# Bygningsmaterialer

Grundlæggende egenskaber

# Bygningsmaterialer

*Grundlæggende egenskaber*

Redigeret af
Finn R. Gottfredsen og
Anders Nielsen

Bygningsmaterialer: Grundlæggende egenskaber
*Redigeret af Finn R. Gottfredsen og Anders Nielsen*

1. udgave, 7. oplag 2015

© 1997, Polyteknisk Forlag

ISBN 13 978-87-502-0788-7
ISBN 10 87-502-0788-1

Forlagsredaktion: Ole Jørgensen
Sats: Jens Jørn Pedersen
Omslagsfoto: Lars Bahl /2 maj
Omslagsgrafik: Rie Egeskov Jensen
Tryk: St

Ingen del af denne bog må gengives, lagres i et søgesystem eller transmitteres i nogen form eller med noget middel, grafisk, elektronisk, mekanisk, fotografisk, indspillet på plade eller bånd, overført til databanker eller på anden måde, uden forlagets skriftlige tilladelse. Enhver kopiering fra denne bog må kun ske efter reglerne i lov om ophavsret.

Printed in Denmark 2015

Polyteknisk Forlag
Anker Engelunds Vej 1
2800 Lyngby
Tel.: 77 42 43 28
Fax: 77 42 43 54
forlag@polyteknisk.dk
www.polyteknisk.dk

# Forord

Den foreliggende lærebog med titlen *Bygningsmaterialer - Grundlæggende egenskaber* er udarbejdet til brug ved de danske diplom- og civilingeniøruddannelsesteder. Det er udgivernes håb, at bogen også må finde anvendelse hos praktiserende ingeniører.

Bogen har en lang tilblivelseshistorie. Udviklingen startede ved Tekniska Högskolan i Lund, hvor den daværende professor Sven G. Bergström i 1964-65 fik udarbejdet et kompendium i bygningsmateriallære. Det oprindelige kompendium er blevet revideret i flere omgange i Lund, bl.a. for at indarbejde nye forskningsresultater. *Lundkompendiet* blev indført ved undervisningen på Danmarks Ingeniørakademi i København i 1971. De almene afsnit af Lundkompendiet blev senere oversat og bearbejdet af Ebbe Hagemann og udgivet som *Byggematerialer, Grundbog* af Polyteknisk Forlag i 1981 og 1985.

Den her foreliggende bog er inspireret af grundbogens 1985-udgave, og af kapitel 1 - 11 i Lundkompendiets 1993-udgave: *Byggnadsmaterial, Allmän Kurs för V.* En stor del er oversat fra sidstnævnte udgivelse og er suppleret med danske erfaringer og resultater, bl.a. er fugtkapitlet meget udbygget. Et dansk bidrag er tabellerne, som er medtaget fra notatet *Bygningsmaterialers egenskaber*, Laboratoriet for Bygningsmaterialer, 1992.

Umiddelbart efter dette forord er der en oversigt, hvori der for hvert kapitel er nævnt, hvilke forfattere der i tidens løb har bidraget væsentligt til det pågældende kapitels indhold.

Bogen her er et resultat af arbejdet i gruppe 5 i det af Undervisningsministeriet i 1994 igangsatte KONMAT-projekt, som havde til formål at skaffe ensartet undervisningsmateriale til de danske diplomingeniøruddannelser.

Ved bogens tilblivelse har lektor, lic.techn. Jens Kr. Jehrbo Jensen, Aalborg Universitet bidraget med udkast til kapitlerne 2 og 3. Civ.ing., Ph.D. Finn R. Gottfredsen har været redaktør og har i samarbejde med undertegnede forestået det praktiske arbejde med indsamling af stof, oversættelse, bearbejdning og tilrettelæggelse.

Lyngby, Maj 1997

*Anders Nielsen, Docent*
Institut for Bærende Konstruktioner og Materialer
Danmarks Tekniske Universitet

**Væsentligste bidragydere**

| *Kapitel* | *Forfatter(e)* |
|---|---|
| 1. Indledning | Anders Nielsen, 1997 |
| 2. Stofstruktur | Jens Kr. Jehrbo Jensen og Anders Nielsen, 1997 |
| 3. Porøsitet og densitet | Jens Kr. Jehrbo Jensen og Anders Nielsen, 1997 |
| 4. Varme | Arne Hillerborg, 1982, Per G. Burström, 1992 |
| 5. Fugt | Anders Nielsen, 1985, 1997 |
| 6. Styrke og stivhed | Sven G. Bergström, 1967, Arne Hillerborg, 1982<br>Finn R. Gottfredsen, 1997 |
| 7. Volumen-bestandighed | Anders Nielsen og Finn R. Gottfredsen, 1997 |
| 8. Holdbarhed | Sven G. Bergström og Göran Fagerlund, 1969<br>Arne Hillerborg, 1978, Per G. Burström, 1993 |
| 9. Temperaturbetingede ændringer og brand | Anders Nielsen, 1969, Per G. Burström, 1993 |

**Medlemmer af KONMAT's gruppe 5**

| | |
|---|---|
| Knud A. Nørgaard | Ingeniørhøjskolen i Århus (Formand) |
| Robert Eeg | Ingeniørhøjskolen, Horsens |
| Peter Ehlers | Ingeniørhøjskolen i Århus |
| Erik Høngaard | Ingeniørhøjskolen, Odense |
| Jens Kr. Jehrbo Jensen | Aalborg Universitet |
| Anders Nielsen | Danmarks Tekniske Universitet |
| Henning Sørensen | Ingeniørhøjskolen, Horsens |

# Indhold


**1 Indledning** . . . . . 11

**2 Stofstruktur** . . . . . 13
2.1 Atomer . . . . . 13
Grundstoffer . . . . . 13
Isotoper . . . . . 14
Atommasse . . . . . 15
Mol . . . . . 15
2.2 Molekyler . . . . . 15
Molekylemasse . . . . . 15
2.3 Intermolekylære kræfter . . . . . 16
2.4 Kemiske bindinger . . . . . 18
Primære kemiske bindinger . . . . . 18
Sekundære kemiske bindinger . . . . . 19
2.5 Tilstandsformer . . . . . 20
2.6 Strukturer . . . . . 21
Krystalstruktur . . . . . 21
Gitterfejl . . . . . 22
Ikke-krystallinske stoffer . . . . . 23
2.7 Disperse systemer . . . . . 24
Kolloider . . . . . 24
Geler . . . . . 25
Referencer . . . . . 25
Opgaver . . . . . 26

**3 Porøsitet og densitet** . . . . . 27
3.1 Definitioner . . . . . 29
Porøsitetsmål . . . . . 30
Densiteter . . . . . 30
Adsorption . . . . . 31
3.2 Porøsitetsformlen . . . . . 31
3.3 Porestørrelsesfordeling . . . . . 32
3.4 Porøsitetens betydning . . . . . 33
3.5 Bestemmelse af densitet, porøsitet og absorption . . . . . 34
Veje-dyppe-veje-metoden . . . . . 34
Pyknometermetoden . . . . . 35
3.6 Andre densiteter . . . . . 37
Referencer . . . . . 38

**4 Varme** . . . . . 39
4.1 Stråling . . . . . 39
4.2 Konvektion . . . . . 42

4.3 Ledning . . . . . 45
Varmekapacitet og varmediffusivitet . . . . . 47
4.4 Varmetransmission gennem porøse materialer . . . . . 48
Varmeledningsevnen hos tofasede materialer . . . . . 49
Influerende faktorer . . . . . 53
4.5 Varmetransmission gennem sammensat væg . . . . . 60
4.6 Måling af varmeledningsevnen . . . . . 63
Referencer . . . . . 64

**5 Fugt** . . . . . 65
5.1 Indledning . . . . . 65
5.2 Fugtkilder . . . . . 65
5.3 Fugtens betydning . . . . . 66
5.4 Luftens damptryk og dampindhold . . . . . 67
5.5 Bygningsmaterialernes fugtparametre . . . . . 73
5.6 Fugtbinding . . . . . 75
Sorption . . . . . 76
Suction . . . . . 81
5.7 Fugttransport . . . . . 83
Vandtryksforskelle . . . . . 84
Kapillarsugning . . . . . 88
Damptryksforskel . . . . . 95
Luftryksforskel . . . . . 99
5.8 Udtørringsforløb . . . . . 100
Referencer . . . . . 104

**6 Styrke og stivhed** . . . . . 107
6.1 Spænding og tøjning . . . . . 107
Normalspænding og længdetøjning . . . . . 107
Forskydningsspænding og forskydningstøjning . . . . . 109
Arbejdslinien . . . . . 110
Deformationer . . . . . 113
Flydning og brud . . . . . 114
6.2 Spændings-tøjningsrelationer . . . . . 117
6.3 Sejhed og sprødhed . . . . . 120
6.4 Spændingsretningen og spændingskombinationer . . . . . 123
Isotropi og anisotropi . . . . . 125
Fleraksede spændingstilstande . . . . . 126
6.5 Tidsafhængige fænomener . . . . . 129
Krybning . . . . . 129
Boltzmanns superpositionsprincip . . . . . 133
Relaksation . . . . . 134
Krybningsinfluerende faktorer . . . . . 136
6.6 Udmattelse . . . . . 137
Delskadehypotesen . . . . . 139

6.7 Friktion og slidstyrke . . . . . 140
6.8 Materialeprøvning . . . . . 141
Styrkebestemmelse . . . . . 141
Faktorer, som indvirker på prøvningsresultatet . . . . . 146
Bestemmelse af hårdhed . . . . . 151
Bestemmelse af slagsejhed . . . . . 154
Referencer . . . . . 157

**7 Volumenbestandighed** . . . . . 159
7.1 Grundlæggende sammenhænge . . . . . 159
7.2 Temperaturbetingede volumenændringer . . . . . 160
7.3 Fugtbetingede volumenændringer . . . . . 163
7.4 Afsluttende bemærkninger . . . . . 167
Referencer . . . . . 169

**8 Holdbarhed** . . . . . 171
8.1 Indledning . . . . . 171
8.2 Nedbrydningsmekanismer . . . . . 172
Kemiske angreb . . . . . 172
Elektrokemiske angreb . . . . . 174
Fysiske angreb . . . . . 181
Biologiske angreb . . . . . 185
Ultraviolet stråling . . . . . 186
Ældning . . . . . 186
8.3 Miljøfaktorer . . . . . 187
8.4 Prøvning og vurdering af holdbarhed . . . . . 190
Gyldighed og pålidelighed ved prøvning . . . . . 190
Tidsfaktoren . . . . . 191
Synergi-effekten . . . . . 194
Samvirken mellem materialer . . . . . 194
Teoretiske modeller . . . . . 194
Feltundersøgelser og erfaringer . . . . . 195
Referencer . . . . . 195

**9 Temperaturbetingede ændringer og brand** . . . . . 197
9.1 Indledning . . . . . 197
9.2 Strukturelle ændringer . . . . . 197
9.3 Egenskabsændringer . . . . . 199
Styrken . . . . . 199
Deformationer . . . . . 200
Temperaturbetingede bevægelser . . . . . 200
9.4 Materialenedbrydning . . . . . 201
Gaskorrosion . . . . . 201
Afskalninger, termochok . . . . . 201
Forbrænding . . . . . 202

9.5 Materialer fra et brandmæssigt synspunkt . . . . . 203
Tegl og murværk . . . . . 204
Stål . . . . . 205
Aluminium . . . . . 206
Beton . . . . . 207
Armeret beton . . . . . 208
Letbeton . . . . . 209
Natursten . . . . . 210
Træ . . . . . 210
Gips . . . . . 211
Plast . . . . . 211
Referencer . . . . . 212

**Tabeller** . . . . . 213

**Stikord** . . . . . 233

# 1
# Indledning

Opførelsen af et bygværk eller udformningen af en bygningsdel starter med at man formulerer de funktionskrav, som skal opfyldes. Herefter kan man undersøge hvorledes funktionskravene kan opfyldes. Man kan spille på bygværkets udformning (design), man kan vælge forskellige materialer og man kan bringe forskellige udførelsesmetoder i anvendelse. Projekteringsprocessen består således i, at man i et samspil mellem *udformning*, *materialer* og *udførelse* fastlægger, hvorledes funktionskravene bedst kan opfyldes.

I denne proces er et detaljeret kendskab til materialernes egenskaber nødvendigt, når man skal have fantasien til at spille og vurdere de mange forskellige løsningsmuligheder man har. Det er materiallærens opgave at måle og dokumentere de egenskaber materialer skal have, for at opfylde kravene. Desuden er det er en vigtig opgave for materiallæren at give forståelse for, hvorfor materialerne har de egenskaber som iagttages, for dermed eventuelt at kunne forbedre egenskaberne.

Opstilles projekteringsprocessen som ovenfor forklarer det, hvorfor vi ikke i bygningsmateriallæren angiver priser på de forskellige materialer. Det er sådan set uinteressant at få at vide om et materiale er dyrt eller billigt per kg eller $m^3$, når det i sidste ende er det færdige bygværks pris der er afgørende. Yderligere er det et urimeligt stort arbejde til stadighed at holde sig á jour med de forskellige materialers pris.

I denne bog er der især lagt vægt på at gennemgå definitionerne på de grundlæggende materialeegenskaber som har interesse, når et bygværk skal udformes efter funktionskravene til f.eks. varmeisolering, fugtforhold, bæreevne og holdbarhed.

I kapitel 2 gives en kort introduktion til stofstruktur, hvorefter materialeegenskaberne gennemgås i de efterfølgende kapitler. Ved gennemgangen er materialeegenskaberne opdelt i følgende hovedgrupper:

- porøsitet og densitet,
- varme og varmeisolering,
- fugt og fugttransport,
- styrke og stivhed,
- volumenbestandighed,
- holdbarhed,
- temperaturbetingede ændringer og brand.

Ud over ovenstående egenskaber findes der mange andre egenskaber ved materialer og bygningsdele, som man skal tage hensyn til i projekteringen og andre steder i bygningsingeniørens virke. I tabel 1.1 er der givet en opremsning af sådanne egenskaber, delt op efter *udførelsesegenskaber*, *demoleringsegenskaber* og *anvendelsesegenskaber*. Tabel 1.1 er alene medtaget for overblikkets skyld, idet det ligger uden for denne bogs rammer at behandle samtlige disse mange egenskaber.

*Tabel 1.1 Bygningsmaterialers egenskaber.*

**Udførelsesegenskaber**
Lagringsholdbarhed
  Fugtfølsomhed
  Kemiske reaktioner
Vandindhold ved levering
  Afdækning
  Udtørring
Bearbejdelighed
  Spåntagning
  Formbarhed
  Støbelighed
  Brændbarhed
Forarbejdningsgrad
  Elementstørrelse
  Arbejdsoperationer udført
Fleksibilitet
  Form, farve, mode
Monteringslethed
  Vægt
  Håndterlighed
  Farlighed ved transport
Arbejdsmiljø
  Støjgener
  Støvgener
  Farlige gasser
Kundetryghed
  Tidligere anvendelser (referencer)
  Garanti
  Serviceniveau
  Leveringssikkerhed
**Demolering (Nedbrydning)**
Bearbejdelighed
  Spåntagning
  Brændbarhed
Sektionering af bygningsdele
  Udskiftningsmuligheder
Recirkulation
  Genbrug
  Afbrænding
  Deponering
**Anvendelsesegenskaber**
Struktur
  Tørdensitet
  Våddensitet
  Porøsitet
  Porestørrelsesfordeling
  Poreform
Varme
  Varmekapacitet
  Varmeledning
  Varmeakkumuleringsevne
Fugt
  Fugtbinding, fugtkapacitet
  Fugttransport, damp
  Fugttransport, væske
Deformation
  Momentandeformation
  Krybning (tidsafhængig deformation)
  Dæmpning
Styrke
  Træk, tryk, bøjning, forskydning
  Tidsafhængighed, udmattelse
  Hårdhed, slid, erosion
  Slagsejhed
Volumenbestandighed
  Varmeudvidelse
  Fugtbetinget svind/svelning
  Kemisk betinget (karbonatiserings-svind, korrosionsekspansion...)
Holdbarhed, levetid
  Kemisk (ældning, indeklima)
  Elektrokemisk (korrosion)
  Fysisk (erosion, forvitring, frost)
  Biologisk
  Forligelighed med andre materialer
Indeklimaegenskaber
  Afgasning, fibertilskud
Vedligehold
  Rengørlighed (dekontaminerbarhed)
  Reparationsegnethed
Brandbestandighed
  Antændelighed
  Varmeledning
  Varmekapacitet
Elektriske
  Ledningsevne
  Kapacitans
Optiske
  Lysbrydning
  Glans og farve
  Klarhed
Æstetiske
  Udformning
  Udseende
Akustiske
  Lydhastighed
  Lydtransmission
  Dæmpning
Friktion og skridsikkerhed
Gennemtrængelighed
  Luft, gasser
Strålingsbeskyttelse

# 2
# Stofstruktur

En hensigtsmæssig anvendelse af materialer beror på kendskabet til materialernes grundlæggende egenskaber. For bygningsingeniøren koncentrerer interessen sig specielt om egenskaber som *styrke, stivhed* og *holdbarhed.* Disse egenskaber hos et materiale er nøje knyttet til materialets opbygning, som vi finder den på submikroniveau i atomstrukturen, på mikroniveau i krystalstrukturen og på makroniveauet i porestrukturen. I dette kapitel behandles *atomstruktur, bindingstyper og krystalstruktur* medens porestrukturen beskrives nærmere i kapitel 3.

Kapitlet her skal udelukkende ses som en opsummering af nødvendige begreber. For et mere dybtgående studium af stofstrukturer henvises til litteraturen angivet i referencelisten.

## 2.1 Atomer

Fælles for alle stoffer er, at de er opbygget af atomer. Et *atom* er den mindste del af et stof, som kan indgå i en kemisk forbindelse. Alle atomer er opbygget af en positiv ladet *kerne*, der består af et antal positivt ladede *protoner* og neutrale *neutroner*. Kernen er omgivet af negativt ladede *elektroner* i et antal svarende til antallet af protoner, således at den samlede ladning af et atom udadtil bliver nul.

Hvis atomet optager én eller flere ekstra elektroner dannes der en *negativ ion*. Afgives der elektroner dannes der en *positiv ion*.

Antallet af protoner $Z$ angiver atomets *atomnummer*. Antallet af neutroner betegnes $N$ og neutronen vejer lige så meget som én proton. Elektroner er negativt ladede, og hver vejer de kun ca. 0,05% af en proton.

Det samlede massetal for et atom, $A$, er defineret som summen $Z + N$, og betegnelsen *nukleoner* bruges ofte som samlet betegnelse for protoner og neutroner.

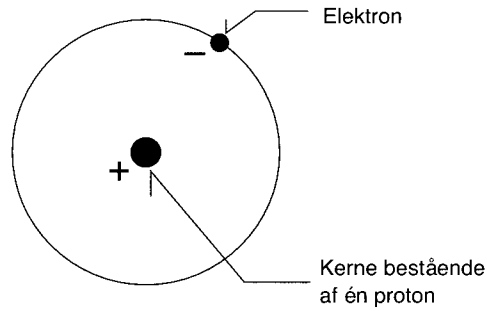
I tabel 2.1 er der givet en oversigt over masse og ladning for de nævnte elementarpartikler.

*Tabel 2.1. Ladninger og hvilemasse af atomers byggestene.*

| Partikel | Masse, [$10^{-27}$ kg] | Ladning, [$10^{-19}$ C] |
|---|---|---|
| Proton | 1,673 | +1,602 |
| Neutron | 1,675 | 0 |
| Elektron | 0,00091 | -1,602 |

### *Grundstoffer*

Et stof, der udelukkende består af atomer med det samme atomnummer $Z$, kaldes et *grundstof*. Grundstofferne er de dele af materien, som ikke kan fremstilles eller neddeles yderligere ved almindelige kemiske reaktioner.




*Figur 2.1. Principiel opbygning af det simpleste atom, hydrogenatomet (H).*

Det simpleste grundstof er hydrogen (H). Hydrogenatomet består af en kerne med én proton og med én elektron i et kredsløb omkring kernen, se figur 2.1. Tilføjes gradvist flere og flere protoner og neutroner, og dermed også elektroner, opbygges atomer med stadig større kompleksitet.

Elektronerne placerer sig i skaller uden om kernen, idet der dog er grænser for, hvor mange elektroner, der kan være i hver skal. Generelt gælder, at det maksimale antal elektroner der kan være i en skal, kan skrives som $2 \cdot n^2$, hvor $n$ er skallens nummer regnet inde fra. I den inderste skal er det maksimale antal således 2, i den næste er det 8, i den tredie 18 o.s.v.

Grundstofferne er elektrisk neutrale og indeholder således et ens antal protoner og elektroner. Da atomnummeret $Z$ er lig med antallet af protoner, bliver atomnummeret også lig med antallet af elektroner i atomet.

Grundstofferne kan på hensigtsmæssig vis klassificeres ved hjælp af *det periodiske system*, hvor de ordnes efter det samlede antal af elektroner, og dermed atomnummeret, samt antallet af elektroner i de yderste skaller. En opstilling af det periodiske system er vist bagerst i bogen sammen med en grundstoftabel.

I det periodiske system er grundstofferne ordnet efter atomnummer i vandrette rækker, *perioder*, som er anbragt over hinanden, således at grundstoffer med samme kemiske og fysiske egenskaber kommer i samme lodrette *gruppe*. Det periodiske system blev opstillet i 1869 af Mendelejev, som dermed kunne forudsige både eksistensen af og visse egenskaber hos de da endnu ukendte grundstoffer germanium, gallium og scandium. Senere påviste Niels Bohr relationen mellem det periodiske system og elektronernes fordeling i atomernes elektronskaller.

### *Isotoper*

Atomer, der er kemisk ens og derfor tilhører det samme grundstof, kan indeholde et forskelligt antal neutroner. Det betyder, at atomerne får forskellig masse.

Sådanne atomer kaldes *isotoper*. Et eksempel er grundstoffet kulstof, C, som kan optræde i 3 udgaver: med det normale massetal 12, samt med de mere sjældne massetal 13 og 14. Mange atomer med høje atomnumre optræder ofte som radioaktive isotoper. Disse radioaktive isotoper kan henfalde til stabile isotoper under udsendelse af en karakteristisk stråling. Der skelnes mellem tre former for stråling: alfa- beta- og gammastråling. Ved *alfastråling* mister atomkernen to protoner og to neutroner, ved *betastråling* stiger atom-

nummeret med ét, svarende til at der i kernen sker en omdannelse af én neutron til én proton under udsendelse af én elektron. Ved *gammastråling* ændres der ikke på masse eller atomnummer, idet gammastråling udelukkende består af meget energirige fotoner, der udsendes som følgestråling ved radioaktive henfald eller andre kerneprocesser.

***Atommasse***

Et enkelt atom vejer meget lidt, ca. $10^{-27}$ kg. Dette er en upraktisk måleenhed, og derfor defineres den *relative atommasse* $A_r$ [-], som massen af det pågældende atom i forhold til *atommassekonstanten* $m_u = 1{,}6605 \cdot 10^{-27}$ kg:

$$A_r = \frac{m}{m_u} = \frac{\text{masse af atom}}{\text{atommassekonstant}} \qquad (2.1)$$

Atommassekonstanten er defineret som 1/12 af hvilemassen af et kulstof-12 atom. Den relative atommasse kaldes også i daglig tale for *atomvægten*, og den er tabellariseret for alle grundstoffer, se tabel 15 og tabel 16. Enheden [u] benyttes til at angive masser i forhold til atommassekonstanten, idet 1 u = $m_u$ = $1{,}6605 \cdot 10^{-27}$ kg.

***Mol***

Til mange beregninger har man brug for kendskabet til begrebet *mol*. Ét mol af et stof, er defineret som den mængde af stoffet, der har ligeså mange elementære enheder, som der er atomer i 12 g af kulstof-12. Man kan beregne, at ét mol af et givet stof netop er lige så mange gram af stoffet, som molekylevægten angiver. Dette er den såkaldte *molære masse M* [g/mol]. Det er vigtigt at bemærke, at ét mol af et vilkårligt stof altid vil indeholde det samme antal elementardele $N_a = 6{,}022 \cdot 10^{23}$ enheder. Dette tal kaldes *Avogadros tal* og har enheden [$mol^{-1}$].

## 2.2 Molekyler

Atomer kan forbinde sig med hinanden til *molekyler*, hvorved der dannes nye stoffer, forskellige fra grundstofferne. Kun de såkaldte ædelgasser optræder som ét-atomige stoffer.

Dannelse af et molekyle ud fra to eller flere atomer kan ske ved at atomerne:

- afgiver elektroner til andre atomer, hvorved der dannes positive ioner,
- modtager elektroner fra andre atomer, hvorved der dannes negative ioner,
- deler elektroner med andre atomer.

I alle tre tilfælde dannes der *primære, kemiske bindinger* mellem atomerne.

***Molekylmasse***

Sammensættes flere atomer til et molekyle, opstår der en forbindelse med en større samlet masse.

I nogle tilfælde forbinder atomerne sig til veldefinerede molekyler. F.eks. forbinder to H-atomer og ét O-atom sig til ét vandmolekyle ($H_2O$). I andre til-

fælde kan man ikke tale om et egentligt molekyle, fordi stoffet findes som en struktur, hvilket f.eks. er tilfældet for NaCl. Her er man nødt til at definere molekylvægten som vægten svarende til en *formelenhed* af det pågældende stof, f.eks én NaCl-enhed.

Den *relative molekylmasse* $M_r$ [-], der bruges til at angive massen af molekyler og formelenheder, er defineret som massen af én formelenhed i forhold til atommassekonstanten:

$$M_r = \frac{m}{m_u} = \frac{\text{masse af formelenhed}}{\text{atommassekonstant}} \tag{2.2}$$

Af praktiske årsager er det almindeligt at erstatte den lidt omstændelige betegnelse *relativ molekylmasse* med den mere mundrette betegnelse *molekylmasse*.

## 2.3 Intermolekylære kræfter

Atomer, og dermed også molekyler, er som nævnt i afsnit 2.1, opbygget af positivt ladede kerner omgivet af negativt ladede elektroner. På grund af asymmetrier i ladningsfordelingen, asymmetrier der kan være kortvarige eller permanente, dannes der såkaldte *dipoler*. Hvis områder (poler) med ladninger med modsat fortegn nærmer sig hinanden vil der opstå *tiltrækkende* kræfter. Omvendt vil der opstå *frastødende* kræfter, når områder med ladninger med ens fortegn nærmer sig hinanden.

Hvis afstanden mellem to atomer eller molekyler bliver mindre end en vis ligevægtsafstand, vil de frastødende kræfter være dominerende. Omvendt vil atomerne eller molekylerne tiltrække hinanden, hvis afstanden bliver for stor i forhold til en karakteristisk ligevægtsafstand. Det samlede energiindhold er mindst muligt ved ligevægt, hvor de tiltrækkende og frastødende kræfter netop er lige store. Ved påvirkninger der fjerner dem fra ligevægten, vil atomer og molekyler søge at genoprette ligevægten.

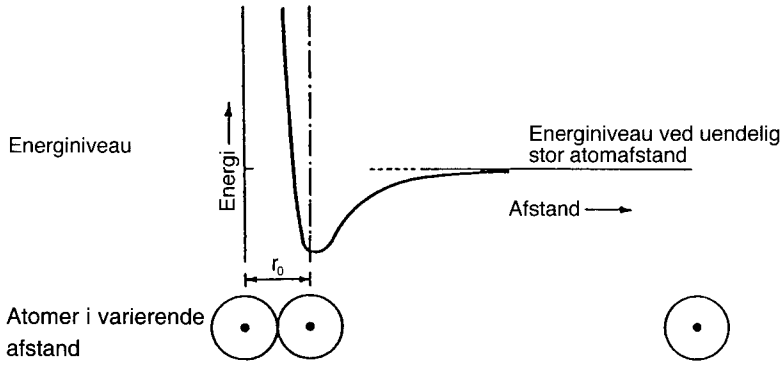
Den *potentielle energi* for to molekyler med den indbyrdes afstand $r$, der gensidigt påvirker hinanden kan udtrykkes ved *Lennard-Jones potentialet* $\Phi$ [J/mol], der er givet som

$$\Phi(r) = \Phi_0\left[\left(\frac{r_0}{r}\right)^{12} - 2\left(\frac{r_0}{r}\right)^{6}\right] \tag{2.3}$$

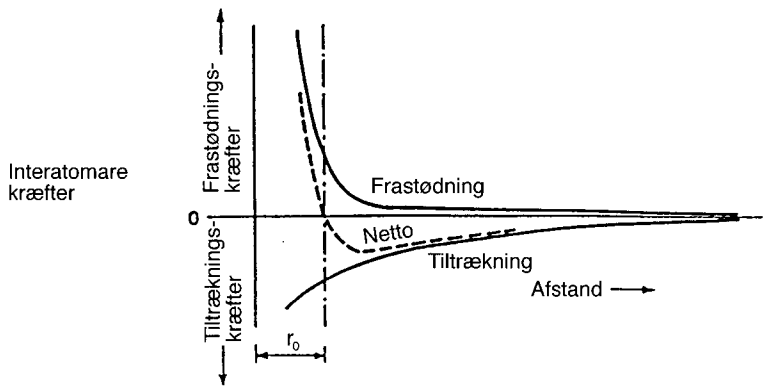
hvor $\Phi_0$ og $r_0$ er konstanter, der er karakteristiske for de enkelte stoffer, se tabel 2.2.

*Tabel 2.2. Lennard-Jones parametre for et antal gasarter.*

| Stof | Gas | $\Phi_0$ [J/mol] | $r_0$ [$10^{-10}$ m] |
|---|---|---|---|
| Helium | He(g) | 85 | 2,87 |
| Hydrogen | $H_2$(g) | 308 | 3,29 |
| Argon | Ar(g) | 996 | 3,82 |
| Nitrogen | $N_2$(g) | 791 | 4,15 |
| Oxygen | $O_2$(g) | 984 | 3,88 |




*Figur 2.2. Lennard-Jones potentialet.*




*Figur 2.3. Lennard-Jones kraften angivet som summen af tiltrækkende og frastødende kræfter.*

I figur 2.2 ses en afbildning af energien udtrykt ved Lennard-Jones potentialet. Det fremgår af figuren og formel (2.3), at $\Phi$ har en mindsteværdi $-\Phi_0$ for $r = r_0$.

Den *kraft F* [N], som de enkelte molekyler påvirker hinanden med, fås ved differentation af (2.3), og dermed fås følgende matematisk udtryk for den intermolekylære kraft:

$$F(r) = \frac{\partial \Phi(r)}{\partial r} = 12\,\frac{\Phi_0}{r_0}\left[\left(\frac{r_0}{r}\right)^{13} - \left(\frac{r_0}{r}\right)^{7}\right] \tag{2.4}$$

Det ses af formlen (2.4), at der er kraftligevægt, d.v.s $F = 0$, for $r = r_0$. Den resulterende kurve er afbildet i figur 2.3.

Det bør bemærkes, som det fremgår af figur 2.2 og 2.3, at de tiltrækkende kræfter er forholdsvis små, og med en begrænset rækkevidde. Omvendt ses de frastødende kræfter, de såkaldte *kernekræfter*, at vokse hurtigt og blive store ved afstande der kun er lidt mindre end $r_0$.

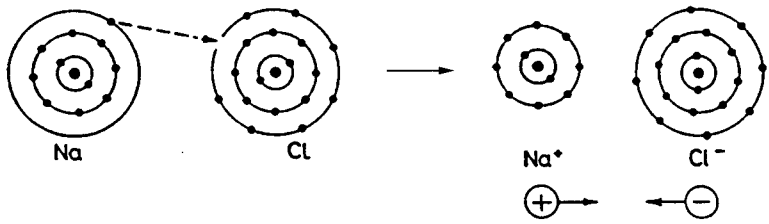
## 2.4 Kemiske bindinger

***Primære kemiske bindinger***

Atomerne danner molekyler og strukturer ved hjælp af *primærbindinger*, hvoraf der findes tre typer: *ionbinding, kovalent binding og metalbinding.*

*Ionbinding*

Når et atom afleverer en eller flere elektroner til et andet atom, dannes der en positiv og en negativ ion. Disse ioner kan sammenholdes af en såkaldt *ionbinding*. Et eksempel på et stof sammenholdt af ionbindinger er stoffet NaCl eller almindelig kogsalt. Kogsalt består af et uendeligt gittersystem, hvor henholdsvis positive Na-ioner og negative Cl-ioner er placeret i hvert sit hjørne af en kubisk struktur. Na-atomet har i sin yderste skal én elektron, som den gerne vil afgive. Cl-atomet mangler en elektron for at have fyldt sin yderste skal, hvorfor den gerne vil modtage en elektron. Figur 2.4 viser det principielle forløb af dannelsen af NaCl.

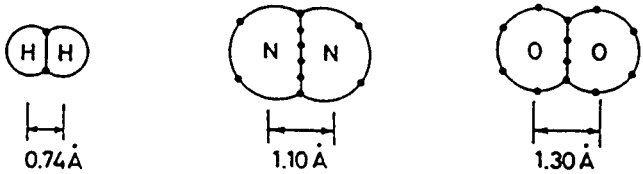



*Figur 2.4. Dannelse af NaCl ved ionisering.*

*Kovalent binding*

En kovalent binding opstår, når to atomer deler 2 eller flere elektroner mellem sig, således at der opstår en ydre elektronskal med et stabilt antal elektroner, typisk 2 eller 8 elektroner.

Da den yderste skal, *valensskallen*, er fælles, kaldes fænomenet ofte for *kovalens*. Mange grundstoffer optræder som kovalente forbindelser: hydrogen, oxygen, nitrogen. Ofte optræder der kovalente bindinger mellem et metal og dets oxidhinde; aluminiumoxid danner en meget tæt kovalent hinde til den rene aluminium. I figur 2.5 er der vist tre eksempler på molekyler dannet ved kovalente bindinger. Stoffer sammenholdt af kovalente bindinger er som regel stærke, men skøre.

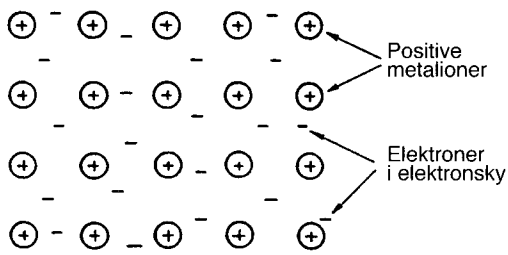



*Figur 2.5. Eksempler på kovalente bindinger. 1Å = $10^{-10}$m.*

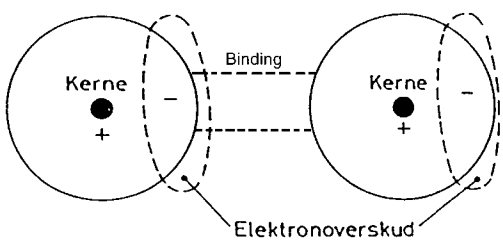
*Metalbinding*

Denne tredie bindingstype optræder udelukkende i metaller. Her er de enkelte elektroner ikke knyttet til bestemte atomer, som ved de to andre bindingstyper. Atomkernerne er placeret i et gittermønster og elektronerne er ikke knyttet til et særligt atom, men findes i form af en elektronsky, fordi de ikke er så kraftigt bundne, som ved ionbindinger og kovalente bindinger.

Metaller leder både varme og den elektriske strøm godt, og det skyldes netop, at elektroner kan bevæge sig meget frit. Endvidere vil ydre kræfter kunne påvirke det gitter, som atomkernerne danner. Der kan ske en forskydning af de enkelte atomplaner. Dette medfører etablering af nye kontakter og er årsagen til, at metaller kan deformeres plastisk. Figur 2.6 viser princippet i metalbindingen.




*Figur 2.6. I metaller danner løsrevne elektroner en negativt ladet elektronsky. Metalbindingen skyldes tiltrækningskræfter mellem de positive metalioner og elektronskyen.*




*Figur 2.7. Van der Waal-binding dannet ved en kortvarig, usymmetrisk fordeling af elektronerne i to tætliggende atomer.*

***Sekundære kemiske bindinger***

Ud over de primære bindinger, findes der en række *sekundære bindinger*, hvoraf *van der Waal-bindinger* og *hydrogenbindinger* er de væsentligste.

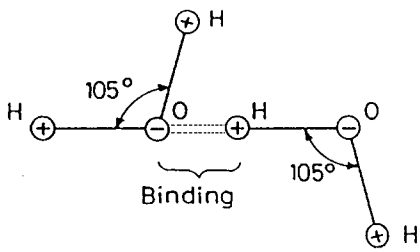
Idet elektronerne bevæger sig rundt om kernen kan der forekomme kortvarige, asymmetrisk fordelinger af elektronerne i atomer, hvorved der opstår en såkaldt *dipol*. Flere dipoler vil tiltrække hinanden, men med en bindingsenergi, som er væsentlig mindre end energierne ved de primære bindinger. Bindingen skabt af sådanne skiftende dipoler kaldes en *van der Waal binding*. På figur 2.7 er en sådan binding illustreret.

Vand, $H_2O$, er et eksempel på et stof, hvori der optræder *hydrogenbindinger*. Vandmolekylet består af to brint-atomer og ét ilt-atom, som er bundet sammen ved kovalent binding. Denne opbygning bevirker, at de tre atomer i

vandmolekylet ikke ligger på en ret linie, men danner en vinkel på 105°, som vist på figur 2.8.

Iltatomet trækker i de elektronpar, som det deler med hver af de to brintatomer, således at bindingen bliver polariseret. Det medfører, at centeret for de positive ladninger og centeret for de negative ladninger ikke er sammenfaldende og der dannes en *permanent dipol*. Denne dipol giver anledning til en binding mellem de forskellige vandmolekylers negative og positive poler, den såkaldte hydrogenbinding, som er illustreret på figur 2.8.

Vandets *dipolmoment* er meget højt, og den dannede hydrogenbinding er så kraftig, at det bevirker, at vand optræder med egenskaber som hos et stof, der har en væsentlig højere molekylmasse end de 18 g/mol, der er molekylmassen for vand. Således er vands kogepunkt meget højt og fordampningsvarmen er ligeledes meget stor i forhold til den lave molekylmasse. Organiske stoffer med den samme molekylmasse som vand, f.eks. ether, vil fordampe allerede ved stuetemperatur og ved en ringe varmetilførsel.




*Figur 2.8. Vandmolekyler sammenholdes ved hydrogenbindinger, som skyldes den usymmetriske placering af brint-atomerne i forhold til ilt-atomet.*

## 2.5 Tilstandsformer

Et stof kan optræde i tre *tilstandsformer*: fast, flydende eller gasformigt. I *fast tilstand* er molekylernes indbyrdes bevægelse begrænsede. De har tendens til at indtage bestemte positioner i forhold til hinanden, hvorved faste strukturer kan opbygges. Stoffets opbygning forventes således at være ens i to områder, selv om de ligger langt fra hinanden, der siges at herske *fjernorden*. I *flydende tilstand* er de sammenbindende kræfter stadig så store, at molekylerne er i indbyrdes kontakt i en bestemt afstand, men kræfterne er så små, at molekylerne kan bevæge sig nogenlunde frit i forhold til hinanden. I mindre områder findes den samme ordning af stoffet, der opretholdes *nærorden*. I en *gas* optræder stoffet som enkeltmolekyler og bindingskræfterne er så små, at molekylerne kan bevæge sig fuldstænding frit i forhold til hinanden. Molekylerne vil samtidig altid fordele sig i et givet volumen. Der hersker *ingen* orden.

Et stof kan skifte tilstandsform. Et fast stof bliver ved *smeltning* flydende, det overgår til at blive en væske. Den dannede væske kan *fordampe* til gas. Omvendt kan gas *kondensere* til væske, og væske kan ved *frysning* eller *størkning* omdannes til et fast stof. Et stof kan også overgå direkte til gasform, dette kaldes *sublimation*.

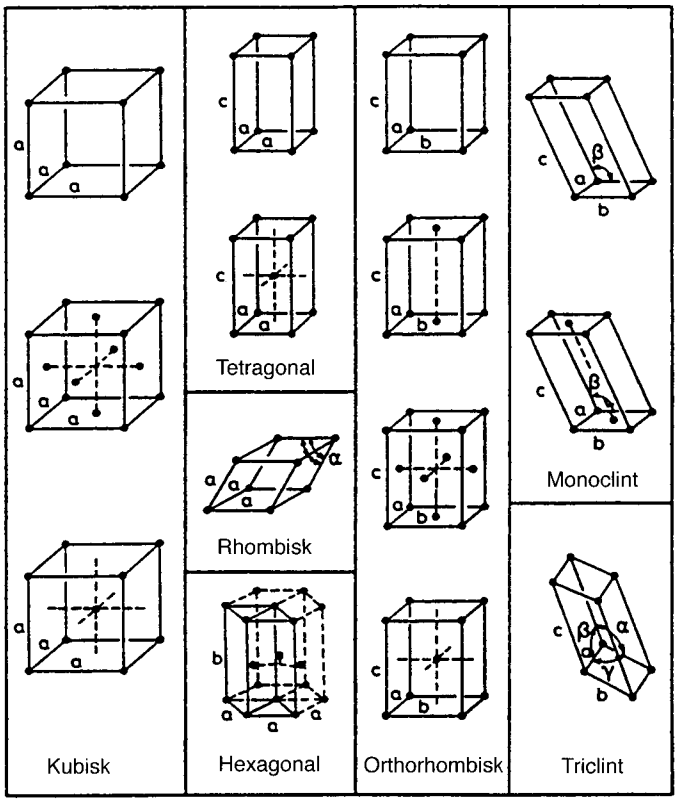
De nævnte tilstandsændringer, *faseomdannelser*, kræver tilførsel eller afgivelse af energi i form af varme eller tryk. Faseomdannelsen sker herved uden at stoffets temperatur ændres.

## 2.6 Strukturer

Faste stoffer kan findes som ordnede, rumligt regelmæssige strukturer, *krystaller*, eller som *ikke-krystallinske stoffer*, hvor der kun hersker nærorden.

### *Krystalstruktur*

Krystallinske stoffer er karakteriseret ved, at ethvert atom er placeret i en gitterstruktur, hvor hvert punkt i gitteret har identiske omgivelser. Det mindste mønster som kan gentages i et gitter kaldes en *gittercelle* eller *elementarcelle*. En række betingelser for dannelsen af sådanne celler skal være opfyldt: elektro-neutralitet, lavest mulig energiindhold og tættest mulig pakning. Det har vist sig, at der findes 14 forskellige teoretisk mulige gitterstrukturer, se figur 2.9, og de er alle fundet eksisterende i naturen.

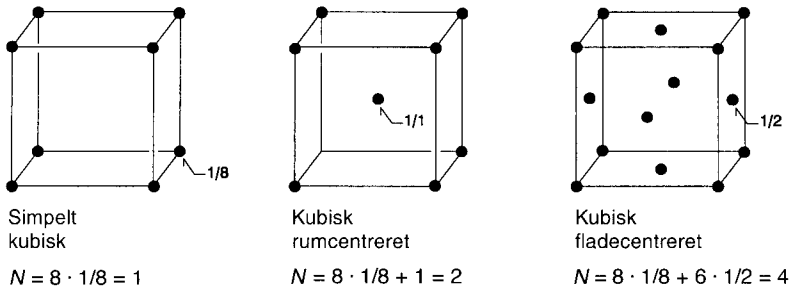



*Figur 2.9. De 14 mulige gitterstrukturer.*

De kendeste og mest udbredte er *simpelt kubiske, kubisk fladecentrerede* og *kubisk rumcentrerede* gitre.

Et eksempel på et simpelt kubisk gitter er ionkrystallen NaCl, hvor Na-ioner og Cl-ioner er placeret skiftevis ved siden af hinanden. Et sådant gitter vil ikke være særlig stabilt ved pludselige påvirkninger, fordi forskydning af atomplanerne bevirker, at positive ioner kommer nærmere hinanden, hvorved de frastøder hinanden og materialet går i stykker. Materialet siges at være *skørt*.

Kubiske rumcentrerede og kubisk fladecentrerede stoffer er velkendte blandt metallerne, og f.eks. jern (Fe) kan ved opvarmning optræde i begge strukturer. De tre kubiske gitre er illustreret i figur 2.10.




*Figur 2.10. De tre simple kubiske gitterceller. Antallet af atomer N i de enkelte celler er angivet.*

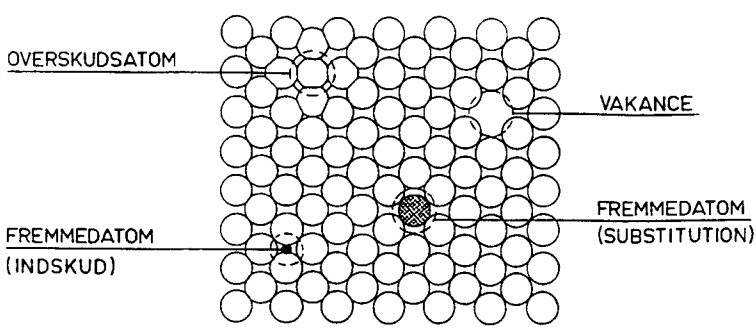
***Gitterfejl***

De praktisk forekommende krystallinske stoffer er ikke ideelt opbygget. De indeholder *gitterfejl*. Disse fejl har stor betydning for materialets styrke, idet styrken meget nemt kan blive reduceret med en faktor 100 eller mere i forhold til det fejlfrie materiale.

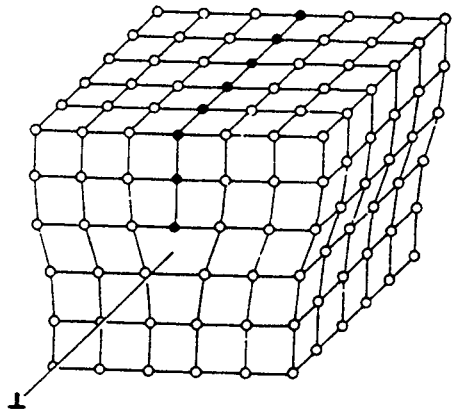
Gitterfejl kan opstå som en *punktfejl*, d.vs. fejl, hvor der er indskudt eller substitueret andre atomer ind i det oprindelige gitter, eller der optræder huller i strukturen, fordi der mangler atomer eller der et atom i overskud. De forskellige fejltyper er illustreret i figur 2.11.

*Liniefejl* (dislokationer) skyldes, at der er indskudt ekstra halvplaner af atomer ind i den oprindelige struktur, som illustreret i figur 2.12 og 2.13.

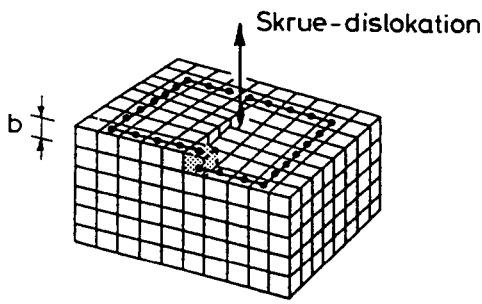
Både punktfejl og liniefejl optræder sammen med andre typer hyppigt i metaller, hvorfor der henvises til en yderligere uddybning af emnet i metallæren.




*Figur 2.11. Eksempler på punktfejl i kubisk krystalgitter.*



*Figur 2.12. Kantdislokation er en liniefejl forårsaget af et indskudt halvplan af atomer.*




*Figur 2.13. Skruedislokation er en liniefejl, som opstår ved at et ekstra atomhalvplan er indskudt.*

***Ikke-krystallinske stoffer***

En række faste stoffer har en opbygning, der er mindre ordnet end de krystallinske stoffers. Ofte indeholder disse såkaldte *ikke-krystallinske* stoffer dog områder med krystallinsk opbygning. Som følge af den mindre ordnede struktur, repræsenterer ikke-krystallinske stoffer generelt et højere energiniveau end krystallinske stoffer med samme sammensætning.

Tidligere benyttede man betegnelsen amorf, for et materiale der ikke var krystallinsk opbygget. Denne betegnelse er afledt fra græsk og betyder "uden form" eller "uden orden". Det er ikke nogen dækkende betegnelse, da der ofte forekommer krystallinske områder i de ikke-krystallinske materialer.

Ikke-krystallinske stoffer kan eksempelvis være opbygget af lange kædemolekyler eller et tredimensionelt netværk af polyedre med kun hjørner fælles.

De ikke-krystallinske stoffer har i modsætning til de krystallinske ikke et veldefineret smeltepunkt. Omdannelsen fra faststof til væske og omvendt sker over et vist temperaturinterval, og det betyder bl.a. at volumenet ikke ændrer sig brat som ved en normal smeltning. Eksempler på ikke-krystallinske stoffer er glas, visse plastmaterialer og andre organiske stoffer.

## 2.7 Disperse systemer

Et materiale, som kun består af ét stof, siges at være *homogent*. Betegnelsen er mest dækkende når det gælder makrostrukturen, og f.eks. stål og glas er homogene i denne betydning. Derimod er det yderst få materialer, der er homogene i mikrostrukturen.

De fleste materialer er opbygget af flere forskellige stoffer. Som eksempler på såkaldt *heterogene* materialer kan nævnes plast, der tilsættes fyldstoffer, beton, som består af cementpasta, sand og sten, og metallegeringer, der er sammensat af et antal rene metaller. De homogene dele af et heterogent materiale kaldes *faser*.

I et tofasesystem kan den ene fase være fintfordelt, *dispergeret*, i den anden fase. Den fintfordelte fase kaldes den *disperse fase* og den sammenhængende fase for *dispersionsmidlet*. I tabel 2.3 er betegnelserne for tofasede systemer anført, og der er nævnt eksempler på disse.

Det er ikke altid, at man i praksis kan skelne klart mellem hvilket stof i et byggemateriale, der er dispersionsmidlet, og hvilket der er den disperse fase. Således kan man hævde, at såvel luften som plasten er dispersionsmidlet i et skumplastprodukt. Tilsvarende kan man i en hærdnende cement ikke klart skelne mellem, hvorvidt det er den faste eller den flydende fase, der er den kontinuerlige.

*Tabel 2.3. Mulige tofasede disperse systemer med betegnelser på disse systemer samt eksempler.*

| Dispersions-middel | | Dispers fase | | |
|---|---|---|---|---|
| | | Fast | Væske | Gas |
| Fast | Betegnelse: | Fast opløsning | Fast emulsion | Fast skum |
| | Eksempel: | Visse legeringer, glasser | Beton under hærdning | Skumplast |
| Væske | Betegnelse: | Suspension | Emulsion | Skum |
| | Eksempel: | Maling inden hærdning/tørring | Maling inden hærdning | Skumplast under produktion |
| Gas | Betegnelse: | Røg | Aerosol | [1] |
| | Eksempel: | Støv i luft | Atmosfæisk tåge | |

[1] Der eksisterer *ikke* disperse systemer, hvor gasarter udgør såvel den disperse fase som dispersionsmidlet. Årsagen hertil er, at de Brown'ske bevægelser mellem gasmolekylerne bevirker en så fin blanding, at systemet efter meget kort tid ophører med at være disperst.

### *Kolloider*

Ved opslemning af partikler i en væske dannes, som omtalt i foregående afsnit, en dispersion. Er der specielt tale om en opslemning af partikler af størrelsen fra 1 nm (1 nm = $10^{-9}$ m) til 1000 nm taler man om et *kolloid*. Dispersionsmidlet er ofte vand, og man taler i dette tilfælde om en *sol*.

Er de opslemmede partikler større end den anførte grænse på 1000 nm, vil der med tiden ske en bundfældning af partiklerne. Er partiklerne mindre end grænsen på 1 nm, nærmer de sig størrelsesordenen for molekyler, og man taler i stedet om opløsninger.

Kolloider er karakteriseret ved, at den indre overflade er meget stor i forhold til massen. Det betyder, at elektrisk tiltrækning, og frastødning, samt overfladekræfter kommer til at spille en meget stor rolle for stoffets opførsel. Man skelner mellem *hydrofile* kolloider, d.v.s partikler, der er vandsugende og *hydrofobe* kolloider, der frastøder vandmolekyler. Af byggeteknisk interesse kan som kolloider nævnes hærdnende cementpasta og leropslemninger.

***Geler***

En *gel* er et kolloidt system, som indeholder væske og fast stof fordelt således, at begge faser er gennemgående. Mange geler er hygroskopiske og de kan optage meget vand, ofte under en stor volumenforøgelse. Når vandet afgives igen, svinder materialet. Velkendte eksempler er træ og hærdnet cement.

## Referencer

Atkins, P.W. (1994)
*Physical chemistry*, 5.ed., Oxford University Press, Oxford.

Freiesleben Hansen, P. (1995)
*Materialefysik for bygningsingeniører. Beregningsgrundlag*, SBI-anvisning 183, Statens Byggeforskningsinstitut, Hørsholm.

Thorup, N. (1993)
*Elementær fysisk kemi*, 4.udg., Polyteknisk Forlag, Lyngby.

Van Vlack, L.H. (1969)
*Elements of materials science*, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., Reading, Massachusetts, USA.

Vogel, C., C. Juhl & E. Maahn (1993)
*Metallurgi for ingeniører*, 6. udg., Akademisk Forlag, København.

Weast, R.C. (ed.) (1983)
*CRC Handbook of chemistry and physics*, CRC Press, Inc., Florida, USA.

## Opgaver

1. Angiv massetal, A og atomnummer, Z for hydrogens 3 isotoper: protium, deuterium og tritium.

2. Atom A1 har et massetal på 17 og indeholder 8 protoner. Atom A2 har nucleontal 17 og kernen indeholder 8 neutroner. Atom A3 har neutrontal 10 og massetal 18.
   Spørgsmål: Hvilke af disse atomer er kemisk ens?

3. Beregn molekylmassen af gips (calciumsulfat, dihydrat): $CaSO_4{,}2H_2O$.

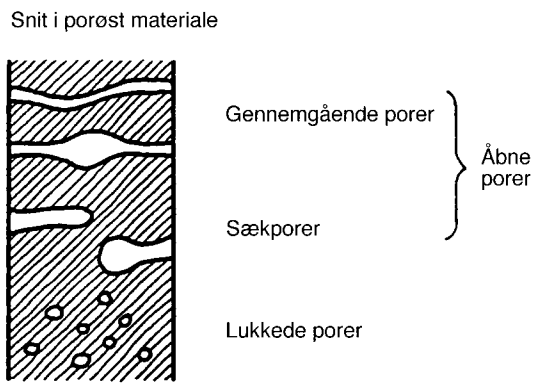
4. Den relative molekylmasse af vand er 18,02 g/mol.
   Spørgsmål: Beregn antallet af molekyler i 1 g vand.

5. Middeldiameteren af et cementkorn er ca. $10^{-5}$ m og kornet vejer ca. $1{,}6 \cdot 10^{-9}$ g.
   Spørgsmål: Angiv den omtrentlige masse af 1 mol cementkorn!

# 3
# Porøsitet og densitet

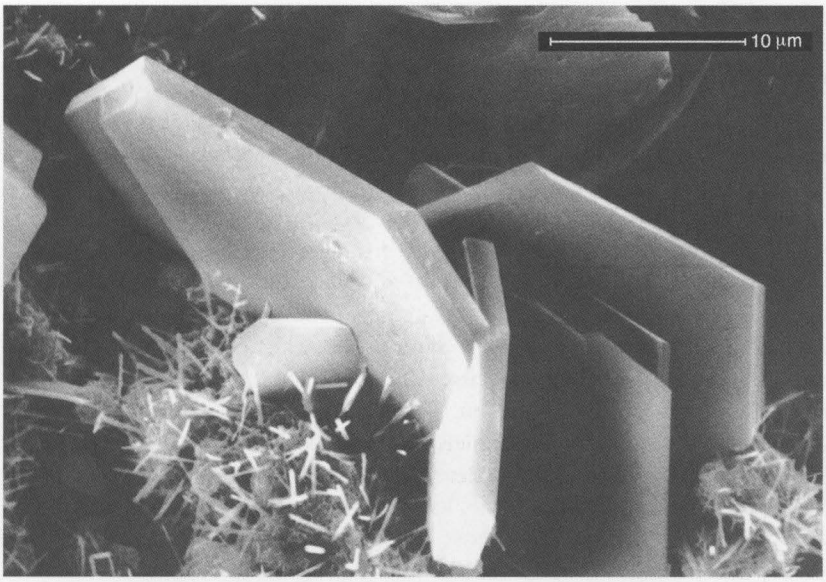
I praksis skelner man normalt mellem *porøse* materialer, f.eks. tegl og beton, og *kompakte* materialer, f.eks. plast og metaller. Ved nærmere betragtning kommer man imidlertid frem til, at også de kompakte materialer er mere eller mindre porøse. Atomerne ligger ikke perfekt tæt lejret, men har "huller" i strukturen, der kan være fremkaldt af gitterfejl, jf. figur 2.11 - 2.13. Hos metallerne forekommer mikrosprækker mellem krystaller eller luftblærer stammende fra gasudvikling under størkningen. Plast er heller ikke kompakt, da luftarter og vanddamp har mulighed for at slippe imellem kædemolekylerne.

Hulrum af en vis størrelse i et materiale betegnes i materiallæren som *porer*. Porerne kan være luftfyldte eller mere eller mindre vandfyldte. Porer, der er frit tilgængelige fra omgivelserne, kaldes *åbne porer*. Åbne porer kan optræde som gennemgående porer eller som sækporer af forskellig størrelse. Porerne kan også ligge inde i selve materialet uden forbindelse med omverdenen, og benævnes så *lukkede porer*. De omtalte poretyper er vist på figur 3.1. Det skal dog pointeres at der er tale om en stærkt idealiseret fremstilling af porebegrebet. Mere realistiske poretyper og -former er vist på figur 3.2 og 3.3.

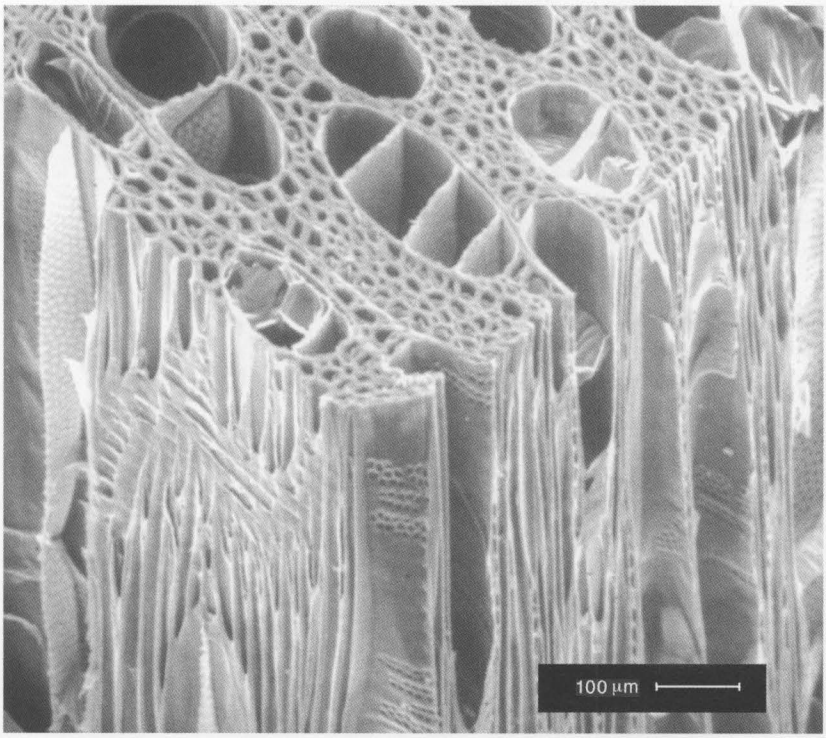



*Figur 3.1. Poretyper i et idealiseret, porøst materiale.*

Grænsen mellem porer og huller i et materiale sættes i praksis ofte ved et tværmål på et par mm, således at vi over denne grænse bruger betegnelsen huller. Til de mindste porer hører kapillarporer og gelporer, men grænsen nedefter mod hulrum i atomar størrelse, f.eks. vacancer som er vist på figur 2.11, er usikker.




*Figur 3.2. Nåleformede krystaller af hydratiseret cement og pladeformede calciumhydroxidkrystaller. SEM. (SEM = Scanning Electron Microscope).*




*Figur 3.3. Cellestruktur i træarten poppel.*

De fleste egenskaber hos porøse materialer hænger sammen med porestruktur og porøsitet. Porestrukturen kan karakteriseres ved *poremængde*, *porefordeling* og *poreform*. Jo større poremængden, porøsiteten, er, des lavere er styrken. Omvendt forøges varmeisoleringsevnen, inden for visse grænser, med øget porøsitet. Endvidere er gennemtrængeligheden for f.eks. luft og vand porøsitetsafhængig, frostbestandigheden og vandopsugningshastigheden ligeledes. I disse tilfælde er det ikke alene porøsitetens størrelse, der er afgørende, men også fordelingen af porerne (mange små eller få store) samt formen (gennemgående, ikke-gennemgående eller lukkede porer).

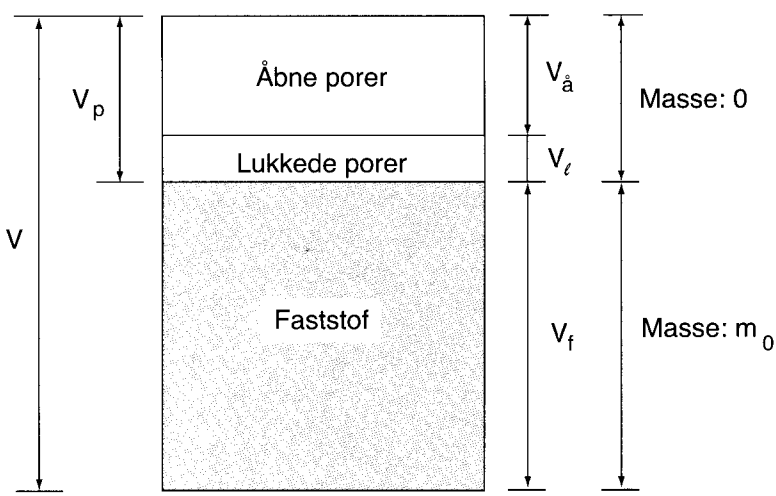
## 3.1 Definitioner

*Porøsitet* er defineret som et porevolumen i forhold til et totalvolumen. *Densiteten* er forholdet mellem en masse og et volumen. De to parametre er imidlertid ikke entydige. De må defineres i forhold til hvilke faser som medregnes. I den forbindelse gøres der brug af følgende størrelser, som er illustreret på figur 3.4:

$V_f$, *absolut faststofvolumen*, er volumenet af det faste stof uden porer,
$V_{tf} = V_f + V_\ell$, *tilsyneladende faststofvolumen*, er volumenet af fast stof inklusiv de lukkede porer,

$V = V_f + V_\ell + V_{å}$, *totalvolumen*, er volumenet af det faste stof, de lukkede og de åbne porer,

$m_0$, *tørmassen*, er massen af det tørre materiale, dvs. efter udtørring til konstant masse ved 105°C eller over silicagel ved 20°C.




*Figur 3.4. Skematisk fremstilling af faserne i et tørt, porøst materiale.*

***Porøsitetsmål***

Et materiales *åbne porøsitet* $p_{å}$ [-] er defineret som volumenet af de åbne porer $V_{å}$ [m$^3$] i forhold til materialets samlede volumen $V$ [m$^3$]:

$$p_{å} = \frac{V_{å}}{V} \tag{3.1}$$

Den *totale porøsitet* $p_{tot}$ [-] er defineret som det totale porevolumen $V_p$, dvs. volumen af åbne og lukkede porer, i forhold til det samlede volumen $V$:

$$p_{tot} = p = \frac{V_p}{V} = \frac{V_{å} + V_{\ell}}{V} \tag{3.2}$$

I praksis indføres ofte, som angivet ovenfor, betegnelsen $p$ som erstatning for $p_{tot}$.

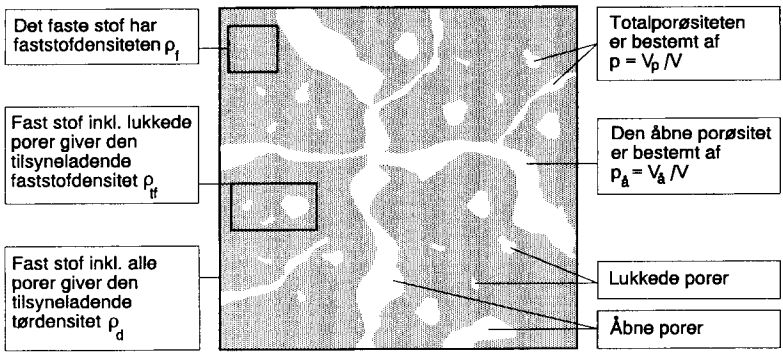
I forbindelse med løse, kornede materialer som sand og jord kan det være hensigtsmæssigt at benytte *poretallet e* [-] til beskrivelse af indholdet af porer. Poretallet er defineret som det samlede porevolumen $V_p$ i forhold til volumenet af det faste stof $V_f$:

$$e = \frac{V_p}{V_f} = \frac{V_p}{V - V_p} \tag{3.3}$$

idet der i sidste udtryk er gjort brug af sammenhængen $V = V_p + V_f$.

***Densiteter***

Et materiales densitet er grundlæggende defineret som materialets masse pr. volumenenhed i den foreliggende tilstand. Massen af et porøst materiale kan være en tør masse eller en masse med vand i de åbne porer. Tilsvarende kan man ved beregning af volumenet vælge at tage hensyn til volumenet af såvel de lukkede som de åbne porer. Derfor er man nødt til at præcisere den fugttilstand materialet har, når man beregner en densitet.




*Figur 3.5. Densiteter og porøsiteter hos et fast stof med åbne og lukkede porer.*