

De kracht van het evenwicht

Bouwkunde in een notendop

Geert De Schutter

Acco Leuven / Voorburg

Eerste druk: 2007
Tweede druk: 2009
Derde druk: 2011
Vierde, herziene druk: 2013

Gepubliceerd door

Uitgeverij Acco, Blijde Inkomststraat 22, 3000 Leuven, België
E-mail: uitgeverij@acco.be – Website: www.uitgeverijacco.be

Voor Nederland:

Acco Nederland, Westvlietweg 67 F, 2495 AA Den Haag, Nederland
E-mail: info@uitgeverijacco.nl – Website: www.uitgeverijacco.nl

Omslagontwerp: Press Point

© 2013 by Acco (Academische Coöperatieve Vennootschap cvba), Leuven (België)

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

No part of this book may be reproduced in any form, by mimeograph, film or any other means without permission in writing from the publisher.

D/2013/0543/184

NUR 955

ISBN 978-90-334-9342-3



INHOUD

Woord vooraf	9
Hoofdstuk 1. Basisdefinities en basisprincipes	11
1.1 Bouwkunde	11
1.2 Bouwkundige verscheidenheid	12
1.3 Kracht	18
1.4 Reactie	20
1.5 Moment	21
1.6 Evenwicht	23
1.7 Spanning	26
1.8 Rek	30
1.9 Materiaalwetten	32
1.10 Spannings- en vervormingstoestanden	35
1.11 Bezwijken	40
1.12 Bijzondere problemen	42
Hoofdstuk 2. Washington monument	45
2.1 Inleiding	45
2.2 Washington Monument	45
2.3 Vereenvoudigde beschrijving	46
2.4 Belastingen	49
2.5 Reacties	53
2.6 Inwendige krachtswerkingen	57
2.7 Spanningen	61
2.8 Veiligheid	64
2.9 Slotbemerking	67
Hoofdstuk 3. Bouwmaterialen	69
3.1 Inleiding	69

3.2	Natuursteen	69
3.2.1	Mineralen en gesteenten	69
3.2.2	Aanwending van gesteenten in de bouwnijverheid	71
3.2.3	Ontginningstechnieken	73
3.2.4	Belangrijkste eigenschappen van natuursteen	74
3.3	Baksteen	76
3.3.1	De grondstof: klei	76
3.3.2	Vervaardiging van baksteen	77
3.3.3	Soorten baksteen	79
3.3.4	Belangrijke eigenschappen van baksteen	79
3.4	Beton	81
3.4.1	Algemeen	81
3.4.2	Eigenschappen van verhard beton	82
3.4.3	Cement	84
3.4.3.1	Soorten cement	84
3.4.3.2	Vervaardiging	87
3.4.4	Typesamenstellingen van beton voor gebouwen of kunstwerken	90
3.5	Gewapend beton	91
3.6	Voorgespannen beton	95
3.7	Andere bouwmaterialen	99
Hoofdstuk 4. Draagstructuren		101
4.1	Inleiding	101
4.2	Muren	101
4.3	Bogen	111
4.4	Balken, kolommen en raamwerken	113
4.5	Vakwerken	121
4.6	Platen, schijven en wanden	124
4.7	Andere draagstructuren	127
Hoofdstuk 5. De bouwwereld: technisch overzicht		129
5.1	Inleiding	129
5.2	Grondwerken en funderingen	129
5.3	Gebouwen en torengebouwen	136
5.4	Wegen en spoorwegen	145
5.5	Bruggen	148
5.5.1	Algemeen	148
5.5.2	Balkbruggen	150
5.5.3	Boogbruggen	151
5.5.4	Hangbruggen	155

5.5.5	Tuikabelbruggen	160
5.6	Tunnels	162
5.7	Waterbouwkunde	164
	Bijlage	177
	Verantwoording figuren	189
	Bibliografie	191



WOORD VOORAF

De wereld van de bouwkunde spreekt vaak tot de verbeelding. Bruggen met lange overspanning en torens met onmetelijke hoogtes trekken de aandacht, en roepen vaak bewondering op. Belangrijke bouwkundige constructies worden soms een toeristische trekpleister, of treden op de voor- of achtergrond in films en feuilletons. Niet-bouwkundigen verwonderen zich vaak over de wijze waarop moeilijke hindernissen op technisch hoogstaande wijze overbrugd of ondertunneld worden, al kunnen ook bouwkundigen nog aangenaam verrast worden door moderne uitvoeringstechnieken waarbij bruggen in aanbouw bijvoorbeeld in hun geheel op hun finale positie geschoven worden. Dit handboek tracht de basisprincipes van de bouwkunde op elementaire wijze uit te leggen.

Deze uitgave is een herwerkte versie van het voor het eerst in 2007 gedrukte handboek. Enkele zetfouten werden gecorrigeerd, en meerdere paragrafen werden geactualiseerd. De inhoud van het handboek wordt als sinds 2000 aangewend in het kader van de cursus Bouwkunde voor de studenten Handelsingenieur aan de Universiteit Gent. Er wordt getracht deze economisten enige kennis bij te brengen van de taal van de ingenieurs, evenwel zonder verregaande diepgang te beogen. De bouwkundigen zijn dus gewaarschuwd wanneer ze toch deze tekst willen doornemen. Eén en ander is soms zeer sterk vereenvoudigd voorgesteld om de principes duidelijk naar voor te brengen.

Het verheugt me dat deze geactualiseerde versie van het handboek ter beschikking gesteld wordt van een ruimer publiek. Ik heet u allen welkom in de wereld van de bouwkunde!

GEERT DE SCHUTTER

Gent, juli 2013.



HOOFDSTUK 1.

BASISDEFINITIES EN BASISPRINCIPES

1.1 Bouwkunde

Waarom blijven gebouwen en andere bouwkundige constructies staan? Waarom zakken we niet door de vloer? Wat is het geheim achter een constructie die een zeer brede kloof met schijnbaar gemak letterlijk overbrugt? Waarom vallen de wolkenkrabbers in New York niet om bij een zware stormwind? Er kunnen nog vele analoge vragen geformuleerd worden, en in essentie hebben ze alle eenzelfde antwoord: omdat de optredende krachten met elkaar in evenwicht zijn! Hiermee is eigenlijk het hoofdprincipe van de bouwkunde samengevat. Maar wat wordt er onder bouwkunde eigenlijk verstaan?

In de *Van Dale* wordt *bouwkunde* omschreven als “de wetenschap die de vereisten leert kennen om bouwwerken samen te stellen”. Het begrip *bouwwerk* wordt dan weer omschreven als “algemene benaming voor alle soorten van gebouwen”. Een combinatie van deze definities laat besluiten dat bruggen blijkbaar niet tot de bouwkunde zouden behoren, terwijl dergelijke constructies misschien wel de paradepaardjes zijn van de bouwkundigen. En wat met sluizen, tunnels, dammen, ...? In ingenieurstermen hanteert men zelfs de verzamelnaam *kunstwerken*, evenwel zonder hiermee te bedoelen dat het bouwwerk waarover het gaat, automatisch kunstwaarde bezit (Vandepitte, 1989-1990).

In een meer gefundeerde definitie zou men bouwkunde kunnen omschrijven als “de wetenschap die de vereisten leert kennen voor het plannen, ontwerpen en uitvoeren van bouwwerken”, waarbij het begrip ‘bouwwerk’ meer algemeen gedefinieerd kan worden als “algemene benaming voor alle soorten van gebouwen, bruggen, sluizen, tunnels, kademuren, stuwen, havens, dokken, dammen, torens, wegen, spoorwegen, ...”. De puntjes op het einde zijn veelbetekenend. Eigenlijk kunnen er naar hartenlust bouwwer-

ken ingevuld worden. Zo kan je eigenlijk het paard van Troje als een geniaal bouwwerk beschouwen.

Belangrijk is dat bouwkundige constructies *statisch* zijn. “Indien een brug of een gebouw zichtbare bewegingen ondergaat, is er fundamenteel iets verkeerd. Bij machines is het net andersom, ze zijn gebouwd om te bewegen: een stilstaande auto op de pechstrook betekent ellende” (Van Impe, 1996). De scheidslijn tussen bouwkundige constructies en machines is evenwel niet steeds strikt te onderscheiden. Wat met een beweegbare brug bijvoorbeeld? En stond het paard van Troje ook niet op wielen?

Om met succes een bouwwerk te kunnen plannen, ontwerpen en uitvoeren is een grondige kennis van de rationele, wetenschappelijke basisbeginselen een absolute noodzaak. Voorliggende tekst heeft uitdrukkelijk niet de bedoeling deze grondige kennis aan te brengen. De basisprincipes worden enkel op een heel eenvoudige en aanschouwende wijze toegelicht, in de hoop dat de niet-technici na het doornemen van de tekst de gesprekken tussen bouwkundig ingenieurs onderling enigszins kunnen kaderen, en zelf in staat zijn elementaire gesprekken met een bouwkundige te voeren. De niet-technicus die aan het eind van dit werk zichzelf in staat acht een belangrijk bouwwerk te plannen, te ontwerpen en uit te voeren, wordt bij voorbaat veroordeeld tot het ter hand nemen van ‘de bijbel der bouwkundigen’ (Vandepitte, 1981), om terug met de voeten op de grond te komen (en dat niet alleen omwille van de letterlijk zware stof).

1.2 Bouwkundige verscheidenheid

In de uitgebreide definitie van de term ‘bouwwerk’ is al gebleken dat de bouwkunde een enorme verscheidenheid omvat, met verschillende types constructies, elk met een eigen doel of een eigen bestaansreden. Hierna volgt een globaal overzicht, gebaseerd op Van Impe (1996).

In de *woning- en hoogbouw* (figuur 1.1) behoren de draagsystemen tot het werkterrein van de ingenieur. Men verstaat daaronder de verdiepingsvloeren uit platen en balken, de kolommen, de dragende wanden, de liftkokers en trappenhuizen, de fundering. Deze draagconstructie moet geschikt zijn om de erop inwerkende krachten veilig op te nemen. Deze krachten omvatten zowel het eigengewicht van de constructie als de nuttige belasting, zijnde de lasten veroorzaakt door installaties, niet-dragende onderdelen en uiteraard de bewoners. Ook moet rekening gehouden worden met krachten die horizontaal op het bouwwerk inwerken, bijvoorbeeld veroorzaakt

door de wind. In sommige gebieden moet ook terdege rekening gehouden worden met mogelijke krachten ten gevolge van aardbevingen. Het ontwerp van de draagconstructies in appartementen, kantoorgebouwen, scholen, ... is relatief eenvoudig. Moeilijker is het geschikte draagsystemen te ontwikkelen voor grote expositieruimten, stadions, vliegtuighallen, zwembaden, ... In vele gevallen wordt de aard van het draagsysteem bepaald door de functie van het bouwwerk, bijvoorbeeld bij sportstadions (figuur 1.2), krachtcentrales met bijbehorende koeltorens, silo's, telecommunicatietorens, hoogspanningsleidingen, enzovoort. Naargelang het aangewende materiaal spreekt men algemeen ook van *staalbouw* of *betonbouw*.

Een van de meest interessante deelgebieden van de bouwkunde is ontegensprekelijk de *bruggenbouw* (figuur 1.3). Ten gevolge van de sterke ontwikkeling van het wegennet moest een reusachtig aantal bruggen gebouwd worden. Dat heeft de voorbije vijftig jaar tot een adembenemende ontwikkeling in de bruggenbouw geleid, zodat deze kunst vandaag als bijzonder gerijpt genoemd mag worden. Stille getuigen daarvan zijn de gewaagde overspanningen van diepe kloven of brede zee-engten. Toch kunnen ook kleine voetgangersbruggen een uitstraling zijn van het vernuft van hun ontwerpers, zoals geïllustreerd in figuur 1.4.



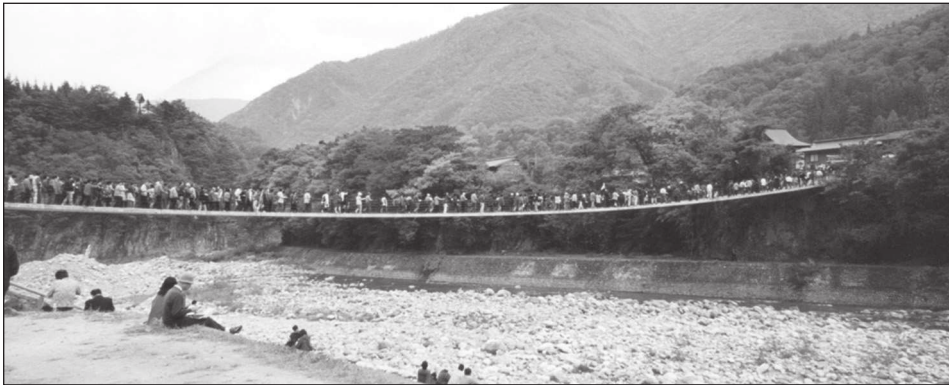
Figuur 1.1. Woning- en hoogbouw langs de rivier Chicago te Chicago, USA.



Figuur 1.2. Olympisch stadion te Barcelona, Spanje.



Figuur 1.3. Yokohama Bay Bridge te Yokohama, Japan.



Figuur 1.4. Betonnen voetgangersbrug te Shirokawa-go, Japan.

Meteen is ook het aspect van het vervoer en het verkeer – de *wegenbouw* – aangesneden. Hiertoe rekenen we alle gewest-, stads- en autosnelwegen, en tevens de spoorwegen en de ondergrondse wegniswerken: *tunnel- en metrobouw*. Maar hiertoe behoren eveneens de uitbouw van vliegvelden en de huidige niet te onderschatten werkzaamheden voor het rustende verkeer, met name de boven- en ondergrondse parkeergarages.

Elk bouwwerk moet uiteraard gefundeerd zijn in de grond. Deze *funderingen* dienen in de meest uiteenlopende grondsoorten uitgevoerd te worden. De studie van de aard en de draagkracht van de bodem is een belangrijke taak van de ingenieurswetenschap. Onder de inwerking van de krachten die naar de bodem worden afgeleid, zal elke fundering zettingen of vervormingen ondergaan. Deze zettingen, voornamelijk differentiële zettingen, kunnen een wezenlijk gevaar betekenen voor de standzekerheid en woonbaarheid van het bouwwerk. Om funderingen te ontwerpen moet men derhalve enerzijds een goede kennis van de bodemeigenschappen bezitten, en anderzijds de diverse funderingswijzen beheersen. Voor dat gebied van de bouwkunde werd de ‘grondmechanica en funderingstechniek’ ontwikkeld. Meer algemeen kan men spreken van ondergrondse werken, die naast de funderingen nog alle andere bouwwerken in het rijk van ‘moeder aarde’ behelzen: voorziening van water-, gas-, elektriciteits- en warmteleidingen, rioleringen en kanalisaties, mijngangen. Wat dat laatste betreft, spreekt men ook van *mijnbouwkunde*.

Tot de ingenieursbouw horen ook alle realisaties van de *waterbouwkunde*, waarbij onder dit begrip diverse specialisaties naar voren treden. Alle complexen ter regularisatie van onze rivieren en stromen, in het bijzonder de verdedigingswerken tegen overstromingen, de dijken, zijn waterbouwkundige werken. Het bevaarbaar maken van de waterwegen voor de binnenscheepvaart confronteert de bouwkundig ingenieur met talloze opgaven:

stuwen en sluisen, remmings- en geleidewerken, kanalen, hefinrichtingen voor schepen, aanlegsteigers, meerpalen en onderhoudsbaggerwerken voor de vaargeulen. De scheepvaart vergt tevens de uitbouw van complexe zeehaven- of binnenhaveninfrastructuur. Gigantische bouwwerken werden gerealiseerd ter bescherming van de Europese kustbewoners tegen uitzonderlijke springtijden: stormvloedkeringen (figuur 1.5).



Figuur 1.5. Stormvloedkering Oosterschelde, Nederland.

Tot de waterbouwkundige werken worden eveneens de installaties gerekend voor het benutten van de waterkracht: stuwdammen (figuur 1.6), stuwmuuren, hydro-elektrische centrales en stuwbeekens. Hetzelfde geldt voor wat eigenlijk het meest voor de hand ligt: *watervoorziening en waterbeheer*. Waterreservoirs, watertorens, pompstations, spaarbeekens, drinkwaterleidingen en waterzuiveringsstations worden ontworpen en gebouwd ten dienste van de burger. Om waterbouwkundige werken goed te ontwerpen en de noodzakelijkheid ervan oordeelkundig in te schatten, is een grondige kennis van de *hydraulica* nodig.

Ten slotte kunnen nog de *off-shoreconstructies* (figuur 1.7) vermeld worden. In de open zee wordt naar olie of aardgas geboord. Hiervoor gebruikt men vaste of drijvende booreilanden, die blootgesteld zijn aan de onvoorspelbare grillen van de natuur en die enorme afmetingen hebben gekregen.



Figuur 1.6. Hume-dam, Australië.

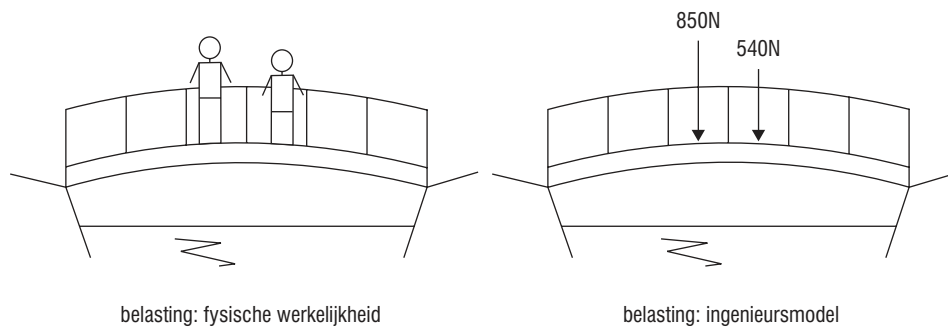


Figuur 1.7. Gulf offshore platform.

De lange reeks is beslist nog onvolledig. Evenwel toont de opsomming duidelijk aan welk ontzaglijk domein van de hedendaagse techniek de bouwkunde bewandelt.

1.3 Kracht

Wanneer een bouwkundige een brug moet ontwerpen, dan zal het resultaat verschillen naargelang het een voetgangersbrug is of een brug die zware vrachtwagens moet kunnen dragen. Een vergissing in de vereiste gebruiksdoelstellingen van een constructie kan zware gevolgen hebben. Een hobbelpaardje is overduidelijk bestemd voor peuters en kleuters, en (helaas...) niet voor zware papa's. In bouwkundige termen zegt men dat een constructie ontworpen wordt om een bepaalde *belasting* te dragen. Intuïtief voelt iedereen wel aan dat een vrachtwagen voor een brug duidelijk een zwaardere belasting betekent dan een wandelend koppeltje. Om objectief en numeriek een ontwerp te kunnen maken dient de ingenieur het intuïtieve te overstijgen. De fysische werkelijkheid van de belasting wordt hiertoe vertaald naar *krachten* (figuur 1.8).



Figuur 1.8. Van fysische werkelijkheid naar krachten.

Voor een bouwkundige kan een kracht gedefinieerd worden als een actie op een lichaam, in een bepaalde richting en met een bepaalde grootte. Een wiskundige zegt liever dat een kracht een vectoriële grootte is, met een bepaald aangrijpingspunt, een bepaalde zin en een bepaalde grootte. Volgens een natuurkundige is een kracht het product van massa met versnelling, volgens de tweede wet van Newton:

$$F = m \cdot a \quad (1.1)$$

met F = de kracht werkend op een lichaam,
 m = de massa van het lichaam,
 a = de versnelling die door die kracht aan het lichaam gegeven wordt.

Deze natuurkundige visie maakt ons meteen duidelijk in welke eenheid een kracht uitgedrukt wordt: een kracht van 1 N (Newton) geeft aan een massa van 1 kg een versnelling van 1 m/s^2 . Een kracht van 1000 N noteert men ook als 1 kN (kiloNewton), 1000 kN noteert men als 1 MN (megaNewton).

Het gewicht van een lichaam is één bepaalde vorm van een kracht. Het geeft het effect aan van de aantrekking van de aarde op de massa van het lichaam. Aangezien de zwaartekrachtsversnelling $9,81 \text{ m/s}^2$ bedraagt, heeft een lichaam met een massa van 1 kg een gewicht van 9,81 N. Vaak stelt men bij benadering dat een massa van 1 kg ongeveer een gewicht van 10 N voorstelt. Op de maan is er een ander verband tussen gewicht en massa, aangezien er een andere zwaartekrachtsversnelling heerst. Voor het ontwerpen van futuristische maanstations moet men hiermee rekening houden.

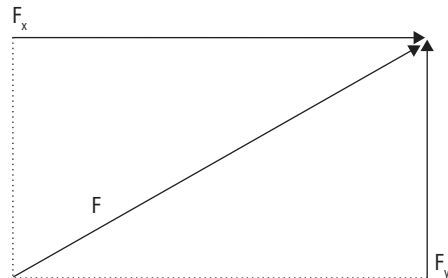
Naast het gewicht van vaste en mobiele lasten kunnen er op constructies allerhande andere krachten optreden: krachten ten gevolge van windbelasting, remkrachten, krachten ten gevolge van botsingen, krachten ten gevolge van thermische effecten, krachten ten gevolge van zettingen... Het is aan de ingenieur om deze krachten allemaal goed te onderkennen en er op een gepaste wijze rekening mee te houden bij het ontwerp.

Oudere ingenieurs, die hun vorming nog genoten hebben voor de invoering van de moderne eenheden (men spreekt van S.I.-eenheden), spreken nog wel eens van 1 kgf (kilogramkracht). Nog oudere leraars en professoren hadden vaak grote moeite om aan de oudere ingenieurs het verschil uit te leggen tussen de kilogramkracht en de 'gewone' kilogram(massa). Gelukkig hoeft dat nu niet meer. Kom je een oudere ingenieur tegen, laat hem dan maar zijn eigen taal spreken, en weet dat 1 kgf ongeveer overeenstemt met een kracht van 10 N.

De wiskundige visie, die stelt dat een kracht een vectoriële grootheid is, leert ons dat een kracht F in twee dimensies ontbonden kan worden in een horizontale component F_x en een verticale component F_y , zoals aangegeven in figuur 1.9. In drie dimensies kan er ook nog een derde component gedefinieerd worden, loodrecht op het blad. De derde dimensie wordt meestal aangeduid met de letter z .

Krachten die in eenzelfde punt aangrijpen, kunnen vectorieel opgeteld worden. Meer verstaanbaar betekent dat dat men de horizontale componenten algebraïsch mag optellen met als resultaat de horizontale component van de

resulterende kracht. Analoog mogen de verticale componenten algebraïsch opgeteld worden, met als resultaat de verticale component van de resulterende kracht. Voor een eventuele derde dimensie geldt dezelfde regel.



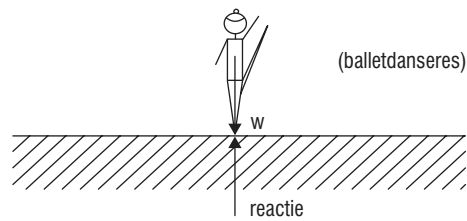
Figuur 1.9. De componenten van een kracht F .

1.4 Reactie

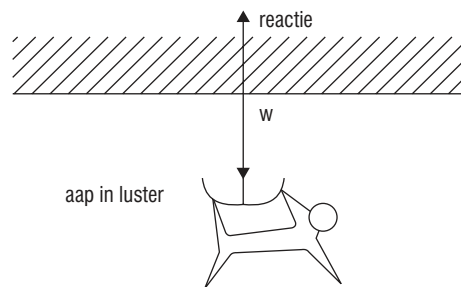
Wanneer een karateka op een stoere wijze met zijn hand een plank doormidden tracht te hakken, dan zou het gevolg wel eens een gebroken hand kunnen zijn. Wanneer je met je hoofd tegen een glazen deur loopt, dan bestaat de kans dat de deur in duizend stukjes breekt, en... dat je zelf duizend sterretjes ziet. Wanneer je met je auto tegen een paal rijdt, dan is het resultaat meestal een mooie bluts... in je auto. Op een mechanische wijze (volgens de wetten van de mechanica, of de leer van krachten en bewegingen) kan dat verklaard worden door het feit dat een kracht uitgeoefend op een lichaam een even grote doch in tegengestelde zin werkende reactiekracht uitlokt. Deze 'oog om oog, tand om tand'-wet wordt geïllustreerd in figuur 1.10.

Beschouw een lichaam met gewicht W , rustend op de grond. Het lichaam is in rust en beweegt niet onder invloed van de zwaartekracht. Het lichaam ondergaat dus zeker geen versnelling, zodat volgens formule (1.1) de resulterende (of totale) kracht op het lichaam bijgevolg gelijk is aan nul. Het gewicht W wordt dus 'tenietgedaan' door een even grote doch in tegengestelde zin werkende reactiekracht.

Hetzelfde geldt voor een lichaam dat rustig hangt te luieren in een luster (figuur 1.11). Lichaam en luster donderen niet naar beneden omdat het gewicht W tegengewerkt wordt door een even grote doch in tegengestelde zin werkende reactiekracht.



Figuur 1.10. Een kracht uitgeoefend op een lichaam lokt een even grote doch in tegengestelde zin werkende reactiekracht uit.



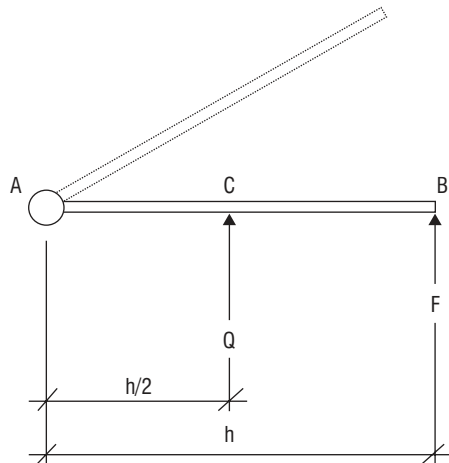
Figuur 1.11. Het gewicht W wordt tegengewerkt door een even grote doch in tegengestelde zin werkende reactiekracht.

1.5 Moment

Beschouw een planzicht van een deur, zoals gegeven in figuur 1.12. Om de deur te openen wordt een kracht F uitgeoefend, die de deur doet draaien rond het scharnier. Het draaieffect uitgeoefend door de kracht wordt het *moment* van die kracht genoemd. De grootte van het moment hangt af van de grootte van de kracht én van de afstand van de kracht tot het scharnier of het draaipunt. Het moment M van de kracht wordt immers gegeven door de vermenigvuldiging van de grootte van de kracht F met de afstand h van de kracht tot het draaipunt, loodrecht gemeten op de richting van de kracht:

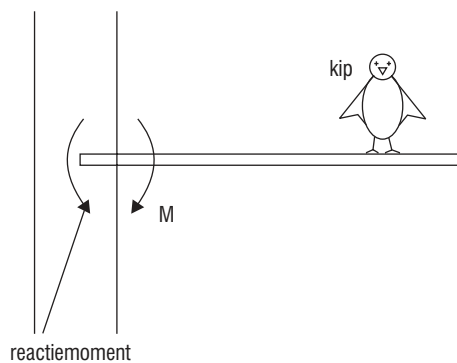
$$M = F \cdot h \quad (1.2)$$

Een moment wordt uitgedrukt in Nm (Newton meter) of bij grote waarden typisch in kNm (kiloNewton meter).



Figuur 1.12. Planzicht van een deur.

Aangezien het moment vereist om de deur te openen onafhankelijk is van de positie van de kracht, kan uit figuur 1.12 besloten worden dat $F \cdot h = Q \cdot h/2$, zodat $Q = 2 \cdot F$. Dat kan snel proefondervindelijk aangevoeld worden. Probeer eens een deur te openen door erop te duwen dicht bij de scharnieren. Hiervoor is merkbaar een veel grotere kracht vereist dan wanneer er in de buurt van de deurklink geduwd wordt.



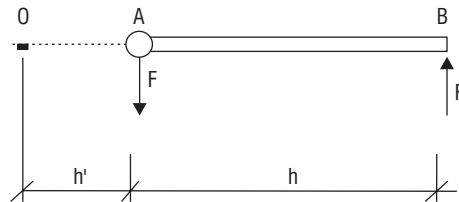
Figuur 1.13. Reactiemoment bij een kippenstok die in een muur ingewerkt is.

Voor het scharnier als afzonderlijk lichaam bekeken, is het openen van de deur equivalent met het aanbrengen van een uitwendige belasting, namelijk een moment M . Analoog wordt door een kippenstok die in een muur ingewerkt is (figuur 1.13), op die muur ook een uitwendige belasting uitgevoerd in de vorm van een moment. Een moment kan dus eveneens beschouwd

worden als een vorm van belasting, als een ‘veralgemeende krachswerking’. Een moment grijpt aan in een bepaald punt, met een bepaalde grootte en met een bepaalde draaizin. Net zoals door krachten reactiekrachten opgewekt worden, veroorzaakt een aangrijpend moment een reactiemoment. In figuur 1.13 wordt zo door de muur op de kippenstok een reactiemoment uitgeoefend, met dezelfde grootte als het aangrijpende moment M , maar met tegengestelde draaizin.

Een bouwkundige heeft het in zijn vakjargon ook wel eens over een *koppel*, zonder het daarbij over enig romantisch tafereel te hebben. In figuur 1.14 is het moment van de kracht F rond het scharnier A gelijk aan $F \cdot b$. Aangezien het volledige deurlichaam enkel draait en niet in zijn geheel langs een rechte lijn beweegt (verticaal in het vlak van de figuur), moet er in het scharnier nog een andere (reactie)kracht werken, die gelijk is aan de kracht F , maar in tegengestelde zin werkt. Een draaieffect wordt dus verkregen door twee gelijke maar tegengestelde krachten met een zekere tussenafstand. Deze combinatie wordt een koppel genoemd, en de grootte van het koppel is gelijk aan het product van de grootte van de kracht met de (loodrechte) afstand tussen de twee (identieke, maar in tegengestelde zin werkende) krachten. De betreffende loodrechte afstand wordt ook wel de *hefboomsarm* genoemd.

Bemerk dat de grootte van een koppel onafhankelijk is van het punt waar rond de momenten van de krachten berekend worden. In figuur 1.14 is het resulterende moment om het punt O van de getekende krachten gelijk aan $F \cdot (b' + b) - F \cdot b'$ (met een minteken omdat de kracht in A in de andere richting werkt), wat nog steeds gelijk is aan $F \cdot b$.



Figuur 1.14. Een koppel.

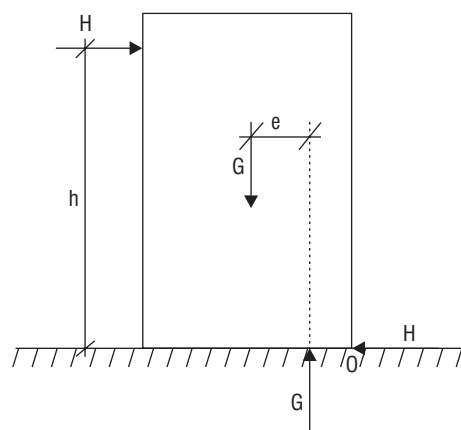
1.6 Evenwicht

Bouwkundige constructies zijn normaal gezien ‘in rust’. Ze ondergaan geen ongecontroleerde bewegingen (tenzij er iets goed fout gaat natuurlijk, zo-

als in het geval van figuur 1.15). In technische vaktermen zegt men dat er *evenwicht* is. Een lichaam is in evenwicht wanneer de effecten van alle krachten en alle momenten elkaar uitbalanceren zodat het lichaam niet beweegt. Anders gezegd, mag er op het lichaam geen resulterende kracht aangrijpen, en geen resulterend moment.



Figuur 1.15. Ingestorte brug te Melle (1992), België.



Figuur 1.16. Evenwicht van krachten.

Alle neerwaartse krachten moeten tegengewerkt worden door opwaartse krachten, en ook de horizontale krachten moeten elkaar opheffen. Dat is geïllustreerd in figuur 1.16, waarin een lichaam (bijvoorbeeld een gebouw) weergegeven is, belast met een verticale kracht G (bijvoorbeeld eigengewicht) en een horizontale kracht H (bijvoorbeeld windbelasting). De verticale kracht G wordt tegengewerkt door een even grote doch opwaarts werkende verticale component van de reactie die door de grond op het gebouw uitgeoefend wordt. De horizontale windkracht H wordt tegengewerkt door een even grote doch in de andere zin werkende horizontale component van de grondreactie.

Het in evenwicht zijn van alle krachten is evenwel niet voldoende. Dat belet wel dat het gebouw zich volgens een rechte lijn zou verplaatsen. In technische termen zegt men dat er *translatie-evenwicht* is. Het gebouw zou evenwel nog steeds kunnen kantelen (bijvoorbeeld rond het punt O) ten gevolge van een onevenwicht in de momenten. Om dat te vermijden dienen ook de momenten in evenwicht te zijn, het zogenaamde *rotatie-evenwicht*. In het geval van figuur 1.16 is hieraan voldaan indien $G \cdot e = H \cdot b$, of dus indien het linksdraaiende koppel qua grootte gelijk is aan het rechtsdraaiende koppel.

Indien men algebraïsch werkt, en dus aan de horizontale en verticale componenten van een kracht een teken toekent naargelang de richting waarin de kracht werkt, dan kan het translatie-evenwicht uitgedrukt worden door de volgende voorwaarden:

$$\sum F_x = 0 \qquad \sum F_y = 0 \qquad (1.3)$$

Voor driedimensionale problemen wordt een analoge voorwaarde toegevoegd betreffende de componenten van de krachten in de derde dimensie, meestal genoteerd met de letter z .

Ook voor de uitdrukking van het rotatie-evenwicht kan men algebraïsch te werk gaan door het toekennen van een teken in functie van de draai-zin van het moment. Het rotatie-evenwicht wordt dan uitgedrukt door de voorwaarde:

$$\sum M_0 = 0 \qquad (1.4)$$

Het subscript 0 geeft de oorsprong aan van het gekozen assenstelsel. Men begroot de momenten in de sommatie dus ten opzichte van een gekozen punt 0 .

De voorwaarde (1.4) drukt in feite het momentenevenwicht uit rond de Z -as (de as loodrecht op het blad). In driedimensionale problemen, waarbij ook krachten optreden buiten het XY -vlak (het blad), dienen ook de momentenevenwichten rond de X - en de Y -as nagekeken te worden.