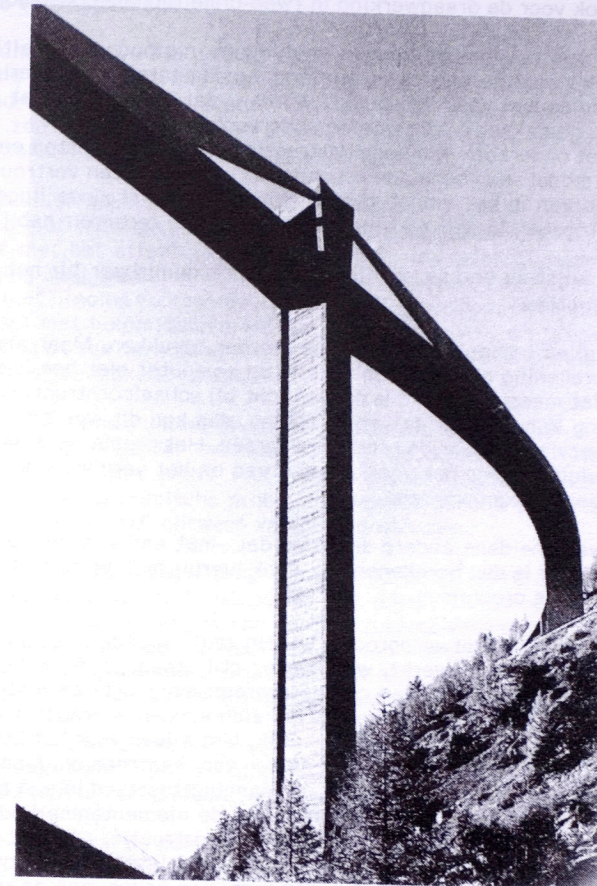
In de eerste fase wordt in concepties gedacht. Naarmate de dragende werking van de constructie voorop staat, zoals bij een watertoren, een grote brug, een hoog gebouw, een offshoreplatform, is de rol van de mechanica in het ontwerpproces belangrijker. Soms is de overheersende vraag: "is de gedachte constructie wel mogelijk", zoals bij een platform in zeer diep water, of bij een hoge koeltoren.

In de eerste fase worden de beslissingen genomen, die bepalend kunnen zijn voor mislukking of succes van een ontwerp. Het is niet in te denken dat men een conceptie van een constructie kan hebben zonder een voorstelling te hebben van de krachtsverdeling.

Ik geef ter toelichting hiervan nog eens twee voorbeelden, beiden uit Zwitserland. Op afbeelding 12 ziet U één van de schalen van Isler. Het zijn schalen met grote overspanningen, die slechts enkele centimeters dik zijn. Op afbeelding 13 ziet U de Ganterbrücke in het Rhonedal bij Brig. De weg kruist het diepe dal met een S-bocht op een hoogte van 150 meter. U ziet hier de 127 meter lange zijoverspanning.



Afb.12. Schaal van H.Isler (Zwitserland)



Afb.13. Ganterbrücke van Chr.Menn (Rhonedal).

Toch is het opvallend dat vaak grote en ook grootse bouwwerken tot stand zijn gekomen, gebaseerd op zeer eenvoudige voorstellingen met betrekking tot de krachswerking. Er gaat daardoor nog wel eens wat mis. Maar complexe theorieën en ingewikkelde berekeningen -al of niet met de computer- staan blijkbaar het concipiërend vermogen in de weg. Het gereedschap moet handzaam zijn. De ontwikkeling van zo eenvoudig mogelijke gedachtenmodellen voor de krachtsverdeling in verschillende constructies ten behoeve van de ontwerpende ingenieur is daarom een belangrijke opgave.

Nu is wat voor de één eenvoudig is, voor de ander soms nog erg moeilijk. Maar ook hier is sprake van een voortschrijdende ontwikkeling.

Met het gedrag van liggers, kolommen, vakwerken en raamwerken is iedere civiel-ingenieur van ouds vertrouwd. Maar een ontwerpende ingenieur moet tegenwoordig iets meer in zijn mars hebben. Hij moet weet hebben van de draagwerkingen in verschillende constructie-elementen en hij moet combinaties van draagwerkingen in een constructie herkennen, bijvoorbeeld hoe in een gebouw een skelet en een buigstijve kern elkaar beïnvloe-



den of hoe bij een boogbrug de boog en de hoofdliggers van de rijvloer samenwerken. In het bijzonder geldt dit ook voor de draagwerking in twee-dimensionale constructies.

Voor het verkrijgen van dit inzicht kunnen analytische methoden nog altijd uitstekende diensten bewijzen. Het analyserend bezig zijn met fundamentele draagwerkingen leidt tot inzicht en met formules kan vaak "gespeeld" worden, dat wil zeggen dat het effect van variaties in gegevens gemakkelijk kan worden onderzocht.

Vaak stuit men bij het onderzoek van een constructie op overeenkomsten en het herkennen van een mechanisch model -een bepaalde krachtswerking- geeft een vertrouwd gevoel. Een bekend voorbeeld hiervan is het model van de elastisch ondersteunde ligger, dat men tegenkomt in een balkrooster, in een kokerbrug, en ook in een reservoir nabij de inklemming aan de voet.

Inzicht dat op deze wijze is verkregen lijkt voorshands onmisbaar bij het ontwerpen van geavanceerde constructies.

Ook op dit gebied zullen computerberekeningen verder oprukken. Maar als de uitkomsten van een computerberekening niet voldoen vertelt de computer niet hoe het ontwerp moet worden gewijzigd. Het meest sprekend is dit wellicht bij schaalconstructies. Blijkt bijvoorbeeld te grote buiging in het oppervlak op te treden, dan kan dit worden veroorzaakt door de vorm van het oppervlak en door de randvoorwaarden. Het probleem is dan niet meer het berekenen van de buiging, maar het voorkomen ervan en het vereist inzicht om te zeggen op welke wijze dat bereikt kan worden.

Overigens geldt in verscheidene andere situaties dat -met een variant op een bekend gezegde- **"voorkomen beter is dan berekenen"**. Ik denk hierbij met name ook aan stabiliteitsproblemen en dynamische problemen.

Ook bij de tweede fase in het ontwerpproces, waarin zoals ik al zei, het ontwerp wordt bijgeschaafd en verder wordt uitgewerkt, wil ik even stil staan. In deze fase wordt tegenwoordig intensief gebruik gemaakt van computerprogramma's, al of niet interactief. Inzicht in de krachtsverdeling en verschijnselen die zich kunnen voordoen zoals bijvoorbeeld knikken en plooiën, is ook in deze fase noodzakelijk, niet alleen voor het beoordelen van de uitkomsten van computerberekeningen en het nemen van maatregelen, maar evenzeer voor een juist en zinvol gebruik. Als men weet dat de spanningstoestand in een bepaald deel van de constructie snel varieert zal men -bij gebruik van de elementenmethode- daar een fijnere elementenverdeling toepassen dan elders in de constructie. Gebeurt dat niet, dan is de kans op foutieve uitkomsten groot. Als men bij de verdeling van een constructie in elementen bepaalde trillingsvormen over het hoofd ziet, dan krijgt men ze van de computer ook niet te zien.

In deze tweede fase zullen ook de definitieve afmetingen van de constructiedelen worden vastgesteld.

Voor opgaven van beperkte omvang binnen strikte randvoorwaarden, bijvoorbeeld het bepalen van de vereiste profielen voor een stalen skelet van gegeven hoofdafmetingen bij gegeven belastingen, kan de computer tegenwoordig het werk vrijwel geheel uit handen nemen. De ontwerper krijgt zo de ruimte om een aantal varianten te vergelijken.

Uitermate belangrijk is ook de vormgeving van details, zoals verbindingen, knooppunten, hoekpunten, oplegpunten enz., zowel in staal als in beton. Veel ongevallen zijn te wijten aan onjuiste vormgeving of dimensionering door onvoldoende inzicht in de krachtswerking. Vaak is hier immers sprake van moeilijk te doorgronden twee-dimensionale of drie-dimensionale spanningstoestanden.

Op dit gebied vinden de laatste jaren interessante ontwikkelingen plaats, zowel vanuit de elasticiteitstheorie als van uit de plasticiteitstheorie, die een nieuwe impuls kunnen betekenen voor het denken in en werken met mechanica-modellen door de ontwerper-constructeur.

## VI. Dynamische verschijnselen

Tot nu toe beschouwden we het gedrag van constructies als statisch, onveranderlijk in de tijd. Maar als de belasting varieert of als materiaaleigenschappen met de tijd veranderen, zal ook het gedrag van een constructie niet constant zijn. Hier liggen belangrijke deelgebieden en ik zou in het bijzonder nog willen stilstaan bij de dynamische verschijnselen die een gevolg kunnen zijn van veranderlijke belastingen.

In de civiele techniek speelden dynamische problemen vroeger geen grote rol. Natuurlijk was men bekend met trillingen bij spoorbruggen of machinefundamenten, met slingerende klokketorens of met het effect van een sprong van de tafel. Dynamische verschijnselen, zoals de beweging door water, wind of ook verkeer hebben echter een stochastisch karakter, d.w.z. een niet precies voorspelbaar, soms grillig verloop. Dit verklaart mede dat men zich vaak behield met hulpmiddelen als een stootcoëfficiënt bij bruggen, een additionele statische belasting of een verhoging van de veiligheidscoëfficiënt. In dit beeld is de laatste decennia echter een ommekeer gekomen.

Schaalvergroting van constructies en de hogere eisen die hieraan worden gesteld, zoals grotere bruggen met zwaarder verkeer, hogere gebouwen met hogere windsnelheden, offshore-platforms in dieper water met hogere golven, maken dat civiel-ingenieurs niet alleen steeds meer met dynamische problemen worden geconfronteerd, maar ook dat deze bepalend kunnen zijn voor het ontwerp van een constructie.

Hiertoe draagt ook bij de ontwikkeling van hoogwaardige materialen en het toelaten van hogere spanningen, waardoor de constructies niet alleen lichter worden, maar ook slanker, zodat de dynamische eigenschappen van de constructies veranderen. De eigen frequenties kunnen daardoor binnen het belastingsspectrum van bijvoorbeeld het verkeer op een brug of de wind op een gebouw komen, waardoor een niet onbelangrijk dynamisch effect kan optreden. Bij offshore constructies is hieraan meestal niet te ontkomen.

Een andere groep van problemen die sterk opkwam wordt gevormd door plotseling aangrijpende belastingen zoals bij botsingen, explosies, breuk enz., op kunnen treden. Aardbevingen kwamen in verband met werken buitenslands duidelijk in de belangstelling.

In deze ontwikkeling kwam de computer op het juiste moment.

Natuurlijk is ook op dit gebied voor alles inzicht nodig. Men moet weten hoe een systeem op verschillende typen belasting kan reageren. Dit inzicht kan nog steeds het beste worden opgebouwd met behulp van analytische methoden, toegepast op eenvoudige systemen met een of slechts enkele vrijheidsgraden.

Bij meer complexe systemen echter maakte de computer het mogelijk eigen trillingsvormen en bijbehorende frequenties te bepalen, maakte de computer het ook mogelijk tijdstapintegraties uit te voeren om bij een gegeven belasting de respons van het systeem te berekenen. En de computer maakte spectrale analyses mogelijk, waarmee de stochastische trillingen konden worden aangepakt. Hierop aansluitend zijn verdere ontwikkelingen gevolgd, zoals bijvoorbeeld de vermoeiingsanalyse bij stochastische trillingen.

Maar met de verruiming van de mogelijkheden die de computer bood, kwamen de problemen die er toch wel waren, versterkt naar voren!

Bij botsingen en explosies en ook bij aardbevingen wordt de respons van constructies bepaald door niet-lineair materiaalgedrag. Maar dit materiaalgedrag wordt op zijn beurt weer beïnvloed door het dynamisch gedrag van de constructie.

Vermoeiing is bij dynamisch belaste constructies een belangrijk criterium. Maar de uitproeven bepaalde vermoeiingsconstanten zijn met zulke onzekerheden behept, dat een berekende levensduur met een grote korrel zout moet worden genomen.



Demping in de constructie kan op deze levensduur een grote invloed hebben. Maar demping is een niet-constante grootte, waarin verschillende verschijnselen een rol spelen, die bovendien mede wordt bepaald door de uitvoering van de constructie en de interactie met de omgeving.

Ook over de dynamische belastingen is vaak onvoldoende bekend, zoals bij golven, explosies of aardbevingen, evenals over de interactie tussen de belastingen en de constructies. Een voorbeeld daarvan is de belasting door het loslaten van wervels in stromend water of in de wind.

Alleen experimenteel onderzoek kan op deze gebieden meer inzicht verschaffen. Maar de kans is aanwezig dat men hiermee wel verder van huis komt, maar niet dichter bij de antwoorden op de vragen die er liggen. Misschien moet men in de civiel-technische wereld meer leren leven met onzekerheden en vooral actief tegenover deze verschijnselen staan, niet alleen als onderzoeker, maar als ingenieur trachten de verschijnselen te beheersen, bijvoorbeeld door het aanbrengen van kunstmatige demping, door meer inspectie van constructies op vermoeiingsverschijnselen of door het beïnvloeden van belastingen, bijvoorbeeld door een andere vormgeving van de constructie.

## VII. Betrouwbaarheid - veiligheid

In het voorgaande heb ik al een paar maal het woord onzekerheid laten vallen, onzekerheid m.b.t. de belastingen, onzekerheid m.b.t. de materiaaleigenschappen. De vraag in het begin naar de sterkte van de balk van Galilei komt daarmee in een ander licht te staan. Bij onzekere gegevens kunnen we niet een eenduidig antwoord verwachten. Langzaam is sinds de 20er jaren het inzicht gegroeid dat bij een constructie beter kan worden gesproken van de kans op bezwijken en is door enkelen gewerkt aan de ontwikkeling van wat thans de betrouwbaarheidsanalyse van constructies wordt genoemd, waarmee op basis van waarschijnlijkheidsleer en sterkteleer de kans op bezwijken van een constructie wordt bepaald.

De schaalvergroting en de sterk toegenomen gevolgen bij bezwijken van sommige constructies hebben de belangstelling voor deze betrouwbaarheidsanalyse de laatste decennia sterk doen toenemen. En ook op dit gebied heeft de computer voor een doorbraak gezorgd door het uitvoeren van de toch wel gecompliceerde berekeningen mogelijk te maken. Na ca 1970 is op dit gebied bepaald van een explosie sprake.

Met een betrouwbaarheidsanalyse is het mogelijk factoren die een belangrijke rol spelen bij de kans op bezwijken op te sporen, waarna aan deze factoren meer aandacht kan worden gegeven, bijvoorbeeld door ze nauwkeuriger te kwantificeren. Verschillende grenstoestanden of bezwijkmechanismen kunnen met een betrouwbaarheidsanalyse beter met elkaar worden vergeleken, terwijl ook een consistente onderlinge vergelijking van verschillende materialen: beton, staal, hout, grond, mogelijk wordt.

Met een betrouwbaarheidsanalyse wordt de mogelijkheid geopend te komen tot een evenwichtig ontwerp, waar geen uitgesproken zwakke schakels in aanwezig zijn. Bij beschadigde constructies kan een betrouwbaarheidsanalyse tot een objectieve beoordeling leiden.

De ontwikkeling is thans zover dat voor constructie-elementen en voor eenvoudige constructies een betrouwbaarheidsanalyse mogelijk is. Voor het ontwikkelen van de betrouwbaarheidsanalyse voor grotere constructies moet nog veel werk worden verricht. Civiel-technische constructies zijn ingewikkelde systemen van elementen, waarvoor gecompliceerde relaties gelden. Dit werk ligt nog geheel in de researchsfeer.

Maar de betrouwbaarheidsanalyse voor een eenvoudige constructie is voor velen vooralsnog een ingewikkelde ontoegankelijke materie. We bevinden ons hier eigenlijk nog maar aan het begin van een ontwikkeling. Theorie en praktijk hebben elkaar nog niet goed gevonden. Men zou wel wensen dat aan de ontwerper een handzaam stuk gereedschap ter beschikking kon worden gesteld, waarmee hij inzicht kan krijgen in de consequenties van beslissingen en deze tegen elkaar kan afwegen.

Toepassing van de betrouwbaarheidsanalyse zal vooreerst dan ook liggen bij het onderbouwen van voorschriften en dat is op zich een goede zaak. Daarmee kan ook internationaal naar uniformiteit worden gestreefd. De ontwerper blijft daarbij werken in een deterministisch kader, maar is zich bewust dat op de achtergrond probabilistische overwegingen meespelen.

Het mag misschien nog wel eens worden benadrukt dat de betrouwbaarheidsanalyse een analyse is en dus nooit meer kan zijn dan een hulpmiddel voor de ontwerper om te komen tot een goed ontwerp.

Tijdens het vervaardigen en daarna tijdens het gebruik wordt de constructie door vele gevaren bedreigd. De ontwerper zal zo goed mogelijk deze gevaren incalculeren en de hedendaagse ontwerper heeft daarbij met heel wat meer bedreigingen, heel wat meer risico's te rekenen dan zijn collega van bijvoorbeeld 50 jaar geleden. Een straaljager die op een kernreactor valt is bijvoorbeeld zo'n nieuw risico. Explosies, aardbevingen zijn andere. Het werk van de ontwerper is meer omvattend geworden. Gelukkig beschikt hij ook over betere hulpmiddelen. Een deel van de bedreigingen onttrekt zich echter geheel of ten dele aan de invloed van de ontwerper en hierin kunnen juist de grootste risico's schuilen. Na de



ontwerper komen er echter nog velen die eveneens verantwoordelijk zijn voor de veiligheid van de constructie. Daarbij gaat het in het algemeen om andere zaken, -beheersing van situaties of processen- en geheel andere middelen om bedreigingen af te wenden. Daar gelden ook andere normen. We zijn dan op het brede terrein van de veiligheid van constructies, het onderwerp van het vanmorgen gehouden symposium. In dit kader is de rol van de Toegepaste Mechanica om het gereedschap aan te reiken, waarmee veilige constructies kunnen worden ontworpen.

## VII. Slotwoord

Dames en Heren,

In het voorgaande heb ik getracht enkele facetten in de ontwikkeling van de Toegepaste Mechanica aan te roeren. Ik ben mij bewust dat sommige facetten onderbelicht zijn gebleven, andere in het geheel niet aan bod zijn gekomen. Ik noem in dit geval nog eens expliciet de belangrijke stabiliteitstheorie. Een zeer groot deel van de ongevallen bij bouwwerken is te wijten aan instabiliteitsverschijnselen. Maar er moesten keuzen worden gemaakt. En ik hoop natuurlijk dat er toch een beeld bij U achterblijft van het vakgebied.

De computer speelde in het betoog een belangrijke rol. Dat was onvermijdelijk. De computer heeft een niet spoedig te overschatten invloed op de ontwikkeling gehad. De ontwikkeling is er a.h.w. door omhoog gestuwd. Niet alleen kan de computer veel werk uit handen nemen, de exploratie van nieuwe gebieden wordt er door mogelijk gemaakt. De eisen die aan de gebruiker worden gesteld wat betreft kennis en inzicht op het vakgebied gaan daardoor echter mede omhoog. Hier liggen de beperkingen en de gevaren!

Wat het onderwijs betreft mag het wel bij herhaling worden gezegd, dat het nog altijd in de eerste plaats aankomt op kennis en inzicht en dat werkelijk inzicht op een vakgebied slechts verkregen wordt door er intensief bij betrokken te zijn.

In de onderzoekwereld zal nog veel spuurwerk moeten worden verricht wil er op adequate wijze van de mogelijkheden van de computer gebruik worden gemaakt. Er blijken nog veel leemten in onze kennis te zijn.

Zoals we hebben gezien maakte de computer diepgravend onderzoek mogelijk en bij constructies van uitzonderlijk belang, zoals een groot offshore-platform, de stormvloedkering in de Oosterschelde kan zo'n onderzoek verantwoord zijn. Dit heeft dan het karakter van een eindcontrole, zoals bij de nabla-lijger van de Haringvlietsluizen met behulp van een experiment werd verricht en het is het werk van specialisten.

Bij systematisch onderzoek, of parameteronderzoek, ten behoeve van algemene doeleinden, krijgen resultaten vooral zin als er een structuur in kan worden onderkend, die houvast geeft, of althans het gevoel geeft dat men er iets van begrijpt. Ik zie een belangrijke opgave in het bewerken van onderzoeksresultaten, waarbij het oog gericht zou moeten zijn op de gebruiker, de ontwerpend ingenieur, het liefst weinig in de vorm van voorschriften, niet te veel empirische formules, maar vooral in de vorm van gedachtemodellen, waarmee gewerkt kan worden. "Je vois les forces", ik zie de krachten, zei Hennebique, een pionier van het gewapend beton. Dat kan niet, krachten kun je niet zien. Maar de uitspraak betekent dat de ontwerper behoefte heeft aan een beeld, een voorstelling, waarmee hij aan een constructie vorm kan geven. Dat kan een model voor de krachtwerving zijn. Ook een beeld van de vervormingen, een kinematisch model kan heel verhelderend werken. Onderzoekers kunnen hier de helpende hand reiken.

Onderzoeken en ontwerpen zijn twee geheel verschillende activiteiten, die bijzonder stimulerend op elkaar kunnen inwerken. Het vereist wel begrip over en weer. Toegepaste Mechanica speelt in beide werelden een rol. Zij is zowel wetenschap als gereedschap.

Zeer gewaardeerde toehoorders,

Ik dank U voor Uw aandacht.



