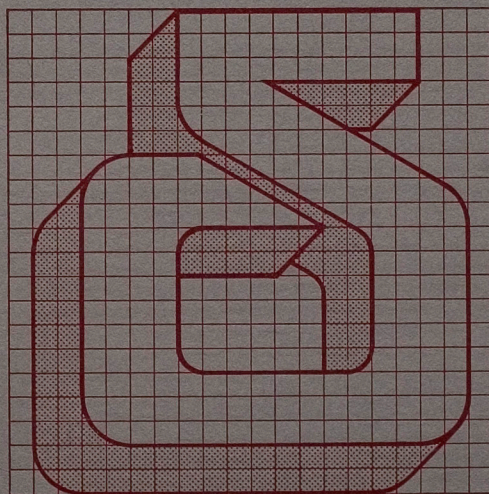


Ir. J. Witteveen

Lessen uit de geschiedenis
van de toegepaste mechanica



Delftse Universitaire Pers

Lessen uit de geschiedenis
van de toegepaste mechanica

Lessen uit de geschiedenis
van de toegepaste mechanica

*Rede
uitgesproken bij de aanvaarding
van het ambt van buitengewoon hoogleraar
in de toegepaste mechanica
aan de afdeling der Civiele Techniek
van de Technische Hogeschool te Delft
op woensdag 28 januari 1976
door ir. J. Witteveen*

Copyright © 1976 by Delftse Universitaire Pers.

No part of this book may be reproduced in any form by print, photoprint, microfilm or any other means without written permission from the publisher.

Voor alle kwesties inzake het fotokopiëren van één of meer pagina's van deze uitgave: Stichting Reprorecht, Amsterdam.

Delftse Universitaire Pers

*Mijne heren leden van het College van Bestuur
en van de Hogeschoolraad
mijnheer de Rector Magnificus
en mijne heren Dekanen
dames en heren leden van deze Hogeschoolgemeenschap
dames en heren medewerkers van TNO,
in het bijzonder van het Instituut TNO voor Bouwmaterialen
en Bouwconstructies
dames en heren studenten
en voorts U allen, die door Uw aanwezigheid blijk
geeft van Uw belangstelling
zeer gewaardeerde toehoorders,*

*'It is only from the past
that we can judge the future'
(Sir Winston Churchill, 1945)*

Inleiding

Bij het binnengaan van de aula heeft u zich naar alle waarschijnlijkheid geen zorgen gemaakt over de veiligheid van de constructie. Het robuuste uiterlijk geeft daartoe ook geen aanleiding. U verwacht terecht dat de draagconstructie in staat is de belastingen, onder andere veroorzaakt door uzelf, naar de fundering af te leiden zonder te bezwijken. Ook mag u verwachten dat een brandje in de kelder geen aanleiding geeft tot instorten van het gebouw. Het realiseren van deze veiligheid is de taak van de constructeur in nauwe samenwerking met de architect.¹

De constructeur geeft vorm aan de constructie en bepaalt de afmetingen met het oog op sterkte, stijfheid en stabiliteit. Hierbij worden de belastingen in rekening gebracht die tijdens de levensduur van het gebouw te verwachten zijn. Hij maakt daarbij gebruik van de toegepaste mechanica. Dit is een ingenieurswetenschap, waarbij op onderzoek en theorie gebaseerde methoden worden toegepast, waarmee het gedrag van vaste doch onder belasting vervormbare lichamen kan worden bepaald. De werkelijke constructie is veelal zo ingewikkeld, dat de toegepaste mechanica er slechts vat op kan krijgen door het probleem te schematiseren.

Deze schematisering betreft in de eerste plaats de krachtswerking, die in werkelijkheid veelal ruimtelijk is. Afgezien van bijzondere constructievormen zoals schalen, wordt de ruimtelijke krachtswerking van gebouwen in het algemeen geschematiseerd tot problemen van één of twee dimensies. De ligger, het raamwerk, respectievelijk de plaat en de schijf zijn hiervan voorbeelden. Vervolgens dient het toegepaste materiaal te worden geschematiseerd in termen van spanning-rek relaties. Tenslotte moeten de werkelijke belastingen waaraan de constructie wordt blootgesteld, worden vervangen door rekenbelastingen. Hiervoor dienen waarden te worden aangenomen met kansen van overschrijding die aanvaardbaar klein zijn.

Nadat schematisering van constructie, materiaaleigenschappen en belasting heeft plaatsgevonden, kan worden overgegaan tot de berekening, dat wil zeggen tot de bepaling van de krachtswerking in de constructie. In engere zin is de constructeur hier beoefenaar van de toegepaste mechanica. Zijn berekeningen wijzen uit of bij de aangenomen afmetingen en materiaaleigenschappen de constructie de daarop werkende belastingen kan dragen. Daarnaast moet worden onderzocht of de constructie onder gebruiksomstandigheden bijvoorbeeld geen ontoelaatbare doorbuigingen of trillingen vertoont.

Tenslotte vindt op basis van de uitkomsten van de berekening een terugkoppeling plaats. Hierbij krijgt de berekening vlees en bloed door van de geschematiseerde constructie terug te gaan naar de werkelijke constructie. Bij een eerste berekening zal in het algemeen aan het licht treden dat eerdere, bij de schematisering gedane aannamen achteraf onjuist blijken te zijn. In het ergste geval volgt uit de berekening dat de constructie niet kan worden gerealiseerd zoals wij haar in eerste instantie hadden gedacht. Er moet dan worden nagegaan of andere constructievormen of andere materialen betere mogelijkheden bieden. In het algemeen zullen verschillende varianten moeten worden onderzocht om een optimale constructie te verkrijgen.

Een vertekend beeld zou echter worden geschilderd als wij het ontwerpen van bouwconstructies uitsluitend vanuit de gezichtshoek van de toegepaste mechanica zouden belichten. Immers in het verleden zijn zonder kennis van rekenmethoden indrukwekkende bouwwerken tot stand gebracht. Men denke slechts aan de piramiden en obelissen van de Egyptenaren, de latere bruggen en aquaducten van de Romeinen en aan de kathedralen van de Gotiek. Vreedenburg noemde dit ontwerpen op ervaring, intuïtie en vernuft.² Hoewel de vergelijking niet geheel opgaat, kunnen wij ons hiervan een voorstelling maken door te denken aan de manier waarop een kind met blokken speelt. Al spelende bouwt het ervaring op. Het ontdekt dat het op elkaar stapelen van blokken maar tot een beperkte hoogte mogelijk is en dat een toren hoger gebouwd kan worden op de tegels in de keuken, dan op het hoogpolig tapijt in de kamer. Een meccanodoos biedt in dit opzicht meer mogelijkheden dan een blokkendoos. Hiermee kunnen constructies met een monolithisch karakter worden gebouwd, die beter een stootje kunnen verdragen.

Een op ervaring gebaseerd ontwerpen kenmerkt zich door de omstandigheid dat extrapolatie naar grotere bouwwerken een hachelijke onderneming is. De gedurende vele eeuwen constant gehouden dia-

meter van koepels is hiervan een voorbeeld. Een uitsluitend op rekenmethoden gericht ontwerpen mist de creativiteit van de bouwers uit de oudheid en werkt verstarrend. Het domweg blijven toepassen van voor monolietbouw ontwikkelde rekenmethoden, voor constructies vervaardigd van geprefabriceerde elementen, heeft enige jaren geleden nog tot gedeeltelijke instorting van een hoog flatgebouw geleid. Een andere vorm van verstarring is het gedurende lange tijd negeren van bijzondere belastingen als brand en explosies.

Uit deze voorbeelden blijkt, dat het niet op elkaar afgestemd zijn van schema en werkelijkheid gemakkelijk tot ongewenste gevolgen kan leiden. De constructeur moet er voortdurend op bedacht zijn dat zijn inzicht in de krachtswerking zo goed mogelijk bij de werkelijkheid aansluit. Een berekening zal de werkelijkheid nooit geheel weergeven. De ontwikkelingen dienen hierop echter wel gericht te zijn. Het is daarom wellicht de moeite waard na te gaan hoe in de loop van de geschiedenis de toegepaste mechanica zich heeft ontwikkeld in relatie tot de werkelijkheid.

Het is dit onderwerp dat ik heb gekozen voor mijn rede. De titel 'Lessen uit de geschiedenis van de toegepaste mechanica' geeft daarbij aan dat wij ook zullen trachten lijnen door te trekken naar de toekomst. Het onderwerp biedt tevens de gelegenheid stil te staan bij belangrijke bijdragen tot de ontwikkeling van de toegepaste mechanica van twee landgenoten, Pieter van Musschenbroek en N. C. Kist.

Galilei, Mariotte, Parent

Kenmerkend voor het vroegere ontwerpen op ervaring is de directe koppeling tussen gebruiksdoel enerzijds en de noodzakelijke afmetingen van de constructie anderzijds. Op enkele uitzonderingen na heeft het tot het tijdperk van de Renaissance geduurd voordat verklaringen werden gezocht voor en verbanden gelegd tussen de gevonden ervaringen.^{3,4,5} Hier ligt het begin van doelgericht onderzoek, theorievorming en de daarop gebaseerde berekening.

Als grondlegger van de toegepaste mechanica kan Galilei (1564–1642) worden beschouwd. Wij zullen slechts stilstaan bij één enkel onderwerp dat zijn aandacht had. Het heeft in de beginperiode van de toegepaste mechanica lange tijd bekend gestaan als het 'Galileïsche Probleem' en de bestudering hiervan stond centraal bij de theorievorming van op buiging belaste constructies.⁶ Het gaat hierbij om de bepaling van het draagvermogen van een aan één uiteinde ingeklemde ligger, die aan het andere einde wordt belast door een

uitwendige kracht. Galilei leidt dit probleem als volgt in:

'Wat de aard van de weerstand die massieve lichamen tegen uitwendige krachten bieden ook moge zijn, er kan geen twijfel zijn aan het bestaan ervan. En hoewel deze weerstand erg groot is als de kracht in langsrichting wordt aangebracht, wordt in de regel waargenomen, dat de weerstand minder is als de kracht in dwarsrichting wordt aangebracht.'

Zowel uit de probleemstelling zelf als uit het verloop van zijn betoog valt af te leiden dat gezocht wordt naar een rechtstreeks verband tussen de bekende breeksterkte van een ligger in axiale richting ('absolute sterkte') en de onbekende buigsterkte bij belasting in dwarsrichting. Ondersteld wordt nu dat bij buiging de gehele doorsnede bij de inklemming op trek wordt belast en dat de inwendige trekkracht gelijk is aan de breeksterkte in axiale richting. De doorsnede roteert daarbij om de gedrukte onderrand. Uit het evenwicht volgt dat het uitwendige moment gelijk is aan de breeksterkte in axiale richting maal de halve liggerhoogte. Hieruit kan de bezwijkbelasting van de ligger rechtstreeks worden afgeleid.^a Opmerkelijk is dat Galilei hier reeds een aantal, later gedefinieerde, begrippen uit de plasticiteitsleer invoert.

De 'bezwijkbelasting' wordt bepaald door schematisering van de ligger tot een 'bezwijkmechanisme', met bij de inklemming een 'plastisch scharnier'. Van de rechthoekige spanningsverdeling in het plastisch scharnier kan achteraf worden gesteld dat deze bij benadering juist is voor een taai materiaal, waarvan de druksterkte vele malen groter is dan de treksterkte. De berekening van de bouten van kopplaatverbindingen vindt nog steeds op deze wijze plaats. Weliswaar leidt de aangenomen krachtsverdeling voor de meeste materialen tot een numerieke fout in de uitdrukking voor de bezwijkbelasting, maar zij heeft geen invloed op de dimensie ervan. Hierdoor blijven de verdere beschouwingen van Galilei over de relatie tussen de geometrie van doorsneden en hun buigsterkte correct. Hetzelfde geldt voor zijn beschouwingen over de invloed van het eigen gewicht op het draagvermogen van geometrisch identieke constructies bij toenemende afmetingen. Van verstrekkende betekenis zijn de hierop gebaseerde uitspraken over de grenzen aan de groei van constructies, mensen en dieren. Voor zover bekend heeft Galilei geen proeven uitgevoerd om de door hem gevonden relatie tussen de breeksterkte in langsrichting en de buigsterkte van een doorsnede

a. Galilei beschouwt alleen rechthoekige, ronde en buisvormige doorsneden. Indien F de breeksterkte in axiale richting voorstelt ('absolute sterkte'), dan is het bezwijkmoment van de doorsnede bij de inklemming $M = F \cdot \frac{1}{2}h$, waarin h de liggerhoogte is. Wanneer voor F de waarde σbh wordt ingevuld, met voor σ de treksterkte van het materiaal, dan vinden we voor het bezwijkmoment van een rechthoekige doorsnede $M = \frac{1}{2}\sigma bh^2$.

te toetsen.

Eerst omstreeks 1680 voert Mariotte (1620–1684) proeven uit met dit doel. Deze werden onder andere bijgewoond door Christiaan Huygens (1629–1695). Rechtstreekse aanleiding hiertoe is het ontwerp voor een pijpleiding ten behoeve van de watervoorziening van het Paleis van Versailles. Mariotte constateert dat de theorie van Galilei te grote waarden voor de buigsterkte oplevert. Om de uitkomsten te kunnen verklaren brengt hij een wijziging aan in diens theorie, namelijk een andere krachtsverdeling^b in de doorsnede bij de inklemming. Deze krachtsverdeling berust op de aanname dat breuk van de doorsnede optreedt als de trekkracht in de zwaarst belaste vezel een grenswaarde overschrijdt. Hiermee, en met de onderstelling dat over de hoogte van de doorsnede de krachten in de vezels evenredig zijn met de afstand tot het punt waarom de doorsnede roteert, wordt een eerste aanzet gegeven tot een oplossing met behulp van de elasticiteitstheorie.^c Mariotte laat echter evenals Galilei de rotatie-as van de doorsnede samenvallen met de gedrukte onderrand.^d Deze krachtsverdeling doet eveneens sterk denken aan de berekening van bouten in kopplaatverbindingen, nu volgens een elastische beschouwing.

In 1713 toont Parent (1666–1716) aan dat de rotatie-as moet samenvallen met een evenwichtsas; waarbij de som van de normaalspanningen, die ter weerszijden van deze as werken, nul moet zijn. Als blijkt dat voor een rechthoekige doorsnede, waarvan bij gelijke eigenschappen voor trek en druk de neutrale lijn in het midden ligt, de berekeningen niet overeenstemmen met proefresultaten voert Parent verschillende eigenschappen voor trek en druk in. De neutrale lijn ligt dan niet meer in het midden van de doorsnede en de spanningsverdeling vertoont ter plaatse een knik. Parent kan hiermee worden beschouwd als de mede-grondlegger van de elasticiteitstheorie voor liggers, deze plaats delend met Jacob Bernoulli (1654–1705), die voor het eerst de vorm van de elastische lijn bij buiging onderzocht. Het werk^e van Parent bleef echter gedurende lange tijd

b. We spreken hier van 'krachtsverdeling' in plaats van 'spanningsverdeling' omdat het begrip spanning door Mariotte nog niet wordt gehanteerd.

c. In 1678 publiceerde Robert Hooke (1635–1703) de naar hem genoemde elasticiteitswet.

d. Indien F de breeksterkte in axiale richting voorstelt ('absolute sterkte') is het bezwijkmoment van een rechthoekige doorsnede bij de inklemming volgens Mariotte $M = \frac{1}{2} F \cdot \frac{2}{3}h = \frac{1}{3} Fh$. Deze uitdrukking geldt alleen voor rechthoekige doorsneden, maar is gedurende lange tijd ook gebruikt voor ronde en buisvormige doorsneden, ook door Mariotte.

e. In tegenstelling tot vroegere publikaties is dit werk niet gepubliceerd in de verhandelingen van de Parijse Academie van Wetenschappen.

onopgemerkt, waardoor de ingenieurs van de achttiende eeuw bleven rekenen met de formules van Galilei en Mariotte.⁷

Pieter van Musschenbroek

In het begin van de achttiende eeuw begint ook in de Nederlanden belangstelling te ontstaan voor de berekening van bouwconstructies. In de hieraan voorafgaande periode was, evenals elders, een ontwikkeling op gang gekomen, waarbij de oude vraagstelling naar 'het wezen der dingen' werd verdrongen door een nieuwe en wel 'hoe gedragen zich de dingen'. Het experiment, eerst kwalitatief later kwantitatief, en de wiskunde beginnen hun intrede te doen. De namen van Simon Stevin (1548–1620) en Christiaan Huygens (1629–1695) zijn hieraan verbonden. Met de benoeming van 's Gravensande (1688–1742) aan de Leidse Universiteit komt de 'experimentele methode' tot grote bloei.⁸ Karakteristiek hierbij is een scherpe soms dogmatische afwijzing van de vroegere op hypothesen gestoelde natuurkunde. Het werk van 's Gravensande wordt voortgezet door Pieter van Musschenbroek (1692–1761).^f Van belang voor ons onderwerp is zijn bijdrage tot de berekening van bouwconstructies. In zijn verhandelingen komt Van Musschenbroek naar voren als een groot voorstander van de 'experimentele methode'. Niets mag als vaststaand worden aangenomen wat niet door overtuigende proeven of strenge mathematische afleidingen bewezen is. Nauwkeurige bestudering van zijn werk doet evenwel vermoeden dat zijn geringe aandacht voor hypothesen, op enkele uitzonderingen na, een belemmering is geweest voor theorievorming. Zijn verrichtingen op het gebied van de berekening van bouwconstructies zijn dan ook uitsluitend van experimentele aard.

Pieter van Musschenbroek is waarschijnlijk de eerste geweest die op systematische wijze de sterkte van materialen en de hieruit voortvloeiende constructie-elementen zoals liggers en kolommen onderzocht.^{4, 5, 9, 10, 11, 12} In zijn in 1729 verschenen boek *Dissertationes Physicae Experimentalis et Geometricae* geeft hij hiervoor een motivering, waarvan een gedeelte hier volgt:¹⁰

'Het nut van deze wetenschap is enorm in de burgerlijke bouwkunde, want uit enige gehouden proeven zullen wij vooraf bepalen of een onderdeel in staat is een bepaald gewicht te dragen. Op deze manier voorziet de wetenschap van de sterkte in onze veilig-

f. Achtereenvolgens hoogleraar te Duisberg (1719–1723), Utrecht (1723–1740) en Leiden (1740–1761). Hij ontleent zijn bekendheid vooral aan de uitvinding van de Leidse fles.

heid en bevrijdt ons van het gevaar van een dreigende instorting, of van nutteloze uitgaven welke balken, posten, palen en stutten, dikker dan vereist, met zich mee zouden brengen'.

Hij begint met het uitvoeren van trekproeven op uiteenlopende materialen als ijzer, hout, glas en leer. Van de hiermee verkregen gegevens is in de praktijk veelvuldig gebruik gemaakt, onder andere bij de restauratie in 1743 van de koepel van de Sint Pieterskerk in Rome. Hierbij werden ijzeren trekringen^g aangebracht om scheurvorming van de koepel tegen te gaan.¹³ Het is wellicht interessant hier te vermelden, hoe de uit drie leden bestaande commissie van onderzoek de berekening van de koepel aanpakt. De koepel wordt geschematiseerd tot mechanismen met scharnieren en wel op de plaatsen met de grootste scheurvorming en aan de voet van de fundering. Met als belasting het eigen gewicht wordt door middel van een evenwichtsbeschouwing de benodigde sterkte van de trekringen bepaald. In de moderne terminologie van de plasticiteitsleer wordt hiermee een bovengrens voor de bezwijkbelasting van de koepel verkregen. Vermeldenswaard is ook dat de commissie voor de trekringen een veiligheidscoëfficiënt van twee voorstelt.

Ook het 'Galileïsche probleem' heeft de aandacht van Pieter van Musschenbroek. Wij roepen in uw herinnering terug dat het hierbij gaat om een rechtstreeks verband tussen de bekende treksterkte en de onbekende buigsterkte van liggers. Van Musschenbroek stelt vast dat er volgens hem te snel een universele regel is opgesteld voor het verband tussen, wat hij noemt de 'volkomen' en de 'dwarsse saamenhegting'.^h Zelf zegt hij hierover:¹⁰

'Geenszins heeft het mij later gespeten dat ik getwijfeld heb, omdat ik uit zeer veel proeven heb geleerd dat een universele regel niet gegeven kan worden'.

Een juiste conclusie, immers naar later is komen vast te staan is de buigsterkte niet alleen afhankelijk van de treksterkte en de geometrie van de doorsnede, maar tevens van de druksterkte en met name van de taaiheid van het materiaal. Eén en ander is voor Van Musschenbroek aanleiding om de buigsterkte van liggers niet via de omweg van de treksterkte te bepalen, maar rechtstreeks met behulp van modelproeven. Hij ontwerpt eenvoudige toestellen, waarmee de sterkte van rechthoekige houten liggertjes kan worden bepaald. Door gebruik te maken van de eerder door Galilei afgeleide betrekking dat de buigsterkte evenredig is met de breedte en het kwadraat van

g. De oorspronkelijke, door Michelangelo (1475–1564) ontworpen, maar op het moment van diens dood nog onvoltooide koepel, (diameter 42 m) bevatte drie ijzeren ringen. In 1743 werden hieraan vijf ringen toegevoegd.

h. Treksterkte, resp. buigsterkte van een doorsnede.

de hoogte, en omgekeerd evenredig met de overspanning, kan de sterkte op ware grootte worden berekend.^j Van Musschenbroek is hiermee één der grondleggers van de experimentele mechanica. Bijzondere vermelding verdient dat bij de bepaling van het breukmoment, bij proeven met aan één zijde ingeklemde liggertjes, rekening wordt gehouden met het bij belasten kleiner worden van de afstand tussen inklemming en last. Hiermee is Van Musschenbroek waarschijnlijk de eerste geweest, die geometrische niet-lineairiteit in zijn beschouwingen betreft.

Aan Van Musschenbroek komt ook de verdienste toe als eerste, eveneens aan de hand van modelproeven het knikprobleem te hebben onderzocht. In het boek *'Dissertationes Physicae Experimentalis et Geometricae'*¹⁰ worden de resultaten vermeld van 22 proeven op rechthoekige houten kolommetjes. De lengte-afmetingen hiervan variëren tussen 16 en 47 cm, terwijl de afmetingen van de doorsnede liggen tussen 0,6 en 1,4 cm. De hieruit afgeleide stellingen ontleen wij aan het in 1736 verschenen boek *'Beginselen der Natuurkunde'*.¹¹

'De sterkte van een en het zelve hout, hebbende dezelfde dikte, maar verscheiden lengte, staande loodrecht op, en van boven door zwaarte neergedrukt, is in eene omgekeerde reden van de vierkanten der lengtens'.

'Houten, hebbende dezelfde hoogte, maar verscheiden dikten, door groote zwaarte belast, buygen krom met hunne dunste zijde; de sterkte van dusdanige houten zijn tot malkander, als de dikte der zijden, welke niet krom buygen, en als het vierkant der dikte van die zijden, welke krom buygen'.

Een verrassend goed resultaat, in aanmerking nemend de kleine proefstukken die zijn gebruikt. In 1744 geeft Euler (1707–1783) een mathematisch bewijs van de eerste stelling, uitgaande van Jacob Bernoulli's hypothese, dat in ieder punt van de elastische lijn, de kromming evenredig is met het buigend moment. De evenredigheid tussen moment en kromming bepaald door de buigstijfheid, wordt in navolging van Van Musschenbroek recht evenredig met de breedte en kwadratisch met de dikte ondersteld. Eerst in 1776 formuleert Euler de naar hem genoemde knikformule, waarin de buigstijfheid correct wordt weergegeven.^{4,9}

Bij nadere analyse van de knikproeven van Van Musschenbroek valt op dat de dikte van de proefstukken, in tegenstelling tot de lengte, slechts in geringe mate is gevarieerd. Dit vestigt de indruk dat Van

j. Zoals bekend is deze schaalwet alleen juist als wordt afgezien van de invloed van het eigen gewicht en van de dwarskracht.

Musschenbroek het knikprobleem beschouwt als een bijzonder geval van buiging en verklaart de evenredigheid met het kwadraat van de dikte.¹² In de betrekking voor de kniklast komt in dit geval een constante voor met een dimensie van een kracht gedeeld door een lengte.

Zoals gezegd heeft Pieter van Musschenbroek, meer geïnteresseerd in het 'hoe' dan in het 'waarom', geen bijdragen geleverd tot de theorie van liggers en kolommen. Wel is er een grote mate van oorspronkelijkheid in de manier waarop hij modelproeven uitvoerde om met behulp van schaalwetten de bezwijkbelasting bij ware grootte te voorspellen. Naar ik hoop heeft het voorgaande aangetoond dat Van Musschenbroek een duidelijke plaats inneemt in de rij van onderzoekers, die hebben bijgedragen tot de ontwikkeling van de toegepaste mechanica.

De elasticiteitstheorie

Het wordt tijd over te gaan naar een nieuwe fase in de geschiedenis van de toegepaste mechanica. We beperken ons tot een globale schets van de ontwikkelingen zoals die zich hebben voorgedaan in de tweede helft van de achttiende en in de negentiende eeuw. Het accent valt daarbij op de ontwikkelingen die van belang zijn voor, en een zeker contrast oproepen met nog te vermelden latere ontwikkelingen. Karakteristiek voor de beoefening van de mechanica in deze periode is de onderstelling dat materialen zich elastisch gedragen. De op de wet van Hooke gebaseerde elasticiteitstheorie gaat uit van een lineair verband tussen de spannings- en vervormingscomponenten, waarbij in haar eenvoudigste vorm de verplaatsingen bovendien oneindig klein worden ondersteld. Hierdoor kunnen de evenwichtsvoorwaarden worden betrokken op de onvervormde constructie en zijn de vergelijkingen, die het probleem beheersen lineair. De oplossing van dit stelsel is uniek, zodat er slechts één evenwichtstoestand bestaat die aan alle vergelijkingen voldoet. Een eerste toepassing hiervan is de reeds genoemde liggertheorie van Parent-Bernoulli. Onder andere voor op druk belaste constructiedelen zoals kolommen, is de lineaire elasticiteitstheorie niet toereikend om het werkelijke gedrag te beschrijven. De theorie moet dan worden uitgebreid voor eindige verplaatsingen. De evenwichtsvoorwaarden worden hierbij betrokken op de vervormde constructie, zodat de vergelijkingen die het probleem beheersen niet langer lineair zijn. Kenmerkend in de niet-lineaire elasticiteitstheorie is het bestaan van meervoudige oplossingen. Een voorbeeld hiervan is het knikverschijnsel, waarvan

de reeds genoemde theorie van Euler een eerste toepassing is.

De hiervoor geschetste schematisering met als uitgangspunt de wet van Hooke maakte vele problemen geschikt voor een wiskundige behandeling. Het karakteristieke verschil met de hieraan voorafgaande periode is dat de theorievorming het mogelijk maakte vraagstukken van toenemende gecompliceerdheid tot oplossing te brengen. De ontwikkeling is vooral gestimuleerd door de bouw van bruggen met grote overspanningen. Het succes van de elasticiteitstheorie deed de werkelijke materiaaleigenschappen, die voordien wel uitgangspunt waren, echter in het vergeetboek raken. Hiermee kwam ook de toestand bij bezwijken op de achtergrond. Een uitzondering moet worden gemaakt voor de grondmechanica waarbij sommige oplossingen bleven berusten op het bezwijkgedrag. Wij gaan voorbij aan zowel de verschillende problemen die met de elasticiteitstheorie tot oplossing zijn gebracht, als aan de rij van onderzoekers die hiertoe hebben bijgedragen.^{4,5,9} Bijzondere vermelding verdienen nog de oplossingsmethoden die berusten op energieprincipes, als alternatieve formuleringsvoorwaarden voor het evenwicht en de vormveranderingsvoorwaarden. Deze principes liggen ook thans nog ten grondslag aan oplossingen met behulp van de elementenmethode. Van groot belang was tenslotte de ontwikkeling van de grafostatica. Hierdoor nam het inzicht in de krachtswerking van o.a. bruggen belangrijk toe.

Het ontstaan van de plasticiteitstheorie

Kenmerkend voor de elasticiteitstheorie is dat alle materialen ondanks verschillende eigenschappen gelijk worden behandeld. Verschil in materiaalgedrag komt slechts tot uiting in de grootte van de toegelaten spanningen en de elasticiteitsmodulus. Hoewel hiermee een redelijk inzicht in de krachtswerking van constructies wordt verkregen zolang de wet van Hooke bij benadering opgaat, is de elasticiteitstheorie niet bij machte het gedrag van taaie materialen bij bezwijken te beschrijven. Zeer duidelijk is dit te illustreren aan de hand van een buigproef op een houten, respectievelijk stalen liggertje. Het houten balkje zal bij een relatief kleine doorbuiging plotseling breken, terwijl het stalen balkje bij een grote doorbuiging de belasting blijft dragen. Het bij hogere spanningen verlaten van de wet van Hooke en het in rekening brengen van niet-lineair materiaalgedrag in het plastisch gebied houdt op het eerste gezicht aanzienlijke complicaties in. Wiskundig bezien zal het verband tussen spanningen en verplaatsingen, ook indien deze oneindig klein worden ondersteld, worden beheerst door niet-lineaire vergelijkingen. Ongetwijfeld heeft

dit de beoefenaars van de mechanica in de negentiende eeuw, die wel met het niet-lineaire gedrag van materialen op de hoogte waren, afgeschrikt. Door het aannemen van een geïdealiseerd elastisch-plastisch materiaalgedrag, blijkt het echter mogelijk te zijn op eenvoudige wijze de bezwijkbelasting en de wijze van bezwijken van constructies te bepalen. Een dergelijke berekening is in vele gevallen zelfs aanzienlijk eenvoudiger dan een berekening gegrond op de lineaire elasticiteitstheorie.

Het is de verdienste van de Hongaarse ingenieur Kazinczy en onze landgenoot N. C. Kist geweest, onafhankelijk van elkaar, hiervoor de grondslag te hebben gelegd.^k Wij zullen bij het werk van laatstgenoemde wat langer stilstaan. Nicolaas Christiaan Kist (1867–1941) introduceerde zijn nieuwe rekenmethode in een rede bij de aanvaarding van het hoogleraarsambt in 'De bruggenbouw en andere belangrijke ijzerconstructies' aan de Technische Hogeschool te Delft in 1917.¹⁴ De rede begint met het aan de orde stellen van de vraag 'of de wet der evenredigheid wel de beste basis is voor de berekening van ijzeren gebouwen en bruggen'. Zo is het draagvermogen van een stalen staaf met een rond gat niet uitgeput wanneer ter plaatse van het gat de vloeispanning wordt bereikt. Weliswaar is een vergroting van de spanning in dat punt niet mogelijk, maar dankzij de taaigheid van het materiaal kan een grotere belasting worden opgenomen met een gewijzigde spanningsverdeling. Voordat bezwijken optreedt zullen de spanningen zich zo gunstig verdelen als met het evenwicht verenigbaar is. Hetzelfde principe wordt door Kist ook toegepast op statisch onbepaalde vakwerken en liggers.^l Dit resulteert in een nieuwe rekenmethode, later bezwijkanalyse^m genoemd, waarbij rechtstreeks de bezwijkbelasting van de constructie wordt bepaald.

Zoals bekend kan het grensdragvermogen worden berekend met behulp van twee duale stellingen, de onder- en bovengrenstheorema's. Het ondergrenstheoremaⁿ wordt door Kist — zij het intuïtief en zonder strenge bewijsvoering — volledig aangegeven. Aan het slot van Kist's rede treffen we hierover de volgende uitspraak aan:

'Gekomen aan het eind van deze beschouwing stel ik de vraag
'Leidt een sterkteberekening, die uitgaat van de evenredigheid van

k. In 1913 ontdekte Gabor Kazinczy (geb. 1888) bij het uitvoeren van proeven op aan weerszijden ingeklemde stalen liggers, dat bezwijken eerst optreedt nadat drie doorsneden vloeien. Zijn werk bleef echter tot 1931 onopgemerkt.¹⁵

l. Kist berekent het plastisch moment van een I-profiel op 1,17 maal het elastisch opneembaar moment.

m. Deze benaming raakt thans in onbruik en is vervangen door elementaire (lineaire) plasticiteitstheorie.

n. Het is historisch onjuist dat in het Teleac-Beton cursusboek (6.1.3) deze stelling wordt toegeschreven aan Prager.

kracht en vormverandering, consequent toegepast, tot een goede constructie van ijzeren bruggen en gebouwen?" Het komt mij voor, dat het antwoord op die vraag moet luiden "Neen". De berekening gegrond op de evenredigheid kan meestal achterwege blijven, en kan, zoo zij al niet achterwege blijft, zeer globaal worden uitgevoerd. Hoofdzaak moet zijn de veel makkelijker berekening, waarbij men de krachten zoo gunstig — gunstig in dien zin, dat de draagkracht zoo groot mogelijk is — verdeelt als met het evenwicht te vereenigen valt'.

Bij het ontwerpen van statisch onbepaalde constructies kan nu als volgt te werk worden gegaan. Na het aannemen van een krachtsverdeling, bijvoorbeeld een momentenlijn in een statisch onbepaald raamwerk, waarbij de statisch onbepaalde willekeurig mogen worden gekozen, geeft men de onderdelen van de constructie de afmetingen die met deze krachtsverdeling overeenstemmen. Bij bezwijken zal de aangenomen krachtsverdeling ook werkelijk optreden.

Dit beginsel is ook thans nog van grote betekenis voor het optimaliseren van bouwconstructies. Voorwaarde is een taai materiaalgedrag en een taai constructiegedrag. Het laatste begrip komen we bij Kist nog niet tegen.

Tenslotte moet nog worden vermeld dat Kist zijn nieuwe theorie ook heeft toegepast op de berekening van kophoeklassen.¹⁶ Als de door de las over te brengen kracht statisch onbepaald is, wordt aangenomen dat de kracht die de verbinding overbrengt zo groot mogelijk is.^o Wij besluiten hiermee onze beschouwingen over het werk van Kist, omdat wij de resterende tijd willen benutten enige recente ontwikkelingen van de plasticiteitstheorie te schetsen.

Recente ontwikkelingen van de plasticiteitstheorie

Dat de voortgang hiervan ook is gestimuleerd vanuit de werktuigbouwkunde is bekend. Wij zullen hier echter de nadruk leggen op de ontwikkelingen zoals die zich hebben voorgedaan bij het berekenen van bouwconstructies. De prioriteiten liggen hier ook anders. Onderscheid kan worden gemaakt tussen de methoden die het gedrag beschrijven bij incrementele verhoging van de belasting en die welke uitsluitend een uitspraak doen over de belasting bij bezwijken. Van de eerstgenoemde methoden geven wij een korte karakteristiek en bespreken slechts enkele toepassingen, temeer omdat onlangs vanaf deze plaats hierover nog een uiteenzetting is gegeven.¹⁸ Zoals

o. Kist neemt a priori aan dat de keeldoorsnede de gevaarlijkste doorsnede is. Later is door Vreedenburgh aangetoond dat een andere doorsnede maatgevend is.¹⁷

gezegd wordt het probleem beheerst door niet-lineaire vergelijkingen en is bovendien de onomkeerbaarheid van het vervormingsproces een probleem. Deze laatste complicatie doet zich onder andere voor bij raamwerken als reeds ontstane plastische scharnieren bij toenemende belasting worden ontlast. Meestal zal de berekening weinig aan betrouwbaarheid inboeten als de onomkeerbaarheid van het vervormingsproces buiten beschouwing blijft, zeker wanneer de volgorde van belasting in werkelijkheid niet bekend is. Met enige aanpassing kan dan met vrucht gebruik worden gemaakt van de in de elasticiteitstheorie afgeleide energieprincipes. Hiermee komen de moeilijkheden die zich voordoen bij plasticiteitsproblemen voornamelijk tot uitdrukking in het rekenproces. We gaan voorbij aan de plasticiteitswetten en vermelden slechts, dat met name voor beton behoefte bestaat aan een betrouwbare fenomenologische beschrijving van het grensgedrag. Het gebruik van incrementele methoden is onder andere noodzakelijk bij nauwkeurige stabiliteitsberekeningen voor draagconstructies van gewapend beton en staal. Hetzelfde geldt voor vraagstukken waarbij tijdsafhankelijke plastische vervorming en kruip een belangrijke rol spelen. Bij staalconstructies bleven tot voor kort tijdsafhankelijke plastische vervormingen buiten beschouwing. Bij het analyseren van het gedrag van staalconstructies onder omstandigheden zoals die zich bij brand voordoen, is het in rekening brengen hiervan noodzaak. Hierbij vormt niet zo zeer de berekening zelf een probleem, maar is behoefte aan een voldoende nauwkeurige beschrijving van het niet-lineaire tijdsafhankelijke materiaalgedrag bij hoge temperaturen. Kenmerkend voor de incrementele methoden is dat de krachten en de verplaatsingen in een constructie bij elke belasting bekend zijn, zij het vaak ten koste van veel rekenwerk. Aan de hand hiervan kunnen gebruikscriteria, zoals doorbuigingseisen worden getoetst, terwijl bovendien het grensdragvermogen van de constructie hieruit kan worden afgeleid.

Voor vele in de bouwpraktijk voorkomende constructies is het voldoende alleen het grensdragvermogen te kennen. Onder bepaalde voorwaarden is hiervoor een eenvoudiger aanpak mogelijk. Voorbeelden hiervan zijn loodrecht op hun vlak belaste platen en raamwerken, mits het gedrag hiervan voldoende nauwkeurig wordt beschreven als de verplaatsingen oneindig klein worden ondersteld. De theorie van Kazinczy en Kist vormt de oorsprong van de methoden die uitsluitend een uitspraak doen over de belasting bij bezwijken. Historisch gezien is de verdere ontwikkeling hiervan voorafgegaan aan de hiervoor besproken incrementele methoden.^{19, 20} Deze kwamen eerst tot ontwikkeling met het beschikbaar komen van computers. Het grensdragvermogen bij oneindig kleine verplaatsingen

is éénduidig bepaald en wel door het evenwicht, de kinematische voorwaarden en de vloeivoorwaarden. Ten opzichte van de elasticiteitstheorie is het voordeel, dat de marge tussen gebruiksbelasting en bezwijkbelasting kan worden berekend, waarbij onzekerheden als restspanningen en zettingen geen rol spelen.

Ter sprake kwamen reeds de onder- en bovengrenstheorema's; het duale karakter hiervan maakt in vele gevallen een beoordeling van de nauwkeurigheid mogelijk. Aantrekkelijk is ook de relatieve eenvoud van de berekeningen. Wij wijzen op de berekening van loodrecht op hun vlak belaste platen, waar analytische oplossingsmethoden volgens de elasticiteitsleer bij een onregelmatige geometrie al gauw verstek laten gaan. Aan de hiervoor in de plaats tredende vloeilijntheorie kleeft echter het bezwaar dat de berekende bezwijkbelasting een bovengrens is. Toepassing van deze methode vereist daarom enig inzicht en ervaring in plaatberekeningen. Het bezwaar van mogelijk onveilige oplossingen kan worden vermeden door gebruik te maken van evenwichtsmethoden, die in beginsel berusten op het ondergrenstheorema. Hierbij kiest men zelf een systeem van belastingafdracht. Ook in dit geval wordt een beroep gedaan op de intuïtie van de constructeur om een evenwichtssysteem te kiezen dat bij een gegeven plaatdikte zo weinig mogelijk wapening vereist. Deze methode wordt in het algemeen ook bij raamwerken gevolgd, omdat bij enigszins gecompliceerde constructies het analyseren van mogelijke bezwijkmechanismen zeer bewerkelijk is. Een bijkomende omstandigheid is, dat ondergrensoplossingen zich beter lenen als ontwerpmethodiek, zowel voor hand- als computerberekeningen.

Aan de toepassing van deze methoden is een essentiële voorwaarde verbonden, namelijk dat op plaatsen waar plastische scharnieren of vloeilijnen ontstaan, plastische rotaties kunnen optreden. Met andere woorden de moment-krommingsrelatie van de doorsnede moet kunnen worden geschematiseerd tot een diagram met een horizontale vloeitak van voldoende lengte. Doordat onder bepaalde voorwaarden het vloeigebied zich ter weerszijden van de kritieke doorsnede kan uitbreiden worden plastische rotaties mogelijk. Vrij nieuw is het inzicht dat bij staalconstructies de versteviging van het materiaal hierbij een belangrijke rol speelt. Wij gaan voorbij aan het noemen van de voorwaarden die aan beton- en staalconstructies moeten worden gesteld om een taai constructiegedrag te waarborgen. Veel recent onderzoek heeft hierop betrekking. Op het gebied van betonconstructies noemen we het onderzoek naar de voorwaarden die aan lassen in wapeningsstaven moeten worden gesteld. Bij staalconstructies vormen de verbindingen een probleem, waaraan veel onderzoek is

en wordt verricht. Teveel komt men echter nog de misvatting tegen dat vervormingscapaciteit van verbindingen slechts nodig zou zijn als men volgens de plasticiteitstheorie rekent. Weliswaar is het de plasticiteitstheorie geweest die tot dit inzicht heeft geleid, maar deze eis dient onafhankelijk van de berekeningsmethode aan bouwconstructies te worden gesteld. Immers het schema van de berekening kan de werkelijkheid nooit geheel weergeven. Wanneer wordt gezorgd voor een taai constructiegedrag zal verschil tussen schema en werkelijkheid minder gemakkelijk tot ongewenste gevolgen leiden. Er zijn meer voorbeelden te noemen waarbij plasticiteitsoverwegingen de vormgeving van constructies hebben beïnvloed. We denken hier aan het afvlakken van berekende piekspanningen bij doorgaande liggers en bij puntvormig ondersteunde vloeren.

Geconstateerd moet echter worden dat de op het grensdragvermogen gebaseerde rekenmethoden in de praktijk minder ingang vonden dan oorspronkelijk wel werd verwacht. Het ligt voor de hand te onderstellen dat het gewend zijn aan elasticiteitsberekeningen op zichzelf al een belemmering vormde. Een belangrijk punt is ook dat de bouwvoorschriften geheel waren afgestemd op de elasticiteitstheorie en dat de aanpassing hiervan geruime tijd vergde. Eerst in de laatste edities van de beton- en staalvoorschriften zijn de methoden ter bepaling van het grensdragvermogen als gelijkwaardig aan de klassieke methoden opgenomen. De traagheid waarmee de voorschriften werden aangepast is mede veroorzaakt doordat nog een aantal problemen moest worden opgelost, voornamelijk op het gebied van de vervormingscapaciteit en van de stabiliteit. Hierbij bleek tevens dat oorspronkelijk verwachte besparingen niet in alle gevallen ook daadwerkelijk konden worden bereikt. Een dominerende invloed is echter uitgegaan van het beschikbaar komen van computers. Hierdoor werden oplossingen van elasticiteitsvraagstukken mogelijk, die tot dusver praktisch onuitvoerbaar waren. Het op de markt komen van standaardprogramma's toegesneden op speciale problemen versnelde deze ontwikkeling. Bij de positiebepaling van de methoden gebaseerd op het grensdragvermogen, dringt zich oppervlakkig gezien de vergelijking op met de relaxatie methode van Southwell en haar voorloper de vereffeningsmethode van Cross. Met de komst van de computer is de eerstgenoemde rekentechniek geheel achterhaald en heeft de techniek van het 'Crossen' belangrijk aan betekenis ingeboet. Het gebruik van de uitdrukking 'rekentechniek' is opzettelijk, om daarmee aan te geven dat deze vergelijking niet opgaat. Immers genoemde methoden dragen niet wezenlijk bij tot het inzicht in de krachtswerking van constructies, maar zijn slechts hulpmiddelen om deze te bepalen. De op het plastisch bezwijken gebaseerde methoden

daarentegen verschaffen wel dit inzicht en zijn, naar wij verwachten, van blijvende betekenis.

Slotbeschouwing

We staan thans aan het eind van de weg die we ons hadden voorgesteld te doorlopen. Rest nog de vraag, welke conclusies kunnen worden getrokken uit de veranderingen die zich hebben voorgedaan en waar het heengaat met de toegepaste mechanica van bouwconstructies. In grote trekken kan het verleden in drie perioden worden ingedeeld. De eerste periode, waaraan onder andere de namen van Galilei en van Van Musschenbroek zijn verbonden, wordt gekenmerkt door een tastend zoeken naar verbanden tussen elementaire ervaringen. Een karakteristiek voorbeeld is de poging de onbekende buigsterkte af te leiden uit de bekende treksterkte. Een begin wordt gemaakt met theorievorming en de experimentele mechanica doet haar intrede. De tweede periode is de bloeitijd van de elasticiteitstheorie. Hierbij staan theorievorming en wiskundige behandeling op de voorgrond. Hoewel de betekenis hiervan moeilijk overschat kan worden is men hierin soms te ver gegaan, door vast te houden aan de wet van Hooke en het negeren van de werkelijke materiaaleigenschappen. Met Kazinczy en Kist treedt een derde periode in, waarbij de werkelijke materiaaleigenschappen voorop komen te staan. In zekere zin wordt hierbij teruggegaan naar de beginperiode waarbij de bepaling van het grensdragvermogen eveneens op de voorgrond stond. Inmiddels is met de komst van de computer een vierde periode ingetreden. De vrijwel onbeperkte rekenmogelijkheden, die hiermee geboden worden maakt een bezinning in welke richting moet worden gekoerst wenselijk. En hiermee zijn we als vanzelf aangeland bij de vraag, langs welke lijnen de verdere ontwikkeling van de toegepaste mechanica, en wel in het bijzonder van de plasticiteitsberekeningen van bouwconstructies, zal plaatsvinden.

Als we tot de beantwoording hiervan overgaan is het nodig ons rekenschap te geven hoe vorm en afmeting van bouwconstructies worden bepaald. Hiertoe doen wij een beroep op uw herinnering door terug te grijpen op het begin van deze rede, waar dit in grote lijnen is geschetst met behulp van de begrippen: schematisering, berekening en terugkoppeling. Om onze inzichten duidelijk te maken moeten we tot een verdere detaillering hiervan overgaan, door de berekening te splitsen in een ontwerp-berekening, een definitieve berekening en een controleberekening. Het is vooral bij de ontwerp- en controleberekening waar de directe methoden zich zullen handhaven.

Immers bij het ontwerpen van gecompliceerde constructies is inzicht in de globale krachtswerking noodzakelijk voor een eerste schatting van de vorm en de afmetingen. Ook bij de controleberekening is toepassing van elementaire plasticiteitsbeschouwingen van belang. Hiermee kunnen vaak gecompliceerde definitieve berekeningen globaal worden gecontroleerd. Verdere ontwikkeling van de directe methoden is dan ook zeker verantwoord. Voor het definitieve ontwerp kan het noodzakelijk zijn een complete berekening uit te voeren. Hier voorzien wij een verdere ontwikkeling van de incrementele plasticiteitsberekeningen, vooral op het gebied van de stabiliteit. Onze verwachting is, dat de belemmeringen die zich thans nog voordoen bij het rekenproces, met de toenemende mogelijkheden van computers eerder zullen zijn opgeheven dan de knelpunten die zich voordoen bij een beschrijving van het materiaal. Dit geldt met name voor beton. Een belangrijk toepassingsgebied van plasticiteitsberekeningen is tenslotte het onderzoek naar de sterkte en stabiliteit van constructies bij brand en andere bijzondere belastingen. Wij verwachten dat op het gebied van brand de eerstkomende jaren belangrijke vorderingen zullen worden geboekt. Tot dusver is dit werk deels nog binnen de muren van de onderzoek-instituten gebleven. Het ogenblik waarop meer resultaten in operationele vorm aan de praktijk kunnen worden aangeboden kondigt zich reeds aan.

Ter afsluiting zullen wij nog nader motiveren, waarom in deze rede aan Van Musschenbroek en Kist zo'n belangrijke plaats is toegekend, anders dan dat beiden landgenoten zijn, die belangrijk hebben bijgedragen tot de ontwikkeling van de toegepaste mechanica. Hiertoe doen wij opnieuw een beroep op uw herinnering door terug te gaan naar het begin van deze rede, waar wij er de aandacht op vestigden dat een berekening nooit geheel met de werkelijkheid zal overeenstemmen. Beiden zijn representatief voor het streven deze werkelijkheid zo goed mogelijk te benaderen. Van Musschenbroek door de theorie van zijn voorgangers te wantrouwen en daarmee een aanzet te geven tot modelonderzoek. Kist door zich af te vragen of de elasticiteitstheorie wel een goed uitgangspunt is voor de berekening en daarmee de grondslag te leggen voor de plasticiteitstheorie. De noodzaak van een voortdurend bijstellen van rekenschema's op de werkelijkheid, is wel de belangrijkste les die we leren uit de geschiedenis van de toegepaste mechanica.

Zeer gewaardeerde toehoorders,

Bij de officiële aanvaarding van mijn ambt als buitengewoon hoogleraar aan deze Hogeschool betuig ik mijn eerbiedige dank aan Hare Majesteit de Koningin voor mijn benoeming.

Mijne heren, leden van het College van Bestuur,

Dat U in aansluiting op de onderwijsopdracht die ik enige jaren geleden mocht ontvangen mij hebt voorgedragen voor deze benoeming, getuigt van het vertrouwen dat U in mij stelt. Ook in de toekomst zal ik mijn taak naar vermogen trachten te vervullen.

Dames en heren hoogleraren, lectoren en medewerkers van de afdeling der Civiele Techniek, in het bijzonder van de vakgroep Toegepaste Mechanica,

Sommigen onder U waren mijn leermeesters, anderen collega's tijdens mijn studie aan deze Hogeschool. Ik stel me er veel van voor nu samen met U te mogen werken aan de opleiding van een nieuwe generatie civiel ingenieurs.

Hooggeleerde Bouma,

Een belangrijk deel van mijn wetenschappelijke vorming heb ik aan U te danken. Met grote waardering denk ik terug aan de wijze waarop U mij in mijn eindstudie hebt begeleid.

Ook heb ik veel van U geleerd in de daarop volgende periode toen U mij in de gelegenheid stelde Uw studenten mede te begeleiden.

Het stemt mij tot grote voldoening dat ik thans naast U, samen met de andere collega's, het onderwijs in de Toegepaste Mechanica mag verzorgen. Ik weet dat ik ook in de toekomst op Uw steun mag blijven rekenen.

Hooggeleerde Van Douwen,

Reeds tijdens Uw colleges werd mijn belangstelling voor staalconstructies gewekt. Mijn keuze om bij TNO aan het onderzoek van staalconstructies te gaan werken, werd vergemakkelijkt doordat ik mij verzekerd wist van Uw steun.

Sindsdien heb ik vele malen een beroep op Uw veelzijdige kennis en ervaring mogen doen en hebt U mij gestimuleerd in het aan-

pakken van nieuwe problemen.

Ook in mijn loopbaan hebt U een voortdurende belangstelling getoond. Voor hetgeen U in de achterliggende jaren voor mij hebt betekend dank ik U hartelijk en ik verheug mij op onze verdere samenwerking.

Dames en heren medewerkers van TNO, in het bijzonder van het Instituut TNO voor Bouwmaterialen en Bouwconstructies,

De Organisatie TNO bevindt zich thans in een periode, waarin vele vernieuwingen tot stand moeten komen. Nieuwe vormen van samenwerking tussen onderdelen van de organisatie liggen hierbij voor de hand. Naar mijn mening zullen ook externe samenwerkingsvormen moeten worden aangegaan met name met de Technische Hogescholen. Sommige samenwerkingsverbanden hebben in het verleden reeds hun beslag gekregen, maar er bestaat ruimte en noodzaak voor uitbreiding hiervan. Ik hoop hieraan te mogen bijdragen.

Vanaf deze plaats wil ik ook graag uiting geven aan mijn erkentelijkheid dat zowel het niveau van het werk als de werkomstandigheden mij de gelegenheid gaven tot ontplooiing. Het verheugt me des te meer in Uw midden werkzaam te kunnen blijven.

Waarde Ligtenberg,

Bijna zeventien jaar heb ik onder Uw leiding mogen werken. Een leiding, niet in de traditionele betekenis van het woord, maar die zich kenmerkt door de ruimte voor eigen initiatieven. In het bijzonder denk ik terug aan de vele gesprekken die wij samen hadden. Uw verstrekkende visie op ons vakgebied is voor mij vaak aansporing geweest, voor de hand liggende opvattingen opnieuw te overwegen. Ik stel het zeer op prijs dat U en collega Pels bereid zijn geweest taken en verantwoordelijkheden zo te verschuiven, dat het mij mogelijk werd gemaakt deze benoeming te aanvaarden.

Waarde Stark,

Ons beider belangstelling voor hetzelfde vakgebied bracht ons gedurende vele jaren in contact. Met voldoening memoreer ik onze gezamenlijke activiteiten op het gebied van onderzoek en kennisoverdracht. De hechte vriendschap die tussen ons is ontstaan, geeft me het vertrouwen dat onze samenwerking in de toekomst even plezierig zal blijven verlopen als thans het geval is.

Mem,

Ik bin mem tige tankber foar de wize, dêr't mem my — foar in

great part allinne — op greatbrocht hat. De greate opofferings, dy't mem foar my oerhawn hat, om it my mooglik to meitsjen my folslein to ûntjaen, stimme my ta greate tankberens. Ik bin och sa bliid, dat mem dit hjir hjoed bywenje mei.

Dames en heren studenten,

Tot dusver ben ik in mijn rede niet ingegaan op het onderwijs in de toegepaste mechanica. Als ik hier thans iets over ga zeggen, is dit tegen de achtergrond van de hiervoor geschetste ontwikkelingen. In het begin van Uw studie zal de werkelijkheid als een verzameling losstaande feiten op U afkomen. In het mechanica onderwijs moet daarom gedurende de eerste jaren met een sterk geschematiseerd beeld van de constructies worden gewerkt. In de latere jaren kan in toenemende mate de werkelijkheid worden ingebracht, mogelijk gemaakt door de colleges in de materiaalkunde en in de beton- en staalconstructies. Daarmee ondergaan eerder verkregen mechanica inzichten een verdieping en krijgen reliëf.

Een belangrijk kenmerk van wetenschappelijk onderwijs is, dat een kritische houding wordt ontwikkeld ten opzichte van verworven kennis en een open oog voor vernieuwingen. Het accent hierop valt vooral in de eindstudie.

De huidige verdeling van taken binnen de vakgroep Toegepaste Mechanica is zodanig dat mijn inbreng vooral in deze fase van de opleiding valt. Vanuit die positie wil ik graag, samen met U, verder werken aan de ontwikkeling van de toegepaste mechanica.

Ik dank U voor Uw aandacht.

Literatuur

1. Dicke, D.
De appel en Newton of toegepaste mechanica en architect
Intreerede 1968, Delft. Reidel, Dordrecht
2. Vreedenburgh, C. G. J.
Ervaring, intuïtie en vernuft in de mechanica en de techniek
Rede 1951, Delft. *Heron* 14 (1966) no. 2
3. Vreedenburgh, C. G. J.
Grepen uit de ontwikkeling der mechanica
Rede 1933, Bandoeng
4. Timoshenko, S. P.
History of strength of materials
New York 1953, McGraw-Hill
5. Todhunter, I. and Pearson, K.
A history of the theory of elasticity
Cambridge 1886-1893. Herdruk, Dover Publ. Inc. New York
6. Galileo Galilei
Dialogues concerning two new sciences
Translated from the Italian and Latin by H. Crew and A. de Salvio
Northwestern University Press 1968
7. Girard, P. S.
Traité Analytique de la Résistance des Solides
Parijs 1798
8. Crommelin, C. A.
'De Hollandsche Natuurkunde in de 18e eeuw en de oorsprong der
natuurkundige instrumentmakerskunst'
De Gids 1936, pp. 196-211
9. Truesdell, C.
'Outline of the History of flexible or elastic bodies to 1788'
Journal of the acoustical society of America,
Volume 32, 12, 1960
10. Van Musschenbroek, P.
Dissertationes Physicae Experimentalis et Geometricae
Samuel Luchtmans, Leyden 1729
11. Van Musschenbroek, P.
Beginnselen der natuurkunde, beschreven ten dienste der landgenoten.
Hoofdstuk 19, 'Van de saamenhegting der lichamen'
Samuel Luchtmans, Leyden 1736, 1739
12. Roetink, J. H.
*Verhandeling over Pieter van Musschenbroek's onderzoek naar de sterkte
van materialen*
Niet gepubliceerde scriptie in het kader van de studie voor civiel in-
genieur aan de Technische Hogeschool te Delft 1975
13. Straub, H.
Die Geschichte der Bauingenieurkunst
Birkhauser Verlag, Basel 1964
14. Kist, N. C.
*Leidt een sterkteberekening, die uitgaat van de evenredigheid van kracht
en vormverandering, tot een goede constructie van ijzeren bruggen en
gebouwen*
Intreerede 1917, Delft, Waltman
15. Kazinczy, G.
'Statisch unbestimmte Tragwerke unter Berücksichtigung der Plasticität'
Der Stahlbau 1931, no. 5

16. Kist, N. C.
'Sterkteberekening van kophoekklassen'
De Ingenieur 49 (1934) no. 38, pag. 172-174
17. Vreedenburgh, C. G. J.
'Nieuwe richtlijnen voor het berekenen van gelaste verbindingen'
Lassymposium N.V.L. 1953
18. Meyers, P.
De Mechanica toegepast
Intreerede 1974, Delft, Delftse Universitaire Pers
19. Prager, W.
'Limit analysis; the development of a concept'
Paper contributed to the international symposium on foundations of plasticity, Warsaw 1972.
Edited by A. Sawczuk
Noordhoff International Publishing, Leiden
20. Hoff, N. J.
The analysis of structures - Appendix 1 (4.6)
John Wiley, Third Printing 1966