

Mechanica van constructies

Elasto-statica van slanke structuren

prof.ir. A.L. Bouma

CIP-gegevens Koninklijke Bibliotheek, Den Haag

Bouma, A.L.

Mechanica van constructies : elasto-statica van slanke structuren / A.L. Bouma. - Delft : Delft University Press. – Ill.

Uitg. in opdracht van : Vereniging voor Studie- en Studentenbelangen te Delft.

- 1e dr. : Delftsche Uitgevers Maatschappij, 1989

Met lit. opg., reg.

ISBN 90-407-1278-6

Trefw.: statica, sterkteleer, toegepaste mechanica, constructiemechanica

© VSSD

Eerste druk 1989

Tweede druk 1993

Derde druk 2000

Uitgegeven door:

Delft University Press

Postbus 98, 2600 MG Delft

tel. +31 15 278 3254, telefax +31 15 278 1661, e-mail dup@dup.tudelft.nl

Internet: <http://www.library.tudelft.nl/dup>

In opdracht van:

Vereniging voor Studie- en Studentenbelangen te Delft

Poortlandplein 6, 2628 BM Delft

tel. +31 15 2782124, telefax +31 15 2787585, e-mail: vssd@tudelft.nl

Internet: <http://www.vssd.nl/hlf>

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of op enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photo-copying, recording, or otherwise, without the prior written permission of the publisher.

ISBN 90-407-1278-6

Voorwoord

Dit boek is voortgekomen uit colleges voor derde-jaars studenten aan de faculteit der Civiele Techniek van de Technische Universiteit Delft. Het is dan ook in de eerste plaats bedoeld voor studenten van deze studierichting. Daarnaast is het bedoeld voor ingenieurs en ontwerpers, die in hun (bouw)praktijk met mechanicaproblemen te maken hebben en die kennis willen nemen van een methodische analyse van het gedrag van uiteenlopende constructies. Bij deze analyse is er naar gestreefd de lezer inzicht te geven in de dragende werking van constructieve systemen en de daarbij optredende karakteristieke verschijnselen, waarbij samenhang en verwantschap van problemen naar voren komen.

Graag wil ik mijn dank betuigen aan prof. dr. ir. J. Blaauwendraad, ing. H. van Koten, ir. B. Kuiper en prof. ir. H.W. Loof, die de tekst hebben doorgenomen. Hun opmerkingen en suggesties betekenden een grote stimulans.

Collega Blaauwendraad ben ik bovendien zeer erkentelijk voor de verleende faciliteiten en het verheugt mij dat het boek zal worden gebruikt als basis voor zijn colleges.

Ir. Kuiper dank ik in het bijzonder voor zijn betrokkenheid en voor het ontwerp van het vignet op de voorzijde van het boek, een symbool van constructieve samenwerking.

Mijn collega Loof ben ik bijzonder veel dank verschuldigd. Door nauwgezette lezing van de tekst heeft hij mij voor menige onzorgvuldigheid behoed en daarbij gefungeerd als mijn wetenschappelijk geweten. Zijn intensief meedenken over de materie heeft geleid tot ideeën en suggesties die op veel plaatsen hun sporen hebben achter gelaten. De gesprekken hierover waren boeiend en inspirerend en ik heb deze hogelijk gewaardeerd.

Mevrouw J.J. Verhoeks-Bok dank ik graag voor de toewijding bij het typen van een moeilijk manuscript. De heer W.H.F. Ritter ben ik veel dank verschuldigd voor de grote zorg die aan de tekeningen is besteed.

Inmiddels is een Duitse uitgave van het boek verschenen*, waarin een aantal wijzigingen is aangebracht. Als belangrijkste wijzigingen kunnen worden genoemd de herziening van het 'riservoorbeeld' uit de offshoretechniek en de omwerking van het hoofdstuk over ringen, waarbij de Fourier-analyse nog duidelijker naar voren komt en de kinematische en constitutieve vergelijkingen in een aparte paragraaf uitvoerig worden besproken. Daarnaast is er een reeks kleinere wijzigingen

* *Mechanik schlanker Tragwerke*, uitgave Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, maart 1993.

aangebracht die als verbeteringen, verduidelijkingen of aanvullingen kunnen worden aangemerkt.

In de tweede druk van de Nederlandse uitgave zijn deze wijzigingen overgenomen en zijn er nog enkele aan toegevoegd. Voor het commentaar dat ik na het verschijnen van de eerste druk mocht ontvangen en dat tot deze wijzigingen heeft bijgedragen, ben ik zeer erkentelijk.

De wijzigingen in deze derde druk zijn beperkt tot enkele kleine verbeteringen.

Rijswijk, augustus 2000

A.L. Bouma

Inhoud

Voorwoord	5
Inleiding	11
DEEL 1. ELEMENTAIRE BELASTINGSGEVALLEN	15
1. Op rek belaste staven	17
1.1. Inleiding	17
1.2. Differentiaalvergelijkingen en oplossingen	17
1.3. Randvoorwaarden en overgangsvoorwaarden	25
1.4. Temperatuursinvloeden, krimp- en zwellingsverschijnselen	35
2. Op afschuiving belaste liggers	39
2.1. Inleiding	39
2.2. Afleiding van de differentiaalvergelijking	40
2.3. Raamwerken (skeletten)	42
2.4. Voorbeelden	46
3. Op wringing belaste staven	53
3.1. Inleiding en afleiding van de vergelijkingen	53
3.2. Dunwandige kokers	56
4. Op buiging en afschuiving belaste liggers	67
4.1. Inleiding en afleiding van de vergelijkingen	67
4.2. Overgangsvoorwaarden en randvoorwaarden	73
4.3. Toepassingen	76
4.4. Temperatuursinvloeden, alsmede krimp- en zwellingsverschijnselen	85
5. De aanvankelijk rechte kabel	92
5.1. Inleiding	92
5.2. Differentiaalvergelijking en oplossingen voor de draagkabel	92
5.3. De horizontale component H van de kabelkracht	98
6. Samenvatting	100
DEEL 2. CONTINU VERDEELDE REACTIES	103
7. Verdeelde reacties die afhankelijk zijn van een verplaatsingscomponent	105
8. Op rek belaste staven waarbij een verdeelde reactiekracht optreedt	107
8.1. Uittrekproef en andere voorbeelden	107
8.2. Uitzetting van een spoorstaaf	111

9. Elastisch ondersteunde afschuifliggers	113
10. Elastisch ondersteunde kabels	118
11. Elastisch ondersteunde buigliggers	121
11.1. Inleiding	121
11.2. De differentiaalvergelijking en de beddingconstante	122
11.3. Particuliere oplossingen van de differentiaalvergelijking, Fourier-analyse	125
11.4. De oplossing van de gereduceerde differentiaalvergelijking	129
11.5. Een geconcentreerde last op een oneindig lange ligger	131
11.6. De vier basisgevallen	140
11.7. Natuurlijke golfengte	145
11.8. Verdeelde belasting	146
11.9. Liggers met eindige lengte	154
DEEL 3. GECOMBINEERDE DRAAGWERKING	157
12. Inleiding, enkele veermodellen	159
13. De combinatie van kabelwerking en buiging, een parallelsysteem	164
13.1. De differentiaalvergelijking	164
13.2. Particuliere oplossing bij sinusvormige belasting	166
13.3. Buigliggers, belast met een trekkracht	169
13.4. De algemene oplossing van de differentiaalvergelijking	171
13.5. Kabels met buigstijfheid, slanke trekstaven	174
13.6. Twee voorbeelden uit de offshore-techniek	181
14. De combinatie van een afschuifligger en een buigligger, een parallelsysteem	187
14.1. Inleiding	187
14.2. De differentiaalvergelijking en oplossingen	189
14.3. Extra verstijvingen en verende ondersteuning	193
DEEL 4. GECOMBINEERDE DRAAGWERKING MET GEKROMDE ELEMENTEN	199
15. De gekromde kabel	201
15.1. Het verband tussen de lengte van de kabel en de grootte van de horizontale kracht H	201
15.2. De flexibiliteit van de kabel en wijziging in de grootte van H	205
15.3. Horizontale verplaatsingen	208
15.4. Fourieranalyse voor het bepalen van de grootte van H	213
15.5. De verplaatsingen bij een additionele belasting	218
16. Hangdaken en hangbruggen	222
16.1. Inleiding	222
16.2. Hangdaken	223

16.3.	Hangbruggen, benadering met de differentiaalvergelijking voor de kabel	229
16.4.	De volledige differentiaalvergelijking bij meewerkende verstijvingsligger, Fourieranalyse	235
16.5.	Geconcentreerde belastingen, randstoringen en het gebruik van invloedslijnen	240
16.6.	Enkele secundaire effecten	246
17.	Bogen	253
17.1.	Inleiding	253
17.2.	Berekening met behulp van vormveranderingsvergelijkingen	254
17.3.	Verplaatsingen	260
17.4.	De differentiaalvergelijking van de boog, oplossingen bij kleine verplaatsingen	263
17.5.	Oplossingen van de uitgebreide differentiaalvergelijking	267
17.6.	Verschillende boogtypen	271
18.	Cirkelvormige ringen en verwante cilindrische constructies (buizen, tunnels, tanks, reservoirs, enz.)	275
18.1.	Inleiding	275
18.2.	Evenwichtsvergelijkingen voor de snedekrachten bij radiale belasting	278
18.3.	Berekening van de snedekrachten met behulp van Fourierreeksen	280
18.4.	Kinematische en constitutieve vergelijkingen, mogelijke vervormingstoestanden	287
18.5.	Berekening van de verplaatsingen met behulp van Fourierreeksen	294
18.6.	Exacte oplossingen	296
18.7.	Tangentieel gerichte belasting	303
DEEL 5. INTERACTIE BIJ VERBINDINGEN EN KOPPELINGEN		311
19.	Verbinding van op rek belaste staven	313
a.	De als star opgevatte verbinding	313
b.	De als star-plastisch opgevatte verbinding	314
c.	De als lineair-elastisch opgevatte verbinding	314
20.	Koppeling van liggers die op buiging worden belast	324
20.1.	Inleiding	324
20.2.	Wanden bij verwaarlozing van de gemiddelde rek	326
20.3.	Wanden met inachtneming van de gemiddelde rek	331

DEEL 6. STORINGSPROBLEMEN	339
21. Randstoringen bij cilindrische schalen en membranen	341
21.1. Het randstoringsprobleem bij cilindrische schalen, inleiding	341
21.2. Differentiaalvergelijking en veerconstante	341
21.3. Toepassingen	343
Een met ringen verstijfde buis onder inwendige overdruk	343
Reservoirs en tanks voor vloeistoffen	345
Het effect van voorspannen	346
Temperatuurspanningen	347
21.4. Het randstoringsprobleem bij een cilindrisch membraan	348
22. Wringing bij kokers met vervormbare doorsnede	352
22.1. Schranken van een doorsnede, afleiding van de differentiaalvergelijking	352
22.2. Het inleiden van een geconcentreerde belasting	360
22.3. Schranken en welven van de doorsneden met bovendien afschuiving in de wanden	366
BIJLAGEN	
A. Het gebruik van Fourierreeksen	375
Theorie en de toepassing hiervan bij belastingsfuncties	375
De Fourierreeks als oplossing van een differentiaalvergelijking	382
B. Enkele particuliere oplossingen en integralen bij de behandeling van ringen	385
C. De constitutieve vergelijkingen bij ringen	386
D. Symbolen	389
Trefwoordenlijst	392