



De kern van duurzame Bouwkunde en Civiele Techniek

Materiaalkunde

M.W. Verver
A.L.A. Fraaij



Noordhoff Uitgevers

Vierde druk

Materiaalkunde

De kern van duurzame Bouwkunde
en Civiele Techniek

Ing. M.W. Verver

Dr.ir. A.L.A. Fraaij

Vierde druk

Noordhoff Uitgevers Groningen/Houten

Ontwerp omslag: G2K (Groningen-Amsterdam)

Omslagillustratie: Hollandse Hoogte, Amsterdam

Eventuele op- en aanmerkingen over deze of andere uitgaven kunt u richten aan:
Noordhoff Uitgevers bv, Afdeling Hoger Onderwijs, Antwoordnummer 13,
9700 VB Groningen, e-mail: info@noordhoff.nl

Met betrekking tot sommige teksten en/of illustratiemateriaal is het de uitgever, ondanks zorgvuldige inspanningen daartoe, niet gelukt eventuele rechthebbende(n) te achterhalen. Mocht u van mening zijn (auteurs)rechten te kunnen doen gelden op teksten en/of illustratiemateriaal in deze uitgave dan verzoeken wij u contact op te nemen met de uitgever.



0 / 15

© 2015 Noordhoff Uitgevers bv Groningen/Houten, The Netherlands.

Behoudens de in of krachtens de Auteurswet van 1912 gestelde uitzonderingen mag niets uit deze uitgave worden veelevoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever. Voor zover het maken van reproductieve veelevoudigingen uit deze uitgave is toegestaan op grond van artikel 16h Auteurswet 1912 dient men de daarvoor verschuldigde vergoedingen te voldoen aan Stichting Reprorecht (postbus 3060, 2130 KB Hoofddorp, www.reprorecht.nl). Voor het overnemen van gedeelte(n) uit deze uitgave in bloemlezingen, readers en andere compilatiewerken (artikel 16 Auteurswet 1912) kan men zich wenden tot Stichting PRO (Stichting Publicatie- en Reproductierechten Organisatie, postbus 3060, 2130 KB Hoofddorp, www.stichting-pro.nl).

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, photocopying, recording, or otherwise, without the prior written permission of the publisher.

ISBN (ebook) 978-90-01-86229-9

ISBN 978-90-01-86228-2

NUR 971

Woord vooraf bij de eerste druk

In het boek *Materiaalkunde* worden niet alleen de materiaaltechnologische aspecten van de bouwmaterialen voor bouwkunde en civiele techniek behandeld, maar ook de materiaalkundige grondslagen.

Het is voor het hbo- en wo-niveau noodzakelijk naast een exact fenomenologisch inzicht ook de samenhang te onderkennen tussen de met het blote oog zichtbare eigenschappen van materialen en de inwendige chemische en structurele opbouw. Het begrijpen en in praktijk brengen van macroscopische eigenschappen is alleen mogelijk met een goede kennis van materiaalsamenstellingen.

Daarom worden waar nodig fysische en chemische achtergronden aan de orde gesteld. Vóórkomen, productietechnologie, eigenschappen, langeduurbehoud en milieueffecten kunnen zo op efficiënte wijze worden gekoppeld. Materiaalkunde geeft de verklaring van het materiaalgedrag, ook onder variërende klimatologische omstandigheden.

Dit boek wil de argumentatie ondersteunen voor eenduidige bepaling van gebruikswaarde en keuze van materialen.

Bij materiaalkunde gaat het om de rechtstreekse relatie tussen wetenschap en toepassing. Het multidisciplinaire karakter van de materiaalkunde onderscheidt producttechnologie, toepassing van materialen en materiaalcomposieten inclusief nieuwe ontwikkelingen en hergebruik en niet in het minst de reeds genoemde onderbouwende fysische en chemische grondslagen. Hierbij zijn steeds de aandachtsniveaus in het oog gehouden die aan de praktischeisen van de ho-opleidingen ten grondslag liggen.

Ing. M.W. Verver, Ouderkerk a/d IJssel

zomer 1996

Woord vooraf bij de tweede druk

De hiervoor aangegeven materiaalkundige en onderwijskundige beschouwingen zijn voor de tweede druk volledig van kracht gebleven. Ook voor materiaalkunde geldt dat bepaalde aspecten in zekere tijd kunnen veranderen of moeten worden verduidelijkt. Daarom zijn fysische en chemische achtergronden aangescherpt.

Strengere milieueisen en de regelgeving voor Duurzaam Bouwen plaatsen materialen en daardoor materiaalkunde op de voorgrond. De normalisatie maakt daar een integrerend deel van uit.

Aan alle disciplines is in dit boek volledig aandacht geschonken om het inzicht in de materiaalkunde te vergroten.

Ing. M.W. Verver

Voorjaar 2000

Woord vooraf bij de derde druk

Steeds meer is de regelgeving bij het bouwen gericht op duurzaam behoud van de bebouwde omgeving. In de derde druk van *Materiaalkunde* is daarmee terdege rekening gehouden. Wetgeving en normalisatie zijn volledig bijgewerkt. Verschillende onderwerpen zijn uitgebreid, zoals betontechnologie, en de laatste materiaaltechnologische ontwikkelingen zijn omschreven. Opmerkingen en wensen van gebruikers zijn waar mogelijk verwerkt. Het concept van *Materiaalkunde* is voortgezet: begrip van het materiaalgedrag in alle denkbare omstandigheden. Nieuw is de toevoeging van aanvullende leerstof op internet. Tevens is daarop een groot aantal vragen met antwoorden te vinden.

Met groot genoegen heb ik dr.ir. A.L.A. Fraaij, universitair hoofddocent TU-Delft, bereid gevonden als auteur te gaan meewerken.

Ing. M.W. Verver, oud universitair docent TU-Delft

Voorjaar 2004

Woord vooraf bij de vierde druk

Bij de herziening geheel in kleur van *Materiaalkunde* is opnieuw uitgebreid aandacht besteed aan de interacties tussen eigenschappen en toepassingsmogelijkheden van het gehele assortiment aan bouwmaterialen, zowel voor het bouwkundig als civieltechnisch ontwerp. Tevens zijn regelgeving (Bouwbesluit) en Normalisatie naar de laatste stand verwerkt. Duurzaamheidsaspecten en milieuzaken zijn nauwgezet behandeld. Daarbij is de nadruk gelegd op materiaalkunde als basis voor zo lang mogelijk functionele bruikbaarheid van de bebouwde omgeving. Materiaalkunde is de kern voor duurzame bouwkunde en civiele techniek. De digitale toevoegingen zijn nadrukkelijk uitgebreid (zie studiewijzer). Graag willen wij drs. H.A.J. de Beer (onderwijskundige) bedanken voor zijn deskundige verwerking van de gehele beeldvorming in kleur.

Ing. M.W. Verver, oud universitair docent TU-Delft
Dr.ir. A.L.A. Fraaij, oud universitair hoofddocent TU-Delft

Voorjaar 2015

Inhoud

Studiewijzer 8

1 Materiaalkunde 11

- 1.1 Materiaalkunde en materiaalkennis 11
- 1.2 Materiaalkunde en bouwmaterialen 12
- 1.3 Het bouwmaterialenpakket 14
- 1.4 Algemene materiaaleigenschappen 18
- 1.5 Milieueffecten 32
- 1.6 Materiaalkundige aspecten 37
- 1.7 Aspecten materiaalkeuze 43
- 1.8 Keuring van bouwmaterialen 43
- 1.9 Bouwmaterialen en afhankelijkheid 45
- 1.10 Bouwmaterialen en classificatie 48
- 1.11 Bouwmaterialen en het bouwkundig bestek 49

2 Hout en houtproducten 51

- 2.1 Inleiding 51
- 2.2 Naaldhout en loofhout 57
- 2.3 Het ontstaan van hout 58
- 2.4 Opbouw en structuur van hout 63
- 2.5 Houtkwaliteit 74
- 2.6 Houteigenschappen 83
- 2.7 Onvolkomenheden 103
- 2.8 Duurzaamheid 109
- 2.9 Bescherming en verduurzaming 122
- 2.10 Plaatmaterialen en andere producten van hout 136
- 2.11 Hout en milieu 152
- 2.12 Algemene houtkenmerken 156
- 2.13 Nadere bespreking houtsoorten 159

3 Natuursteen 171

- 3.1 Inleiding 171
- 3.2 Indeling naar de wijze van ontstaan 173
- 3.3 Ontginning en bewerking 178
- 3.4 Eigenschappen 183
- 3.5 Onvolkomenheden 192
- 3.6 Het keuren van natuursteen 193
- 3.7 Milieueffecten 194
- 3.8 Toepassing, afgeleiden, grond 195
- 3.9 Natuursteensoorten en -groepen 202

4 Gebakken kunststeen 211

- 4.1 Inleiding 211
- 4.2 De grondstof klei 212

- 4.3 Baksteen [218](#)
- 4.4 Keramische dakpannen [243](#)
- 4.5 Keramische buizen [252](#)
- 4.6 Keramische tegels [257](#)
- 4.7 Diversen [262](#)
- 4.8 Milieueffecten [263](#)

5 Anorganische bindmiddelen [267](#)

- 5.1 Inleiding [267](#)
- 5.2 Kalk [268](#)
- 5.3 Cement [271](#)
- 5.4 Gips [289](#)
- 5.5 Herkenning van bindmiddelen en toeslagstoffen [292](#)
- 5.6 Milieueffecten [293](#)

6 Mortels en species [297](#)

- 6.1 Inleiding [297](#)
- 6.2 Algemene eisen aan mortelspecies [298](#)
- 6.3 Samenstellingen van mortelspecies [299](#)
- 6.4 Mortelspecies voor metselwerk (metselmortels) [301](#)
- 6.5 Mortelspecies voor voegwerk (voegmortels) [316](#)
- 6.6 Mortelspecies voor pleisterwerk (pleistermortels) [318](#)
- 6.7 Mortelspecies voor tegelwerk (tegelmortels) [320](#)
- 6.8 Mortelspecies voor nokvorsten [320](#)
- 6.9 Aandachtspunten met betrekking tot mortelspecies [321](#)
- 6.10 Betonspecies [321](#)
- 6.11 Milieueffecten [332](#)

7 Beton en andere kunststeen [335](#)

- 7.1 Inleiding [335](#)
- 7.2 Beton [338](#)
- 7.3 Vezelcementproducten [385](#)
- 7.4 Drijfsteenproducten [387](#)
- 7.5 Kalkzandsteen [387](#)
- 7.6 Gipsproducten [391](#)
- 7.7 Magnesietvloeren [396](#)
- 7.8 Industrieslakken [397](#)
- 7.9 Milieueffecten [397](#)

8 Metalen [403](#)

- 8.1 Inleiding [403](#)
- 8.2 Staal [411](#)
- 8.3 Non-ferrometalen [454](#)
- 8.4 Normalisatie [481](#)
- 8.5 Milieueffecten [482](#)

9 Kunststoffen en rubbers [487](#)

- 9.1 Inleiding [487](#)
- 9.2 Eigenschappen [493](#)
- 9.3 Thermoplasten [496](#)
- 9.4 Thermoharders [509](#)
- 9.5 Rubbers [513](#)
- 9.6 Duurzaamheid [515](#)

- 9.7 Kunststof dakbedekking [518](#)
- 9.8 Milieueffecten [520](#)
- 9.9 Overzichten kunststoffen en rubbers [522](#)

10 Verf, lijm en kit [529](#)

- 10.1 Inleiding [529](#)
- 10.2 Verf [530](#)
- 10.3 Lijm [540](#)
- 10.4 Kitten [544](#)
- 10.5 Milieueffecten [551](#)

11 Bitumen en bitumineuze producten [557](#)

- 11.1 Inleiding [557](#)
- 11.2 Eigenschappen [559](#)
- 11.3 Bitumensoorten in bouw- en civiele techniek [567](#)
- 11.4 Milieueffecten [582](#)

12 Glas en glasproducten [585](#)

- 12.1 Inleiding [585](#)
- 12.2 De glasfabricage [586](#)
- 12.3 Fabricage vlakglas [589](#)
- 12.4 Vlakglasproducten met speciale functie [597](#)
- 12.5 Diverse glasproducten [609](#)
- 12.6 Duurzaamheidsaspecten [611](#)
- 12.7 Milieueffecten [611](#)

13 Isolatiematerialen [615](#)

- 13.1 Inleiding [615](#)
- 13.2 Isolatie en normalisatie [616](#)
- 13.3 Isolatie en constructie [617](#)
- 13.4 Materiaalkunde, materialen en warmtetransport [620](#)
- 13.5 Producten voor isolatie [630](#)
- 13.6 Afmetingen [643](#)
- 13.7 Milieueffecten [643](#)

Illustratieverantwoording [645](#)

Register [647](#)

Over de auteurs [656](#)

Studiewijzer



Extra studiemateriaal behorende bij dit boek is beschikbaar op de website: www.materiaalkunde.noordhoff.nl

Op deze website zijn de volgende aanvullingen per hoofdstuk te vinden waarvan de vermeldingen in de betreffende hoofdstukken worden aangegeven:

- Bij verschillende materiaalgroepen is aanvullende leerstof toegevoegd. Duidelijk om de mogelijkheid te bieden zich in bepaalde materie te verdiepen. Om te oefenen zijn adequate vragen, opdrachten en antwoorden opgenomen.
- Vooral hoofdstuk 1 van *Materiaalkunde* is diepgaand aangevuld om materiaalkundige benaderingen en achtergronden te belichten, zoals de chemie van bouwmaterialen, breuksystemen, spanning en veiligheid, viscositeit en elasticiteit en spanning versus materiaalsystemen.
- Daarnaast worden in hoofdstuk 1 de keuringsproblematiek, normen en normalisatie en Duurzaam Bouwen nader belicht.
- Eveneens zijn in een tweetal uitgebreide toevoegingen Hang- en sluitwerk en Bevestigingsmiddelen met de nodige figuren opgenomen. Daarbij wordt aandacht besteed aan huidige veiligheidsontwikkelingen zoals toegangscontrole, mechanische sluitsystemen en inbraakbeveiliging zoals kerntrekbeveiliging en boorbeveiliging. Het Politiekeurmerk wordt aan de orde gesteld.



1

Materiaalkunde

- 1.1 Materiaalkunde en materiaalkennis
- 1.2 Materiaalkunde en bouwmaterialen
- 1.3 Het bouwmaterialenpakket
- 1.4 Algemene materiaaleigenschappen
- 1.5 Milieueffecten
- 1.6 Materiaalkundige aspecten
- 1.7 Aspecten materiaalkeuze
- 1.8 Keuring van bouwmaterialen
- 1.9 Bouwmaterialen en afhankelijkheid
- 1.10 Bouwmaterialen en classificatie
- 1.11 Bouwmaterialen en het bouwkundig bestek

1.1

Materiaalkunde en materiaalkennis

Voor de ingenieur zijn *materiaalkunde* en *materiaalkennis* een onverbreekelijk geheel. Zonder materiaalkunde zijn de fenomenologische aspecten van (bouw)materialen – herkenning, eigenschappen, langeduurgedrag en toepassingsgebied – niet nader te verklaren, laat staan goed te begrijpen. Het is daarom noodzakelijk dat de ingenieur weet waarvoor hij materiaalkunde nodig heeft; het vakgebied van de ingenieursdiscipline (vormgeving, constructie, milieukunde en weg- en waterbouwkunde) speelt daarbij een grote rol.

Dit boek geeft de brede basis van *materiaalkunde* en *materiaalkennis* die noodzakelijk is voor *bouwkundige* en *civieltechnische* studies. Het richt zich in brede zin op de gestelde einddoelen van die studies en biedt daarvoor de relevante verdieping. Verdieping met behulp van de materiaalkunde betekent de *verklaring geven voor het gedrag van materialen*, in welke klimatologische expositieomstandigheden ze zich ook bevinden (figuren 1.1a en b). Met andere woorden: de *algemene gebruikswaarde* en de *keuze van materialen* met argumenten nader onderbouwen. Hierbij zijn de *doelstellingen* van *duurzaam bouwen* van doorslaggevende betekenis.

FIGUUR 1.1a Bouwkunde en civiele techniek in één oogopslag



1.2 Materiaalkunde en bouwmaterialen

De kennis van bouwmaterialen kan worden onderscheiden in praktische materiaalkennis en in theoretische materiaalkunde.

1.2.1 Het onderscheid tussen kennis en kunde

Bouwmaterialen zijn de materialen waarmee we bouwen, waarmee we een gebouw optrekken, een dijk aanleggen, een wegverbetering uitvoeren, een vliegveld realiseren enzovoort. Het gebruik van bouwmaterialen heeft hiermee een zeer breed karakter. Als we de materialen kennen, herkennen, hun eigenschappen weten en hun gedrag in de praktijk achterhaald hebben, is het ook mogelijk de juiste keuze te maken voor een bepaalde toepassing, doelgericht op *construeren*, *afbouwen* of *afwerken*.

De keuze is groot, maar het zoeken naar of het verwerken van een materiaal in een bepaalde bouwomstandigheid heeft duidelijk meer voeten in de aarde. Bij combinaties van materialen (composieten en andere samenstellingen) ligt dat vaak nog moeilijker.

Als de fundamentele kennis van de materialen echter uitgebreid genoeg is om de voor- en nadelen van het gebruik te kunnen afwegen, kan ook een *doordachte keuze worden gemaakt voor een gerichte toepassing*, in welke omstandigheid dan ook. Het is daarbij van groot belang dat die keuze niet alleen afhankelijk mag zijn van de eigenschap om de gewenste gebruiksfunctie uit te oefenen. Een materiaal of product kan worden gekozen op bijvoorbeeld sterkte of brandveiligheid, maar er is meer bepalend voor een goede keuze. Gezondheid, algemene veiligheid en milieuaspecten moeten wel degelijk worden meegewogen bij het maken van verantwoorde keuzes.

FIGUUR 1.1b Civiele techniek in functionele waterkering



De *materiaalkennis* geeft aan:

- welke materialen voorhanden zijn
- hoe de materialen zijn ontstaan of gemaakt (waaraan vaak kennis van de eigenschappen kan worden ontleend)
- hoe en waaraan we ze kunnen herkennen
- in welke vormen en formaten ze verkrijgbaar zijn
- welke eigenschappen ze bezitten
- de uit overlevering of ervaring bekende gegevens over levensduur

Materiaalkennis

Deze materiaalkennis behoeft niet gestoeld te zijn op verklarende theoretische beschouwingen of onderbouwing.

De *materiaalkunde* geeft de theoretische grondslagen van:

- de structuur, de opbouw, de chemie van de materialen en de daartussen bestaande samenhang; zie 1.4.2
- de corrosie van metalen en de aantasting van alle andere materialen
- de bescherming tegen allerlei aantastende milieu-invloeden
- de weerstand tegen brand, vorst en andere weersinvloeden
- de sterkte in de constructie; zie 1.4.3
- de vervormbaarheid onder mechanische belasting (kruip, stijfheid, plasticiteit, viscositeit, vermoeiing); zie 1.4.3
- de vervormbaarheid door thermische (zie 1.4.4) en vochtinvloeden (zie 1.4.5)
- de mogelijke *levensduur* van materialen en constructies, vertaald in *duurzaam bouwen*; zie 1.4.10 en 1.5.4
- de onderhoudsproblematiek van materialen en constructies

Materiaalkunde

De *materiaalkunde* is de basis bij het voorspellen van het *gedrag van nieuwe en gerecyclede materialen*. De materiaalkunde speelt een duidelijke rol bij het onderkennen van mogelijkheden tot hergebruik van materialen en de toepassing van afvalstoffen. Milieutechnische aspecten zijn met materiaalkunde te onderbouwen.

1.2.2 Keuring, speurwerk en ontwikkeling

Een belangrijke manier om meer van bestaande en nieuwe bouwmaterialen te weten te komen vormt het *onderzoek*. Dit onderzoek kan worden onderscheiden in keuring, speurwerk en ontwikkeling. Bij de *keuring* wordt nagegaan of de geleverde materialen wel aan de gestelde eisen voldoen. Keuring wordt niet zelden onderbouwd met statistische berekeningen, waarvoor groepen proefstukken van praktijkgrootte aselekt zijn genomen. De groepen zijn daarbij dus volstrekt willekeurig gekozen.

Bij *speurwerk* en *ontwikkeling* worden nadere gegevens verkregen over de eigenschappen van de materialen en hun bruikbaarheid in verschillende (nagebootste) omstandigheden. Er ontstaan zo zelfs nieuwe materialen en vaak andere gebruiksmogelijkheden voor 'oude' materialen.

Veel is er te doen over het om- of verwerken van *afvalstoffen*; Bijvoorbeeld vlieg-as (zie paragraaf 1.5.1) (een afvalproduct van met steenkool gestookte elektriciteitscentrales) en *sloopmaterialen* kunnen hier worden genoemd. Een duidelijk milieutechnisch gegeven met een uitdaging voor de materiaalkunde.



Op de website bij dit boek, www.materiaalkunde.noordhoff.nl, wordt in Aanvulling 1.1 nader ingegaan op het onderwerp keuring.

1.3 Het bouwmaterialenpakket

Bouwmaterialen omvatten alle producten die in alle facetten van bouwkunde en civiele techniek worden verwerkt.

1.3.1 Het maatschappelijk belang van bouwmaterialen

In het pakket bouwmaterialen is een zeer *grote verscheidenheid van materialen* vertegenwoordigd. Bovendien heeft het een omvang die de hoeveelheid andere vaste verbruiksgoederen in de maatschappij ver overtreft. Bouwmaterialen zijn niet alleen economisch van *groot belang*, maar ook voor het *milieu en de energie- en grondstoffenvoorraden*. Een en ander is lastig in getallen aan te geven, omdat deze aandachtsgebieden niet onafhankelijk van elkaar zijn. Verder zullen voor een afgewogen waardering ook eigenschappen, onderhoud, de duur van het gebruik en de gevolgen van hergebruik van materialen in de beschouwing moeten worden meegenomen.

1.3.2 De structuur van het bouwen

Bouwkunde en civiele techniek worden gevormd door verscheidene structuren, van groot naar klein opgebouwd uit onderdelen die zelf ook weer gestructureerd zijn. In de bouwkunde kan een gebouw als voorbeeld dienen. Er is een stedelijke structuur, het gebouw heeft een structuur, de dragende vormgeving (bijvoorbeeld een staalskelet) heeft een structuur, de bouwprofielen hebben een structuur, en het oppervlak en de interne opbouw van de materialen zijn gestructureerd. Bij staal zijn dat streng geordende atoomstructuren in kristallen.

In de civiele techniek is zo'n rangorde weer te geven voor bijvoorbeeld een weg, van de infrastructuur tot de wegoopbouw, de korrelsamenstelling en de gebonden structuur van het gekozen materiaal (asfalt of beton).

De structuren staan niet los van elkaar. Bij onderzoeksprogramma's van materialen worden daarom de macrostructuur van een bouwwerk en de microstructuur van de materialen betrokken. Samenstelling en opbouw van de diverse structuren bepalen gezamenlijk de 'eigenschappen' van de gebouwde omgeving. *Het is de basis voor een doelgerichte materiaalkeuze* (paragraaf 1.7).

1.3.3 Functies van bouwmaterialen

Een bouwwerk moet een aantal *technische functies* vervullen. Voor een gebouw betekent dat *bescherming bieden* tegen invloeden van binnen en buiten, dat wil zeggen *mechanisch* in stand blijven (sterk en stijf zijn) en *weerstand* bieden tegen kou, vocht en geluid. Voor een dijk zijn vergelijkbare functies in te vullen: in stand blijven, bescherming bieden en aanvullend een gebied ontsluiten.

Bescherming
bieden

Het is kenmerkend voor de *ontwikkeling van de bouwtechniek* dat de bouwmaterialen zo gekozen, toegepast en gedimensioneerd worden dat zij met tevoren berekende gegevens deze functies kunnen vervullen. Een gevolg van deze ontwikkeling is dat *één materiaal minder functies tegelijk* hoeft te vervullen dan in vroegere tijden het geval was.

Materiaal-
functies

De mate waarin een (bouw)materiaal geschikt is, hangt af van de wijze waarop het een of meer *functies* kan *vervullen* en ook waarop het kan worden afgestemd op andere materialen (figuur 1.2a). De klassieke massieve steensbuitenmuur heeft tot taak om *constructief* te dragen, maar ook om *regen, geluid en koude* te weren.

In een gebouw met een *staalskelet* wordt de *dragende functie* overgelaten aan het staal, terwijl voor *warmte-isolatie* en *regenwering* afzonderlijke materialen worden gekozen.

De *geschiktheid van een bouw materiaal* hangt niet alleen af van de wijze waarop het bepaalde functies vervult, maar ook van de wijze waarop moet kunnen worden *samengewerkt met andere bouwmaterialen*. De kwaliteit van een bouw materiaal is daarom een relatief begrip: er zijn vele goede bouwmaterialen, maar het gebruik op een bepaalde plaats of in bepaalde omstandigheden kan verkeerd gekozen zijn en dan aanleiding zijn tot een onnodig negatief oordeel.

Sommige materialen zijn specifiek op *één functie gericht*, zoals warmte-isolatie. De meeste materialen die thermisch isoleren, kunnen ook gebruikt worden voor geluidsabsorptie, mits het oppervlak poreus genoeg is. Voor *geluidsisolatie* worden zware dichte bouwmaterialen (muren) of speciaal samengestelde constructies van lichte elementen gekozen (bijvoorbeeld voorzetwanden).

Functievoorbelden bij een gebouw

Funderingen

De fundering verdeelt de belasting van de bovenbouw op de ondergrond. Bovendien kan zij tot taak hebben het optrekken van vocht te verhinderen. Van de gebruikte materialen zijn dus de druksterkte, de vervorming, de capillaire opzuiging en de resistentie tegen het grondwater van belang. Gewapend beton of metselwerk met hardgebakken stenen komen in aanmerking, en palen van hout of beton voor de directe funderingsoverdracht.

Buitenmuren

Buitenmuren kunnen functioneren als vulling met afsluitende functie in een skelet van kolommen en balken; ze kunnen echter ook zelf dragen. Van een gevel wordt verwacht dat deze *regulerend werkt* op het binnentreden en uittreden van *licht, warmte, geluid en waterdamp*. Bijna alle soorten bouw-

FIGUUR 1.2a Verschillende bouwmaterialen



materialen kan men erin aantreffen: natuursteen, baksteen, betonblokken, kalkzandsteen, platen van beton, hout, kunststoffen, aluminium, staal, glas en vezelcementproducten. Ecomogelijkheden (plantengroei) zijn in ontwikkeling.

Daken

De bouwmaterialen in het dak hebben in beginsel dezelfde taak te vervullen als die van de gevel.

Voor platdakconstructies worden dragende, isolerende en waterkerende materialen gebruikt.

Voor de *waterkering* komen andere materialen in aanmerking dan voor de gevel (de afvoer van water is daar eenvoudiger). De waterkering bij het platte dak bestaat doorgaans uit bitumineuze banen of kunststoffolies, bij het schuine dak uit pannen of platen.

De keuze van de isolatie is afhankelijk van de gehele constructievorm. De plaats van de isolatie is daarbij van groot bouwfysisch belang (koudebruggen en vocht). Daksystemen met planten (groendaken) zijn hier een bijzonder gegeven (figuur 1.2b).

Schil van een gebouw

Buitenwanden en daken worden gezamenlijk wel de *schil* van een gebouw genoemd.

FIGUUR 1.2b Het eco-dak op een nieuw schoolgebouw



Vloeren

Vloeren hebben primair een dragende functie. Dan is vooral de treksterkte aan de onderzijde van de vloer en de stijfheid van de gehele vloeropbouw van belang.

Daarnaast is geluidsisolatie noodzakelijk. Dit wordt bereikt door de vloer voldoende zwaar en dicht te maken. Isolatie tegen loopgeluid kan behalve door een eenvoudige zachte vloerbedekking bij intensief contactgeluid worden verkregen door een zwevende dekvloer (een vloer zonder contacten met de constructie, waarin minerale wol of kunststofschuim is verwerkt). Van begane vloeren en woningscheidende vloeren wordt ook thermische isolatie geëist. De vloeren bestaan uit gewapend of voorgespannen beton, stalen of houten balken, in combinatie met isolatiematerialen.

Binnenmuren

Binnenmuren hebben een dragende functie als ze woningscheidend zijn. Zij moeten in dat geval ook geluid isoleren. De andere binnenmuren kunnen dragend zijn, maar hebben meestal een scheidende functie. Men kan niet-dragende wanden opbouwen uit elementen van gips of cellenbeton, of uit sandwichconstructies met bijvoorbeeld gipskartonafwerking.

Bij dit voorbeeld van een gebouw komt tot uiting dat een verscheidenheid aan materialen kan worden ingezet voor *construeren* (opvangen van mechanische belastingen), *afbouwen* (additieve functies, zoals afsluiten met ramen, deuren en gevel- en dakinvulling, maar ook trappen en scheidingswanden) en tot slot *afwerken* (dakbedekking, tegelwerk, isolatie enzovoort). Zeer veel materialen zijn bruikbaar. Er is daarbij keuze uit een omvangrijk arsenaal, onder te verdelen in de volgende hoofdgroepen:

- steenachtige materialen (natuursteen, gebakken producten, beton)
- metalen (staal en non-ferro)
- hout en houtproducten
- kunststoffen
- diversen: glas, bitumen enzovoort

1.3.4 Toepassingsgebieden voor bouwmaterialen

Het toepassingsgebied van bouwmaterialen is zeer uitgebreid. In veel gevallen is er duidelijk verband met de productie en verwerking. De juiste keuze van de materialen resulteert doorgaans in succesvol en functioneel ontwerpen.

Toepassingsgebieden van bouwmaterialen zijn:

- woningbouw (eengezinswoningen en woongebouwen)
- gebouwen met andere bestemmingen dan wonen, zoals kantoorgebouwen, winkelcentra, industriehallen, fabrieken, vrieshuizen, ziekenhuizen, verzorgingscentra, verpleeginrichtingen, theaters en bioscopen
- waterbouwkundige werken, zoals irrigatievoorzieningen, dijken, sluisen, reservoirs, bruggen en aquaducten
- verkeersconstructies, zoals wegen, wegbeveiliging, tunnels, viaducten en geluidkerende wanden
- defensiewerken, zoals bunkers en militaire vliegvelden
- leidingwerken voor gas, water, olie en chemicaliën
- milieutechnische werken, zoals waterzuiveringsinstallaties, afval(water)bunkers en grondafdekkingen, en zeker ook het inrichten van afvalterreinen

1.3.5 Bouwmaterialen en bouwstoffen

Er wordt onderscheid gemaakt tussen de aanduidingen *bouwmaterialen* en *bouwstoffen*:

Bouwmaterialen

- *Bouwmaterialen* kunnen nog een bewerking ondergaan zonder de functionele bedoeling te verliezen waarvoor ze gemaakt zijn. Ze kunnen zonder vorm zijn (bijvoorbeeld een cementsoort) ofwel een direct bruikbare vorm hebben meegekregen (bijvoorbeeld een staalprofiel).

Bouwstoffen

- *Bouwstoffen* zijn de basisstoffen waaruit de bouwmaterialen zijn gevormd. Een goed voorbeeld is de natuursteensoort graniet. Er kan een gepolijste plaat uit worden gemaakt, een bouw materiaal voor gevelelementen.

Bouwproduct

Zo'n *gevelement* wordt een *bouwproduct* genoemd. Een bouwproduct bestaat uit bouwmaterialen en/of bouwstoffen. Het heeft een (fabrieksmatige) vorm gekregen, waardoor het zonder meer in het werk kan worden gebracht. *Het geleverde product mag geen ingrijpende wijziging meer ondergaan, anders verliest het zijn functie.*

We zien dus dat bouwproducten kunnen worden aangeduid met een nadere omschrijving, in dit voorbeeld het gevelement. Met een element is men duidelijk aan het bouwen, vandaar dat er sprake is van *bouwelementen*. De functie is hier gericht op de gevelinvulling. Daarbij kunnen zowel dragende als niet-steunende wens een rol spelen.

1.4 Algemene materiaaleigenschappen

Materiaal-eigenschappen

De belangrijkste materiaaleigenschappen zullen onder de loep worden genomen. Bij de bespreking van de afzonderlijke materialen krijgen deze eigenschappen extra aandacht.

1.4.1 Inleiding

Van belang is dat we sterkte, uitzetting, vervorming, stijfheid, dichtheid enzovoort in een vroegtijdig stadium kunnen definiëren. *Het is dan mogelijk een materiaal min of meer te identificeren. De materiaalkeuze wordt minder moeilijk als we het nodige van de gebruikswaarde van het materiaal kennen.* We kunnen aangeven of een materiaal sterk–zwak, stijf–slap enzovoort is. Voor een belangrijk deel worden de *eigenschappen van (bouw)materialen* bepaald door de manier waarop ze zijn gefabriceerd, door de natuur zijn gevormd of een voor de toepassing noodzakelijke vervorming hebben ondergaan. Bekendheid met vervaardigingsprocessen van materialen en hun halfproducten is daarom vaak noodzakelijk.

De *eigenschappen van bouwmaterialen* moeten bekend zijn voor goede functie-uitoefening in de tijd. De relatie duurzaamheid en eigenschappen! Een vloerbelasting blijft de gehele levensduur van een gebouw gehandhaafd en de muren moeten deze continu verwerken. Andere belastingen herhalen zich regelmatig, zoals de spanningen in een dak- of gevelconstructie ten gevolge van temperatuurvariëaties. Verkeersbelastingen kunnen zelfs vele malen per minuut invloedrijke spanningen in de constructie veroorzaken. Wanneer *materiaaleigenschappen* worden bepaald, gebeurt dit meestal onder (standaard)beproevingsomstandigheden waarin bouwkundige en/of civieltechnische aspecten en het tijdsafhankelijk gedrag niet volledig verdisconteerd kunnen worden. Daarom zijn gevonden waarden voor verschillende materialen niet volledig met elkaar vergelijkbaar. Ieder materiaal is onder

eigen genormeerde methoden beproefd. In tabellen weergegeven eigenschappen dienen daarom altijd nauwkeurig te worden beoordeeld. Vooral ook die welke zonder meer in brochures worden vermeld!

1.4.2 Opbouw, structuur en chemie van bouwmaterialen

Opbouw en structuur

Steeds zullen we zien dat opbouw en structuur van een materiaal aan de eigenschappen ten grondslag liggen. De *samenhang van de stof* is dus van uitermate groot belang. Moeilijk blijft dat ondanks die kennis het gedrag van een materiaal in de praktijk niet altijd eenduidig te voorspellen is. Van grote invloed zijn:

- Waar komt een materiaal vandaan (ontstaanswijze, vormingsproces)?
- Wat gaan we ermee doen, waar, wanneer en onder welke omstandigheden?
- Hoe zal het zich gedragen (vervorming, aantasting)?
- Waarom gedraagt het zich zo (welke eigenschappen spelen een belangrijke rol)?
- Wat kunnen we doen om de levensduur (dus het behoud van de eigenschappen) zo lang mogelijk te laten zijn (keuze, combinatie, verduurzamen)?
- Wat zijn de mogelijkheden voor recycling en hergebruik? Bij het ontwerpen van bouwwerken en constructies moet meewegen wat er gaat gebeuren bij 'einde levensduur'.

De chemie

Om het gedrag van bouwmaterialen te begrijpen en te voorspellen, is men vaak aangewezen op de chemie van de materialen. Chemische achtergronden zijn ook heel nuttig om structuur en duurzaamheid te doorzien. Aanvulling 1.2 op de website bij dit boek behandelt de bindingskrachten tussen atomen, de opbouw van atomen en moleculen, en tevens enkele scheikundige begrippen die het inzicht in materiaaleigenschappen ondersteunen.

Op de website bij dit boek, www.materiaalkunde.noordhoff.nl wordt in Aanvulling 1.2 nader ingegaan op de chemie van bouwmaterialen en begrippen uit de scheikunde



1.4.3 Mechanische eigenschappen

De sterkte

Onder de *sterkte* van een materiaal verstaat men de weerstand tegen breuk. De van buiten opgelegde krachten zullen daarbij het materiaal trachten te vervormen, wat zich kan uiten in krom staan, doorbuigen, dunner worden enzovoort. De sterkte waarden waarover men bij materialen spreekt en die in veel tabellen worden weergegeven, zijn de waarden die de materialen bereiken vlak voor het moment van bezwijken, waarop de samenhang geheel verloren gaat. Een materiaal kan op dat moment een voor het oog maximale vervorming te zien geven. Bij *brosse materialen* is van een zichtbare vervorming vrijwel geen sprake; de zogenoemde *brosse breuk*.

De *sterkte* van een materiaal wordt aangegeven met de *spanning* in het materiaal waarbij het bezwijkt. We onderscheiden treksterkte, druksterkte, buigsterkte en schuifsterkte. Deze waarden geven dus de (sterkte) *kwaliteit* aan van een materiaal. Een materiaal mag echter in de praktijk nooit tot deze sterkte waarden worden belast. Vocht- en temperatuuffecten en zeker ook

Sterkte van een materiaal

Brosse materialen

Materiaalgedrag

Toelaatbare spanning

veiligheidseisen stellen duidelijke grenzen. Als grens van belasten wordt de waarde van de *toelaatbare spanning* aangehouden (figuur 1.3).

FIGUUR 1.3 Toelaatbare sterkte overschreden, bezwiken betonbekisting



Deze toelaatbare spanning is de sterkte waarde van het materiaal gedeeld door een *veiligheidscoëfficiënt*. Anders gezegd: de veiligheidscoëfficiënt is de verhouding tussen de maximale sterkte waarde van een materiaal en de toelaatbare spanning in de constructie. Deze coëfficiënt is materiaalgebonden en ligt tussen 2 en 5.



Op de website bij dit boek, www.materiaalkunde.noordhoff.nl, wordt in Aanvulling 1.3 nader ingegaan op brosse en taai breuk. Tevens wordt aandacht besteed aan toelaatbare spanning en veiligheidscoëfficiënt in Aanvulling 1.4.

Belang van normen

In NEN-normen (belastingen op constructies, ontwerp en berekening en dergelijke) zijn de waarden van de toelaatbare spanning voor verschillende materialen vastgelegd. Het zal duidelijk zijn dat de sterkte van een materiaal een belangrijk gegeven is als het gaat om het dragen van mechanische belastingen. Indirect gaat het hier om de interne samenhang van de materialen. Naast de sterkte komen in dit verband aan de orde de *stijfheid* en de *vormstabiliteit*, met andere woorden de weerstand tegen bezwijken.

Vervorming door mechanische belasting

Spanning en stijfheid

Belastingen op een constructie leiden altijd tot spanningen in de samenstellende bouwdelen en dus ook in de toegepaste materialen. Er is sprake van een *gedwongen situatie*. Hierdoor kunnen zich *vervormingen* ontwikkelen die tot bezwijken aanleiding geven. Te hoge spanningen in een balkdragende muur kunnen de muur doen scheuren. In constructieberekeningen worden altijd alle mogelijk optredende vormveranderingen meegenomen; zie de paragrafen 1.4.4 en 1.4.5.

Het is goed hier ook het begrip *relaxatie* aan te geven. Hieronder verstaat men de afname in de loop der tijd van een oorspronkelijk in een materiaal gebrachte spanning. De vermindering van de spanning berust op verschuivingen in de atomaire of moleculaire opbouw van een materiaal. Voorbeelden zijn de stalen kabels van hangbruggen, nagespannen stalen wapening in betonconstructies en relaxerende spanningen in asfaltconstructies. Ook aan relaxatie wordt in berekeningen aandacht geschonken.

Relaxatie

Spanningen in materialen doen zich voor indien constructies aan trek-, druk-, buig- en/of schuifbelastingen worden blootgesteld; als er dus bepaalde krachten op worden uitgeoefend.

Onder het begrip *spanning* (σ) wordt bij *trek* en *druk* verstaan de op het materiaal werkende kracht (F) gedeeld door het belaste oppervlak (A), in formule:

Spanning (σ)

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (\sigma = \text{sigma})$$

Bij buiging geldt: $\sigma = \frac{M}{W}$

In deze formule stelt M het uitwendige moment voor en W het weerstandsmoment van het op buiging belaste constructieonderdeel. Worden de krachten in beide formules uitgedrukt in newton (N) en het oppervlak in mm^2 , dan volgt uit deling de eenheid van spanning in N/mm^2 .

Bij beton en staal (onder de vloeigrens) zal A niet of nauwelijks wijzigen. Bij andere materialen (bepaalde kunststoffen en gestrekte rubbers) is dat wel degelijk het geval.

Ten gevolge van een trekspanning zal een materiaal uitrekken, dat wil zeggen langer worden.

Onder de specifieke *rek* (ε) van een materiaal verstaat men de verlenging Δl gedeeld door de oorspronkelijke lengte:

Rek (ε)

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (\varepsilon = \text{epsilon})$$

ε is dus een *vormverandering* en als gevolg van de definitie een *dimensieloos* getal, dus bijvoorbeeld % of ‰ ($\frac{\text{mm}}{\text{mm}}$). De vervorming ε is afhankelijk van het materiaal en de spanning.

Indien de uitrekking evenredig is met de optredende spanning, geldt de *Wet van Hooke* (1678). Deze luidt:

Wet van Hooke

$$\sigma / \varepsilon = E \quad \text{of} \quad \sigma = E \cdot \varepsilon$$

Hierin stelt de letter E de *elasticiteitsmodulus* (evenredigheidsconstante) voor. E wordt uitgedrukt in N/mm^2 als σ wordt uitgedrukt in N/mm^2 , omdat ε immers dimensieloos is. Een hoge E betekent dat een materiaal stijf is; een E die zeer laag is geeft aan dat een materiaal slap is (E is stijfheid, is weerstand tegen vervorming).

Enkele rekenwaarden:

$$E_{\text{staal}} = 1,9 \text{ à } 2,1 \times 10^5 \text{ N/mm}^2 \text{ (afhankelijk van de staalsoort);}$$

$$E_{\text{hout}} = 0,8 \text{ à } 2 \times 10^4 \text{ N/mm}^2 \text{ (afhankelijk van de houtsoort, het vochtgehalte en de vezelrichting waarin } \sigma \text{ werkt);}$$

$$E_{\text{beton}} = 1,5 \text{ à } 3 \times 10^4 \text{ N/mm}^2 \text{ (afhankelijk van de samenstelling en de praktische verwerkingseisen);}$$

$$E_{\text{kunststof}} = 1,5 \text{ à } 3,5 \times 10^3 \text{ N/mm}^2 \text{ (afhankelijk van de soort kunststof).}$$

De Wet van Hooke (de evenredigheid tussen σ en ϵ) geldt voor een bepaald materiaal alleen tot een bepaalde grootte van de daarin optredende spanning. Deze grenswaarde van de spanning is de zogenoemde *evenredigheids-grens* (zie paragraaf 8.2.6 Eigenschappen van staal). Boven deze grens neemt de rek sneller toe dan de spanning. De evenredigheid is dus verloren gegaan. *Een aanwijsbare evenredigheid (de Wet van Hooke dus) wordt door slechts weinig materialen getoond.* Bij staal is deze tot een bepaalde belasting duidelijk het geval.

Evenredigheids-grens

Elasticiteitsgrens

Even boven de evenredigheidsgrens ligt de *elasticiteitsgrens*. Tot deze grens is het materiaal *elastisch*, dat wil zeggen: bij het opheffen van de daarbij optredende trekspanning krijgt het materiaal nog zijn oorspronkelijke lengte terug. De Wet van Hooke wordt door vele materialen nauwelijks gevolgd of slechts in een klein gebied. Bij staal dus vrij duidelijk. Voor steenachtige (brosse) materialen geeft een trekproef geen uitkomst en moeten we het doen met een onderzoek op druksterkte. Bij beton is sprake van een parabolisch verband tussen σ_d en ϵ , waarbij de top bereikt wordt bij een vervorming van ca. 3,5%. We kunnen stellen dat bij *mechanische vervorming* van een materiaal doorgaans zowel elasticiteit en viscositeit als plasticiteit (zie hierna) een rol spelen. Lage spanningen veroorzaken bij veel (stijve) materialen een elastisch gedrag. Worden de spanningen hoger dan de elasticiteitsgrens, dan volgt een plastische vervorming (duidelijk bij metalen, zie de trekkromme bij staal in paragraaf 8.2.6). Worden de spanningen nog hoger, dan volgt breuk of scheurvorming.

Plasticiteit

Sommige materialen bezitten *plastische eigenschappen*. Als de spanning boven de elasticiteitsgrens is gekomen en daarna weer tot nul is teruggebracht (dat wil zeggen: als de belasting van het materiaal is weggenomen), is bij deze materialen een blijvende vervorming ontstaan. Vooral metalen kunnen plastische vervorming vertonen. We zeggen dat staal *elastoplastisch* is. Een echt plastisch materiaal is klei, indien daaraan een bepaald percentage water is toegevoegd. Ook sommige kitsoorten gedragen zich plastisch.

Er is wel tijd nodig voor plastische vervorming optreedt en de vervorming ontstaat dan pas nadat de spanning een zekere waarde bereikt heeft (de zwich- of vloeispanning).

Viskeuze vervorming

Sommige materialen, zoals bitumen (het bindmiddel in asfaltwegdekken en bitumineuze dakbedekkingsmaterialen), vertonen onder bepaalde belastingomstandigheden een vervorming die *viskeus* wordt genoemd. Figuur 1.4 laat de invloed van het verkeer zien. Het materiaal is viskeus gaan vervormen, dat wil zeggen vloeien. In het materiaal treden afschuivingen in de moleculaire structuur op; in feite hebben we te maken met (dikstroperige) vloeistoffen.

FIGUUR 1.4 Viskeuze vervorming in asfalt door verkeersbelasting



De mate van de optredende vloeï is afhankelijk van de opgelegde uitwendige kracht en van de temperatuur. De viskeuze vloeï is tevens heel duidelijk afhankelijk van de tijd. Een materiaal dat *viskeus* reageert, zal vervormen (vloeïen) *zolang het materiaal wordt belast* door een van de drie genoemde invloeden. Heffen we een belasting op, dan is er een blijvende vervorming ontstaan. De *viscositeit* geeft het verband weer tussen de afschuifspanning in het materiaal en de vervormingssnelheid van de ‘vloeïstof’.

Viscositeit

Verhoging van de temperatuur kan een viskeus materiaal dunvloeïbaar maken, met andere woorden: de viscositeit daalt. Bij bitumen wordt het viskeuze gedrag veroorzaakt doordat de lange ketenmoleculen waaruit het materiaal is opgebouwd, onderling slechts geringe aantrekkingskrachten op elkaar uitoefenen. Belasting, temperatuur en tijdeffecten hebben daarom duidelijk invloed op het vervormingsgedrag.

Dit geldt in het algemeen ook voor een groep polymeren, de thermoplasten (zie paragraaf 9.3), waarin gekluwde ketenmoleculen vooral afhankelijk van temperatuurwisselingen meer of minder gemakkelijk langs elkaar kunnen glijden.

In de praktijk wordt vaak gezondigd tegen de juiste formulering van het begrip *viscositeit*. Een bepaald materiaal is hoog viskeus indien de vloeïstof een sterke inwendige samenhang bezit, en laag viskeus indien dat niet het geval is. Bij bitumina is dat dus goed nader aan te geven.

Bij viskeuze materialen is het beter om niet van een (eenduidige) *E*-modulus te spreken, maar van een (tijdsafhankelijke) *stijfheidsmodulus*. Ook hierbij is een bitumen een goed voorbeeld. De samenhang (cohesie) in het materiaal is gebaseerd op de grootte van de onderlinge aantrekkingskrachten van ionen (geladen atomen) en moleculen. Voor een goed onderscheid wordt de stijfheidsmodulus met *S* (van stijfheid) aangegeven.

Stijfheidsmodulus



Op de website bij dit boek, www.materiaalkunde.noordhoff.nl, wordt in Aanvulling 1.5 nader ingegaan op viskeuze en visco-elastische stoffen.

Kruip

Onder *kruip* verstaat men in de tijd toenemende vervorming van een vast materiaal indien het aan een gelijkblijvende belasting wordt onderworpen. Veelal treedt een eindwaarde op, de *kruiplimiet*, waarbij geen breuk hoeft op te treden (houten balken in historische gebouwen of een brugoverspanning, zie figuur 1.5).

Kruiplimiet

Vrijwel alle materialen vertonen in de praktijk deze kruip. We denken daarbij aan doorbuiging van liggers van staal en beton, zelfs onder invloed van het eigen gewicht. Met dit verschijnsel kruip wordt in berekeningen voor constructies en in voorschriften altijd rekening gehouden.

De *vervorming door kruip* is voor een groot deel *viskeus*, dat wil zeggen: de opgetreden vervorming zal na wegnemen van de belasting niet geheel worden opgeheven. Er is een *blijvende* vormverandering opgetreden, het materiaal is inwendig als het ware iets gevloeid.

Het *andere deel* van de kruipvervorming is *reversibel*, dat wil zeggen: na het wegnemen van de belasting vervalt deze vervorming, een vertraagd elastische terugvering dus. Bitumen, hout en beton zijn voorbeelden van visco-elastische materialen.

FIGUUR 1.5 Kruip en kruiplimiet in brugdek en wegdek



Langeduursterkte

De eigenschap die bij kruip nauw aansluit, is de *langeduursterkte* van een materiaal. Daarbij treedt in een materiaal de hoogste spanning op waarbij de kruip tevens tot stilstand is gekomen.

Vermoeiing

Vaak zijn in de praktijk de belastingen op materialen en constructies niet constant, zij wisselen in grootte. Invloed van wind op gebouwen, grondtrillingen (aardbeving) en verkeersbelasting zijn hier voorbeelden van. Constructies

kunnen onder dergelijke belastingen bezwijken, zelfs onder de toelaatbaar berekende spanningen. Trek- en drukzones wisselen elkaar daarbij af en veroorzaken breuk die nog (lang) niet verwacht was. Naar vermoeiingsgedrag wordt diepgaand onderzoek gedaan, bijvoorbeeld op waterkeringen in de Deltawerken en op wegbouwconstructies. Ook bouwwerken in gebieden met aardbevingsbelastingen worden in de ontwerpfase nauwkeurig berekend.

Definitie: de *vermoeiingssterkte* van een materiaal of constructie bij belastingwisselingen is altijd lager dan de materiaalsterkte die wordt vastgesteld bij (standaard) kortdurende belastingsproeven.

Vermoeiingssterkte

1.4.4 Thermische vormveranderingen

Bepalend voor de mate waarin een materiaal bij temperatuurverandering zal uitzetten of krimpen is de *lineaire uitzettingscoëfficiënt*. Hieronder verstaat men de lengteverandering van een materiaal per meter en per Kelvin. Vaak gebruikt men de praktische omschrijvingen ‰ of mm/m.

Lineaire uitzettingscoëfficiënt

Deze uitzetting is voor sommige materialen, zoals voor de meeste gebakken producten, te verwaarlozen. Bij andere materialen, zoals metalen en kunststoffen, dienen we met deze eigenschap in praktijkomstandigheden terdege rekening te houden. Enkele voorbeelden zijn:

- beton: 0,012‰ (of $12^{-6}/K$)
- kalkzandsteen: 0,010‰
- staal: 0,012‰
- aluminium: 0,024‰
- PVC: 0,08‰
- baksteen: 0,006‰

Opmerkelijk grote verschillen zijn hier dus aan de orde. Het tegen elkaar verwerken van verschillende materialen in een constructie kan daarom problemen opleveren. Sommige materialen zijn ook zeer richtinggevoelig (anisotroop, zie paragraaf 1.4.6), reden waarom voor dergelijke materialen geen eenduidige getallen zijn te geven (een duidelijk voorbeeld is hout).

FIGUUR 1.6 Droogscheur in beton (oppervlaktесheur in voetpad, met stortnaad)



1.4.5 Vormveranderingen door vocht

Krimpen is een gevolg van uitdrogen. Bij vocht opneming zullen de materialen daarentegen *zwellen*. Materialen als hout (het zogenoemde werken van hout) en beton vertonen deze eigenschap (figuur 1.6).

Kalkzandsteen vertoont bij onoordeelkundig gebruik door uitdroging (te nat verwerkt) een vrij grote krimp. Baksteen echter is voor dergelijke invloeden vrij ongevoelig (baksteen: 0,03‰; graniet: 0,1‰; cementmortel: 0,3‰; beton: 0,3‰; gips: nihil; kalkzandsteen: 0,6‰).

Hieruit blijken enorme verschillen. Combinaties van genoemde materialen kunnen daar-

om tot problemen leiden, zoals aangegeven voor de thermische uitzetting (zie paragraaf 1.4.4). Het is daarom noodzakelijk lange doorgaande muren van kalkzandsteen en betonsteen te voorzien van een dilatatievoeg om de ca. 6 m, en bij baksteenwanden om de ca. 18 m.

Aan vocht gerelateerd is het gedrag van poreuze materialen met betrekking tot vorst. De uitzetting van water naar ijs (9%) veroorzaakt vaak mechanische destructie. Deze is wel afhankelijk van de poriënstructuur (vorm en grootte van de poriën). De vorstbestandheid van steenachtige producten is een belangrijk praktijkgegeven.

1.4.6 Homogeniteit en isotropie

Een materiaal is *homogeen* als het op welke plaats in welke doorsnede dan ook een gelijkmatige samenstelling vertoont. Zo'n materiaal is bijvoorbeeld staal. Beton kan op macroniveau door goede verdeling van de samenstelling homogeen zijn.

Heterogeen

Is een beton echter sterk ontmengd (bijvoorbeeld met grindnesten), dan is het zeker niet homogeen. In werkelijkheid is beton *heterogeen*, dat wil zeggen ongelijksoortig van samenstelling, omdat het is opgebouwd uit grind, zand, verhard cement en water.

Isotroop

Een materiaal is *isotroop* als het op welke plaats in het materiaal dan ook in alle richtingen gelijke eigenschappen bezit. Staal is vrijwel isotroop, hout evenwel niet. Dit laatste materiaal is opgebouwd uit in een bepaalde richting duidelijk georiënteerd weefsel. In de lengterichting (de groeirichting) van een stuk hout heeft bijvoorbeeld de treksterkte een duidelijk andere waarde dan loodrecht op die richting. We noemen hout daarom *anisotroop*. Ook bladzink is anisotroop (dunne, in één richting gewalste plaat). Zelfs beton is anisotroop, omdat het een stortrichting kent (zie figuur 1.7).

Anisotroop

FIGUUR 1.7 Beton, homogeen en anisotroop



1.4.7 De volumieke massa

Er zijn *massieve* en *poreuze* materialen. Voor beide kunnen we een verband aangeven tussen hun massa en hun volume. Dit verband is de *volumieke massa*, ook wel *dichtheid* genoemd. Onder de *volumieke massa* verstaat men de massa in kilogram van een materiaal per kubieke meter, inclusief poriëngelichte lucht. Bij de poreuze materialen zal het poriëngelichte uiter-aard van invloed zijn op de grootte van de spreiding in de volumieke massa. Bij hout wordt zelfs een voorgeschreven vochtgehalte gehanteerd (zie paragraaf 2.5.1) bij de onderlinge vergelijking van houtsoorten.

Volumieke massa
Dichtheid

1

De volumieke massa van bijvoorbeeld ongewapend grindbeton is 2.300 tot 2.400 kg/m³ (afhankelijk van de samenstelling), van lichtbeton (afhankelijk van het gebruikte toeslagmateriaal) 1.700 à 2.000 kg/m³. De volumieke massa van ongelegeerd staal is constant, en wel 7.850 kg/m³. In dit geval is in feite sprake van de *soortelijke massa*, de grondstof per volume-eenheid zonder poriën.

Op de website bij dit boek, www.materiaalkunde.noordhoff.nl, is in Aanvulling 1.6 de definitie van gewicht gegeven.



1.4.8 Warmtegeleiding

Bij de *warmtegeleiding* gaat het om de hoeveelheid warmte die door een bepaald materiaal kan worden doorgelaten. Hierbij zijn het soort materiaal, de dikte en het temperatuurverschil aan beide zijden van het materiaal van belang, terwijl de tijd eveneens een rol speelt. Onder de λ -waarde van een materiaal verstaat men de warmtegeleiding in watt per meter en per graad Kelvin. Staal heeft een λ -waarde van ca. 50 W/(m · K).

Een hoge geleiding betekent een slechte isolatie, een lage geleiding een goede isolatie. Stilstaande, droge lucht is een goed 'isolatiemateriaal', net geworden poreuze materialen verliezen duidelijk aan isolatiewaarde. De warmte-isolatie van water is 25× lager dan die van droge lucht. De isolatiewaarde van dubbel glas is gebaseerd op de lage geleiding van droge stilstaande lucht of bepaalde gassen tussen de glasbladen.

Voor constructies wordt gerekend met de zogenoemde *R*-waarde. Deze weerstandswaarde is de verhouding tussen de dikte *d* van de constructie en de warmtegeleidingscoëfficiënt λ :

R-waarde

$$R = d/\lambda \text{ [m}^2 \cdot \text{K/W]}$$

Op deze wijze is bij een gewenste *R* en de gegeven materiaalconstante λ de benodigde dikte van het materiaal te bepalen. Warmte-isolatie is in hoge mate afhankelijk van de volumieke massa, het vochtgehalte en de aard en de structuur van het materiaal. De temperatuur speelt eveneens een rol. Enkele vergelijkingen met betrekking tot warmtegeleiding zijn:

- grindbeton: ca. 3 × lichtbeton (met bijvoorbeeld puimsteenkorrels of ge-expandeerde kleikorrels)
- grindbeton: ca. 3 × buitenmuursteen (baksteen)
- staal: ca. 22 × grindbeton
- aluminium: ca. 4 × staal
- aluminium: ca. 250 × glas

Op de website bij dit boek, www.materiaalkunde.noordhoff.nl, is in Aanvulling 1.7 de definitie van watt gegeven.



1.4.9 Het poriëngehalte en eigenschappen

Het *poriëngehalte* is van grote invloed op verschillende eigenschappen binnen een materiaalgroep. Achtereenvolgens kunnen worden genoemd:

- *Sterkte*: hoe meer poriën, hoe lager de sterkte.
- *Warmte-isolatie*: hoe meer poriën, des te beter de isolatie. De poriën moeten dan wel met droge lucht gevuld zijn.
- *Waterdichtheid*: hoe minder poriën en ook hoe fijner de poriën, hoe waterdichter. Hierbij is van groot belang hoe de poriënstructuur is. Er wordt onderscheid gemaakt tussen een spons- en een schuimstructuur (al of niet doorgaande kanalen). In materialen met zeer fijne poriën kan water zeer diep worden opgezogen, in materialen met grove poriën minder diep, maar wel sneller.
- *Weerstand tegen aantasting*: hoe minder poriën, hoe minder kans op een bepaalde aantasting. De grootte (doorsnede) en vorm van de poriën zijn van belang voor de mate van binnendringen van gassen of vloeistoffen.
- *Vorstbestandheid*: ook hier zijn poriegrootte en -vorm van groot belang. Een rol speelt de zogenoemde verzadigingsgraad, waaruit de ruimte volgt die in het materiaal nodig is voor de volumevergroting van water naar ijs.
- *Volumieke massa*: hoe meer poriën, des te lichter (droge) materialen zijn.
- *Bufferwerking*: het poriënsysteem van bijvoorbeeld gips bepaalt in hoge mate de vochtregulatie in keukens en douchecellen in samenhang met ventilatie.
- *Wateropzuiging*: hoe fijner het poriënsysteem, des te meer water kan er in de loop der tijd worden opgezogen en des te langer wordt dat water vastgehouden.
- *Geluidsabsorptie*: het poriënsysteem in een materiaal kan duidelijk invloed uitoefenen op het geluiddempend vermogen van het oppervlak van het materiaal.

De invloed van vocht komt bij *poreuze materialen* opmerkelijk tot uiting. Wijziging van het vochtgehalte verandert de volumieke massa in bijzondere mate. Ook de eigenschappen zijn sterk afhankelijk van het vochtgehalte. De warmte-isolatie verlaagt bij het hoger worden van het vochtgehalte. De mechanische eigenschappen sterkte en stijfheid worden in hoge mate beïnvloed. Het vocht heeft een 'smerende' werking tussen de materiaal-moleculen.

Vergelijkende getalwaarden van de eigenschappen moeten bij poreuze materialen altijd worden aangegeven met een afgesproken hoogte van het vochtgehalte.

Verscheidene bouwmaterialen, zoals beton, gips, mortels, hout, bakstenen en grond, hebben een poreus karakter. Veel eigenschappen hangen in sterke mate af van hun poriënstructuur, terwijl de poriënstructuur weer afhangt van de grondstoffen en van het fabricageproces van de producten. In tabel 1.8 wordt de relatie tussen technologische factoren, poriënstructuur en materiaaleigenschappen nader aangegeven.

TABEL 1.8 De grondbeginselen van materiaaleigenschappen

Technologische (productie)factoren	Poriënstructuur	Materiaaleigenschappen
<ul style="list-style-type: none"> • korrelgradering grondstoffen • vochtgehalte grondstoffen • luchtbelvormende en andere hulpstoffen • verdichtingsgraad • temperatuur bij vervaardiging • (chemische) samenstelling grondstoffen • vervaardigingsmethode (persen, extruderen) 	<ul style="list-style-type: none"> • totaal poriënvolume (porositeit) • doorsnede poriën • gesloten poriën • aandeel gesloten poriën • aandeel doodlopende poriën • vorm poriën • poriegrootteverdeling • poriënoppervlak 	<ul style="list-style-type: none"> • wateropneming • waterdoorlating • wateropzuiging • waterdampcondensatie • waterdampdoorlating • zwellings- en krimp • vervormingsgedrag • sterkte • warmte-isolatie • geluidsabsorptie • volumieke massa • weerstand agressieve omstandigheden

1.4.10 Gedrag bij hoge temperatuur (brand)

Een materiaal is *brandbaar* indien het in aanwezigheid van voldoende zuurstof bij een voor dat materiaal geëigende temperatuur uit zichzelf gaat branden (figuur 1.9). Er ontstaan namelijk bij die temperatuur uit zichzelf ontbrandende gassen. Hout en bepaalde kunststoffen vertonen deze eigenschap. Onbrandbare materialen dragen niet bij tot de voortgang van een brand.

Onder *brandwerendheid* wordt iets anders verstaan dan onder brandbaarheid. De *brandwerendheid* van een constructie (of materiaal) is de *tijd* gedurende welke ze (het) in stand blijft bij een bepaalde verhitting. Het gaat dus in feite om de tijd waarin doorslag van brand naar aangrenzende ruimten wordt voorkomen.

De brandwerendheid is van groot belang voor de sterkte-eigenschappen bij hoge temperatuur. Zware doorsneden van hout hebben een vrij lange levensduur bij brand. De houtskoollaag werkt bovendien vertragend. Staal heeft daarentegen bij ca. 500 °C (normale brandtemperatuur ca. 1.000 °C) nog slechts van de maximale kwaliteitssterkte van een soort, terwijl de vloeigrens daarvoor al is bereikt. Hiermee wil evenwel niets gezegd zijn ten nadele van de goede eigenschappen van staal als constructiemateriaal; er wordt wel rekening mee gehouden.

Enkele andere begrippen met betrekking tot hoge temperaturen zijn:

- *Ontvlambaarheid* – het al dan niet zelfstandig doorbranden na aanraking met een warmtebron. Men onderscheidt gemakkelijk en niet-gemakkelijk ontvlambare materialen.
- *Vlamoverslagintensiteit* – hiermee wordt de bijdrage beoordeeld die een materiaal levert tot vlamoverslag ten gevolge van warmteophoging aan het oppervlak van het brandbare materiaal. Er is dan sprake van uitbreiding van brand via aan de lucht afgedragen brandbare gassen. De gehele ruimte staat plotseling in brand. Materialen kunnen worden ingedeeld in klassen van zwakke tot sterke bijdrage en tussenliggende waarden. De vlamoverslagintensiteit is een maatstaf voor de ontvlambaarheid.
- *Brandoverslag door straling* – de nadruk ligt op veilige afstanden tussen gevelopeningen van gebouwen.

Brandwerendheid

Ontvlambaarheid

Vlamoverslagintensiteit

Brandoverslag

Vlamuitbreiding

- *Vlamuitbreiding* – de snelheid waarmee vlammen zich over materialen voortplanten. Ook hier vindt indeling in klassen plaats.

Brandvoortplanting

- *Bijdrage tot brandvoortplanting* – het zich uitbreiden van een brand in de ruimte. Men onderscheidt klassen van zeer zwakke bijdrage tot sterke bijdrage. Van groot belang is dat een materiaal na de brand niet direct geheel in brand staat of grote hoeveelheden rook ontwikkelt. De mate van rookontwikkeling wordt aangegeven met een zogenaamd rookgetal *R* (van zwakke tot zeer sterke rookontwikkeling).

Zelfdovendheid

- *Zelfdovendheid* – het materiaal kan wel branden, maar onderhoudt de brand niet. De omstandigheden bij uitslaande brand zijn soms in duidelijke tegenstelling met deze aanname. Beter is ook hier te spreken van bijdrage tot brandvoortplanting.

Bouwbesluit

Op het gebied van *brandveiligheid* wordt in de *normalisatie* uitgebreid aandacht besteed, ook in nauwe relatie met het *Bouwbesluit*. Naar de volgende normen wordt dan verwezen:

- brandbeveiliging van gebouwen en woningen
- brandwerendheid van bouwmaterialen en bouwdelen

Brandaspecten zijn als zeer belangrijk onderwerp in het *Bouwbesluit 2012* omschreven. Een bijzonder gegeven is de ‘*compartmentering*’ van gebouwen, waardoor beheersbaarheid van branden mogelijk is.

Brandveiligheid in het *Bouwbesluit* richt zich op de Euroklassen volgens NEN-eisen. Bouwmaterialen en bouwproducten voldoen daarbij aan de Richtlijn *Bouwproducten*.

De brandklasse-indeling geschiedt naar de mate waarin materialen aan een brand bijdragen. De indeling loopt van A1 (hoogste veiligheid, onbrandbaar) tot F (zeer gevaarlijke bijdrage, uiterst brandbaar).

De Euroklassenindeling maakt onderscheid tussen vloeren en niet-vloeren.

Brandveiligheid van bouwwerken wordt in de NEN-normalisatie uitgebreid behandeld.

FIGUUR 1.9 Het schrikbeeld van brand



1.4.11 Duurzaamheid

Een materiaal is *duurzaam* als aan alle denkbare belastingen goede weerstand kan worden geboden in een economisch nuttig tijdsbestek (de *langeduurgebruikswaarde*). Die belastingen kunnen zowel een intern als een extern karakter hebben, terwijl ze bovendien van chemische, fysische, biologische en mechanische aard kunnen zijn.

We kunnen positieve invloed op de levensduur van materialen en constructies uitoefenen als we alle belastingen onderkennen en kunnen verklaren. Hier komen de grondslagen voor *duurzaam bouwen* (Dubo) duidelijk tot uiting. Behoud en onderhoud van constructies gaan daarbij hand in hand.

Voorbeelden van *chemische* belasting (waarbij ook destructieve reacties kunnen optreden) zijn:

- intern: verontreiniging van aanmaakwater in beton
- extern: zure regen en zuur grondwater op beton, zwamaantasting op hout, corrosie van staal

Fysische belastingen kunnen zijn:

- intern: spanningen ten gevolge van temperatuurwisselingen en wisselingen in vochtgehalte (krimpen/zwellen)
- extern: vorst, brand, zonnewarmte, afkoeling door regen

Biologische belastingen vinden voornamelijk plaats op organische materialen. Voorbeelden zijn de dierlijke (insecten) en plantaardige (zwammen) aantasting van hout. Bacteriën zijn in staat staal onder bepaalde afgesloten omstandigheden te doen corroderen (buissystemen).

Mechanische belastingen kunnen zijn:

- intern: eigengewicht, nuttige belasting
- extern: zettingen van de ondergrond, aardbeving, wind

Bij materialen kunnen duurzaamheidsklassen worden aangegeven, bijvoorbeeld de vijf duurzaamheidsklassen van hout (zie paragraaf 2.9.6).

Het is zaak dat steeds *maatregelen* worden genomen om de *duurzaamheid* van bouwwerken te garanderen voor de beoogde gebruikstijd. Daarbij zijn van belang: ontwerp, materiaalkeuze, uitvoering en beheer.

De technische en de functionele *levensduur van bouwwerken* moeten zo lang mogelijk zijn. Technisch is dat mogelijk door een verantwoorde *materiaalkeuze*, functioneel door de bouwwerken zo te ontwerpen dat de taak die ze moeten vervullen de beoogde tijd haalt en dat ze zonder grote ingrepen later aan nieuwe functie-eisen kunnen voldoen. Dan behoort *demontabel bouwen* tot de mogelijkheden.

Duurzaamheid (Engels: *sustainability*) is een zeer breed aandachtsgebied. In de NEN-normen wordt duurzaamheid van alle kanten belicht. Bouwconstructies en -materialen zijn onverbrekelijk aan elkaar gekoppeld, en milieu en samenleving spelen een grote rol.

Langeduur-
gebruikswaarde

Chemische
belasting

Fysische
belasting

Biologische
belasting

Mechanische
belasting

Duurzaamheid

1.5 Milieueffecten

Steeds meer worden we geconfronteerd met de vraag of bepaalde materialen milieubelastend zijn of zelfs direct de gezondheid nadelig kunnen beïnvloeden.

1.5.1 Inleiding

Het is zaak ontwikkelingen ten aanzien van *milieueffecten* nauwgezet te volgen, zeker ook op het gebied van de recycletechnieken. Goede berichtgeving (op onderzoek gefundeerd) blijft noodzaak. Vaak zijn het nieuwere materialen (bepaalde kunststoffen) of producten die van andere industriële processen afkomstig zijn (bijvoorbeeld gipssoorten) of bepaalde afvalstoffen (bijvoorbeeld vliegas) die de mens, al of niet gegrond, in beroering brengen. Vaak biedt wetenschappelijk onderzoek uitkomst. *Vliegas* kan als vulstof worden verwerkt in cementbeton, in een vuurvast materiaal voor brandwerende coating van staalconstructies en in isolerende bouwpanelen. Een *gipssoort* die vanuit de *kunstmestindustrie* kan worden gewonnen, is enigszins radioactief en daardoor voor het binnenklimaat onbruikbaar. Buitenshuis kan het gebruikt worden, echter zonder watercontact! *Rookgasontzavelingsgips* (het zogenoemde Rogips) is onschuldig.

Asbest

Duidelijk ligt het met *asbest*, dat van een bepaalde kristalopbouw kankerwerkkend is. Nog veel producten *in de bestaande bouw* zijn asbesthoudend, zoals asbestcementplaten en -buizen en bitumen, lijm, coatings en isolatiesystemen. Hiervoor zijn wettelijke *verwijderingsrichtlijnen* uitgevaardigd (zie ook pagina 399).

Houtverduurzaming

Houtverduurzamingsmiddelen zijn niet voor niets onderworpen aan toelatingsregels van de overheid. Over de milieu- en gezondheidsaspecten van verfsoorten (oplosmiddelen) is het laatste woord ook nog niet gezegd. Hergebruik of gewoon afval van kunststoffen (bijvoorbeeld PVC) kunnen problemen geven. Veel producten zijn verboden verklaard (teer, bepaalde verfstoffen en arseenhoudende producten).

We kunnen er echter van uitgaan dat overheid en fabrikant in nauw overleg blijvend tot duidelijke regelgeving zullen en willen komen.

Vliegas

Het al genoemde product *vliegas* (poederkoolvliegas) is het bijproduct van de met steenkool gestookte elektriciteitscentrales. Daarvan komen enorme hoeveelheden vrij. Door de specifieke eigenschappen van vliegas (de zogenoemde puzzolane werking, dat wil zeggen met kalk in een waterige omgeving een verhardingsreactie aangaan) is dit materiaal goed te gebruiken als vulstof in cement (portlandvliegasement), beton, schuimbeton, kalkzandsteen en asfalt voor de wegenbouw. Naar de mogelijkheden van vliegas is diepgaand wetenschappelijk onderzoek verricht.

Bij de bespreking van de verschillende materiaalgroepen wordt specifiek op het milieu teruggekomen.

De Stichting Milieukeur ontwikkelt systematisch onafhankelijke milieukeurmerken voor producten en productgroepen voor producenten.

Normen

Een belangrijke norm is NEN 8006, waarin opgenomen de milieugegevens van bouwmaterialen en bouwproducten voor opname in een milieuverklaring.

1.5.2 Optimaal materiaalgebruik

Intensief onderzoek is en wordt verricht naar de *milieubelasting* door bouwmaterialen op basis van bepaalde milieu- en energieaspecten; aspecten die optreden gedurende de gehele levensduur van de materialen, van

grondstofwinning tot en met mogelijke en gewenste recycling. Men beoogt hiermee te komen tot *milieubewust bouwen* en de ontwikkeling van milieuvriendelijke (woon)gebouwen.

Bij *bouwmaterialen* dient aandacht te worden besteed aan:

- het in het algemeen zuinig gebruik van bouwmaterialen (dit verlaagt het percentage reststoffen)
- het zo min mogelijk gebruikmaken van grondstoffen die schaars zijn (bijvoorbeeld tropisch hardhout en grind)
- het terughoudend gebruik van materialen die milieu- en natuurbelastend zijn (chemische bouw- en hulpstoffen)
- materiaaltoepassingen die de mogelijkheid bieden tot hergebruik (bijvoorbeeld metalen)

Verder moet aandacht besteed worden aan de ontwikkeling van nieuwe bouwmethoden waardoor:

- *slopen* minimaal kan zijn (belang van demontabel bouwen)
- hergebruik van sloopafval mogelijk is (*selectief slopen*); zie figuur 1.10
- het percentage *bouwafval* laag is (prefabricage, goede maatvoering, zo veel mogelijk gebruikmaken van handelsafmetingen)
- het *onderhoudsafval* minimaal kan zijn (duurzame materialen toepassen, een onderhoudsplanning en indien mogelijk onderhoudscontracten afsluiten met de uitvoerende aannemer)
- bij latere *functiewijziging* weinig afval ontstaat (bijvoorbeeld: kantoorgebouw wordt garage; een doelbewuste *herbestemming* van de *gebruiksfunctie*, waarbij de constructie als geheel behouden blijft)
- bij *renovatie* (duurzaam herstellen) vrijwel geen verliezen optreden en de toepassing van bestaande materialen en bouwdelen vooropstaat

Tot slot wordt er aandacht besteed aan:

- het gebruik van *schoon afval* (geselecteerd op de bouwplaats door selectief slopen), zoals balkhout en puingranulaat voor beton
- het toepassen van *duurzame materialen* (dit verlengt de *gebruiksduur* van bouwwerken)

Bouwmethoden

FIGUUR 1.10 Sloopafval via implosie



Zoals de zaken er nu voorstaan, komen veel materialen voor nader onderzoek en vergelijking in aanmerking. *Een taak voor de pure materiaalkunde.* Het is de bedoeling van gedegen onderzoek geen 'schuldigen' in het bouwmaterialenpakket aan te wijzen, zodat bouwen vertraagd en zelfs onmogelijk wordt. Voor het realiseren van bouwwerken zijn nu eenmaal bouwmaterialen nodig! Met optimaal materiaalgebruik moet *duurzaam bouwen* mogelijk zijn.

1.5.3 Bouwmaterialen, mens en milieu

Veel grondstoffen en vooral ook materiaalsamenstellingen worden voortdurend beoordeeld op nadelige invloeden. Bepaalde materialen staan onder grote druk en zijn of worden uit de handel of uit productie genomen. Voor bepaalde bouwdoeleinden zijn alternatieven nodig die het liefst even goedkoop moeten zijn als het oorspronkelijke product (bijvoorbeeld de vervanging van golfplaten van asbestcement).

In *samengestelde producten* worden bepaalde stoffen sterk gereduceerd. De toevoegingen *vrij* en *arm* worden vaak gebruikt. *Vrij* betekent dat een bepaalde stof niet is verwerkt; bij *'arm'* is nog steeds *een zekere hoeveelheid* van een bepaalde stof toegepast, hoe weinig dat dan ook mag zijn! Bij materiaaltoelevering moet een exacte aanduiding van de samenstelling aanwezig zijn, zodat twijfel uitgesloten wordt.

CFK's

Een *belangrijke milieuvervuiling* wordt veroorzaakt door CFK's (chloor-fluorkoolstoffen). Deze chemische producten zijn de voor de ozonlaag bedreigende koolstofverbindingen (dus niet koolwaterstoffen, zoals vaak gezegd). Ook in bouwmaterialen komen deze stoffen voor, onder andere in oudere polyurethaanschuimen. Vanaf 1993 is de controle op deze ozonlaag vernietigende koolstofverbindingen indringend verhoogd. Isolatieplaten en -panelen, vloer- en spouwmuurisolatie die met CFK zijn geproduceerd, mogen van begin 1993 niet meer worden gebruikt. Sinds 1 juli 1993 zijn alle CFK-houdende isolatiematerialen verboden.

Er is ook veel bekend van de zogenoemde *binnenruimte-invoed* van bouwmaterialen op de mens. Een aantal materialen wordt geweerd of staat onder strenge controle, zoals bepaalde synthetische gipsoorten, de beruchte asbestvezels en oplosmiddelen in verf en lijm. Tegelijkertijd hebben positieve ontwikkelingen geleid tot zeer bruikbare producten, zoals de isolatiemogelijkheden met cellulose en vlas.

Nederlands Instituut voor Bouwbiologie en Ecologie (NIBE)

Het Nederlands Instituut voor Bouwbiologie en Ecologie (NIBE), in Bussum (gevestigd in de Watertoren), heeft grondslagen ontwikkeld voor milieubewust en gezond bouwen, werken en wonen.

Belangrijke grondslagen zijn:

- De NIBE *milieuclassificatie* bouwmaterialen. Hierin hebben bouwmaterialen een keuzewaardering van 1 (voorkeur) tot 7 (onaanvaardbaar). In de beoordeling wordt de gehele levenscyclus van een materiaal meegenomen: grondstofwinning, productie (inclusief halffabricaten), constructie, gebruik, onderhoud, sloop, afvalverwerking en hergebruik.
- De NIBE *milieu-index*, een getal voor de duurzaamheid van een gebouw. Als basis fungeren bouwmaterialen, energie, waterhuishouding, mobiliteit en bereikbaarheid. De index geeft de druk op het milieu weer. Hoe lager de index (referentieniveau: de bouwmethoden van 1990), des te meer aan de wensen van *duurzaam bouwen* wordt voldaan.

1.5.4 Milieubeleid overheid en duurzaam bouwen

Het Nationaal Milieubeleidsplan

In het Nationaal Milieubeleidsplan (NMP) wordt de tactiek nader omschreven voor het strategische milieubeleid van de overheid. Voor het milieu is het uitgangspunt: streven naar een *duurzame ontwikkeling*. Deze ontwikkeling voorziet voor de mens in de behoeften van de huidige generatie en tegelijkertijd in waarborging van de behoeften van toekomstige generaties. Bij een goed milieubeheer (hoog niveau van milieubescherming) moeten ongewenste effecten van menselijk handelen worden voorkomen of tegengegaan. De steeds groter wordende milieuproblemen zijn aanleiding geweest tot het opstellen van dit beleidsplan. Problemen die vroeger slechts van lokaal belang in een land leken, zijn wereldproblemen gebleken, en omgekeerd.

Nationaal
Milieubeleids-
plan (NMP)

1

In het NMP is de bouwsector een doelgroep waarvan grote inspanningen worden verlangd. Van de bouw uit moeten continu activiteiten plaatsvinden om aan de doelstellingen te voldoen: opleidingen, gerichte informatie aan werknemers en consumenten, maar ook milieuvriendelijke producten voor de steeds intensievere 'doe-het-zelfsector'.

Het NMP eiste van de bouw dat bepaalde taakstellingen al vóór 2000 moesten zijn gehaald. In relatie tot *bouwmaterialen* kwam dit op het volgende neer:

- een verdubbeling van het hergebruik van bouw- en sloopafval
- in het gehele bouwproces duidelijke aandacht voor milieueffecten van bouwmethoden en bouwmaterialen
- vervanging van (bouw)materialen waarvan winning, gebruik en/of afvalverwerking tot ernstige milieugevolgen leiden
- besparing (extra) van het energiegebruik van 25% in de verwarming van gebouwen (normstelling met betrekking tot isolatie van gebouwen is hiermee verscherpt)
- bevorderen van de bouwkwaliteiten (grenswaarden zijn gesteld aan risico's van het binnenmilieu)
- grote aandacht voor natuurlijke producten (grondstoffenproblematiek)
- beheerst gebruik van grondstoffen die uitgeput raken
- tropisch bos ontzien: het NMP 4 eiste dat de bouw al in 2005 minstens 25% duurzaam geproduceerd hout zou toepassen

Gebaseerd op het voorgaande werd het project *Duurzaam Bouwen* tot ontwikkeling gebracht. Een zogenoemde *ketenbeheer* (kringloop van grondstoffen voor de bouw) staat daarbij centraal.

Project Duurzaam
Bouwen

Bij *duurzaam bouwen* (Beleidsnota van het Nationaal Milieubeleidsplan) vormen ontwerpen, bouwen (uitvoeringsproces), beheren en het onderkennen van milieuproblemen een onverbreekelijke interactie. Het beleid is wat de *grondstoffenproblematiek* voor de bouw betreft gericht op:

- vermindering van het gebruik van eindige grondstoffen en aanmoediging van het gebruik van vernieuwbare en secundaire grondstoffen
- beperking van afvalstromen in de bouw en stimulering van hergebruik van bouw- en sloopafval
- vermindering van belastende milieuemissies bij de productie van bouwmaterialen en gebouwen

De *milieubelasting* wordt vastgelegd door ontwerp en *materiaalkeuze*, en loopt van producten tot sloop of hergebruik.

Duidelijk is dus dat *duurzaam bouwen* (Dubo) algemeen wordt gerelateerd aan energiezuinige en milieuvriendelijke aspecten. *Duurzaam bouwen* wordt vooral toegepast in de *woningbouw*. Architecten passen Dubo het meest toe, zo'n 80%, aannemers 70% en woningcorporaties 79%. Professionele opdrachtgevers en gemeenten zijn vaak de initiatiefnemers. Het NPDB (Nationaal Pakket Duurzaam Bouwen) wordt gebruikt als naslagwerk en als leidraad. Voor de gehele bouwsector (bouwkunde en civiele techniek) is duidelijk dat er weloverwogen keuzes moeten worden gemaakt bij zowel bouwprojecten als bouwprocessen. Dat geldt evenzeer voor functiewijziging als voor renovatie van een bouwwerk.

**Industrieel,
Flexibel en
Demontabel
bouwen**

In de strategie van *duurzaam bouwen* past de ontwikkeling van Industrieel, Flexibel en Demontabel bouwen (IFD): een combinatie van verhoging van productkwaliteit (I), wisselende gebruikerswensen (F) en vermindering van milieubelasting (D). Het samenspel versterkt de ontwerpfase. De gebruiksfase moet de bedoeling van IFD bewijzen. Zowel in de woningbouw en de utiliteitsbouw als in de grond-, weg- en waterbouw zijn de mogelijkheden voor IFD ruimschoots voorhanden.

De doelstellingen van *duurzaam bouwen* zijn ook van toepassing verklaard op de sector grond-, weg- en waterbouwkunde. Van belang is verder het besluit van de overheid dat het storten van herbruikbaar bouw- en sloopafval verbiedt.

Duurzaam bouwen maakt onderdeel uit van het Bouwbesluit. Daarbij wordt onderscheid gemaakt tussen materiaalgebonden en niet-materiaalgebonden maatregelen. Voor materialen zijn minimumeisen en LCA (levensduurcyclusanalyses) van belang.

Na het uitkomen van het NMP constateerde men dat dit milieuplan aangescherpt moest worden om de doelstellingen van dit plan, gericht op een *duurzame ontwikkeling*, zo snel mogelijk te realiseren: de geboorte van NMP⁺. De milieuproblemen mogen namelijk niet worden afgewenteld op komende generaties. Dit is te realiseren met aanpassing van tegenwoordige consumptie- en productieomstandigheden. De aanscherping van het NMP met de regels van het NMP⁺ betekende:

- minder uitstoot kooldioxide
- verzuring intensiever aanpakken
- bescherming en ontwikkeling van de natuur nog meer centraal stellen
- totale afvalketen blijvend beheersen: productiebeleid aandachtig volgen
- sanering grond en water
- energiebesparing

Het latere NMP 3 stond aanzienlijke *reductie van belastende emissies* voor.

Het is duidelijk dat ook bouwmaterialen steeds op de voorgrond treden. Het was niet de bedoeling met het NMP⁺ de strategie van het NMP aan te tasten; wel werden versnelling van maatregelen en aanvullende maatregelen beoogd. De duurzame ontwikkelingen moesten eerder in zicht komen. NMP en NMP⁺ vormen samen *het milieubeleid*.

Bodembelasting (op basis van samenstelling en uitloging van (bouw)materialen) en stralingsbelasting (onder andere gasvormig radon) zijn te verwerken in kengetallen (milieumaten) en in de bedoeling van NMP⁺ geïntegreerd.

De *milieumaten* zijn bedoeld om milieueffecten van (bouw)producten duidelijk te maken.

Milieumaten

De Europese Commissie publiceert de *regelgeving Milieu Prestatie Normen voor Gebouwen*. De LCA-methodiek (levensduurcyclusanalyse) voor bouwmaterialen is in het Bouwbesluit opgenomen. Voor bouwdelen, -producten en -materialen en ook voor afvalstromen zijn milieugegevens nodig om milieuprestaties van woningen aan te geven. Van een bouwproduct moeten milieuprofiel en milieumaten worden bepaald. Het *milieuprofiel* omvat onder andere broeikas effect en verzuring. Men onderkent in dit verband het zogenoemde *materiaalgebonden milieuprofiel van gebouwen* (mmg).

Levensduurcyclusanalyse

De LCA zet de eigenschappen van het product af tegen de belasting van het milieu. Daarbij zijn van belang de verwerkingsfase, de winning, de productie, de bewerking, het transport en einde levensduur. Expliciet worden vijf milieumaten onderkend, te weten grondstoffen, energie, emissie, hinder en afval.

Het *Bouwstoffenbesluit* (verantwoord toepassen van primaire en secundaire bouwstoffen, algemeen beleid ter bescherming van bodem, oppervlaktewater en 'gelimiteerde' grondstoffen) is vanaf 1 juli 1999 volledig van kracht (toelaatbare bodembelasting door bouwstoffen). Er worden milieuregels gehecht aan het toepassen van steenachtige bouwmaterialen, zoals de natuurlijke materialen grond, zand, grind en klei, en de secundaire producten asfalt, baksteen en beton.

Bouwstoffenbesluit

AVI-bodemassen (afvalverbrandingsindustrie) en teerhoudend asfalt (te hoog PAK-gehalte) mogen uitsluitend nog geïsoleerd, gecontroleerd en beheerd worden aangebracht in fundering en ophoging. Lichtverontreinigde materialen mogen onder bepaalde omstandigheden worden verwerkt. Veld- en laboratoriumonderzoek heeft laten zien dat AVI-bodemassen geschikt is als ophogingsmateriaal voor wegen.

1.6 Materiaalkundige aspecten

De materiaalgrootheden vormen de karakteristieke fundering voor bouwkunde en civiele techniek.

1.6.1 Eigenschappen en materiaalgrootheden

De civiele techniek houdt zich voor een belangrijk deel bezig met mechanische grondslagen van materialen (en constructies); de bouwkunde heeft een flink aandachtsgebied in de afsluitende functies van bouwwerken. In beide bouwdisciplines zijn duidelijk overgangsgebieden aan te geven, en elk *duurzaamheidsaspect* geldt dan ook voor beide.

We zien dat terug als we de verschillende functies nader onder de loep nemen en daarbij *materiaalgrootheden* centraal stellen.

In de toegepaste mechanica en de bouwphysica wordt gerekend met *grootheden*, die zijn afgeleid uit de materiaaleigenschappen. Voorbeelden van deze eigenschappen en materiaalgrootheden, die bekend moeten zijn om te beoordelen of een bouwwerk aan zijn *functies* zal voldoen, zijn weergegeven in tabel 1.11.

TABEL 1.11 Functie, eigenschap, grootheid

Functie	Eigenschap	Uitgedrukt in de grootheden
• dragend vermogen	- sterkte	- druksterkte - treksterkte - schuifsterkte - buigsterkte
• vormstabiliteit	- stijfheid - kruip - krimp - zwellig	- E-modulus - kruipmodulus - uitdrogingskrimp - volumevergroting
• thermische isolatie	- thermische uitzetting - warmtegeleidingsvermogen	- uitzettingscoëfficiënt - warmtegeleidingscoëfficiënt en warmtedoorgangcoëfficiënt
• waterkerend vermogen	- permeabiliteit - wateropzuiging - waterdampdoorlating (diffusie)	- waterdoorlatendheidscoëfficiënt - capillariteit - waterdampdoorlatendheidscoëfficiënt

1.6.2 Grootheden en afhankelijkheid

Men zou geneigd zijn te denken dat de *materiaalkunde* kan volstaan met het geven van (eenduidige) waarden voor de *grootheden van materiaaleigenschappen*. Er zijn echter verschillende redenen aan te geven waarom de ontwerper of constructeur aan die waarden niet voldoende heeft.

Hier volgt daarvoor een aantal argumenten:

- *Grootheden* hangen vaak af van de *ontstaanswijze*, de wijze waarop een materiaal is vervaardigd en/of nabehandeld (staal, beton) of van nature gevormd (natuursteen, hout). Eigenschappen van materialen zijn dus duidelijk gerelateerd aan of gebaseerd op een voorgeschiedenis. Voorbeelden:
 - Staal krijgt door koudvervormen of warmtebehandelingen andere eigenschappen.
 - Betoneigenschappen zijn afhankelijk van wijze en tijdsduur van het mengen van de specie, van toegepaste hulpstoffen, van cementsoorten, van de verdichtingsprocessen, van de vervaardigingstemperatuur en van de zorgvuldigheid van de nabehandeling.

Conclusie:

De materiaalkunde heeft daarom de taak uit de technologie de relaties te zoeken tussen de manier van het maken en/of vindomstandigheden van het materiaal en de eigenschappen ervan. Een materiaal is niet altijd gelijksoortig (dus heterogeen) en dat moet in de gebruikte waarden tot uitdrukking komen.

- De *grootheden* zijn altijd afhankelijk van:
 - de omringende temperatuur
 - de spanning in het materiaalsysteem
 - het vochtgehalte van het materiaal

Ad 1 De omringende temperatuur

De temperatuur heeft een zeer grote invloed op de elasticiteitsmodulus van kunststoffen, een vrij grote op die van staal en een wat minder grote op die van steenachtige materialen. Binnen een temperatuurgebied van kamertemperatuur (18 °C) tot 50 °C kan een kunststof meer dan honderd keer minder stijf worden. Staal is bij 20 °C zevenmaal stijver dan beton, maar bij 600 °C (bij brand bijvoorbeeld) kan beton stijver zijn dan staal. Ook andere

eigenschappen zijn temperatuurafhankelijk, de warmte-isolatie van een geschuimde kunststof bijvoorbeeld.

Ad 2 *Spanning in het materiaalsysteem*

De E-modulus is vaak een functie van de spanning, dat wil zeggen dat de modulus geen constante is. Soms moet gerekend worden met de raaklijn aan de krommen van het spannings-ervormingsdiagram (zie ook σ , ϵ -diagram van staal, paragraaf 8.2.6).

Op de website bij dit boek, www.materiaalkunde.noordhoff.nl, wordt in Aanvulling 1.8 nader ingegaan op spanning in een materiaalsysteem.



Ad 3 *Vochtgehalte van het materiaal*

Het vochtgehalte van poreuze stoffen kan de eigenschappen aanzienlijk veranderen. De sterkte van vochtig beton is bijvoorbeeld 20 tot 35% lager dan van droog beton. Bij gips kan het verschil oplopen tot 50%.

Hoe vochtiger het beton, des te groter wordt de krimp bij uitdrogen (zie figuur 1.6). Vochtig beton laat (verontreinigde) lucht veel langzamer binnendringen dan droog beton.

Conclusie:

De materiaalkunde moet daarom formules aandragen waarmee de temperatuur-, spanning- en vochtafhankelijkheid van de materiaaleigenschappen berekend kunnen worden.

- De effecten van temperatuur, kracht en vochtgehalte op het materiaalgedrag zijn niet onafhankelijk van elkaar. Vochtig beton heeft een andere thermische uitzettingscoëfficiënt dan droog beton. Door vormveranderingen die met vocht gepaard gaan, treden spanningsverschillen op tussen kern en oppervlak van het materiaal. Op iedere plaats zijn temperatuur, vochtgehalte en spanning anders. Op iedere plaats is ook de sterkte anders door vocht- en temperatuurverschillen. Voor het nauwkeurig berekenen van spanningen mogen daarom geen 'materiaalconstanten' gebruikt worden.

Temperatuur
Kracht
Vocht

Conclusie:

De materiaalkunde heeft tot taak om de effecten op het materiaal bij gelijktijdige veranderingen van temperatuur, krachten of vochtgehalte te onderzoeken.

- Alle grootheden zijn tijdsafhankelijk. Sterkte en elasticiteitsmodulus van beton bijvoorbeeld nemen toe met de tijd. Blijvende vormverandering onder voortdurende gelijkblijvende belasting in de tijd is van grote betekenis (kruip). De kortduursterkte van een materiaal is vaak veel hoger dan de sterkte bij langeduurbelasting. Een baksteenmuur bijvoorbeeld bezwijkt onder kruipbelasting bij een sterkte waarde die ca. 60% bedraagt van de sterkte bij een kortdurende belasting. Een extra complicatie is dat sommige materialen (beton, mortels) in de tijd verder verharderen en daarmee sterker worden.

Tijdsafhankelijkheid

Conclusie:

De materiaalkunde mag daarom niet volstaan met alleen de sterkte op te geven die bij een kortduurbelasting is gevonden, maar moet tevens de

belastende factoren weergeven die voor de tijdsduur gelden waarin de constructie moet dienstdoen.

Dit geldt ook voor alle andere grootheden.

Dimensie

- De *grootheden* zijn *dimensieafhankelijk*. De grootheden die in veel tabellen worden weergegeven, gelden in het algemeen voor materialen waarvan de onderzochte proefstukken (veel) kleiner en ook anders van vorm zijn dan de constructies zelf. De breukrek van een korte stalen proefstaaf is bijvoorbeeld vele malen groter dan van hetzelfde staafmateriaal met de (grote) lengte in de constructie.

Bij onderzoek van betonkubussen die van hetzelfde beton zijn gemaakt en in hetzelfde milieu en gedurende dezelfde tijd verhard zijn, blijkt dat de gemiddelde sterkte van grote kubussen veel lager is dan van kleinere kubussen. Ook blijkt dat de sterkten van alle kubussen met eenzelfde afmeting niet even groot zijn. De spreiding in de sterktewaarden is echter bij de grote kubussen veel geringer.

Conclusie:

De materiaalkunde moet daarom op statistisch verantwoorde wijze rekening houden met heterogeniteit in het materiaal en met de spanningspatronen die bij onderzoek in grote en kleine proefstukken kunnen optreden.

Milieu

- De *grootheden* zullen met de tijd veranderen als gevolg van *invloeden van het milieu*. De eigenschappen van kunststoffen kunnen sterk veranderen als gevolg van langdurige inwerking van ultraviolet licht, hout kan door organismen aangetast worden, staal kan corroderen, geïsoleerde baksteen kan soms slecht bestand zijn tegen vorst en beton kan door zuren en bepaalde zouten worden aangetast. Zie de aantasting van metselwerk in figuur 1.12.

Met de eigenschappen zal ook de bruikbaarheid van de constructie in de tijd veranderen. Constructies moeten daarom niet berekend worden met gebruikmaking van de waarden van de materiaaleigenschappen die het materiaal in het nieuwe bouwwerk bezit, maar met de *verwachte minimumwaarden* die in de loop van de levensduur ervan worden bereikt.

Conclusie:

De materiaalkunde moet trachten om kwantitatief de achteruitgang van materialen in de loop van de tijd te voorspellen als functie van de gekozen verduurzamingsmethoden en onderhoudsregels.

Materiaalkeuze

- In onze tijd wordt de *materiaalkeuze* niet meer alleen bepaald door de technische en esthetische materiaaleigenschappen en de prijs die voor het materiaal moet worden betaald, maar zeker ook door de invloed die het gebruik van een materiaal heeft op de andere aandachtsgebieden in de maatschappij, zoals de gezondheidssector (straling, ontwikkeling van gassen) of de milieusector (consequenties van ontgronding, recycling enzovoort).

Conclusie:

De materiaalkunde moet trachten de voor- en nadelen van het gebruik van materialen tegen elkaar af te wegen en bovendien nagaan of het mogelijk is om afvalstoffen in de bouwmaterialen op een verantwoorde wijze te verwerken.

Resumé materiaalgrootheden

Bij eenvoudige constructies loont het zeker niet om alle *variëaties* die in *materiaaleigenschappen* kunnen voorkomen, nauwkeurig te kennen. Men kan volstaan met die constante waarden van de materiaalgrootheden waarvan de praktijk geleerd heeft dat ze tot verantwoorde constructies leiden en hebben geleid. De onzekerheden komen in dat geval tot uiting in een grotere veiligheidsfactor waarmee gerekend wordt.

Het toepassen van verschillende waarden voor de materiaaleigenschappen van één materiaal op verschillende plaatsen en tijden maakt dat de berekening veel moeilijker wordt. Computergestuurde rekenprogramma's laten daar waar nodig verfijningen toe, waardoor de 'onzekerheidsfactor' als onderdeel van de veiligheidsfactor wordt verlaagd.

De belangrijkste opgave van de materiaalkunde bestaat uit een kwantitatieve beschrijving van de opbouw van de materialen (de materiaalstructuur) en van de wetmatigheden die het verband aangeven tussen de structuur en de waarden van de eigenschappen waarvan we gebruik willen maken. Anderzijds moeten we weten hoe door samenstelling en fabricagemethode de structuur bepaald wordt. *We kunnen dus twee verbanden onderkennen:*

- 1 samenstelling en fabricagemethode → materiaalstructuur
- 2 materiaalstructuur → eigenschappen (de mechanische eigenschappen sterkte en vervorming, thermische isolatie, waterkering, duurzaamheid)

- 1 geldt per afzonderlijk materiaal, omdat dit verband voor elk materiaal anders is.
- 2 geldt in principe voor alle materialen met eenzelfde soort structuur.

Conclusie:

De materiaalstructuur is dus het centrale thema in de materiaalkunde, de relatie met de eigenschappen ligt voor de hand.

**Belangrijkste
opgave van de
materiaalkunde**

**Materiaal-
structuur**

FIGUUR 1.12 Tijd en milieu kunnen materiaalgrootheden nadelig beïnvloeden



Constructieve bouwmaterialen

1.6.3 De structuur van bouwmaterialen

Constructieve bouwmaterialen bestaan uit vaste stoffen. Echter, lang niet alle vaste stoffen zijn geschikt om te gebruiken als bouw materiaal.

Enkele voorwaarden zijn:

- Ze moeten goedkoop te verkrijgen en te bewerken zijn.
- Ze moeten een inwendige samenhang vertonen die overal zo groot is dat erop (en ook ermee) te rekenen valt. Grote samenhang betekent stijfheid, sterkte en dichtheid.
- Hun kwaliteiten mogen in de praktijk niet te snel afnemen (langeduurgebruikswaarde).
- Ze mogen geen al te grote vormveranderingen ondergaan.

Drie materiaal- groepen

We kunnen *drie materiaalgroepen* onderscheiden die hieraan min of meer voldoen:

- de metalen: staal, aluminium
- de steenachtige materialen: beton, natuursteen, baksteen, kalkzandsteen
- de organische groep: kunststoffen, hout, bitumineuze producten

De variaties in eigenschappen binnen de groepen zijn groot. Toch is het mogelijk een *ruwe karakterisering* te geven van hun belangrijkste kenmerken. Deze karakterisering (tabel 1.13) laat duidelijk zien dat de chemische verwantschap van de grondstoffen een grote invloed moet hebben op hun eigenschappen.

TABEL 1.13 Karakterisering van de kenmerken van drie materiaalgroepen

	Metalen	Steenachtige materialen	Hout en kunststoffen
• treksterkte	zeer hoog	laag tot zeer laag	hoog tot vrij hoog
• weerstand tegen druk	zeer hoog	hoog	matig
• rek bij breuk	hoog	laag	vaak hoog
• elasticiteitsmodulus	zeer hoog	hoog	laag
• gedrag bij brand	matig	goed	slecht
• thermische uitzettingscoëfficiënt	laag tot middelmatig	laag tot zeer laag	hoog tot zeer hoog
• volumieke massa	hoog	middel	laag
• elektrische geleiding	hoog	laag	laag
• warmtegeleiding	hoog	laag	laag

1.6.4 Het belang van vormingsprocessen

In een materiaal met voldoende mechanische eigenschappen (stijfheid, sterkte) voor constructieve doeleinden moet de nodige samenhang aanwezig zijn (doorlopend systeem van atomen of moleculen op zo kort mogelijke afstand van elkaar). Dit kan worden verkregen door:

- afkoeling vanuit een gesmolten toestand: fabricage van metalen en stollen van natuursteen, waarbij kristalvorming optreedt met onderlinge zeer grote aantrekkingskrachten
- vorming uit oplossing: kristallisatie vanuit een oplossing bij de verharding van cement of gips, en ook bij het ontstaan van natuurlijke kalksteensoorten
- vorming uit enkelvoudige verbindingen: fabricage van kunststoffen en het ontstaan van het natuurproduct hout

1.7 Aspecten materiaalkeuze

De materiaalkeuze is een van de moeilijkste opgaven in de bouwwereld. Geschiktheid van materialen begint op de tekentafel en moet waargemaakt worden met kennis van de eigenschappen en onderbouwing van *levensduurvoorspelling*.

De *gebruikswaarde* is gebaseerd op gefundeerde *materiaalkeuzes*. Hierbij spelen de volgende aspecten een belangrijke rol:

- Een bepaalde *vormgeving* is alleen bereikbaar met geschikte materialen (beton, baksteen, staal, hout, kunststof).
- De materiaalkeuze wordt echter ook door *andere eisen* bepaald: de mechanische eigenschappen (sterkte en stijfheid), thermische isolatie, vochtwering, lichtaspecten, geluidwering, brandveiligheid, kleur, windkering.
- De materiaalkeuze wordt nader bepaald door *plaatselijke omstandigheden en economische factoren*: verkrijgbaarheid materialen (waar ter wereld), dichtheid van de bebouwing, aardbevingsgevaar, overstromingsgevaar.
- *De grote diversiteit van de eigenschappen*: het functieaspect (welke functies en hoeveel).
- De mogelijkheid *materialen te combineren* waardoor de gebruikswaarde wordt vergroot (grenzen verleggen): beton-staal, glasvezelversterkt cement en polyester en vezelversterkt gips, sandwichproducten, het lamineren van hout.
- *De levensduur van materialen* moet gelijk zijn aan de gebruiksduur van de constructie. Duurzaam bouwen.
- *Het kostenplaatje van het materiaalpakket* moet zo laag mogelijk zijn, met behoud van kwaliteitszorg.
- *De materiaalkeuze afstemmen* op: mogelijkheden in het ontwerp, de technologische mogelijkheden van de bouwplaats en de oppervlaktestructuur van het gehele bouwwerk (cosmetica).
- Indien mogelijk een *toekomstige functiewijziging* van het bouwwerk koppelen aan het materiaalpakket met behoud van eigenschappen.
- Een optimale *onderhoudsstrategie* moet mogelijk zijn.
- De materiaalkeuze baseren op specifieke onderzoeks- en keuringseisen.

1.8 Keuring van bouwmaterialen

Keuren is het toetsen van constructies of materialen aan bepaalde normen.

1.8.1 Het belang van normen

Normen zijn vastgelegde regels die de belanghebbende groepen in gemeenschappelijk overleg hebben opgesteld en aanvaard. Wetenschap en techniek zijn onderbouwende pijlers.

Normen zijn in het algemeen gericht op opheffing van onnodige verscheidenheid door het brengen van eenheid, vaak ook typebeperking. Normen hebben in het bijzonder betrekking op:

- benamingen, symbolen, eenheden en tekenwijzen
- meetmethoden, onderzoekings- en beproevingsmethoden
- maten, ter bevordering van uitwisselbaarheid van producten en onderdelen

- uitvoering en kwaliteit, overeenkomstig het doel waarvoor het product is bestemd; kwaliteit omvat duurzaamheid, veiligheid, gezondheid, bruikbaarheid en milieu
- installatievoorschriften en werkwijzen
- meting en controle van veiligheid, gezondheid en milieu

Nederlands
Normalisatie
Instituut (NEN)

In Nederland is het Nederlands Normalisatie Instituut (NEN) de instelling die tot taak heeft Nederlandse normen en praktijkrichtlijnen tot stand te brengen en te publiceren. Het NEN is het Nederlandse lid van de (mondiale) International Organization for Standardization (ISO) en van de Europese normalisatieorganisatie CEN. NEN levert bijdragen aan Euro- en ISO-normering. Ook voor bouwmaterialen en bouwconstructies hebben normen een gunstig economisch resultaat.



Op de website bij dit boek, www.materiaalkunde.noordhoff.nl, is in Aanvulling 1.9 een nadere beschouwing gewijd aan normen en normalisatie opgenomen.

1.8.2 Keuringsinstituten

NEN keurt niet zelf; daarvoor zijn andere instituten beschikbaar:

- TNO, innovatieorganisatie voor wetenschappelijk advies en onderzoek
- particuliere laboratoria, zoals Nebest Koning en Bienfait
- fabriekslaboratoria, bijvoorbeeld kalkzandsteenindustrie en dakpannen-industrie
- KOMO-certificaat/-attest voor vele producten in de bouw door keuringsinstituten, zoals KEMA en SKH:
 - KOMO: beoordelingsrichtlijnen: collectieve keurmerken voor de gehele bouw (zowel bouwkunde als civiele techniek)
 - KEMA: keurmerken voor elektrische materialen
 - SKH: kwaliteitszorg voor hout, inclusief duurzaam beheerd bos

1.8.3 Monsterneming

In de normen wordt het aantal monsternemingen niet aan de ontwerper overgelaten. De betreffende norm stelt dat het *aantal monsters* zo groot moet zijn dat de kwaliteit van het product, over een bepaald werk beschouwd, statistisch beoordeeld kan worden.

Keuringsproeven

De uitkomsten van grote aantallen keuringsproeven kunnen daarbij worden uitgezet in een frequentiekromme. Hierin wordt de frequentie (het aantal malen dat een bepaalde waarde in een nauw gebied bereikt wordt) uitgezet tegen de waarde zelf. Een voorbeeld: de lengte van Waalformaat baksteen kan variëren tussen 206 en 214 mm. Omdat er zoveel verschillende oorzaken kunnen zijn waarom de lengte varieert, voldoet de frequentiekromme (de Gausskromme) aan een normale statistische verdeling. De lengte kan namelijk veranderen door variaties in de samenstelling en het vochtgehalte van de grondstof klei, door slijtage van vormmachines, door verschillen (hoe klein ook) in baktemperaturen enzovoort.

1.8.4 Keuring van grote bouwelementen

Bij keuring gaat het dus om de controle van de tussen afnemer en producent afgesproken kwaliteit. Voor een goede keuring moet het aantal proefstukken niet te klein zijn. Bij grote elementen is dat echter niet mogelijk (te duur). Wel kan dat op onderdelen van elementen of met niet-destructieve

methoden. De controle kan worden uitgevoerd bij de fabricage. Bij betonelementen bijvoorbeeld kan de toetsing plaatsvinden op het beton, de wape-ning en de deklaag van het staal. De keuring van het element moet bewijzen dat de combinatie van ontwerp, uitvoering en materiaal goed is. Voor bepaalde bouwdelen zijn richtlijnen opgesteld, zoals voor lichte schei-dingswanden (windbelasting, aansluitingen, brand, waterdichtheid, geluid enzovoort), ramen (lucht- en waterdichtheid, mechanische eigenschappen) en dakplaten (thermische isolatie, waterkering, brandwering, sterkte).

1.8.5 Keuring op de bouwplaats

Bij de meeste materialen en producten zal de keuring voor de verwerking plaatsvinden in de fabriek of in een laboratorium. Keuring op de bouwplaats vindt onder andere plaats bij betonconstructies, omdat die constructies ook ter plaatse vervaardigd kunnen worden.

Onderzoek kan dan worden gedaan op de verontreiniging van zand met hu-mus, de korrelverdeling van het zand en grind, de kwaliteit van het water en de verwerkbaarheid van de specie. Bij aanvoer van prefab-specie zullen de eerste drie beproevingen op de betoncentrale zijn verricht.

1.9 Bouwmaterialen en afhankelijkheid

Bouwmaterialen zijn optimaal vertegenwoordigd in sturende richtlijnen, zo-wel in de bouwkunde als in de civiele techniek.

1.9.1 Bouwmaterialen en regelgeving

Naast de sturende regels van het milieubeleid is er de *normalisatie* (zie pa-ragraaf 1.8.1). Normen zijn er voor de woningbouw, de utiliteitsbouw en de civiele techniek. De toepassing van normen is vrij; de rechtskracht komt als er in een (wettelijk) geschrift naar wordt verwezen.

In *bouwkundige bestekken* kunnen bepaalde *normen* dwingend worden voor-geschreven.

Voor de bouwwereld kunnen we *normen* onderscheiden die zich richten op functionele eigenschappen van het bouwwerk (gezondheid, comfort, veilig-hed, leef- en werkruimte) en verder onder andere op de *kwaliteitseisen van bouwmaterialen*, productafmetingen en het eenduidig gebruik van termen, symbolen en eenheden. Goed gebruik van *normen* bevordert *doordacht bou-wen*, hetgeen weer leidt tot een zo hoog mogelijke *gebruikswaarde van bouwwerken*: de basis van *duurzaam bouwen*.

Het Nederlands Normalisatie-instituut NEN werkt nauw samen met ISO en is daardoor ook betrokken bij de internationale ontwikkelingen met betrek-king tot de ISO-normen.

De betekenis van ISO (NEN-ISO 9000-serie)

ISO staat voor International Organization for Standardization.

De NEN-ISO 9000-serie dient als richtlijn voor het opzetten, onderhouden en toetsen van *kwaliteitszorgsystemen*. NEN-ISO 9001, 9002 en 9003 zijn mo-dellen voor externe kwaliteitsborging: algemeen toepasbare regels voor het opzetten en beheren van een kwaliteitsborgingssysteem. Een behaald certi-ficaat geeft een bedrijf een waardering voor kwaliteitszorg binnen de organi-satie. NEN-ISO 9004 is gericht op interne kwaliteitszorg (geen certificaat).

Bouwkundige
bestekken

ISO-normen

Bouwbesluit

Het Bouwbesluit 2012

In de *Europese Richtlijn Bouwproducten* gaat het om producten voor de bouw die een positieve bijdrage moeten leveren aan veilige, voor de gezondheid onschadelijke, optimaal bruikbare en energiezuinige bouwwerken (figuur 1.14). Daarbij behoren aspecten ten aanzien van sterkte en stabiliteit (stijfheid), brand, geluid en milieu. Deze Europese Richtlijn is in het Bouwbesluit ingebracht. De Richtlijn voorziet in de vrije verhandelbaarheid van bouwproducten binnen Europa.

FIGUUR 1.14 Optimaal gebruik zonne-energie (zonnepanelen in de dakopbouw)



In het Bouwbesluit zijn de technische voorschriften omschreven die bij het bouwen dienen te worden gehanteerd.

Belangrijke eisen zijn ook die welke aangeven waaraan de technische staat van de bouwwerken minstens moet voldoen om nog voor doelmatig gebruik geschikt te zijn.

Het Bouwbesluit maakt duidelijk onderscheid tussen nieuwbouw en bestaande bouw, en omschrijft ten aanzien daarvan voorschriften uit het oogpunt van:

- *veiligheid* (bouwkundige constructies, brand en rookontwikkeling, toegankelijkheid enzovoort)
- *gezondheid* (geluid, vocht, lucht, licht enzovoort)
- *bruikbaarheid* (bereikbaarheid, verblijfsruimte, opstelplaatsen apparatuur enzovoort)
- *energiezuinigheid* (thermische isolatie, luchtdoorlatendheid, energieprestatie)

Het zal duidelijk zijn dat *materiaalkunde en bouwmaterialen* in het *Bouwbesluit* een grote rol spelen. Een en ander komt direct tot uiting in het eerste hoofdstuk, 'Algemene bepalingen'. Begripsbepalingen zijn er voor constructieomschrijvingen, NEN-voorschriften en de genoemde Richtlijn Bouwproducten. 'Kwaliteitsverklaringen en CE-markeringen' van het Bouwbesluit gaat

nauwgezet in op bouwmaterialen, bouwdelen en CE-markering op producten (Richtlijn Bouwproducten).

Voor fabrikanten geldt de verplichting bij een CE-markering aan te geven aan welke prestaties hun producten voldoen. Voorbeelden zijn: mechanische eigenschappen (zoals sterkte), brandveiligheid en corrosie. Een product moet worden vergezeld van een zogenoemde prestatieverklaring! Het Bouwbesluit verwijst naar de van kracht zijnde NEN-normen. Voorts wordt ook verwezen naar voor het Besluit van belang zijnde (*product*)kwaliteitsverklaringen.

1.9.2 Bouwmaterialen en bouwkwaliteit

KOMO-kwaliteitsverklaringen voor de bouw

KOMO-kwaliteitsverklaringen worden uitgegeven op basis van de begrippen *bouwdeel* en *product*.

Een *bouwdeel* is een op de bouwplaats vervaardigd onderdeel van een bouwwerk met functieomschrijving. Een *product* is een fabrieksmatig vervaardigd element met daarbij nauwkeurig omschreven eigenschappen. Voor een bouwdeel kan een producent een *attest* verkrijgen. De bouwdelen dragen *geen* KOMO-keurmerk. Afnemers moeten zelf (laten) keuren of het geleverde aan de eisen voldoet.

Voor een product kan een producent een *certificaat* verkrijgen. De producten dragen *wel* een KOMO-keurmerk. Op gezette tijden wordt de kwaliteit gecontroleerd.

Combinaties van een attest en certificaat bestaan eveneens.

De Stichting Bouwkwaliteit beheert de KOMO-keurmerken op basis van een reglement. Er zijn overeenkomsten gesloten met verschillende keuringsinstituten, die de kwaliteit beoordelen op basis van kwaliteitseisen en beoordelingsrichtlijnen (zie ook paragraaf 1.8.2).

Het KOMO-keurmerk is een garantie voor kwaliteit voor opdrachtgevers, bestekschrijvers, architecten en ingenieurs. Voor consumenten biedt het zekerheid bij de keuze van producten en diensten. Het keurmerk komt tot stand in samenspraak met het bedrijfsleven.

Voorbeelden van bouwdelen waarvoor een KOMO-attest kan worden verkregen, zijn: buitengevelisolatie, niet-dragende binnenwanden, dakplaten en thermisch-isolerende beglazingssystemen.

Voorbeelden van producten met KOMO-certificaat zijn: heipalen, betonvloeren, raam- en deurprofielen, thermisch-isolerend vlakglas, houten gevelelementen, kunststof gevelelementen, houtlijmen, keramische dakpannen, straatsteen en betonstaal.

Er zijn onafhankelijke certificatie-instellingen in Nederland in de bouw werkzaam. Op deze wijze wordt de kwaliteit van de certificatie in de bouw bevorderd. Zie paragraaf 1.8.2.

Het *waarborgen van kwaliteit* kan bijdragen aan *duurzaam bouwen*. Bouwgebreken kunnen er zeker door worden geminimaliseerd. Gecertificeerde producten kunnen het ontwerpproces sturen en het toezichthoudend personeel op de bouwplaats de helpende hand bieden.

KOMO

Bouwdeel
Product

Stichting
Bouwkwaliteit

Stichting Arbouw

1.9.3 Bouwmaterialen en Arbozorg

De Arbeidsomstandighedenwet (Arbowet) regelt onder andere hoe we gezond en veilig kunnen werken. De Arbowet geldt voor alle bedrijfstakken, dus ook voor de bouwnijverheid. De bouwnijverheid doet een beroep op gespecialiseerde instituten die weten hoe de Arbowet bij de praktijk (de bouwplaats) past.

De Stichting Arbouw heeft de zorg voor de verbetering van de arbeidsomstandigheden in de gehele bouwnijverheid (onderzoek en ontwikkeling, adviezen geven, informatie aanreiken over arbeidsomstandigheden – arbeidsgezondheidszorg – in de bouwnijverheid, cursussen en training Arbotechniek).

Een illustratie is het Arbo-convenant dat de Nederlandse Bond van Timmerfabrikanten, de vakbonden en het Ministerie van Sociale Zaken overeenkwamen ter zake lichamelijke belasting: het Arbo-convenant Bouw. Hierin worden doelstellingen nader geregeld, zoals werkdruk en fysieke belasting, maar ook zaken rond de kwartshoudende materialen en de invloeden van OPS (Organisch Psycho Syndroom); zie voor OPS paragraaf 10.5.4.

Een van de taken van de Stichting Arbouw is dus het geven van informatie. Dat wordt gedaan met *Bouwveiligheidsadviezen*. Adviezen met betrekking tot *bouwmaterialen* en materiaalgebruik zijn onder andere: minerale wol (glas- en steenwol), lijmen en kittens, asbest, epoxy, houtverduurzaming, gips, verf, cement, vliegas, tropisch hout, PUR-schuim, ontkistingsmiddelen en metselsteen.

De Stichting Arbouw geeft informatiebladen uit over arbeidsomstandigheden in de bouwnijverheid. In deze uitgaven worden regelmatig bouwmaterialen en bouwproducten nader belicht.

1.10 Bouwmaterialen en classificatie

De SfB-classificatie

Classificatie SFB

Het *classificatiesysteem* SfB is destijds ten behoeve van de bouw ontwikkeld (Zweden). SfB betekent Samarbetkommitten for Byggnadsfragor. De bedoeling van het systeem is ordening van informatie over *bouwwerken en de omgeving* via een indeling in elementen, constructies en productiemiddelen:

- Elementen zijn bouwdelen met overeenkomstige functie. Voorbeelden zijn: onderbouw (funderingen), afbouw (wandopeningen), installaties (communicatie, beveiliging) en terrein (opstal, omheining).
- Constructies worden gedefinieerd vanuit ontwerpen of uitvoering. Voorbeelden zijn: heiwerk, betonwerk, metselwerk.
- Productiemiddelen beoogt ordening in grondstoffen. Voorbeelden zijn: natuursteen, niet gebakken kunststeen, metalen.

Bij offertebeoordeling of productvergelijking kan het voorkomen dat de SfB-code geen antwoord heeft op classificatieaanduiding. Niet alle activiteiten en producten zijn altijd goed onder te brengen.

ICS – International Classification of Standards

Classificatie ICS

In het ICS zijn niet alleen gebouwen en producten ingedeeld, maar ook bepaalde diensten, zoals bedrijfsorganisatie en beheer. Ook grond- weg- en waterbouwkunde is erin terug te vinden. In verband met deze algemene toegankelijkheid hanteert het NEN voor zijn normindeling de ICS-classificatie.



Bouwmaterialen en het bouwkundig bestek

STABU-Standaard

De *STABU-Standaard* is een boekwerk dat een onderdeel is van de STABU-Systematiek (besteksystematiek voor de woning- en utiliteitsbouw). Het bevat ook teksten met betrekking tot beproeving van *bouwmaterialen*. De STABU-Standaard is een integraal onderdeel van *projectbestekken*. Opdrachtgevers, architecten, aannemers, adviseurs, installateurs en toeleveranciers zijn verplicht voor dit soort bestekken de STABU-Standaard te hanteren. Om de vijf jaar wordt het boekwerk aangepast aan de ontwikkeling in de bouw- en installatietechniek. In de Technische Bepalingen worden begripsomschrijvingen, kwaliteitseisen en kwaliteitsklassen aangegeven.

Met betrekking tot *bouwmaterialen* worden aangegeven:

- *begrip*: onderscheid in klassen en typen van bouwmaterialen (om misverstanden te voorkomen)
- *bouwmaterialen*: adequate maatregelen treffen om kwaliteitsverlies, verontreiniging en beschadiging te voorkomen

Ook *hier geldt*: doelmatige toepassing van materialen stoelt op efficiënt gebruik van de eigenschappen.

Onderdeel van de STABU-Standaard zijn de *Uniforme Administratieve Voorwaarden* (UAV 2012): contractuele bepalingen in de Nederlandse bouwsector. Hierin worden *bouwmaterialen* veelvuldig aangehaald: (functionele (on)geschiktheid, levering, 'oude' bouwproducten, fouten in bouwmaterialen, eigendom en zorg voor bouwmaterialen). Ook gevaarlijke stoffen en bestekwijzigingen worden nader omschreven. Belangrijk is dat de jurisprudentie van de Raad van Arbitrage op een aantal noodzakelijke plaatsen is verwerkt.

In paragraaf 1.10 van Aanvulling Hoofdstuk 1 wordt ingegaan op het begrip Duurzaam Bouwen en de rol van de ingenieur/bouwkundige hierin.

Op de website bij dit boek, www.materiaalkunde.noordhoff.nl, zijn vragen en antwoorden behorende bij dit hoofdstuk opgenomen, evenals enkele extra figuren.

STABU-
Standaard

1

UAV 2012

