

Kompendium / Høgskolen i Gjøvik, 2013 nr. 1

Materialvalg

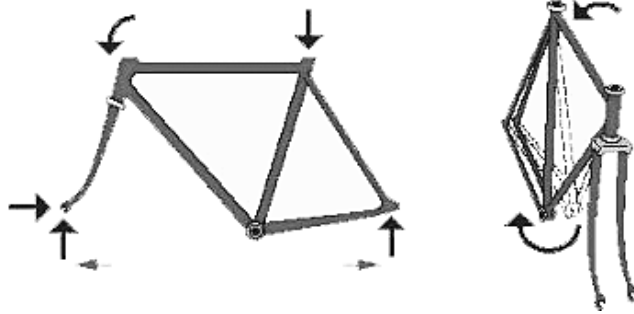
Henning Johansen



Gjøvik 2013

ISSN: 1503-3708

Materialvalg



	side
INNHOLD	2
FORORD	3
1 INNLEDNING	4
1.1 Livet var enklere før!	4
1.2 Møt fremtiden med ”integrert produktutvikling”	5
1.3 Materialer og miljøvern	7
1.3.1 Miljøvennlighet som produktparameter	8
1.3.2 Energi	9
1.3.3 Materialer - ressurser og reserver	10
1.4 Hva kan vi gjøre?	10
2 MATERIALDATA	11
2.1 Kategorier av materialdata	13
2.1.1 Kvantifiserbare egenskaper	13
2.1.2 Variable egenskaper	13
2.1.3 Vanskelige definerbare egenskaper (”Fuzzy” - egenskaper)	13
2.1.4 Indekserte (relative) data	14
3 METODER FOR MATERIALVALG	14
3.1 Generelle metoder for materialvalg	14
3.1.1 Intuitivt valg	14
3.1.2 Samme som før	15
3.1.3 Overlate beslutninger til andre	15
3.2 Semi-systematisk materialvalg	17
3.2.1 Det første som holder	17
3.2.2 Sammenlignbare problemstillinger	17
3.2.3 Problemløsende materialvalg	17
3.3 Systematisk materialvalg	19
3.4 Metoder for optimalisering. (Trinn V)	21
3.4.1 Geometrisk sammenligning	21
3.4.2 Kumulative avvik	23
3.4.3 Bruk av merittparametere	25
4 VEDLEGG	34
Vedlegg 1 Oppsummering	34
Vedlegg 2 Informasjon om egenskaper	35
5 REFERANSER	42

FORORD

Dette kompendium er beregnet på personer som er fortrolig med grunnleggende materiallære og som ønsker å få en grunnleggende innføring i materialvalg. Det er skrevet ut i fra en serie med forelesninger i Materiallære ved Høgskolen i Gjøvik. Det er lagt stor vekt på gode illustrasjoner og kortfattet tekst.

Som mål har dette kompendium å gi en kort innføring om materialvalg. Hvordan valg av materialer foregår prinsippielt manuelt og nå mest ved hjelp av datateknologi og materialdatabaser. Også hvordan vi på en enkel måte også kan benytte enkle verktøy som regneark.

Valg av materialer henger bl.a. sammen med type produkt, hvilke prosesser som skal benyttes i produksjonen, energiforbruk, miljøvern og muligheter for å resirkulere materialene på en enkel og lite resurskrevende måte.

Vi ser på typer av materialdata vi kan velge ut fra. Noen egenskaper kan gis av konkrete tallverdier fra testing/prøving, for eksempel flytegrense 235N/mm^2 . Disse tallverdiene er enkle å forholde seg til og bruke til sammenligning. Vi må være klar over at disse verdiene er fremkommet ved standardiserte tester som er utført på en bestemt måte, på en bestemt prøvestav ved en bestemt temperatur og i et bestemt miljø. En virkelig konstruksjonsdetalj vil se helt annerledes ut og bli bruk under helt andre omstendigheter.

Andre egenskaper er vanskeligere å beskrive, som utseende, sveisbarhet, korrosjonsbestandighet og lignende. Her benytter vi for eksempel en skala fra 1 til 5, hvor 5 er best.

Videre ser vi på forskjellige metoder for materialvalg. Generelle, Semi-systematiske og systematiske metoder. Ved valg av metode øker behovet for å kunne benytte datateknologi og databaser som inneholder opplysninger/egenskaper om mange forskjellige materialer. Størst oppmerksomhet er viet systematisk materialvalg og metoder for optimalisering.

Det er bl.a. vist noen enkle eksempler på bruk av merittparametre.

Vedlegget inneholder en oppsummering og noe informasjon om materialegenskaper.

Forfatteren var tidligere ansatt som bl.a. seksjonsleder ved Teknologisk Institutt, avd. for materialteknologi i Oslo, og er nå førsteamanuensis i materialteknologi ved Høgskolen i Gjøvik.

1 INNLEDNING

”Riktig materiale på rett plass”

Å velge et materiale for en gitt komponent eller konstruksjon kan være et vanskelig og innviklet arbeid. Å velge det ”beste” materialet kan synes å være umulig. Å velge ”feil” materiale kan derimot være kostbart.

Lite gjennomtenkt materialvalg kan føre til unødvendig høye tilvirkningskostnader, mens galt materialvalg kan føre til reklamasjon på produkter som ikke holder mål. I tillegg er det innført lov om produktansvar, som innebærer at produsenten kan bli erstatningsansvarlig for skade som skyldes feil ved materiale, materialbruk eller manglende informasjon om hvordan materialet/produktet brukes.

I flere land er det forsøkt å få en oversikt over hva manglende materialkompetanse koster i form av tapt brutto nasjonalprodukt basert på blant annet havari, forkortet produktlevetid, høye vedlikeholdskostnader, produksjonstap, erstatningskrav for skader og opprydding etter utslipp.

Omregnet til norske forhold kan det antas årlige tap på omtrent 12 milliarder kroner for materialbrudd og 10 milliarder kroner for korrosjon. Sammenligner vi med forsvarsbudsjettet ruster vi ned for mer enn vi ruster opp! Kanskje det mest oppsiktsvekkende er at 15 - 25 % av disse beløp trolig kunne vært spart ved bruk av velkjent teknologi.

1.1 Livet var enklere før!

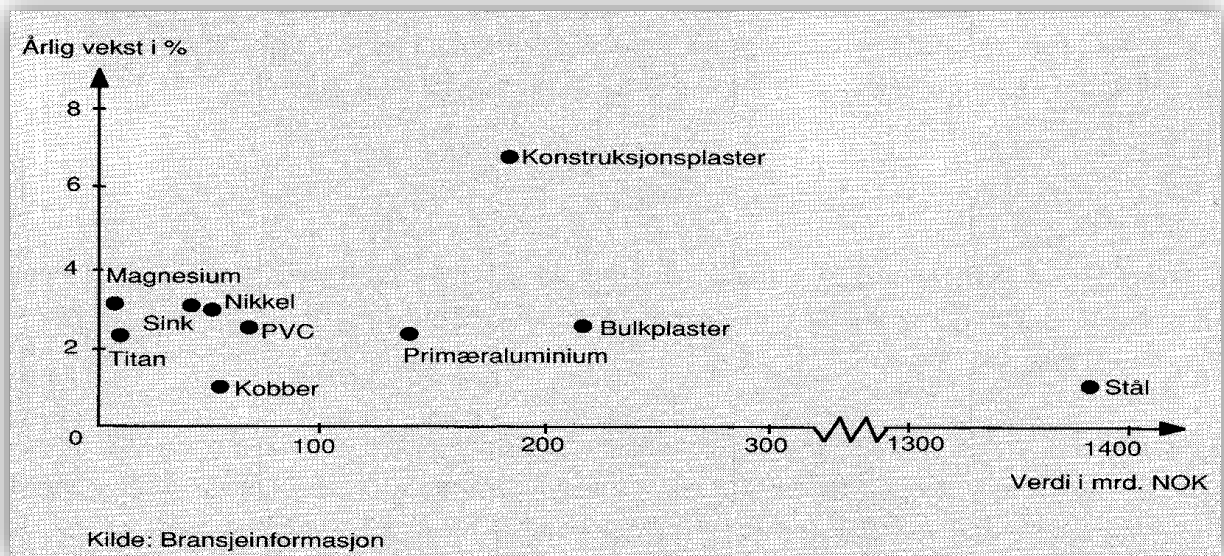
Tidligere epoker i menneskets historie er betegnet etter hvilke materialer som ble brukt - steinalderen, bronsealderen og jernalderen. Disse epokene illustrerer godt utviklingen på materialsiden.

I dag snakker vi om ”nye materialer”. Flere av dagens materialer har utspring fra nettopp disse eldgamle tradisjoner. Et eksempel er dagens komposittmaterialer med keram som grunnmasse. I Egypt for noen tusen år siden ble det brukt materialer som var sammensatt av både strå og leire.

Det som preger dagens materialbilde er den voldsomme økningen i antallet av kommersielt tilgjengelige materialer. Utviklingen har hovedsaklig skjedd de to siste generasjonene.

Figur 1.1 viser forbruk og årlig vekst i materialmarkedet i den vestlige verden. I dag er det vanskelig å fastslå hvor mange materialer med ulike bruksegenskaper (kvaliteter) som er på markedet. Det er praktisk umulig å skaffe seg en detaljert kjennskap til alle.

Livet var kanskje lettere da materialvalget kunne baseres på god kjennskap til en håndfull materialer. Hvis vi i dag ønsker å foreta et optimalt valg og utnytte nye materialer og tilvirkningsmetoder, er vi nødt til å gjøre dette uten å ha 10 - 20 års erfaring. Vi må foreta valg på grunnlag av materialelegenskapsdata og annen informasjon.



Figur 1.1

Forbruk og vekst i materialmarkedet i den vestlige verden. (1)

Det oppstår nye utfordringer. Hvor skal vi finne det vi vil vite, og hvordan kan vi sortere alle opplysningene uten å drukne i dem?

I tillegg til at det er svært mange materialer tilgjengelig på markedet, har de nye materialene også en tendens til å være utviklet med mer spesialiserte egenskaper. De er ofte skreddersydde til spesifikke anvendelsesområder. Et vellykket valg er dermed avhengig av en detaljert forståelse både av fordelene og begrensningene ved hvert materiale. Vi kan trekke to slutninger av denne observasjonen:

- 1) Det blir nødvendig å vurdere flere materialegenskaper for å skille mellom ulike materialer. Dette øker ytterligere den informasjonsmengde vi må håndtere. Materialvalget blir i enda større grad en informasjonsteknologisk oppgave.
- 2) Vi kommer ikke bort fra at vi likevel må ha en del kunnskaper om materialene. Selv om vi ikke kan lære detaljene om spesifikke materialer, må vi vite såpass mye at vi kan vurdere f.eks. hvilke egenskaper som er relevante eller viktigst i et gitt tilfelle.

Noen krav til fremtidige materialvelgere blir:

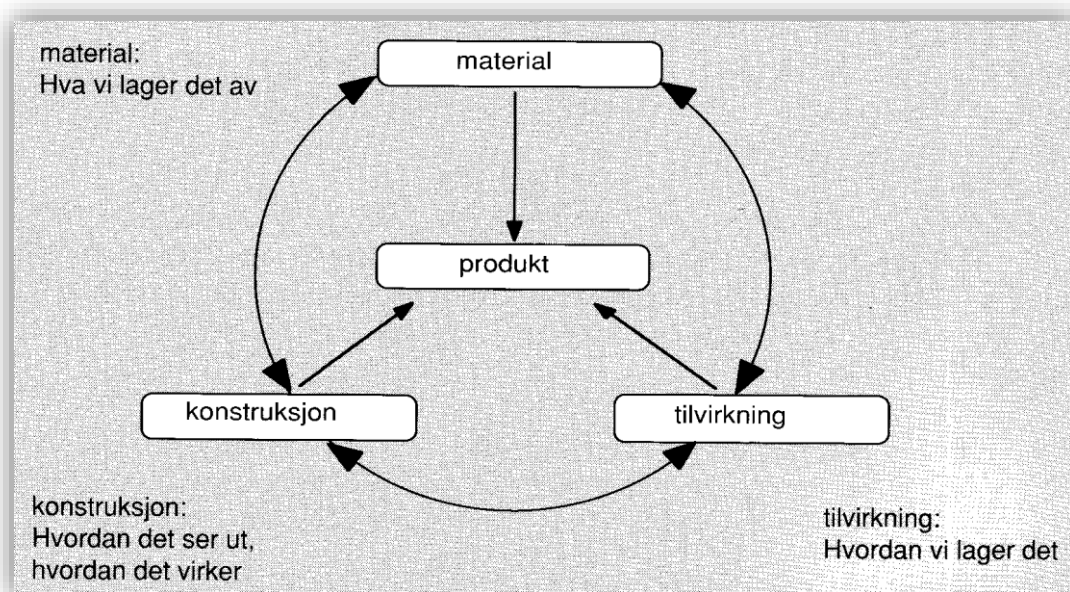
- Inneha basiskunnskap om materialene og deres egenskaper, inklusive påvirkning av tilvirkningsprosesser og konstruktiv utforming.
- Ha lett tilgang til velorganiserte, kritisk vurderte og relevante materialdata og supplerende kunnskaper.
- Disponere metodikk for effektivt å søke gjennom og isolere aktuelle materialer til et spesifikt formål.

1.2 Møt fremtiden med ”integreert produktutvikling”

Undersøkelser utført hos norsk verkstedindustri viser tendenser mot bruk av et stadig større utvalg av materialer. Tradisjonelle konstruksjonsstål blir erstattet med rustfrie stål, høyfast stål, aluminium, plaster og kompositter. Størst økning er forventet for de tre siste.

Hvis vi også tar med høyytelses keramer, ser vi at et felles trekk for disse nye materialene er en stadig kortere vei mellom råmaterialet og det ferdige produkt. Stål, som vanligvis kjøpes som halvfabrikat (plate, stang eller rør), krever videre bearbeiding for å få frem et produkt. Plast, kompositter og keramer kjøpes som råstoff, sammenblandes og tilvirkes til et ferdig produkt med liten eller ingen etterbehandling.

Materialenes egenskaper blir således en funksjon av produktets utforming og fremtaksprosessen. Samspillet mellom materialene, utformingen og produksjonsteknikken er vesentlige momenter vi må ta hensyn til ved produktutviklingen. Design, materialvalg og valg av produksjonsprosess må vurderes helhetlig for å oppnå et vellykket produkt, se Figur 1.2.



Figur 1.2
Integrert produktutvikling. (1)

Det snakkes i dag om to måter å gjennomføre produktutviklingsprosjekter på. Den mest vanlige måten har vært og er fortsatt å benytte et sekvensielt forløp. Det kalles også stafettstrategi. Den andre måten er integrert produktutvikling hvor det fokuseres sterkt på samvirke mellom aktivitetene. Dette kalles parallellstrategi.

Den integrerte produktutviklingen går ut på at samtlige hovedtyper av virksomheter (forretning/økonomi - konstruksjon - produksjon - marked) ved fremtaging av nye produkter skjer tidmessig parallelt, men med varierende aktivitetsgrad. Med dette etableres samarbeid også i tidligere faser, og i rett tid. Prosjektmedarbeidere i en avdeling skal ha et nært systematisk samarbeid med prosjektmedarbeidere fra andre avdelinger. Denne måten gir stor mulighet til å forkorte fremtagingstiden og passer i alminnelighet moderne utviklingskrav bedre.

1.3 Materialer og miljøvern

Selv om miljøskader og forurensninger har fulgt menneskets utvikling helt fra urtiden, er det kanskje først i moderne tid at det har blitt oppfattet som en trussel mot hele jorden.

Problemene begynte å fange større oppmerksomhet på 1960-tallet. Romaklubben presenterte i 1972 globale modeller for forurensning, matforsyning og befolkningsvekst i *Limits to Growth*. Her spås det ragnarok rundt år 2050 dersom ingenting blir gjort med utviklingen. Etter dette er det utgitt en stor mengde med miljø- og miljøvernslitteratur. Et eksempel er *Brundtland-rapporten*. Den viser at miljø er blitt en del av den internasjonale politikken. Miljøpolitikken er blitt seriøs, med regelmessig dekning i media og i ulike tidsskrifter. Problemene begynner nå å bli tatt alvorlig.

Kanskje det virkelige problemet med miljøvern er at det er uhyre komplisert og globalt. Nasjonal politikk som mangler helhetsvurdering og ikke tar hensyn til fagkunnskap, kan virke mot sin hensikt. Der miljøtiltak kommer i konflikt med andre interesser, vil det oppstå vanskelige prioriteringskonflikter mellom helse/sikkerhet og arbeidsplasser/økonomi.

Det publiseres veiledning om miljøvennlig handel. Igjen er det lett å være på defensiven når produkter som har vært populære i flere år, plutselig dukker opp på en liste over produkter vi ikke vil ha. En positiv merking vil bli et sterkt salgsargument.

Det er innført en ordning med miljømerking i Norge, Figur 1.3. Det samme skjer i Norden og Europa. Svanemerket er det offisielle nordiske miljømerket, og er en frivillig ordning. Svanen gir deg som forbruker mulighet til å velge de mest helse- og miljømessig trygge produktene. Svanemerket stiller miljøkrav til produkter i hele livssyklusen – fra produksjon, i bruk og når det ender opp som avfall. Det finnes flere tusen Svanemerkede produkter innenfor nesten 50 produkt- og tjenestoområder f.eks. barnesjampo, bleier, batterier, tøyvaskemidler, rengjøringsmidler, hoteller, matbutikker m.m. Blomstmerket er det felles europeiske miljømerket. Blomsten gir deg som forbruker mulighet for å velge de mest helse- og miljømessig trygge produktene. Blomsten er opprettet av EU-kommisjonen, og er et tilsvarende frivillig miljømerke som Svanen. Blomsten gjelder i hele Europa. Blomsten håndteres i Norge av stiftelsen Miljømerking. Her i landet finnes det Blomstermerkede produkter og tjenester innenfor blant annet barneklær, maling, tekstiler og hoteller.

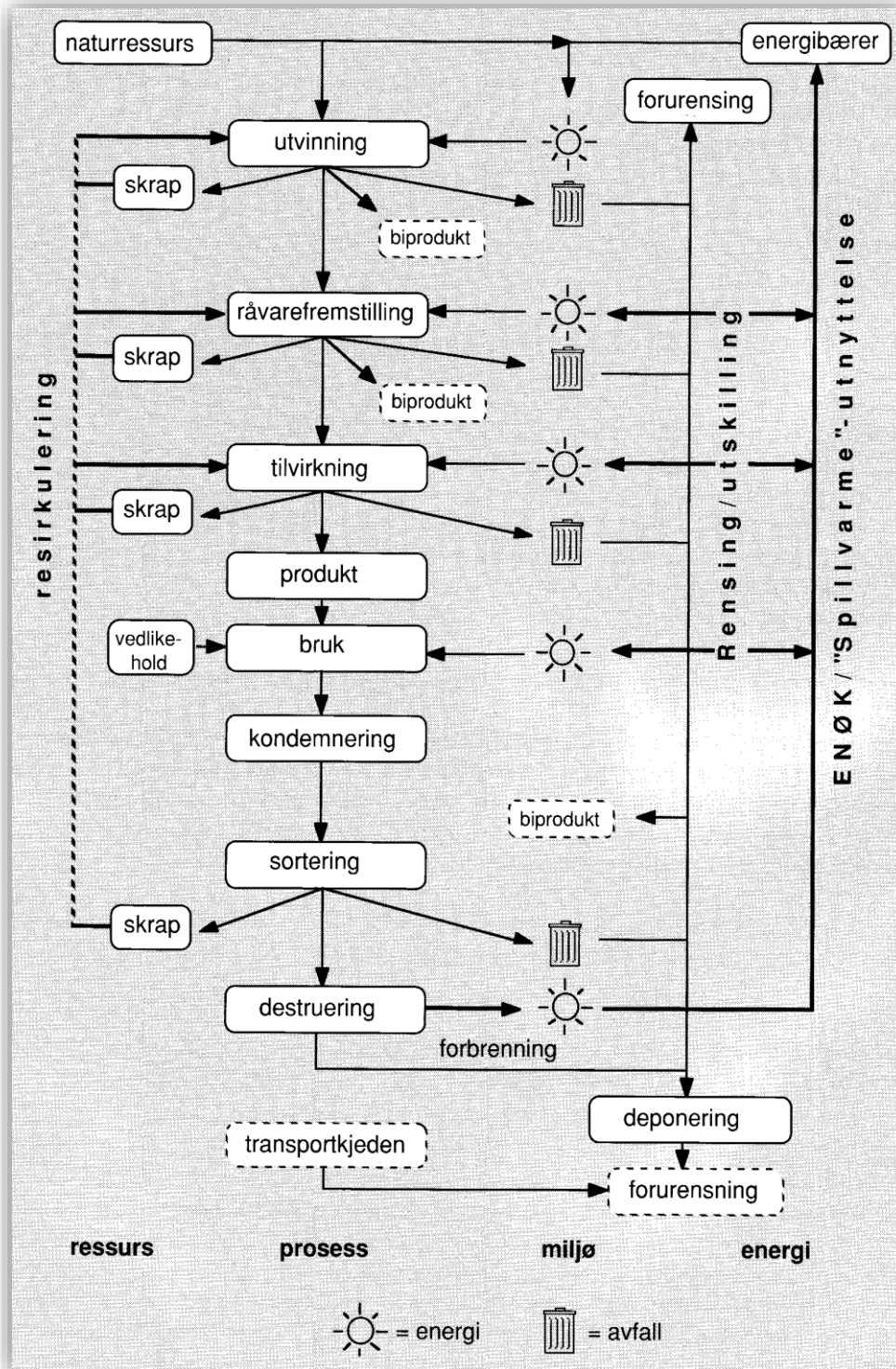
Det er usikkert hvilke kriterier som skal brukes for å vurdere produktene, men dersom vurderingene gjøres på en objektiv og innsiktsfull måte, er det et klart incitament til å satse på produkter hvor miljøvennlighet tas med i produktspesifikasjonen. Dette er i stor grad en materialteknisk utfordring.



Figur 1.3
Miljømerking. Den grønne svane og Blomstmerket. (1)

1.3.1 Miljøvennlighet som produktparameter

Når vi tar beslutninger om hvordan produktet skal se ut, hvilke materialer og tilvirkningsprosesser som skal brukes, er vi også ansvarlige for produktets miljøvennlighet fra utvinningen av råvare til destruering/gjenvinning, slik som forsøkt illustrert i Figur 1.4. Innføring av miljømerking tilsier at vi må være forberedt på å ta miljøvennligheten med i produktspesifikasjonen sammen med de tekniske og økonomiske kravene.

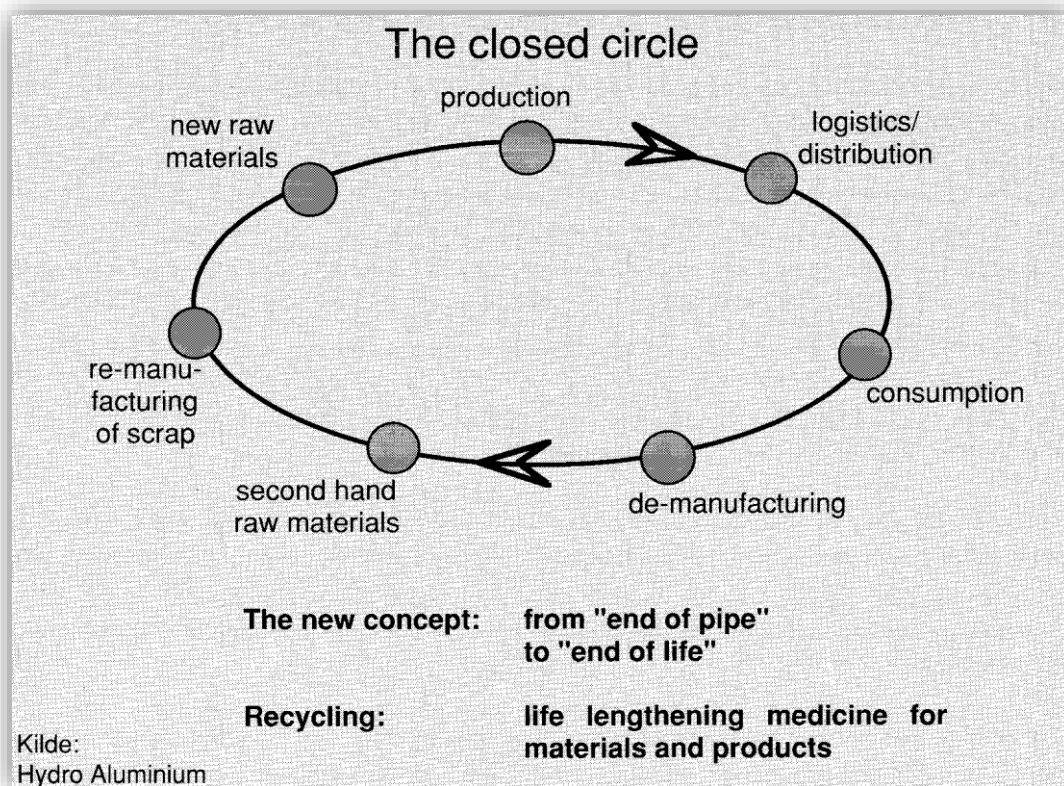


Figur 1.4

Miljøimplikasjoner ved materialvalg. Forenklet livssyklus for materialproduktene. (1)

Vi må også prøve å tilrettelegge nye produkter for senere resirkulasjon eller ”demanufacturing”.

Figur 1.5 viser det nye konseptet, fra ”End of pipe til End of life”.



Figur 1.5
Resirkulering. (1)

Inntil det foreligger en form for miljøvennlighetsparameter for materialer og prosesser, er det vanskelig å finne ut hva som egentlig er riktig. I mellomtiden kan vi se på noen miljømessige aspekter ved materialvalg og materialforbruk - som en slags bevisstgjøring.

1.3.2 Energi

Globale forurensninger er i høy grad knyttet til energiforbruket. Hovedmengden av verdens energiforbruk går til utvinning og videreforedling av materialer.

Det går mye energi til å utvinne aluminium, mens omsmelting for gjenbruk kun krever 5 % av denne energien. Polyetylen kan i likhet med andre plastmaterialer brennes, og den frigjorte varmen kan brukes. Flere plaster kan brukes om igjen. Sement derimot, er lite energikrevende å produsere, men svært vanskelig å fjerne og gjøre noe med etter bruk. Varmforsinking av stål vil beskytte mot korrosjon og øke levetiden, men fordi sink er gift i en stålsmelte, vil dette samtidig vanskeliggjøre resirkulering av materialet.

Det er derfor viktig å vite hva som skal skje med materialet etter bruk, før vi kan velge det mest energioptimale materialet. Dette er svært avhengig av de rådende forhold med hensyn til innsamling og gjenvinning/forbrenning av de enkelte materialer.

Økonomisk sett er det også interessant å tenke over hvordan endringer i energiprisene vil slå ut på markedsprisene til de ulike materialene. Særlig når vi tenker på at jordolje brukes som energikilde for utvinningen av de fleste materialer.

1.3.3 Materialer - ressurser og reserver

Jordens overflate består av ca. 8 % aluminium. Metallet er krevende å få frigjort fra stabil form (oksid). Kobber er et annet materiale som er blitt utvunnet i mer enn 1000 år. De mest konsentrerte forekomstene er omtrent oppbrukt, slik at vi stadig må bruke mer energi for å utvinne fra mindre konsentrert malm. Det er betenkelig at flere vanlige metaller begynner å bli oppbrukt i løpet av nåværende og neste generasjons levetid. Med mindre det blir vesentlige forbedringer i utvinningsteknologien, slik at flere ressurser kan betraktes som reserver, kan vi se frem til en markant økning i både pris og skrapverdi for disse metallene. Utvinning fra havbunnen kan bli overkommelig i fremtiden.

Med hensyn til keramer, er råstoffene til stede i ubegrensede mengder. Utnyttelsen er i dag begrenset av komplisert fremstillingsteknologi.

Polymerene omfatter en interessant materialgruppe. Hovedmengden av plastene bygger på jordolje (eller naturgass) som råstoff. Selv om olje/gass reservene er av begrenset omfang, brukes kun en liten del (4 - 5 %) til plastmaterialer, og dette er kanskje en av de bedre miljømessige anvendelser av oljen. Kull er en alternativ råstoffkilde til plastmaterialer. Hittil er kull stort sett blitt brukt til brensel og i metallurgiske prosesser.

De første polymerene var basert på naturlige høymolekylære stoffer, slike som cellulose, ostestoff og saft fra gummitreet. Av disse fikk vi de halvsyntetiske polymerene celluloid, kaseinplast og naturgummi. I dag er hovedtyngden av polymerene (plast og gummi) helt syntetiske. Det betyr at de er bygget opp av enkle, lavmolekylære stoffer. I prinsippet er det mulig å fremstille ulike polymerer fra fornybare kilder, som bl.a. kan være trær, planter og alger. Noen nyere biologisk nedbrytbare plaster er basert på stivelse. Bruk av bioteknologi kan kanskje fjerne avhengigheten av olje for disse materialene?

1.4 Hva kan vi gjøre?

På materialvalgsiden kan vi vurdere ut fra flere kriterier, bl.a.:

- 1) Prioritere mer tilgjengelige materialer (større ressursgrunnlag) fremfor ett som holder på å bli oppbrukt.
- 2) Vurdere totalt energiforbruk, samt total forurensning ved valg av materiale. Dette bør omfatte alt fra utvinningsstadiet og til alternativt gjenbruk.
- 3) Optimalisere materialforbruket, slik at vi ikke bruker materialer som er bedre enn nødvendig. Alternativt kan slitasjebestandighet oppnås ved å belegge produktet fremfor å bruke massivt slitasjebestandig materiale.
- 4) Vektreduksjon. Redusere transport- og energikostnader.
- 5) Lengre produktlevetid. Design og materialvalg som medfører at produktet varer lengre i sin helhet, og/eller at produktet lett kan demonteres for utskifting av enkelte komponenter fremfor å bli kassert. Oftest krever dette bedre forståelse for prosesser som bryter ned materialet.

- 6) Økt sikkerhet/pålitelighet hos produkter hvis feil/svikt vil føre til miljøproblemer. Mer effektiv forbrenning krever høyere temperaturbestandighet, bedre korrosjonsbestandighet og bedre termisk isolasjon.
- 7) Vurdering av produktets endelige slutt. Ved forbrenning, hvilke stoffer blir igjen og hvilken innvirkning har disse på miljøet? Kan materialene sorteres og brukes om igjen?
- 8) Merking av produkter med materialdata, slik at brukerne kan vurdere hvordan produktene skal destrueres (varefakta for materialer). Merking etter gruppering ut fra gjenvinningsmetoder og blandbarhet.

2 MATERIALDATA

Spørsmål: **Hva mener vi når vi snakker om egenskapene til et materiale?**

Mange ingeniører tenker sikkert først på mekaniske egenskaper som fasthet og flytegrense. En strekkfasthet på 300N/mm^2 er lett å forholde seg til, og er også lettvisst å samle opp i bøker og databaser. Disse dataene blir følgelig brukt til dimensjonering av komponenter og konstruksjoner.

For de vanligste materialene finnes det en stor mengde med erfaringsdata. Ved å bruke disse, slipper vi å vurdere dislokasjonsbevegelser, glideplanorientering og andre materialvitenskapelige fenomen hver gang vi f.eks. skal bruke flytegrensen ved dimensjonering.

Ikke alle materialer og deres egenskaper er så samarbeidsvillige. Hos polymerer er egenskapene oftest tidsavhengige, og hos keramer er statistisk behandling påkrevd.

Det er ikke materialene som gjør feil, det er ingeniørene / designerne.

Mekaniske egenskaper kan tallfestes, eller presenteres grafisk. Problemene oppstår når vi skal beskrive materialenes evne til å ha et pent utseende. Spesielt overfor forbrukerne gir dette et bedre salgsargument enn materialets styrke.

Når vi sammenligner materialene, er det mange forutsetninger som blir tatt for gitt. Strekkfastheten er for eksempel angitt ved romtemperatur og den er målt etter en klart definert prøvemethode. Både tverrsnitt og lengde kan påvirke måltallet.

I tillegg er det flere materialeegenskaper som vi kun kan karakterisere som enten ”svært bra”, ”bra”, ”dårlig” eller ”svært dårlig”. Denne type løst beskrivende egenskaper gir fort problemer når vi skal bruke numeriske verdier. Vi skal se litt nærmere på ulike kategorier av materialdata.

Spørsmål: For å gi en presis beskrivelse av et materiale, hvor mange og hvilke egenskaper må vi spesifisere?

Tabell 2.1 gir en systematisk grovinndeling av noen overordnede materialegenskaper. Hver av de overordnede egenskapene avdekker igjen flere spesifikke egenskaper. Vær oppmerksom på at denne tabellen er begrenset i detaljeringsnivået.

Eksempelvis vil en mekanisk/fysisk egenskap være fasthet. Mer detaljert kan fasthet være både flytegrense og bruddfasthet. Begge disse kan igjen være både i trykk og strekk. I tillegg til det som er listet opp i tabellen, bør vi spesifisere både statisk og dynamisk belastning, temperaturer, tøyningshastigheter, prøvestørrelse og målemetode.

Det er ikke uvanlig at et materiale beskrives ved dets sammensetning, struktur og produksjonsmetode.

Selv om det er en avhengighet mellom struktur, sammensetning og egenskaper, er kunnskapen til å forutsi egenskaper ut fra struktur og sammensetning hittil veldig begrenset.

Dessuten er vi avhengig av å spesifisere ønskede egenskaper for det ferdige produktet, hvor materialegenskapene kan avvike fra det vi måler på en prøvestav.

Mekaniske/fysiske egenskaper	Tetthet, fasthet, stivhet, duktilitet, siging, hardhet, seighet, demping,
Termiske	Smeltepunkt, mykningspunkt, kokepunkt, spesifikk varme, varmeledningsevne, utvidelse, ...
Elektriske	Gjennomslagsfasthet, tapsfaktor, ledningsevne, dielektrisk fasthet, supraleddingsevne, ...
Magnetiske	Permanens, ledningsevne, curiepunkt, ...
Kjemiske	Løsningssevne, korrosjon, oksidasjon, UV-lys, ioniserende stråling, ...
Optiske	Refraksjonsindeks, absorpsjon, emisjon, refleksjon, ...
Estetiske	Utseende, glans, farge, feel, overflatetekstur, ...
Overflate	Lakkering, maling, polering, metalliske belegg, keramiske belegg, slitasje, ...
Bearbeiding	Skjæring, valsing, ekstrudering, støping, pressing, sliping, bøyning, knekking, ...
Akustiske	Demping, absorpsjon, ...
Sammenføyning	Sveising, lodding, liming, nagling, falsing, ...
Økonomiske	Materialkostnad, håndtering, tilgjengelighet, bearbeidbarhet, ...
Sikkerhet	Bruddform, feil-/sviktsannsynlighet, varme/kalde overflater, brann, giftighet, ...
Miljø	Energiforbruk, biprodukter, ressursgrunnlag, skrap, gjenvinning, destrueringsprodukter, ...

Tabell 2.1

Noen overordnede sett av materialegenskaper. Hvert stikkord skjuler flere spesifikke egenskaper.

2.1 Kategorier av materialdata

2.1.1 Kvantifiserbare egenskaper

De kvantifiserbare materialeegenskaper er de minst brysomme. Det er snakk om egenskaper med godt innarbeidede og tallfestede verdier. Eksempler kan være tetthet, flytegrense, hardhet, smeltepunkt, varmeutvidelseskoeffisient, slagseighet, strekkfasthet og bruddseighet.

De kvantifiserbare egenskapene finnes enten i produktspesifikasjonen, materialdatabaser, tekniske håndbøker, faglitteratur, konstruksjonsbøker eller i særskilte oppslagsverk.

Imidlertid er det viktig å være klar over hva disse dataene egentlig forteller:

De er målinger av materialets respons på en ytre påvirkning.

Eksempelvis kan dataene være et resultat fra en test på en prøvestav. Omstendigheter som temperatur, deformasjonshastighet, prøvestørrelse, produksjonsmetode og varmebehandling påvirker resultatene. Verdiene som til slutt oppgis er ofte gjennomsnitt av flere målinger, og standardavviket er normalt ikke oppgitt.

Alternativt kan verdiene oppgis som garanterte minimumsverdier, typiske verdier eller middelverdier. Slike ubevisste forutsetninger kan være en felle, spesielt hvis vi skal sammenligne data fra ulike kilder.

2.1.2 Variable egenskaper

Enkelte egenskaper varierer. Råvareprisene går opp og ned på verdensmarkedet, men de kan også være lokalt påvirket av blant annet rabattordninger og tilgjengelighet.

Det kan være aktuelt å endre materialvalget avhengig av disse faktorene. Estetiske egenskaper kan være motepregede, og krever forsiktig innarbeiding i markedet. Bruk av plast i bilindustrien viser dette.

Dårlige erfaringer med et materiale kan skape generelle motforestillinger. Dette kan gå utover det rasjonelle, på grunnlag av for liten viten. I offshoresammenheng anses titan for å være altfor kostbart, mens plast ikke kan brukes fordi det brenner. Det kan ta tid før fordommene forsvinner, selv om de spesifikke problemene er løst. Opinionen kan også være med på å påvirke materialvalget ved å kreve mer miljøvennlige løsninger.

Vi kan også finne egenskaper som endres permanent. Et materiale som har vært kjent for å være svært vanskelig å bearbeide, kan bli lettere å bearbeide ved innføring av ny bearbeidingsteknikk.

2.1.3 Vanskelige definerbare egenskaper (Fuzzy - egenskaper)

Flere egenskaper er svært vanskelig å definere. Å vurdere om utseende til et produkt etter et malingsstrøk er matt eller silkematt, beror på subjektive inntrykk. Selv om det finnes flere testmetoder for måling av glans, oppfatter vi ikke klart overgangen matt - silkematt.

Det samme gjelder ved vurdering av sveiser. Røntgenbildene gir informasjon om mengde av slagginneslutninger i sveisen. Selv om Det norske Veritas (DnV) setter grenser for hvor mange slagginneslutninger som kan tåles, skal vi ikke ta dette helt bokstavelig. Vi bør ikke konkludere ukritisk med at materialet holder hvis det er en slagginneslutning mindre enn grensen.

Egenskaper av denne art er svært vanskelig å kvantifisere. En person har evnen til å vurdere opplysninger fra flere ulike hold, snakke med fagfolk, spesialister og kolleger, for deretter å komme frem til en oppfatning om materialet kan anvendes. Slike egenskaper forutsetter kunnskap hos konstruktøren og forståelse for hvordan materialene oppfører seg i forskjellige situasjoner.

2.1.4 Indekserte (relative) data

For å gjøre fuzzy-dataene mer håndterlige, kan vi gradere materialeegenskapene på en vilkårlig skala. Eksempelvis kan vi gradere sveisbarhet fra 1 - 10, med 1 som umulig, 2 som svært vanskelig og opp til 10 meget lettvent.

Slik indeksering er utsatt for en del kritikk, spesielt når den er tatt inn i en database. Etter hvert vil vi sikkert finne en bedre måte å gradere de mer vriene egenskapene på. I mellomtiden er indekseringen kun en veiledning, og verdiene kan brukes for de som ønsker det.

3 METODER FOR MATERIALVALG

Når vi skal velge et materiale eller en kombinasjon av materialer til et bestemt produkt, er det gjerne de mekaniske egenskapene som vies mest oppmerksomhet. Fremstillingsprosessen er som regel tillagt mindre vekt, og den konstruktive utforming betraktes som gitt.

Vi må understreke behovet for å vurdere utforming, materialvalg og produksjon samtidig for hele produktets livssyklus.

Materialvalg er kanskje bare en liten del av konstruktørens virksomhet, men faktum er at når beslutningen er truffet, er det umiddelbart bundet kostnader til produksjonen.

3.1 Generelle metoder for materialvalg

Uansett hvorfor eller hvordan vi velger materialer, er det viktig at vi ikke er for konservative. Vi må finne en riktig balanse mellom gjennomprøvd teknologi og banebrytende teknologi. Det er ingen grunn til å gjøre de samme feilene som våre besteforeldre og foreldre gjorde.

3.1.1 Intuitivt valg

Det er nokså vanlig at materialvalget baseres på konstruktørens ekspertise. Dette gjelder spesielt hos mindre bedrifter og for etablerte produkter. Endelig valg blir tatt på skjønn. Fordelen er at samme person står for både materialvalg og design. Han har god kjennskap til bedriftens maskinpark og bearbeidingsmetoder, slik at produktutviklingen ses på som en helhet. Dessuten er dette lite ressurskrevende.

Ulempen, eller risikoen, er at beslutninger tas på grunnlag av et begrenset utvalg av kjente materialer som konstruktøren kjenner. Hvis vedkommende ikke holder seg oppdatert, er det vanskelig for bedriften å utnytte nyvinninger både i tilvirkningsmetoder og materialer. Et intuitivt materialvalg på disse premisser er avhengig av erfaringer bygget opp over flere år. I de aller fleste tilfeller er erfaringsbakgrunnen stål. Overgang til andre materialtyper kan bli mislykket uten tilstrekkelig innsikt.

3.1.2 Samme som før

En begrunnelse for at et bestemt materiale er valgt for en gitt komponent, er at det passer og alltid har vært brukt. Det er ressurskrevende å finne et bedre materiale, og derfor faller valget ofte på "The same procedure as last year". Denne begrunnelsen viser liten refleksjon over materialbruken.

Så lenge bedriften har et produkt som virker, har en samtidig utelukket muligheten for å lage det billigere og bedre. Bedriften kan da tape terreng i en stadig sterkere konkurransesituasjon.

Selv med de best etablerte og vellykkede produkter er det en fordel å vurdere alternative materialer, produksjonsmetoder og utformingsløsninger med visse mellomrom. Om ikke annet for å bekrefte at produktet fortsatt er optimalisert i forhold til dagens teknologi.

Fordelene ved å satse på "The same procedure as last year" er bl.a.:

- Få tekniske overraskelser, mye relevant erfaring.
- Produksjonsutstyrt er tilpasset produktet.
- Ikke noe ressursforbruk ved å vurdere andre alternativer og prototyper.
- Kvalitetssikringssystemet, godkjennelsesrutinene er godt innarbeidet.
- Reservedelsbeholdningen er enkel å kontrollere.

Ulempene:

- Forutsetningene for det opprinnelige materialvalg kan endres. Lovverket, reglene, opinionen og konkurrerende produkter kan brått endre seg.
- Eventuelle små endringer, akkumulert over lengre tid, tilsier at materiale, design og produksjonsmetode bør revideres.

- Tidligere forutsetninger som bl.a. arbeidskostnader, slitasje på maskineri og relative materialkostnader er endret slik at det økonomiske grunnlaget for produksjonen må revideres.
- Produktet blir foreldet ved at nye materialer og nye bearbeidingsteknikker ikke blir utnyttet.
- Markedet stiller større krav til f.eks. levetid og pris.

3.1.3 Overlate beslutninger til andre

Det å overlate beslutningene til andre, er en lettvinnt måte å unngå å ta beslutninger på. Det er ingen tilfredsstillende situasjon på lengre sikt.

På neste side er det gitt tre eksempler som illustrerer hvordan eksterne krefter påvirker materialvalget.

EKSEMPEL 1:

KUNDEN BESTEMMER

Underleverandøren bruker materialer og produksjonsmetoder som oppdragsgiveren spesifiserer til bestilt produkt eller komponent. Underleverandøren /produsenten aksepterer dette uten videre.

Underleverandøren gjør bare det han har fått beskjed om. Vil ikke en bedrift som er i stand til å foreslå alternative løsninger overfor kunden ha et betydelig konkurransefortrinn? Vil ikke dette bli ytterligere forsterket hvis løsningen bedriften legger frem også reduserer kostnadsnivået?

Det har forekommet at kunden har levert både materiale og sveiseprosedyrer som senere har vist seg ikke å kunne brukes. I dette tilfellet var det kunden som måtte bære ansvaret. Slik kunne skje for noen år siden. Praksis har endret seg slik at underleverandørene nå selv må stå for detaljer ved leveransen. Nå tar de mer ansvar for materialvalget.

EKSEMPEL 2:

LEVERANDØREN BESTEMMER

Bedriften søker assistanse hos leverandører og materialprodusenter. En anbefaling fra leverandøren vil derfor ofte bli bestemmende for materialvalget.

Servicen hos grossistene er varierende. Det samme gjelder utsalgsprisen på lagerførte materialer. Det gjelder å forhøre seg flere steder. Det er ofte bedre å søke råd hos materialprodusentene.

Vi må også stille krav til leverandørene. Produktene skal leveres til avtalt tid og pris. Materialkvaliteten bør være konsistent. Hver leveranse til samme standard bør ha tilnærmet like egenskaper, slik at bearbeidingsprosessene er repeterbare.

For å stille slike krav forutsettes det at vi kan spesifisere våre behov klart og utvetydig. Dette innebærer at vi tar større ansvar for beslutningene.

EKSEMPEL 3:**STANDARDER / SPESIFIKASJONER BESTEMMER**

Stadig flere produktkategorier forutsettes å tilfredsstillere en standard /spesifikasjon.

EU's indre marked har ført til en kraftig økning av europeiske standarder, som også blir Norsk standard. Hensikten er å øke konkurransen. Like standarder over hele Europa vil kunne gi skalaeffekter i produksjon og lavere kostnader. Enkelte standarder er veldig snevre med hensyn til materialer, tilvirkning og utforming.

Ofte angis et fåtall godkjente materialer. For å få solgt et produkt, må disse reglene imøtekommes, selv om det skulle foreligge en bedre teknisk løsning.

Det er ikke uvanlig at det tar veldig lang tid for et nytt materiale aksepteres, og det krever mye innsats for å få til slike endringer i nasjonale og internasjonale standarder.

Det finnes også bedriftsinterne regler som er utarbeidet av selve bedriften. Særlig innenfor oljevirkningsomheten er dette utbredt. I slike tilfeller er det enklere å komme i kontakt med de personene som utarbeider reglene. Dermed er det også lettere å få vurdert endringene.

3.2 Semi-systematisk materialvalg

Under semi-systematisk materialvalg skal vi se på tre metoder hvor problemløsningene forenkles ved bruk av et egnet materialdatabasesystem (MDB).

3.2.1 Det første som holder

Dette er en rask og enkel måte å finne et materiale som holder. Vi utfører et søk i en MDB for å finne de materialene som tilfredsstillere minimumskravene til de viktigste materialegenskapene. Den resulterende listen inneholder få materialer, hvor de øverste på listen er like bra som de andre. Det er bare å plukke ut det materialet som ønskes ut fra de prioriterte egenskapene.

Dette er en enkel prosess, som er rask og lite arbeidskrevende.

Noen ulemper:

- Det er lett å overse andre egenskaper som er viktig for materialet
- Det er lite sannsynlig at materialet passer optimalt. Det er svært ugunstig å ha et materiale med en flytegrense på 500N/mm^2 , hvis minstekravet er 100N/mm^2 .

Denne metoden er kanskje akseptabel hvis det lages 1 - 2 produktenheter. Det forutsettes at det valgte materialet kontrolleres nøye med hensyn på egenskaper som ikke ble tatt med i det opprinnelige søket.

3.2.2 Sammenlignbare problemstillinger

Noen ganger når vi skal vurdere materialvalget for en komponent som er en del av en større konstruksjon, vil flere av materialkravene være felles. Det er da nærliggende å vente at samme materiale kan brukes. Det går raskt å sjekke at materialet holder til den nye anvendelsen.

Et alternativ til denne fremgangsmetoden er å se på hva konkurrentene bruker av materialer.

I noen MDB kan vi søke på anvendelsesområde med enkle stikkord. Dette kan med fordel brukes for å få tips om aktuelle materialer. Vi kan for eksempel søke på "ship" med tanke på materialanvendelse i det maritime miljø.

Metodikken her er enkel og gir et godt grunnlag for forslag til videre bearbeiding. Det er lite sannsynlig at materialene som er plukket ut, vil gi et optimalt valg uten en grundig evaluering. For øvrig er det en forutsetning at den originale løsningen vi kopierer er bra. Vesentlige faktorer kan ha blitt oversett.

3.2.3 Problemløsende materialvalg

Det hender at vi må revurdere materialvalget hos et etablert produkt. Årsakene kan bl.a. være:

- Utilfredsstillende ytelse
- Feil/svikt har oppstått som følge av brist, brudd eller slitasje
- Bedret produktivitet etterlyses
- Nye eller endrede regler og lovverk, som åpner eller stenger for muligheter
- Ønske om et bredere produktutvalg
- Flere/bedre funksjoner til samme pris
- Flere funksjoner integrert i en komponent

Når små endringer må foretas for å løse et bestemt problem, kan vi søke løsninger ved hjelp av en systematisk analyse. Dette gjøres enklest med hjelp i en materialdatabase. En skisse til fremgangsmåte er:

- Identifiser de presise materialeegenskaper som er kritiske, og som derfor må forbedres. Det kan for eksempel dreie seg om formbarhet og maksimum brukstemperatur.
- Ta frem den siste materialspesifikasjonen og øke kravene til de kritiske egenskapene.
- Søke etter alternative materialer som tilfredsstillende de nye kravene.

Denne fremgangsmåten krever god innsikt både i å identifisere den virkelige årsaken til problemet, og å uttrykke et korrektiv i form av et materialkrav.

Det kan være at noen små endringer i den konstruktive utformingen, eller kanskje i produksjonsprosessen, er påkrevd fremfor materialendringer. Typiske utformingsfeil oppstår gjerne når vi tar i bruk et nytt materiale i et etablert produkt bare ved å kopiere utformingen fra det tradisjonelle materialet. En vannkranarmatur tradisjonelt laget av messing, kan ikke uten videre erstattes av en polymer med samme dimensjoner og gjengestørrelser.

Selv når vi bare skal foreta små endringer i materialvalget, må vi huske at ingen materialer er helt like. Hvis vi søker etter et materiale hvor en egenskap forbedres, må vi regne med at minst en annen blir endret. Vi må ikke overse slike bivirkninger.

I noen tilfeller holder det ikke med små endringer. Det er noen egenskaper som er vanskelig å komme forbi ved å endre design på produktet. Maksimum brukstemperatur kan kreve radikale endringer i materialvalget, og det kan bli snakk om å måtte gå over til en annen materialgruppe for å tilfredsstille krav til anvendelse i høytemperaturområder. Jo større endringen er, desto større er sannsynligheten for at hele produktet må revurderes innenfor design, tilvirkning og materiale.

3.3 Systematisk materialvalg

I det etterfølgende er det vist et forslag til hvordan materialvalgsprosessen kan systematiseres. Denne metoden benyttes for å sette opp et lite utvalg av alternative materialer. Listen kan danne grunnlaget for en optimalisering av materialvalget. Metoden brukes for å komme frem til "Det Beste Materialet".

Figur 3.1 viser flyten i prosessen. Ennå må de to første leddene gjøres manuelt. Søking og utsortering kan effektiviseres ved bruk av en eller flere materialdatabaser.



Figur 3.1
Prosess ved systematisk materialvalg. (1)

Prosesseren er anvendelig også uten datateknikk. Tilgang til datamaskin gjør det realistisk å håndtere flere tusen materialer fra ulike klasser og grupper. Det er en veldig tidkrevende oppgave å gjøre det samme med håndbøker og datablader. I praksis er det bortimot umulig.

Det er viktig å understreke at en systematisk materialvalgsprosess er et hjelpemiddel som skal kombineres med menneskelig kreativitet, intuisjon og sunn fornuft!

Trinn I: Definisjon av funksjonskrav

Det første som defineres er produktets funksjon. Det gjelder å finne ut hva produktet skal gjøre, hvordan det skal virke, hvor det skal brukes, hvilke krefter og belastninger som må tilfredsstilles og hvilke standarder som må imøtekommes. Målsettingen her er å beskrive produktet uten å binde seg til noe bestemt materiale eller detaljert konstruktiv utforming.

Hvor grundig og åpensinnnet man kan være, vil i seg selv avhenge av produktet. Erfaringsmessig er det ofte vanskelig å unngå å lage skisser som ubevisst er påvirket av forutinntatte ideer om både materiale og produksjonsmåte. Det er viktig å regne med at helt ulike produksjonsmetoder kan være aktuelle.

Kravene på dette stadiet kan ha en ordlyd som er veldig generell. Det er vanlig at vi snakker om at produktet enten må tåle et støt, må tåle å stå ute et bestemt antall år, eller må kunne brukes av barn.

Når vi er noenlunde tilfreds med en liste over produktets ønskede funksjonskrav, kan vi forsøke å overføre disse til generelle materialkrav.

Trinn II: Spesifisere generelle materialkrav

Målsettingen med dette trinnet er å spesifisere karakteristiske trekk for det ideelle materialet, samtidig som vi ønsker å sile ut en overkommelig liste over aktuelle materialer eller materialgrupper.

Her må vi i unngå å spesifisere altfor detaljert, og heller arbeide for å eliminere grupper fremfor individuelle legeringer. Eksempelvis vil funksjonskravet ”må være gjennomsliktig” eliminere nesten alle metallene og omtrent halvparten av polymerene og keramene.

Overgangen mellom funksjonskrav og materialkrav er vanskelig. Det er ikke noe klart skille, og vi må regne med å gå frem og tilbake flere ganger. Problemet her er å identifisere uklare beskrivelser og karakteristika, å tallfeste ukvantifiserte verdier. Dette er en prosess som bygger på erfaring.

Men det er også noen fallgruver her:

- Materialkravene hos det ferdige produktet kan være i konflikt med materialkravene som ønskes under produksjonen. Det kan således være nødvendig å lage to sett med krav, ”materialet under produksjon” og ”materialet i bruk”.
- Produktfunksjonen kan ofte oppnås ved hjelp både av materialet og design, slik at disse må vurderes sammen. Eksempel, kravet til en stiv bjelke kan imøtekommes enten ved å velge et stivt materiale med høy E-modul, eller ved å endre bjelkens tverrsnittsgeometri (høyt areal tregghetsmoment, I). Poenget er at det er bjelkens stivhet som er viktig og ikke materialets.
- Det kan være viktig å skille mellom overflatefunksjoner og massive egenskaper. Det stilles ulike krav til materialet hos et produkt som skal være gjennomvarmt, og ett som skal utsettes for strålevarme. Det er også viktig å være oppmerksom på hva som kan oppnås ved å belegge et materiale.
- Det forekommer at funksjonskravene i virkeligheten er tatt fra tidligere brukte materialer og dermed undergraver ideen om åpensindighet. Stål som materiale har vært godt anvendt i lange tider. Mange er åpenbart påvirket av dette, og forventer at et produkt fremstilt av et annet materiale, har akkurat de samme egenskaper som stål. Ved en sammenligning er det da lett å konkludere med at stål er det eneste riktige materialet å bruke.

I dag arbeides det med datasystemer for å hjelpe med disse overgangene. For det meste benyttes kunstig intelligens som reproducerer resonnementet fra erfarne eksperter. Teknologien eksisterer, men krever fortsatt forskning og videreutvikling før den virkelig kan kommersialiseres.

MDB er til stor hjelp i de neste trinnene av materialvalgprosessen. Denne prosessen starter etter at vi nå har utarbeidet en liste over generelle materialkrav.

Trinn III: Siling

Med utgangspunkt i vår liste over generelle materialkrav, kan vi sile ut aktuelle materialgrupper eller undergrupper. Normalt vil dette avgrense hvor i databasen vi skal søke, og det kan gjøres uten å detaljspesifisere egenskapsgrensene. De begrensende faktorer varierer med omstendighetene. Det vi søker er overordnede krav som kan eliminere store mengder av materialer. Målet er altså å sitte igjen med et håndterlig utvalg for en mer detaljert analyse.

Trinn IV: Spesifikke materialkrav

Nå er vi endelig kommet til det stadium hvor vi må utarbeide detaljerte krav til materialene. Eksempelvis blir det snakk om å tallfestede minimums- og maksimumsverdier for styrke, brukstemperatur, formfylling og korrosjonsbestandighet. Deretter kan vi sette opp en søkeprofil som går på individuelle kvaliteter. Det kan også være snakk om å spesifisere bestemte produsenter under dette punktet.

Resultatet skal være en liste over noen materialer som kan brukes i produktet. Dersom listen blir for lang, er det lurt å stille snevrere krav til materialegenskapene, og gå gjennom prosessen en gang til.

Når listen er av høvelig lengde, er det likevel ikke slutt på prosessen. Vi er vanligvis interessert i å vite hva som er det beste materialer.

Trinn V: Optimalisering av materialvalget

Formålet med optimaliseringen er å finne det beste materialet, eller de beste materialene for det aktuelle produktet. Med utgangspunkt i en liste over materialer som kan brukes, må vi nå ta hensyn til bl.a. dimensjoner, utforming, priser og tetthet. For å finne det mest ideelle materiale, er lavest kostnad ofte et sentralt optimaliseringsmål.

3.4 Metoder for optimalisering. (Trinn V)

Det finnes flere metoder for å optimalisere, og vi skal se nærmere på noen av disse. De fleste har eksistert før datamaskinen ble tatt i bruk, og naturlig nok kan vi finne en eller flere av disse implementert på dagens datasystemer.

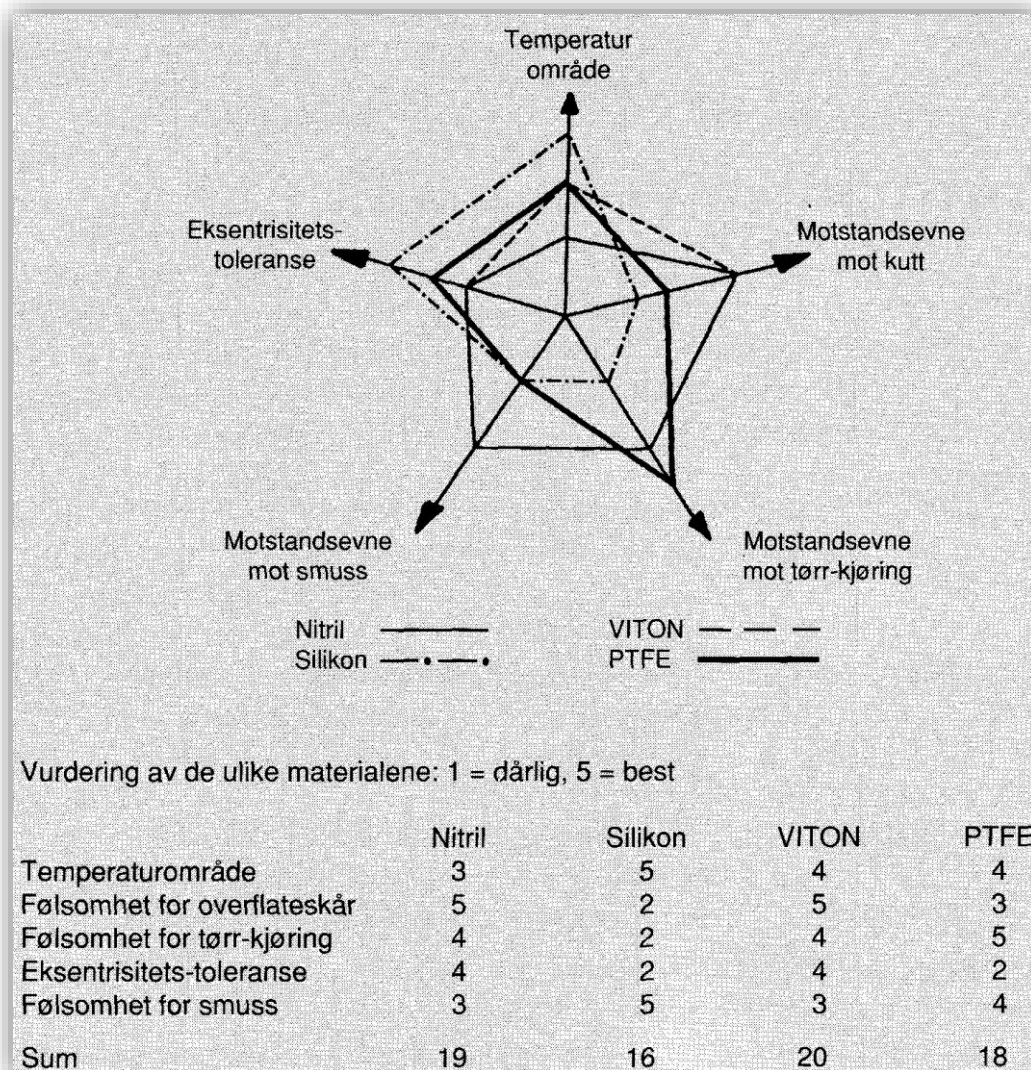
Det er verdt å merke seg at metodene ikke nødvendigvis må være innebygd i et materialdatasystem, eller bli tilbudt som en skreddersydd programpakke. Det kreves lite datatekniske kunnskaper for å sette opp et standard regneark hvor verdier kan legges inn.

3.4.1 Geometrisk sammenligning

Geometrisk sammenligning er en visuell presentasjonsmetode som rangerer materialene.

Figur 3.2 på neste side viser et likesidet polygon (mangekant). De ønskede egenskaper utgjør "eikene" i figuren. Likesidighet oppnås ved å definere hver ønsket egenskap som 100%. Denne brukes som sjablong for å sammenligne aktuelle materialer. Følgelig vil det perfekte materialet være helt sammenfallende med det ideelle. Andre vil danne irregulære polygoner, hvor en eller flere av egenskapene viser avvik.

Som det kommer frem av Figur 3.2, er det fortsatt vanskelig å vite hva som er best blant flere ikke-ideelle materialer. Her vurderes 4 materialer til bruk i en O-ring. Figuren viser at PTFE er minst følsom for "tørrkjøring". Ved å sammenligne PTFE mot VITON og Nitril, er "følsomhet for overflateskår" og "følsomhet for smuss" forholdsvis dårlig.



Figur 3.2

Geometrisk sammenligning av egenskaper fra ulike materialer mot idealspesifikasjonen.

Nitril - NBR gummi, Silikon - (herdeplast), VITON - Fluorocarbon,

PTFE - Polyetraflouretyen termoplast

Se også: http://www.allorings.com/material_selection.htm

I dette tilfellet er VITON valgt. Grunnen er at dette er det mest balanserte polygonet av de 4 alternativer. Til sammen har VITON også de høyeste egenskapsverdiene. Vi ser at vurderingen er veldig subjektiv og basert på tre kriterier:

- Størrelsen av polygonet og dets tilnærming til det ideelle.
- Utformingen (regularitet) av polygonet og tilsvarende tilnærming til det ideelle.
- Subjektiv viktighet av hver egenskap, vurdert sammen med avvik fra det ideelle.

I et forsøk på å forenkle og kvantifisere disse vurderingene kan vi bruke parametrene Mean Weighted Characteristic, MWC, (middel-vektalls-karakteristikk) og Balance Factor, BF, (balansefaktor).

MWC og BF uttrykker avviket mellom ønsket og aktuelt polygon.

Jo nærmere MWC er 1, desto mindre er avviket, og jo bedre passer materialet.

Jo nærmere BF er null, desto mindre er avviket, og jo bedre passer materialet.

$$\text{MWC} = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot X_i}{\sum_{i=1}^n Y_i} \quad (1) \quad \text{MWC} = 1 \rightarrow \text{ideelt}$$

$$\text{BF} = \sum_{i=1}^n \left[\frac{X_i}{Y_i} - (\text{MWC})^2 \right]^{1/2} \quad (2) \quad \text{BF} = 0 \rightarrow \text{ideelt}$$

hvor $X_1 \dots X_n$ = egenskapsverdi for det aktuelle materialet

$Y_1 \dots Y_n$ = egenskapsverdi for det ideelle materialet

$\alpha_1 \dots \alpha_n$ = vektall for viktighet av hver egenskap.

Fra "uviktig" = 0, 0,1, 0,2, ..., til "kritisk" = 1.

Σ = sum fra 1(i) til n

n = antall egenskaper under vurdering

Ved hjelp av en datamaskin er det lett å beregne MWC og BF, men det forutsettes at vektallet α bestemmes på skjønn.

Vurderingen kan forenkles ytterligere ved å søke minimumsverdien av D:

$$D = \left[(1 - \text{MWC})^2 + \text{BF}^2 \right]^{1/2} \quad (3) \quad D = 0 \rightarrow \text{ideelt}$$

På en utskrift av MWC og BF, er D avstanden mellom ønskede og aktuelle materialeegenskaper.

3.4.2 Kumulative avvik

Som et alternativ til den geometriske metoden skissert over, kan materialene rangeres ved hjelp av kumulative avviksmetoder. Her oppsummeres alle avvik mellom ønskede og aktuelle egenskapsverdier hos materialet som skal vurderes.

Vi får et uttrykk for det totale avvik, og det beste materialet er følgelig det med minst avvik. Det finnes flere varianter av beregningsmetodene. Det er vanlig at vi tillegger hver egenskap et viktighets - vekttall (0 - 1) for å fremheve hva vi mener er de vesentligste faktorene.

De vanligste er:

”Minimized Linear Absolute Deviation Sum” (minste sum for lineært tallverdiavvik)

og **”Minimized Square Deviation Sum”** (minste sum av kvadratisk avvik)

$$Z_{\text{MIN}} = \sum_{i=1}^n \alpha_i \left| \frac{X_i}{Y_i} - 1 \right| \quad (4) \quad Z_{\text{MIN}} = 1 \rightarrow \text{ideelt}$$

$$Z_{\text{SQR}} = \sum_{i=1}^n \alpha_i \left(\frac{X_i}{Y_i} - 1 \right)^2 \quad (5) \quad Z_{\text{SQR}} = 0 \rightarrow \text{ideelt}$$

Den siste ligningen (5), uthever avvik bedre enn den første (4). Med en datamaskin er det enkelt å utføre slike beregninger på flere egenskaper og sammenligne flere materialer.

Vi må være kritiske ved bruk av disse fremgangsmetodene. Et større avvik på en egenskap kan utlignes av flere andre egenskaper som er omtrent som ønsket. Eksempel, et materiale som ikke oppfyller kravet til duktilitet (seighet), men med en flytegrense og strekkfasthet nøyaktig som ønsket, kan falle bedre ut enn et materiale med tilstrekkelig duktilitet, og med flytegrense og strekkfasthet omtrent som ønsket.

Tabell 3.1 viser hvordan de ulike optimaliseringsmetodene slår ut på et enkelt eksempel. Det beste materialet er det med verdier som er nærmest det ”ideelle” i hvert tilfelle.

En svakhet her er at vi kun benytter tallverdiene i optimaliseringsprosessen. Denne metoden kvantifiserer bare størrelsen, og ikke retningen på avviket. Det kan føre til at et materiale med litt for liten duktilitet kan bli prioritert istedenfor ett med noe for stor duktilitet.

Med noe trening kan vi påvirke resultatet ved å velge et vekttall. Dersom vi valgte $\alpha_i = 1000$ for pris i tabell 3.1 på neste side, vil dette fungere som å sette 10 kr/kg som en øvre grense i stedet for som en målverdi. Ytterligere problemer oppstår på grunn av relative størrelser på egenskaper som skal sammenlignes. Flytegrense rundt 300 - 500MPa blir sammenlignet direkte med bruddforlengelse på 30-50%.

ØNSKEDE EGENSKAPER			
	R_{p0,2} (MPa)	R_m (MPa)	PRIS (kr/kg)
Ønske-data (Y _i)	360	420	10
Vekttall (α _i)	1	0,75	0,25

RESULTATER FRA ULIKE METODER								
KANDIDAT-DATA (X_i)	R _{p0,2}	R _m	PRIS	Z _{Min}	Z _{SQR}	MWC	BF	D
Messing	200	350	10	1,57	0,22	0,72	0,16	0,33
Bløtt stål	220	430	2	1,57	0,31	0,71	0,10	0,30
Høy C-stål	500	1200	1,5	2,49	2,92	1,78	0,40	0,88
Aluminium	350	450	11	0,95	0,01	1,03	0,05	0,06
Titan	850	950	57	2,48	8,57	2,74	0,38	1,78
IDEELLE	360	420	10	1,00	0,00	1,00	0,00	0,00

Tabell 3.1

Bruk av ulike optimaliseringsmetoder. Det beste materialet skal være det med verdier nærmest det «ideelle» i hvert tilfelle. (1)

Både de geometriske og de kumulative avviksmetodene må brukes med omhu. Det er viktig at vi har forståelse for svakhetene. De datatekniske hjelpemidlene gjør at det er praktisk mulig å løse komplekse beregninger.

Måleenhetene kan normaliseres til mer sammenlignbare tallverdier, og vi kan arbeide med sammenligninger hvor bedre enn ønskede verdier ikke elimineres.

3.4.3 Bruk av merittparametere

De optimaliseringsmetoder vi har beskrevet, behandler utelukkende materialelegenskapsdata. De forutsetter at dimensjonene er fastlåst.

Imidlertid har vi ofte frihet til å endre dimensjonene, slik at vi kan optimalisere både materialvalget og dimensjonene. Dette gjøres for å imøtekomme en bestemt produktfunksjon. Dette kan oppnås ved hjelp av merittparametere.

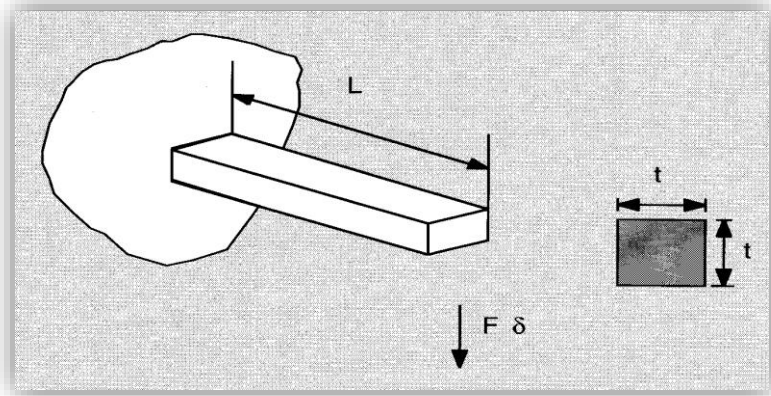
Første trinn er å fastslå hvilke designparametere som er kritiske. Dette kan være enten stivhet, spenningsnivå, kollaps, vekt eller ledningsevne. Poenget er at vi optimaliserer på produktfunksjonen framfor materialelegenskapene.

Begrensningen ligger i at funksjonen er påvirket av materialet. For en bjelke som ønskes så stiv som mulig, er det bjelkens stivhet som må maksimeres, ikke materialets. Når den kritiske designparameteren er identifisert, må den uttrykkes ved en formel hvor materialelegenskapene inngår. På et egnet databasesystem må vi kunne legge inn egne parametere for så å søke enten etter minimums- eller maksimumsverdier.

Det er ikke mulig å gjennomføre slike optimaliseringer uten bruk av et datasystem, med mindre vi vurderer noen få materialer og har veldig god tid. Igjen er regneark nok så besparende.

Vi kan illustrere dette med et enkelt eksempel. Figur 3.3 viser en innspent bjelke.

Vi ønsker en lavest mulig vekt for en gitt stivhet.



Figur 3.3
Innspent bjelke. (1)

Vi må altså finne et uttrykk for bjelkens vekt i forhold til dens stivhet uavhengig av det variable tverrsnitt.

Nedbøyningen på bjelkens ende gis av:

$$\delta = \frac{FL^3}{3EI} = \frac{FL^3}{3E \frac{t \cdot t^3}{12}} = \frac{4FL^3}{Et^4} \quad (6)$$

hvor: F = last, E = materialets elastisitetsmodul og I = arealtrehetsmoment

og bjelkens vekt er:

$$M = V \cdot \rho = Lt^2 \cdot \rho \quad (7)$$

hvor: V = volum, ρ = materialets densitet (egenvekt)

Fra vektformelen (7) får vi:

$$t = \left(\frac{M}{L\rho} \right)^{1/2} \quad (8)$$

som vi kan sette inn i nedbøyningsformelen (6):

$$\delta = \frac{4FL^3L^2\rho^2}{EM^2} \quad (9)$$

Vi kan nå, fra (9), uttrykke vekten uavhengig av tverrsnittet:

$$\text{Vekten } M = \left(\frac{4FL^5}{\delta} \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{\rho^2}{E} \right)^{1/2} = \left(\frac{4FL^5}{\delta} \right)^{1/2} \cdot \frac{\rho}{E^{1/2}} = \underline{\text{Konstant} \cdot \text{Merittparameter}} \quad (10)$$

For en gitt stivhet F/δ (Konstant) oppnås lavest vekt i bjelken ved å velge det materialet som har lavest verdi av Merittparameteren $\frac{\rho}{E^{1/2}} = \frac{\rho}{\sqrt{E}}$.

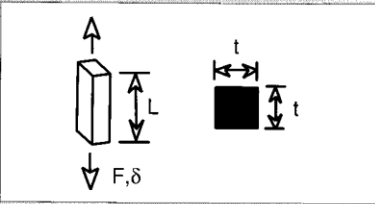
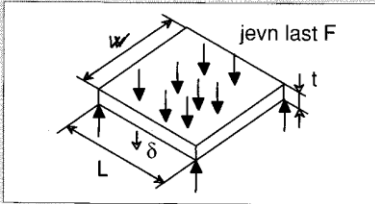
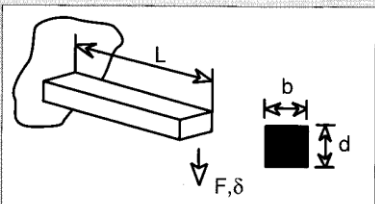
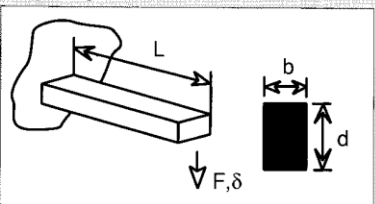
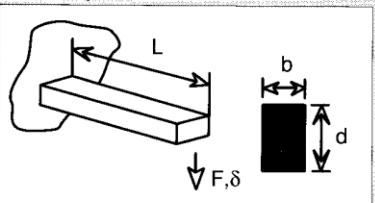
Det er denne verdien vi må søke etter i databasen og ikke materialet med lavest egenvekt.

Vi har her brukt et firkantet tverrsnitt i bjelken. Andre tverrsnitt ville gitt andre parametere. Eksempelvis ville en dypere bjelke, men med samme bredde, gitt $\rho/E^{1/3}$. Ut fra dette kan vi sammenligne løsninger basert på ulike materialer, produksjonsmetoder og dimensjoner, i stedet for kun materialer.

Verdier for både tetthet og elastisitetsmodul er nokså lett å finne i oppslagsverk, og det er ikke så vanskelig å regne ut verdier for merittparametrene med kalkulator. Uten datamaskin er det imidlertid lite fristende å beregne verdier for 100 materialer, samtidig som flere andre kriterier må vurderes (kostnad og miljøbestandighet).

Meritt-
parametere
for andre
geometrier
og
belastnings-
former er
ennå ikke
godt
dokumenter.

I Tabell 3.2
er det vist
noen enkle
eksempler.

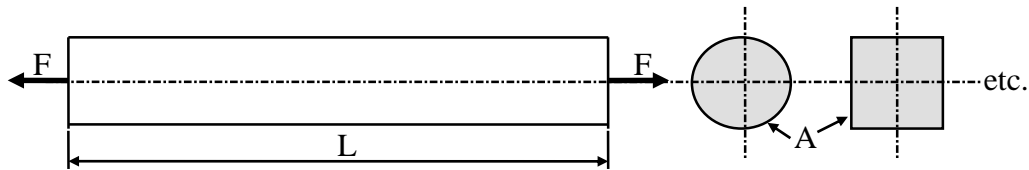
Belasting	Mål: Maksimum stivhet med minimum vekt.	Mål: Maksimum styrke med minimum vekt.
<p>Uniaksielt strekk</p> 	$\delta = \frac{FL}{Et^2}$ $M = \rho Lt^2$ $= \frac{FL^2}{\delta} \frac{\rho}{E}$ <p>Maksimeres: $\frac{E}{\rho}$</p>	$\sigma_y = \frac{F}{t^2}$ $M = \rho Lt^2$ $= FL \frac{\rho}{\sigma_y}$ <p>Maksimeres: $\frac{\sigma_y}{\rho}$</p>
<p>Plate under bøyning</p> 	$\delta = \frac{5FL^3}{32Ewt^3}$ $M = \rho Lwt$ $= L^2 \left(\frac{5Fw^2}{32E} \right)^{\frac{1}{3}} \frac{\rho}{E^{1/3}}$ <p>Maksimeres: $\frac{E^{\frac{1}{3}}}{\rho}$</p>	$\sigma_y = \frac{3FL}{4wt^2}$ $M = \rho Lwt$ $= \left(\frac{3FL^3w}{4} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\rho}{\sigma_y^2} \right)^{\frac{1}{2}}$ <p>Maksimeres: $\frac{\sigma_y^{\frac{1}{2}}}{\rho}$</p>
<p>Innspent bjelke</p> 	$\sigma = \frac{4FL^3}{Eb^4}$ $M = \rho Lb^2$ $= \frac{2FL^5}{\delta} \frac{\rho}{E^2}$ <p>Maksimeres: $\frac{E^{\frac{1}{2}}}{\rho}$</p>	<p>for b = d</p> $\sigma_y = \frac{6FL}{b^3}$ $M = \rho Lb^2$ $= L(6FL)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{\rho}{\sigma_y^3} \right)^{\frac{1}{3}}$ <p>Maksimeres: $\frac{\sigma_y^{\frac{2}{3}}}{\rho}$</p>
<p>Innspent bjelke</p> 	<p>for b < d (d konst.)</p> $\delta = \frac{4FL^3}{Ebd^3}$ $M = \rho Lbd$ $= \frac{4FL^4}{\delta d^2} \frac{\rho}{E}$ <p>Maksimeres: $\frac{E}{\rho}$</p>	<p>for b < d (d konst.)</p> $\sigma_y = \frac{6FL}{bd^2}$ $M = \rho Lbd$ $= \frac{6FL^2}{d} \frac{\rho}{\sigma_y}$ <p>Maksimeres: $\frac{\sigma_y}{\rho}$</p>
<p>Innspent bjelke</p> 	<p>for b < d (b konst.)</p> $\delta = \frac{4FL^3}{Ebd^3}$ $M = \rho Lbd$ $= L^2 \left(\frac{4Fb^2}{\delta} \right)^{\frac{1}{3}} \frac{\rho}{E^{\frac{1}{3}}}$ <p>Maksimeres: $\frac{E^{\frac{1}{3}}}{\rho}$</p>	<p>for b < d (b konst.)</p> $\sigma_y = \frac{6FL}{bd^2}$ $M = \rho Lbd$ $= (6FLb)^{\frac{1}{2}} \frac{\rho}{\sigma_y^{\frac{1}{2}}}$ <p>Maksimeres: $\frac{\sigma_y^{\frac{1}{2}}}{\rho}$</p>

Symboler: E = elastisitetsmodul, ρ = densitet, F = kraft, σ_y = flytespenning eller ekvivalent design spenning, d = nedbøyning, M = vekt. Dimensjoner t, b, d, w, L som angitt i skissene

Tabell 3.2
Noen merittparametere. (1)

EKSEMPEL 1

Metallstang utsatt for strekkbelastning.



Figur 3.4

Stang utsatt for strekkbelastning.

I) Mål: Minimum vekt av stang for maksimum styrke

Styrke kan uttrykkes ved materialets flytegrense: $\sigma_F = \frac{F}{A}$

F = strekkraft og A = tverrsnitt

Normalt vil spenningen ligge under σ_F , men denne verdien kan benyttes som et sammenligningsgrunnlag.

Vekt av stang $M = V \cdot \rho = AL \cdot \rho$

V = volum, ρ = tetthet (spesifikk vekt) og L = lengde

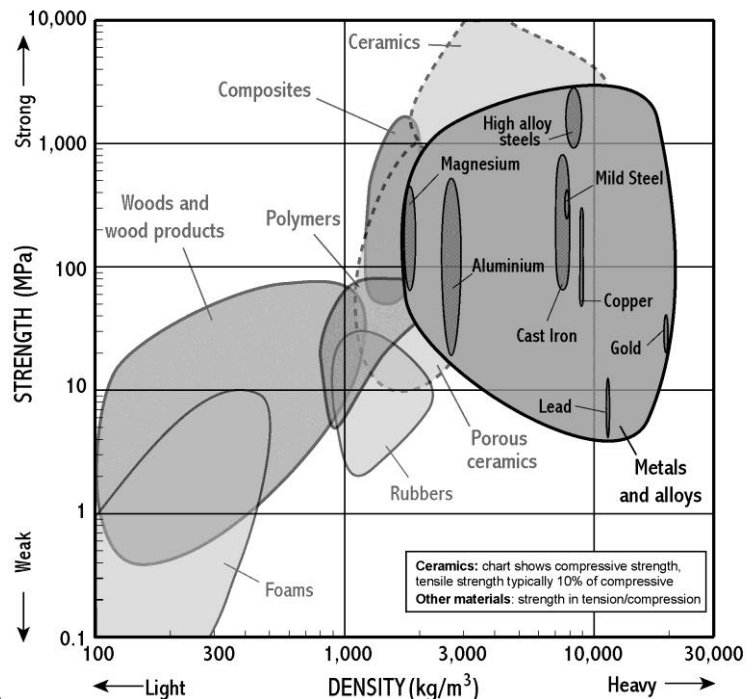
Fra ligning for flytegrense $A = \frac{F}{\sigma_F}$

→ Vekt av stang $M = AL \cdot \rho = \frac{F}{\sigma_F} L \cdot \rho = \frac{FL}{\frac{\sigma_F}{\rho}}$

→ Jo større $\frac{\sigma_F}{\rho}$, jo lettere stang

Forholdet mellom materialets styrke (Strength) og tetthet (Density) kan uttrykkes i et diagram som vist til høyre.

I diagrammet kan det legges inn kurver, for konstant $\frac{\sigma_F}{\rho}$



Figur 3.5

Strength - Density Chart.
(CES Edupac Chart, M. F. Ashby)

II) Mål: Minimum vekt av stang for maksimum stivhet (min. forlengelse)

$$\text{Forlengelse (deformasjon): } \delta = \varepsilon L = \frac{\sigma_F}{E} L = \frac{\left(\frac{F}{A}\right)}{E} L = \frac{F}{AE} L$$

$\varepsilon =$ relativ forlengelse, $\varepsilon = \frac{\sigma}{E} =$ Hooke's lov, E = elastisitetsmodul, E-modul

Vekt av stang $M = AL\rho$

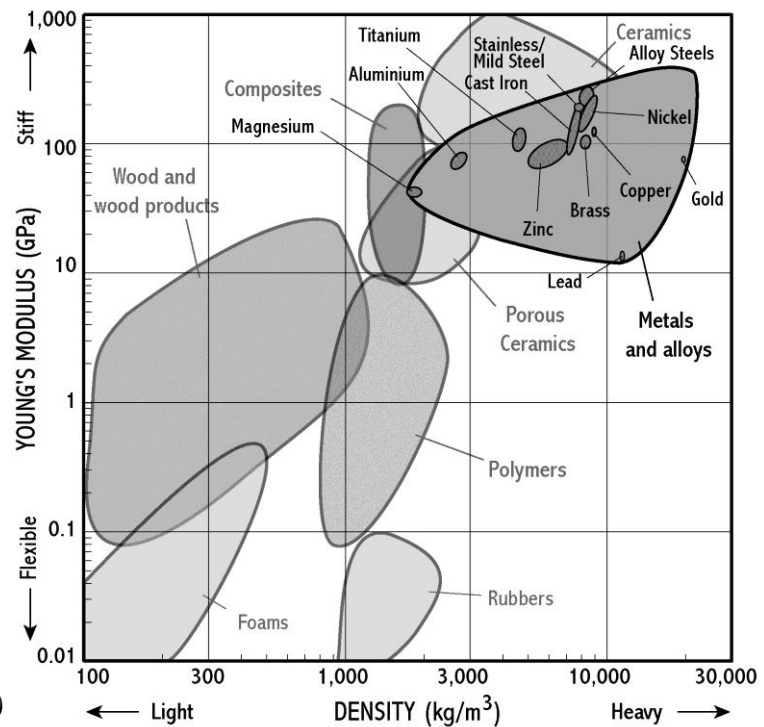
Fra ligning for forlengelse $A = \frac{FL}{\delta E}$

→ Vekt av stang $M = AL \cdot \rho = \frac{FL}{\delta E} L \cdot \rho = \frac{FL^2}{\delta E \rho}$

→ Jo større $\frac{E}{\rho}$, jo lettere stang

Forholdet mellom materialets E-modul (Young's Modulus) og tetthet (Density) kan uttrykkes i et diagram som vist til høyre.

I diagrammet kan det legges inn kurver, for konstant $\frac{E}{\rho}$



Figur 3.6
Young's Modulus - Density.
(CES Edupac Chart, M. F. Ashby)

III) Mål: Minimum pris for stang

Pris: $K = M \cdot k_{\text{vekt}}$

$k_{\text{vekt}} = \text{pris pr. kg}$

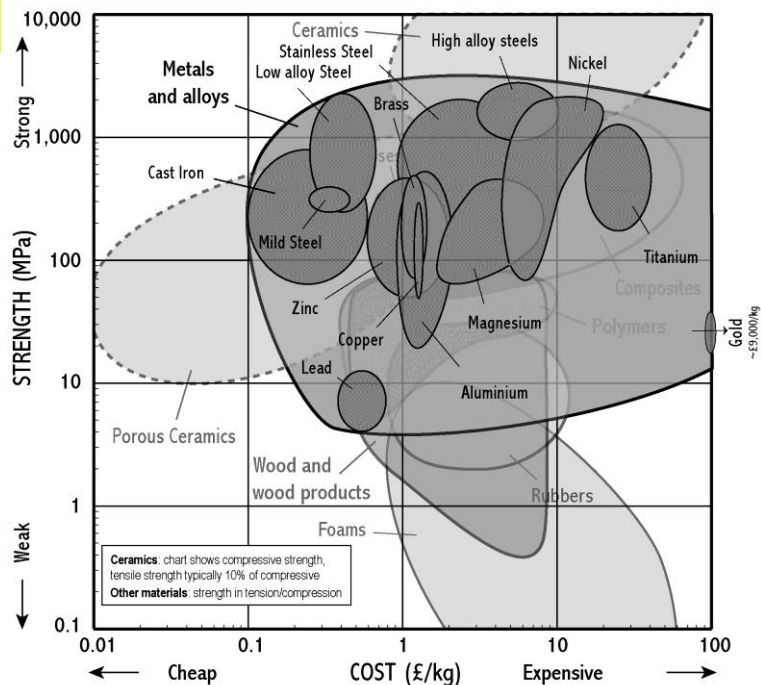
Vekt av stang $M = \frac{FL}{\frac{\sigma_F}{\rho}}$

→ Pris $K = M \cdot k_{\text{vekt}} = \frac{FL}{\frac{\sigma_F}{\rho}} \cdot k_{\text{vekt}} = \frac{FL}{\rho \cdot k_{\text{vekt}}}$

→ Jo større $\frac{\sigma_F}{\rho \cdot k_{\text{vekt}}}$, jo lavere pris

Forholdet mellom materialets styrke (Strength) og pris pr. kg (Cost, £/kg) kan uttrykkes i et diagram som vist til høyre.

I diagrammet kan det legges inn kurver, for konstant $\frac{\sigma_F}{\rho \cdot k_{\text{vekt}}}$



Figur 3.7
Strength - Cost Chart.
(CES Edupac Chart, M. F. Ashby)

Eller:

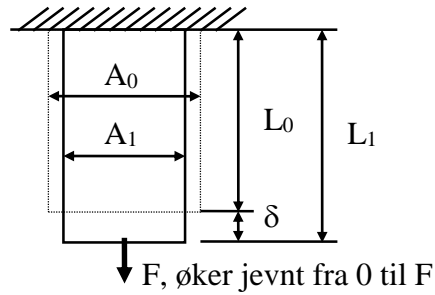
→ Pris $K = \frac{FL}{\frac{\sigma_F}{\rho k_{\text{vol}}}} = \frac{FL}{\frac{\sigma_F}{k_{\text{vol}}}}$

$k_{\text{vol}} = \text{pris pr. volumenhet}$

→ Jo større $\frac{\sigma_F}{k_{\text{vol}}}$, jo lavere pris

EKSEMPEL 2

Beregning av prisen for deformasjonsarbeid.



Figur 3.5

Innspent stang utsatt for strekkraft F som fører til forlengelse δ .

$$\text{Deformasjonsarbeid } W = \text{kraft} \cdot \text{vei} = \frac{F}{2} \cdot \delta$$

$$\frac{F}{2} = \text{gjennomsnittskraft (Kraft øker fra 0 til } F)$$

$$\text{Hook's lov } \varepsilon = \frac{L_1 - L_0}{L_0} = \frac{\delta}{L_0} = \frac{\sigma}{E}$$

$$\text{Vi kan skrive deformasjon (forlengelse) } \delta = \frac{\sigma_F \cdot L}{E}$$

$$\rightarrow \text{Deformasjonsarbeid } W = \frac{F}{2} \cdot \delta = \frac{F}{2} \cdot \frac{\sigma_F \cdot L}{E} = \frac{(\sigma_F \cdot A)}{2} \cdot \frac{\sigma_F \cdot L}{E} = \frac{\sigma_F^2}{2E} \cdot AL = \frac{\sigma_F^2}{2E} \cdot V \quad [\text{Nm}]$$

V = stangas volum

$$\text{Deformasjonsarbeid pr. vektenhet } \frac{W}{M} = \frac{\frac{\sigma_F^2}{2E} \cdot V}{\rho \cdot V} = \frac{\sigma_F^2}{2E \cdot \rho} \quad [\text{Nm/kg}]$$

\rightarrow **Prisen for deformasjonsarbeid** (deformasjonsarbeid pr. prisenhet) kan skrives som

$$\frac{W}{M \cdot k_{\text{vekt}}} = \frac{\frac{\sigma_F^2}{2E} \cdot V}{\rho V \cdot k_{\text{vekt}}} = \frac{\sigma_F^2}{2E \cdot k_{\text{vol}}} \quad [\text{Nm/kr}]$$

For sammenligning av aktuelle materialer, kan vi sette opp en tabell.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Materiale	Egenskaper			Pris		Kvalitetstall				
	ρ [kg/dm ³]	σ_F [N/mm ²]	E [N/mm ²]	k_{vekt} [kr/kg]	k_{vol} [kr/dm ³]	σ_F/ρ [Nm/kg]	σ_F/k_{vol} [Nm/kr]	$\sigma_F^2/2E\rho$ [Nm/kg]	$\sigma_F^2/2Ek_v$ [Nm/kr]	E/ ρ [Nm/kg]

Tabell 3.3
Sammenligning av materialer.

Fra tabellen kan vi bl.a. lese:

- For konstruksjonsdetaljer hvor belastningene ikke er bestemmende for dimensjoneringen, er det naturlig å vurdere materialene ut fra kolonne 6.
- Ved vurdering av vekten av høyt påkjente deler studeres kolonne 7.
- Er prisen avgjørende, vurderes kolonne 8.
- Arbeidsevnen til materialet avhengig av vekten fremgår av kolonne 9.
- Arbeidsevnen til materialet avhengig av prisen fremgår av kolonne 10.
- Deformasjoner p.g.a. egenvekt ved f.eks. en stav som er opphengt i den ene enden, er en funksjon av verdiene i kolonne 11.

4 VEDLEGG

Vedlegg 1 Oppsummering

Kategorier av materialdata:

1. KVANTIFISERBARE EGENSKAPER

- tetthet, ρ
- flytegrense, σ_F
- varmeutvidelseskoeffisient, α
- smeltepunkt, T_{MP}
-

2. VARIABLE EGENSKAPER

- råvarepriser
- estetiske egenskaper (motepreg, etc.)
- egenskaper endres ved innføring av ny teknikk (f.eks. bearbeiding)
-

3. VANSKELIG DEFINERBARE EGENSKAPER ("FUZZY"- EGENSKAPER)

- utseende (f.eks. malt overflate - matt, silkematt, halvblank, etc.)
- vurdering av sveiser etter Røntgenatlas

Metoder for materialvalg:

I GENERELLE

1. Intuitivt valg
2. Samme som før
3. Overlate beslutninger til andre
eks.: - kunden bestemmer
- leverandøren bestemmer
- standarder / spesifikasjoner bestemmer

II SEMISYSTEMATISKE

1. Det første som holder
2. Sammenlignbare problemstillinger
3. Problemløsende materialvalg

III SYSTEMATISKE

PROSESS:

- | | |
|-----------|------------------------------------|
| Trinn I | Definisjon av funksjonskrav |
| Trinn II | Spesifisere generelle materialkrav |
| Trinn III | Siling |
| Trinn IV | Spesifikke materialkrav |
| Trinn V | Optimalisering |

METODER FOR OPTIMALISERING:

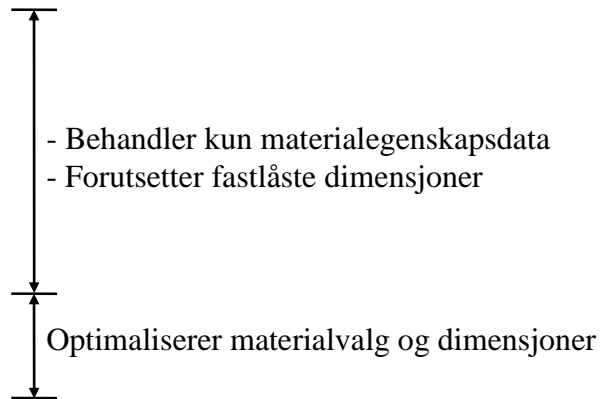
A. GEOMETRISK SAMMENLIGNING

- visuell presentasjonsmetode
- parametere: MWC, BF og D

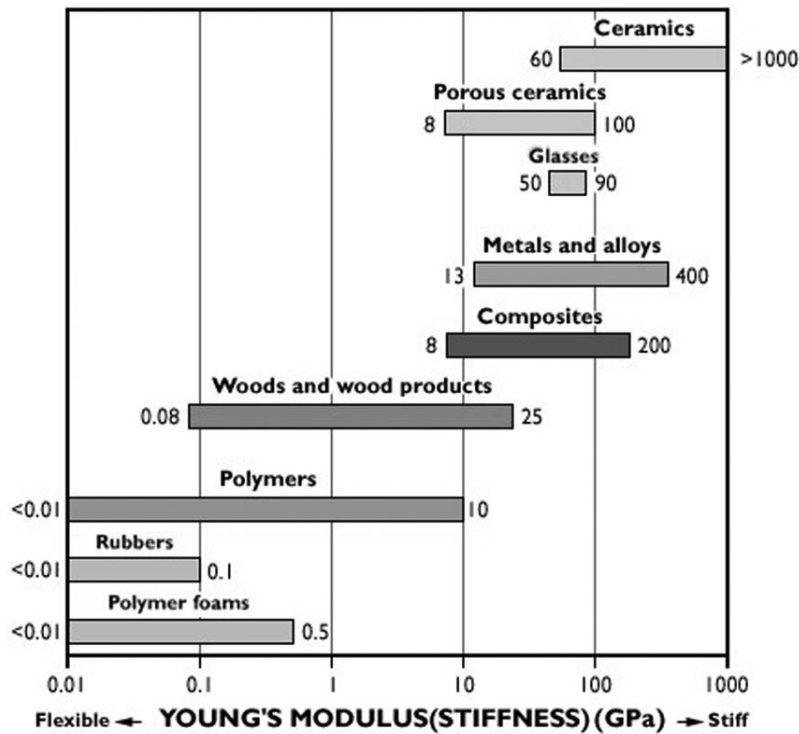
B. KUMULATIVE AVVIK

- Z_{MIN}
- Z_{SQR}

C. MERITTPARAMETERE



Vedlegg 2 Informasjon om egenskaper
(se neste side)

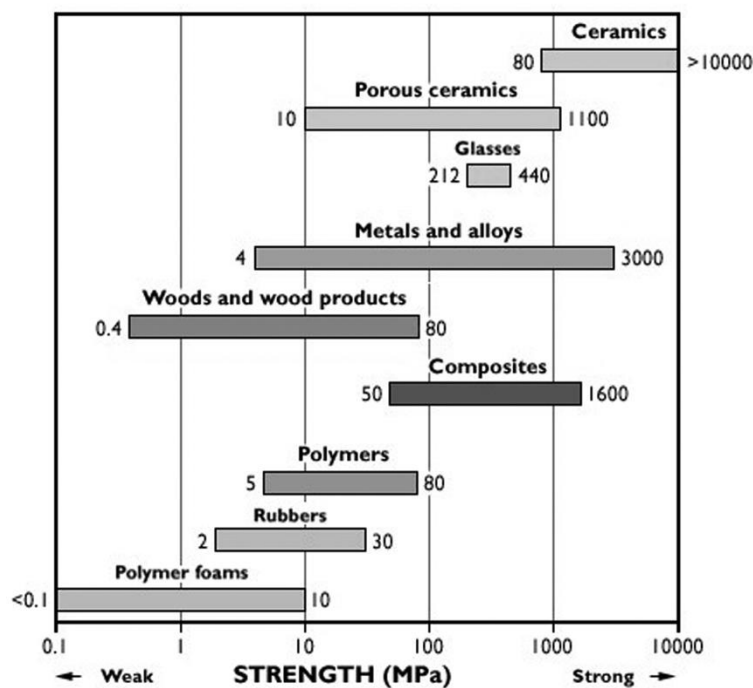


Figur V2.1

Elastisitetsmodul, E-modul (Young's modulus) = σ/ϵ

= elastisk spenning / relativ deformasjon [$N/m^2 = Pa$]

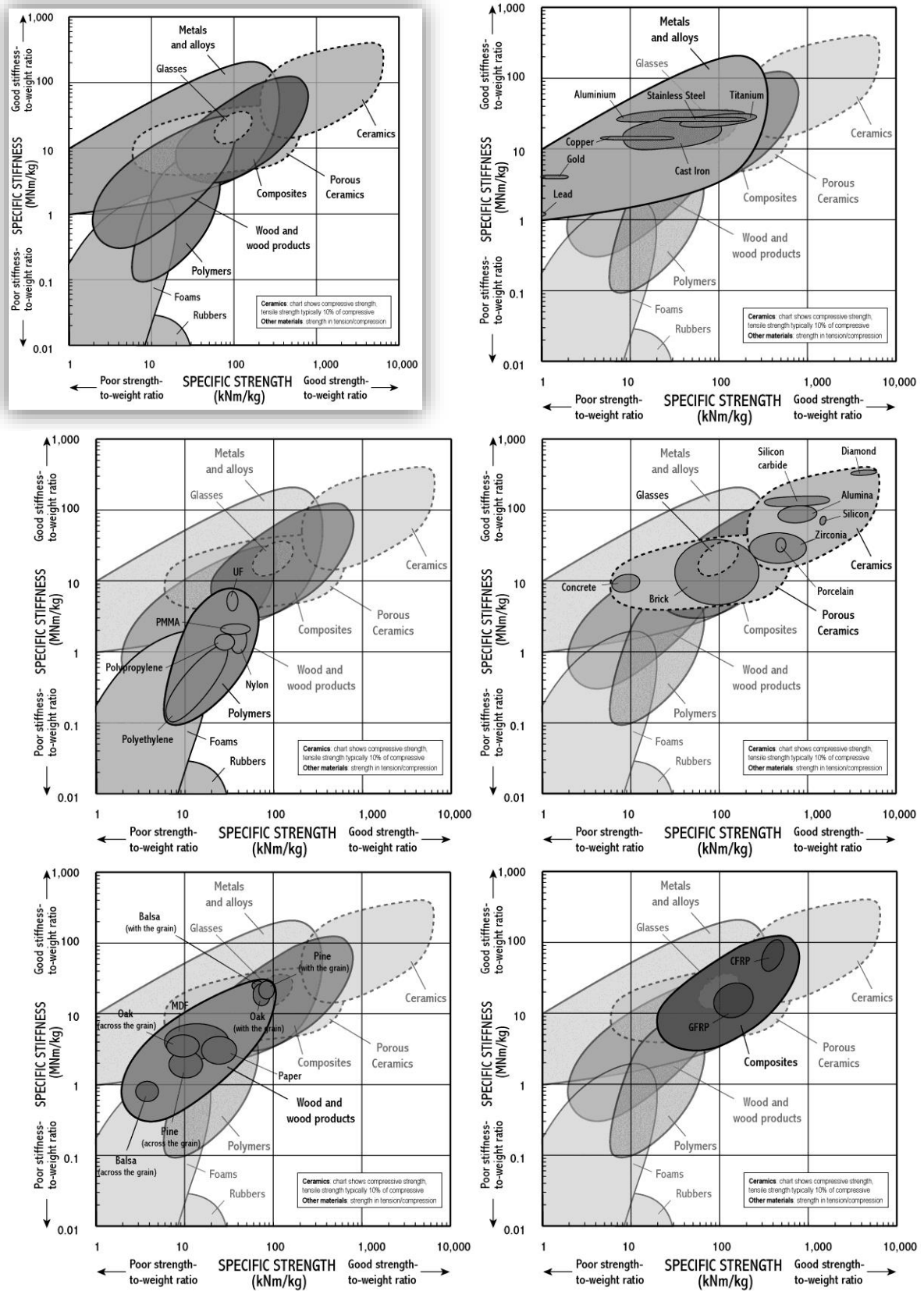
Spesifikk stivhet = E-modull / tetthet = E/ρ - er mest brukt for å sammenligne materialer, enhetene er ikke viktig. (1 Pa (Pascal) = $1N/m^2$; 1 GPa = $1000 N/mm^2$). (5)



Figur V2.2

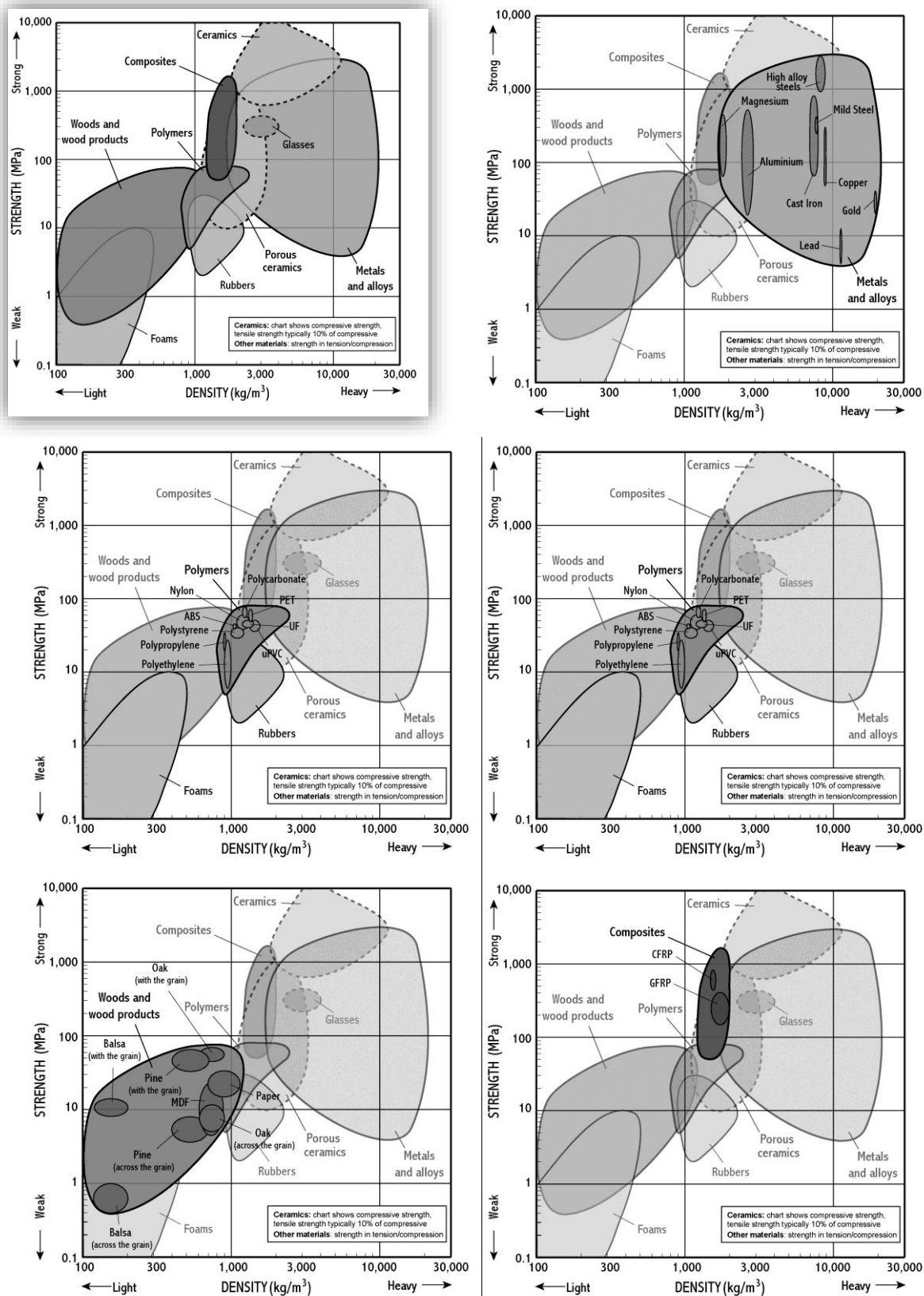
Styrke målt som påført belastning, spenning (Strength) = $\sigma = \text{kraft} / \text{areal}$ [$N/m^2 = Pa$]

Spesifikk styrke = styrke / tetthet = σ/ρ - er stort sett bare brukt for å sammenligne materialer, slik at enhetene er ikke viktig. (5)



Figur V2.3

Spesifikk stivhet (Stiffness) = E -modull / tetthet = E/ρ sammenlignet med spesifikk styrke.
 Spesifikk styrke (strength) = styrke / tetthet = σ/ρ . σ/ρ er også kjent som forholdet styrke/vekt.
 (6)



Figur V2.4
 Styrke (Strength) σ sammenlignet med tetthet (density). (6)

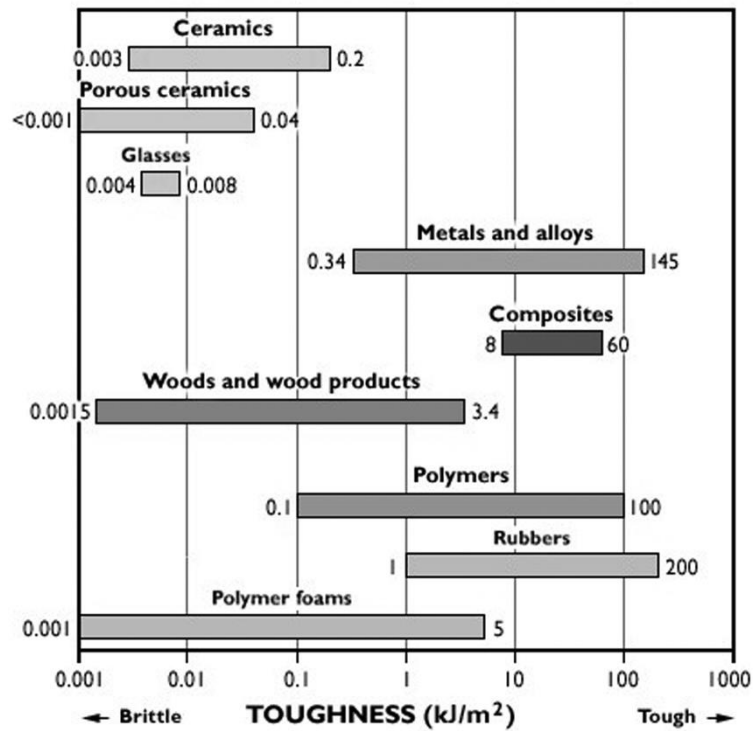


Figure V2.5

Seighet (Toughness) måles vanligvis som energi per arealenheter eller Joules/m² [J/m²]. Energi fra Charpy eller Izod tester er enkel energi i joule [J].

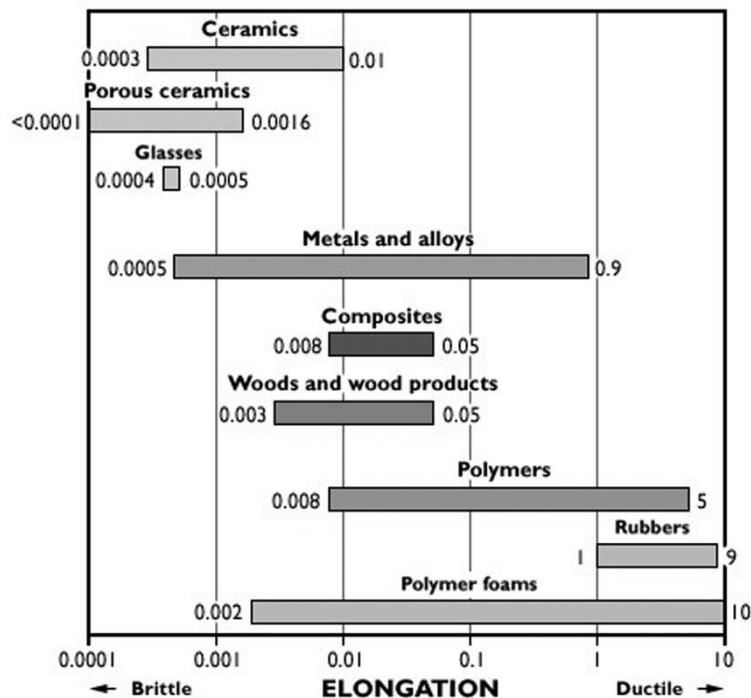


Figure V2.6

Fordi forlengelse (elongation) er lik relativ bruddforlengelse har den ikke noen enhet. Den blir ofte gitt i % tøyning. (5)

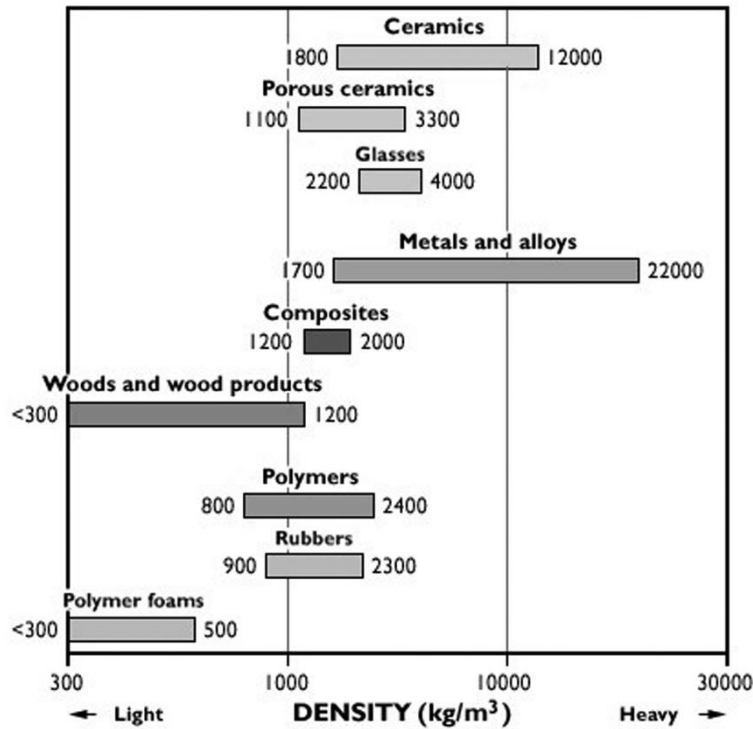


Figure V2.7

Tetthet (density) er målt i kg/m^3 . Legg merke at noen ganger er tettheten angitt i forhold til vann. Dvs. relativ tetthet = tetthet / tetthet av vann (= 1000kg/m^3). (5)

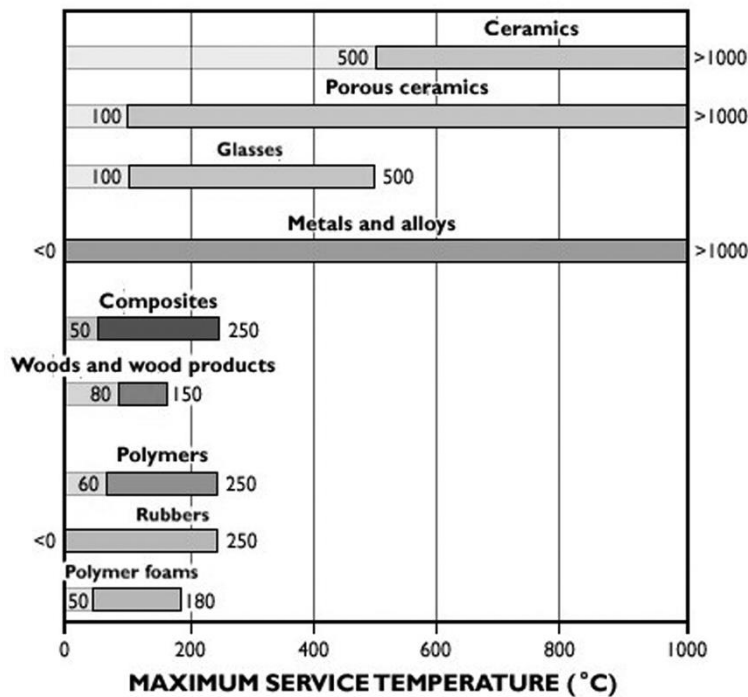


Figure V2.8

Maksimal driftstemperatur (Maximum servicetemperatur) blir målt grader Celsius. Det kan antas at enhver driftstemperatur under maksimal temperatur ned mot null grader Celsius er trygt i design. (5)

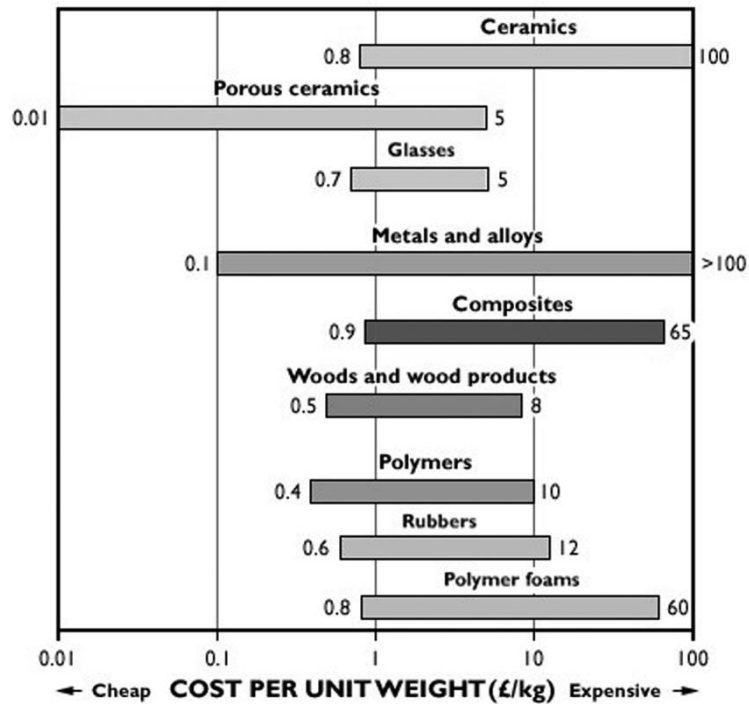


Figure V2.9a

Kostnaden kan måles som kostnad per vekt enhet (Cost per unit weight), i £/kg, kr/kg, ... (5)

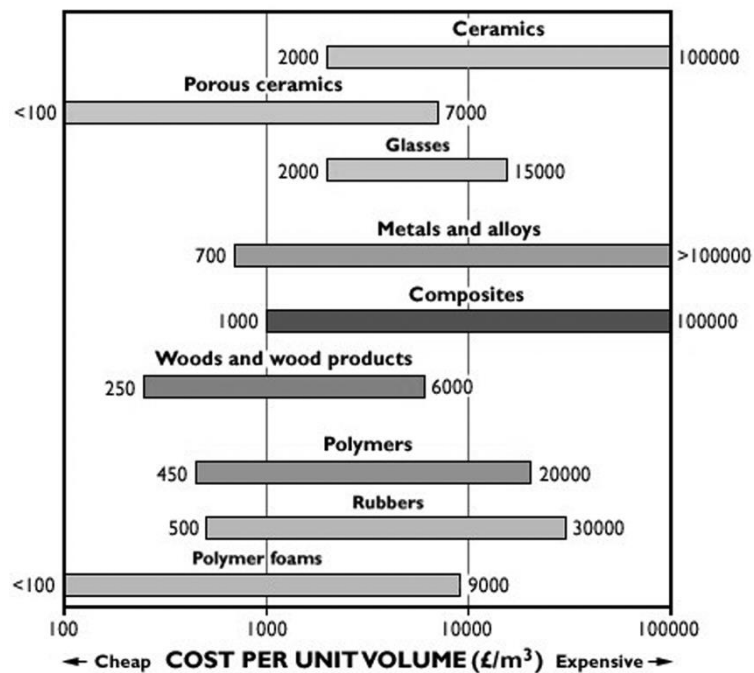


Figure V2.9b

Kostnaden kan også måles som kostnad per volumenhet (Cost per unit volume), i £/m³, kr/m³, ... (5)

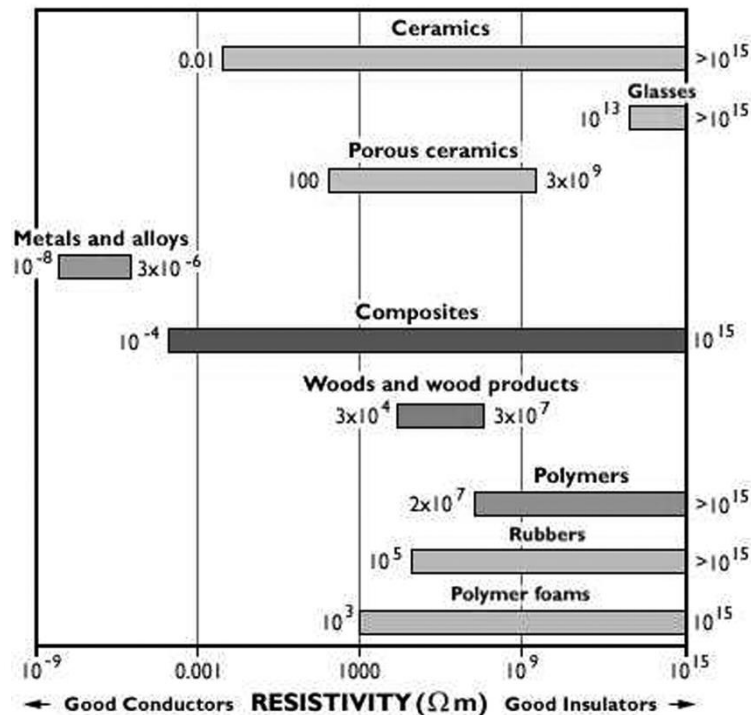


Figure V2.10

Elektrisk motstand (Resistivity) har enhet ohm-meter. Å gi nøyaktige verdier kan være vanskelig på grunn av sterk temperaturavhengighet. Vanligvis angitt ved romtemperatur. (5)

5. REFERANSER

- 1 John Edwards (1991), *Materialteknisk håndbok for Verkstedindustrien*, Teknologibedriftenes Landsforening, TBL, ISBN 82-91073-00-7.
- 2 David G. Ullman (1992), *The Mechanical Design Process*, McGraww-Hill, ISBN 0-07-065739-4.
- 3 M. F. Ashby & D. R. H. Jones (1988), *Engineering Materials 2*, Pergamon Press, ISBN 08-032531-9
- 4 Forbrukerrådet, www.forbrukerportalen.no/ (15.04.2013)
- 5 University of Cambridge, <http://www-materials.eng.cam.ac.uk/mpsite/properties/default.html> (15.04.2013)
- 6 M. Ashby, H Shercliff, D. Cebon (2007), *Materials Engineering, science, processing and design*, Elsevier, ISBN-13: 979-0-7506-8391-3.