Engineering Materials

Constructiematerialen en Industriële Materiaalkunde

Lesillustraties en -transparanten – Versie 0.5
(build 70211)

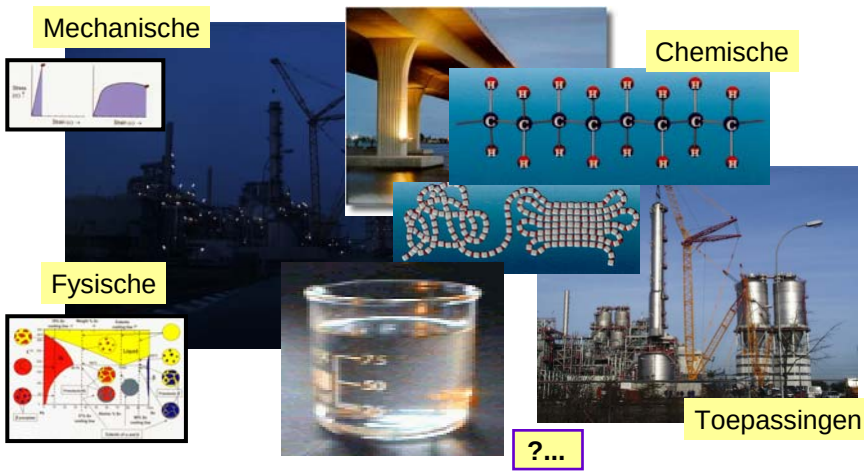
KATHOLIEKE UNIVERSITEIT LEUVEN

O.I. – Project K.U.Leuven

Multimedia Compendium, Appendices & Slides

Prof.dr.ir. W. Bogaerts
Academiejaar 2006 - 2007

Materiaalkunde voor Ingenieurs



Materiaalkunde voor Ingenieurs

= *"Eind-GEBRUIKER"*

- "*Engineering Materials*" : Metalen, Niet-metalen, Legeringen, Coatings, ...
- Eigenschappen, Bereiding en Processing, ...
- Beschrijving, Begrijpen, Selectie, ...
- Etc...

Inhoud HANDBOEK

- Polymeren
- Composieten
- Keramische Materialen
- Staal
- Staalsoorten & Roestvast staal
- Corrosie
- Schade-analyse & -preventie / NDT
- Gieten, PM, Vormgeven, Verspanen, Lassen
- Cu
- Al
- Ni, Zn, Ti, Mg, Refractaire
- Opp.behand & Coatings
- Selectie

Inhoud – Indeling Cursus

- ***Thema 1 :*** Polymeren
- ***Thema 2 :*** Anorganische Niet-Metalen (keramische materialen)
- ***Thema 3 :*** Staal & Staalsoorten (incl. roestvast staal)
- ***Thema 4 :*** Vormgeven
- ***Thema 5 :*** Non-ferro Metalen
- *Capita Selecta* (NDT, ...)

Materiaalkunde voor Ingenieurs

= *"Eind-GEBRUIKER"*

- **Handbook** (= basislectuur)
- **Slides** (= ENKEL rode draad !!!)
- **"Verdiepingsmodules"**

  o.m.: videos, lesdemonstraties, hyperlinks (o.m. naar bijkomende literatuur), practica, ...
- **"Uitbreidingsmodules"**

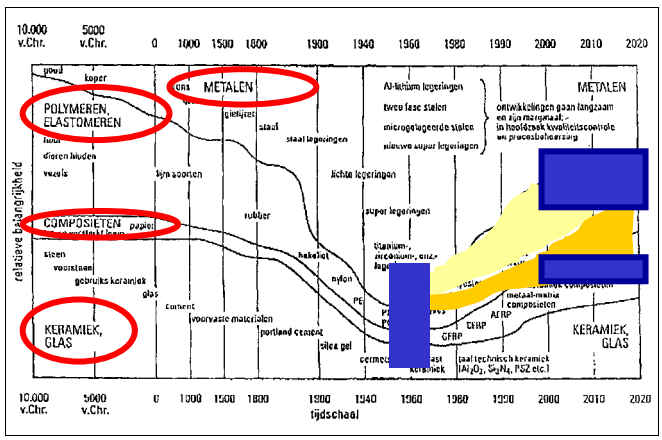
  lestopics, hyperlinks, practica, etc ...

- Verwachtingen
- Examenvorm
- Lessen ...

Handboek:
"*Engineering Materials - Properties and Selection*"

Slides :
http://www.mtm.kuleuven.ac.be/Education/NonMatIrCourses/index.html

MATERIALEN ...



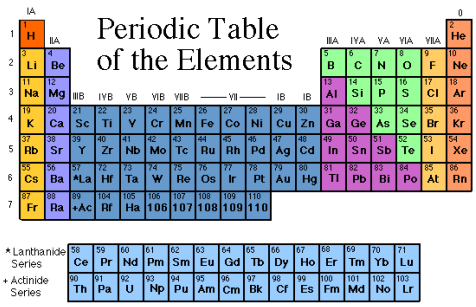
§ 1.1 of WWW...

= Notatie voor ref. naar Cursus Matk. 1, of naar Extra Illustraties, of naar Weblink voor meer info

Elementen ...

Excellent Periodic Table Weblink ...

Another Excellent Periodic Table Weblink ...

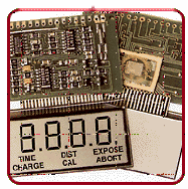


En vele andere ....

Thema 1 : POLYMEREN

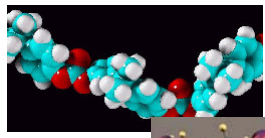
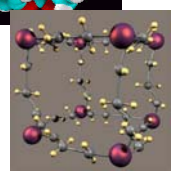
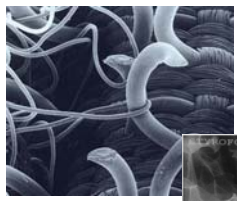
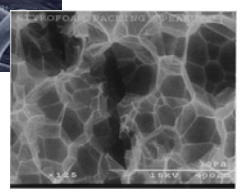
Inhoudstabel ...

of : “Kunststoffen” ...
of : “Plastics” ...



Inhoud

- Inleiding
- **Polymeer<u>chemie</u>**
  - Polymerisatie-reacties
  - Soorten Polymeren
- **Belangrijkste <u>eigenschappen</u>**
  - Versterkingsmethoden
- Fabricagetechnieken

Polymeren : *Inleiding* (1)

- **Wat / Naam ?**
  - Gr.: *poly* (veel) + *meras* (delen)
  - = “stoffen die bestaan uit lange ketens van zich herhalende moleculaire groepen” (*monomeren*)
  - Meeste monomeren : ruggengraat van C-atomen
    (→ organische stoffen)
- Note: Chemistry Glossary = http://www.ch.ic.ac.uk/vchemlib/mol/

Polymeren : *Inleiding* (2)

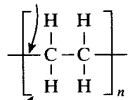
- Wat / Naam ?
- Voorbeeld : ***poly-ethyleen*** **(poly-etheen)**

Geeft een covalente binding aan

C_2H_4 — Chemische formule van één etheenmolecule

$[C_2H_4]_n$ — Formule van een polyetheen-keten die uit *n* monomeer-schakels bestaat

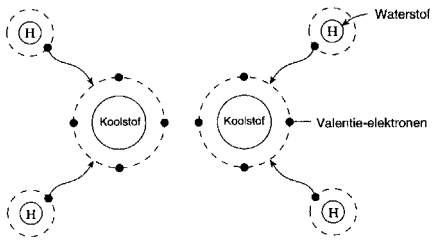
OF



Voorkeursstructuurformule voor het polymeer

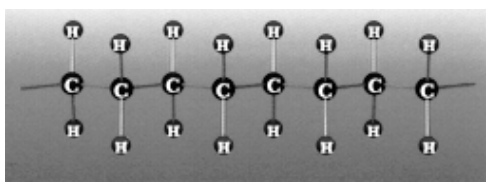
Notatie van een Polyethyleen-molecule (1/2)

Polyethyleen-molecule (2/2)



Atoomstructuur

buitenste atoomschil van C-atoom bevat 4 elektronen → kan nog 4 elektronen opnemen
Aan beide kanten van etheen-molecule ander etheen molec. → valenties v. centrale molecule volledig bezet
→ ev.: Ontstaan lange keten



Fysische structuur

Ev.: erg lange ketens → verward & verstrengeld → meer of minder "kristalliniteit", of "amorf" (cfr. infra)

Polymeren : *Inleiding* (3)

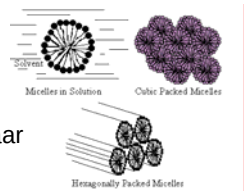
- Wat / Naam ?
- Voorbeeld : *poly-ethyleen* (poly-etheen)
- Vergelijking met andere materialen
  - Atomen *binnen* monomeer : zeer sterk aan elkaar gebonden (meestal covalent)
  - Binding *tussen* aaneengeregen monomeermoleculen (= *binnen* polymeerketen): ook covalent, of ev. veel zwakkere secundaire binding
  - **Polymeren met lange ketenmoleculen : normaliter zwakker dan keramieken of metalen :**
    - Onderling slechts aan elkaar gebonden door zwakke elektrostatische krachten ("Vanderwaalskrachten")
    - Onder belasting : ketens uit elkaar glijden !...
    - ➔ **versteviging** (diverse mogelijkheden : vulstoffen, vertakte keten, "cross-links", ...)
- Eigenschappen

Polymeren : *Inleiding* (4)

- Wat / Naam ?
- Voorbeeld : *poly-ethyleen* (poly-etheen)
- Vergelijking met andere materialen
- Eigenschappen
  - Zéér veel variaties :
    - structuur keten
    - ligging ervan
    - toevoegstoffen
    - e.g. ook : snel afkoelen
  - Gevolg : ∝ grote waaier van eigenschappen
    - → meest moderne materialen; nog enorme evoluties
    - → rol polymeerchemicus : '*compounders*' (mengers) & *polymeer*fabricanten

Polymeren : *Inleiding* (5)

- "*Polymeren*" : ook natuurlijk
  - Ook dierlijke eiwitten = polymeren
  - Ook : dennenhars, schellak, natuurrubber
  - Hout = ketens <u>cellulosemoleculen</u>, aan elkaar gehouden door een ander natuurlijk polymeer, i.e., *lignine*

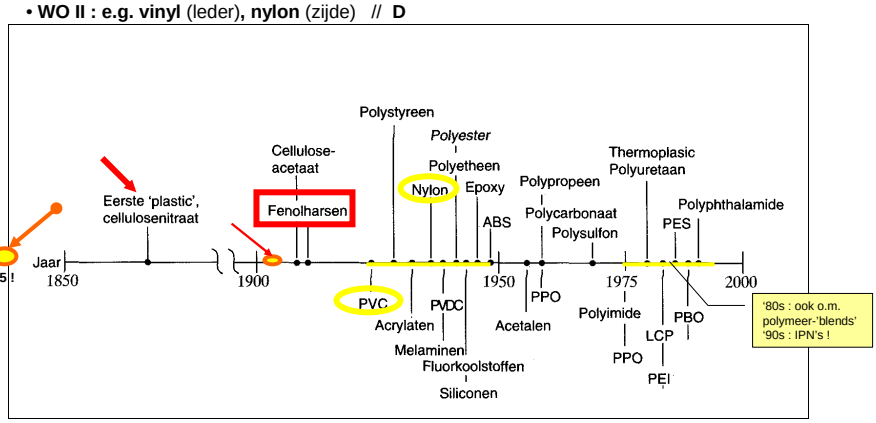


- "*Kunststof*" = polymeer met allerlei toevoegingen
- "*Plastic*" : cfr. *plastisch*, *kneedbaar*

  zeker niet altijd OK

Polymeren : Enige geschiedenis

- **Celluloid** ***(1869)***
- **Caseine ('kunsthoorn')** ***(1904)***
- **Bakeliet** ***(1909-1923)***
- **WO II : e.g. vinyl** (leder)**, nylon** (zijde) // **D**



Milestones of chemistry …

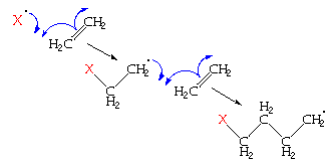
http://www.elements-of-life.org/eol_index_flash.html :
Click "*Milestones of Chemistry*" button …

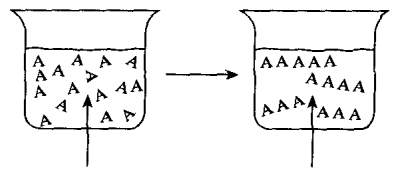
Inhoud

- Inleiding
- **Polymeerchemie**
  - Polymerisatie-reacties
  - Soorten Polymeren
- **Belangrijkste eigenschappen**
  - Versterkingsmethoden
- Fabricagetechnieken

Polymerisatie-reacties *(1)*

- **Additiepolymerisatie** : de moleculen worden geheel achter elkaar gekoppeld , als kralen aan een ketting
- Uitgangsmateriaal = monomeer in oplossing, emulsie, dampvorm, of gewoon onverdunde vloeistof
- Schakels in polymeer : zelfde chemische samenstelling als monomeermolecule

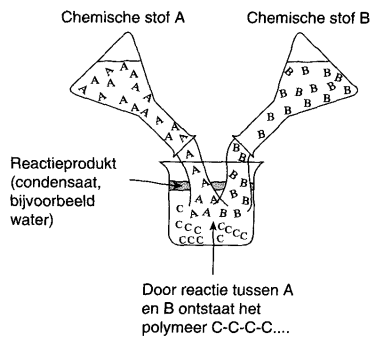


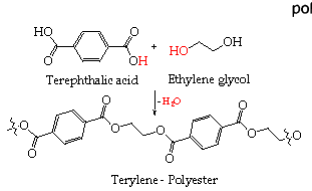


There are several major types of thermoplastic polymers - high and low density ***polyethylene***, polypropylene, polystyrene, polyvinyl chloride, and many more - all of which are ***addition polymers***.

Polymerisatie-reacties *(2)*

- **Condensatie-polymerisatie** : een nieuw molecule hecht zich aan een ander molecule tijdens de vormingsreactie
- Schakels in polymeer : andere chemische samenstelling dan uitgangsmaterialen
- Vorming van bijproduct (water / "condensatie")





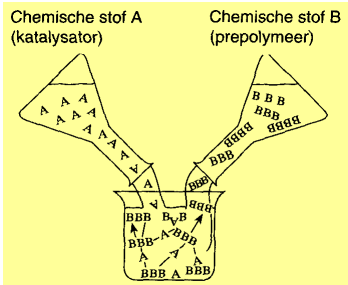
Polyesters:
A **dicarboxylic acid**, such as terephthalic acid, and a **diol**, such as ethylene glycol, can react with each other at both ends to exclude a molecule of **water** for each link formed in the polymer chain - producing a **polyester**.

Polymerisatie-reacties *(3)*

BIJZONDERE GEVALLEN :

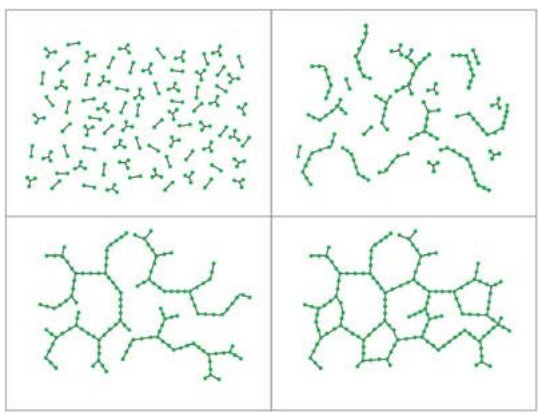
• **Polyadditie :** (combinatie 1 & 2) condensaat wordt ook in de keten opgenomen op een andere plaats

• **Cross-linking** : vorming van sterke chemische bruggen ('cross-links' / dwarsverbindingen) tussen de ketens
• Materiaal dat ontstaat is in feite één macromolecule
• Vb.: Epoxyharsen (e.g. voor PMC composiet-materialen)



Ontstaan van een macromolecule door vorming van cross-links

Epoxy: cross-linking ...



<< back

Molecular bonds develop as epoxy cures …

Inhoud

- Inleiding
- **Polymeerchemie**
  - Polymerisatie-reacties
  - Soorten Polymeren

  Inleiding ...
- **Belangrijkste eigenschappen**
  - Versterkingsmethoden
- Fabricagetechnieken

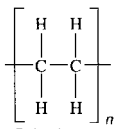
"Verschillende" polymeren

- Fysisch verschillend : bv. katalysator en/of proces-parameters (p, T, …) → lengte polymeerketens (moleculair gewicht)

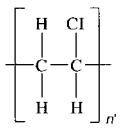
  MG ➔ materiaaleigenschappen !!!

  Vb.: PE met hoog of laag MG = andere eigenschappen
  - mechanische eig. (treksterkte, buigsterkte,…) : groter bij groter MG
  - verwerkbaarheid (i.e. viscositeit / gieten, persen, vormen) : afneemt met groter MG
- Chemisch verschillend : *cfr. Polyethyleen*
  - Chemische **Samenstelling** : substitutie van een of meer H-atomen door *ander element* of *moleculaire groep*
    (vb.: Cl, methylgroep CH_3, "R"...)
  - (Chemische) **Structuur** (3D) : atactisch, isotactisch, syndiotactisch …*cfr. infra*

Polyvinylchoride / Polypropyleen



Polyetheen

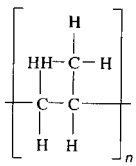


Polyvinylchloride

Basis : C_2H_4 (ethyleen)
Vervang één H door Cl
→ *Polyvinylchloride* (PVC)

$CH_2{=}CH_2 + Cl_2 \xrightarrow[\text{260°C in reactor}]{\text{verwarming tot}} CH_2{=}CHCl + HCl$

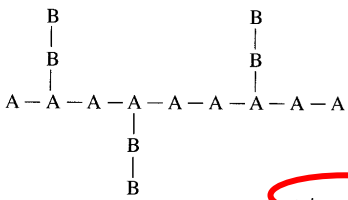
Etheen — Chloorgas — Polyvinylchloride-monomeer — Zoutzuurgas



Vervang H door CH_3
--> *Polypropyleen* (PP)

Co-polymerisatie

= Polymerisatiereactie waarbij polymeerketting ontstaat die (twee) verschillende monomeren bevat *(méér → "terpolymeren")*



één van beide bouwstenen uitsluitend in hoofdketen, andere in zijketen
- ***atactisch*** (onregelmatige plaatsing)
- ***isotactisch*** (zijgroepen steeds aan zelfde kant)
- ***syndiotactisch*** (zijgroepen alternerend aan hoofdketen)

& Katalysatoren → *+/- onbeperkte waaier eigenschappen*

entcopolymeer

A – A – A – A – B – B – B – B – B – A – A – A – B – B – B – B

blokcopolymeer

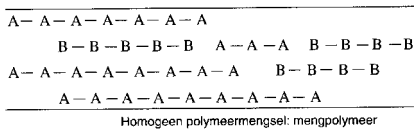
hoofdketen zonder bijketens

A = monomeer met chemische samenstelling A
B = monomeer met chemische samenstelling B

Polymeer 'blends'

- **Mengpolymeer** (*homogeen*, één fase)

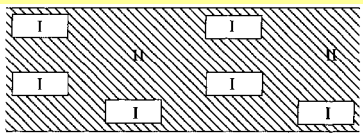
Componenten op moleculaire schaal mengbaar; hebben identiteit verloren



Homogeen polymeermengsel: mengpolymeer

- **Polymeer Mengsel** (*heterogeen*, meerfasig)

Componenten niet mengbaar; componenten behouden iets van hun oorspronkelijke eigenschappen (i.e., ***Tg***)
Verschillende *microstructuren* (e.g. component I = kleine bolletjes, cylindrische structuren,...)
Ook : componenten = lamellen (cfr. laagjes triplex, multiplex)



Heterogeen polymeermengsel

- **Praktijk (commerciële prod.) :** onderscheid niet altijd duidelijk

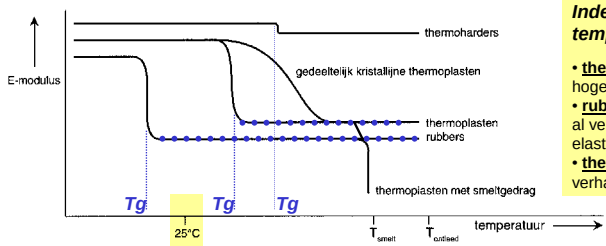
T_g : "Glasovergangstemperatuur" "Glastemperatuur"

§

- = "glaspunt" ; "glas-rubber-overgangstemperatuur", verwekingstemperatuur";
  = temperatuur waarbij polymeer verweekt
- Bij $T > T_g$:
  - amorf polymeer = rubberachtige "vloeistof"
  - ketens kunnen over elkaar glijden (vloeien; "*plastic*")
- Bij $T < T_g$:
  - materiaal = vaste, glasachtige stof
- Heterogeen Mengsel : beide componenten hebben eigen T_g

Soorten Polymeren *(1)*

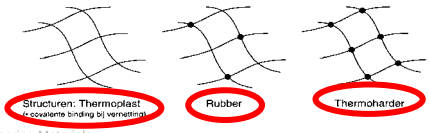
Thermoplasten, Thermoharders, Rubbers



Indeling op basis van temperatuur-afhankelijk gedrag :

- **thermoplasten**: verweken (plastisch) bij hogere temperatuur
- **rubbers, elastomeren**: bij kamertemp. al verweekt (+ rubber-elastisch of visco-elastisch gedrag = terugtrekking vertraagd i/d tijd)
- **thermoharders**: +/- niet verweekt (of zelfs verhardt) bij hogere temperatuur

• • • • • • "rubbertraject"



Thermoharders : vernetting / 'cross-linking' (covalente brugverbindingen) bij hoge temp.
→ 3-dimensionaal macromolecule
Niet nogmaals te smelten (I.e. niet meer terug vloeibaar bij opnieuw verwarmen; e.g. verkolen)
→ recyclage = ??!
Thermoplasten : "lineaire" polymeren; smalle polymeer ketens / beperkte 2-dimensionale structuur
Rubbers : tussenvorm

Tg – Internet Demonstraties

Bouncy Balls
A bouncy ball is made of a polymer that is above its T_g at room temperature, with cross-linking keeping the ball in its spherical shape. The height that the ball rebounds to when dropped is dependent on how much energy is lost during the bounce. At room temperature the ball loses little energy when it deforms, so can rebound to a large fraction of its original height. As the temperature is reduced, the viscosity of the polymer increases, so more of the elastic strain energy is dissipated, and the ball does not bounce as high.

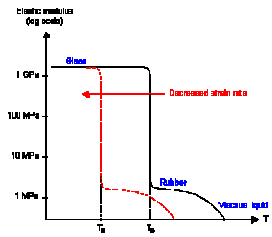
At T_g nearly all the energy is dissipated, and the ball barely bounces at all. As the temperature is reduced more to below T_g, there is not enough energy for conformational changes to occur, and the ball becomes glassy. The energy losses above T_g are due to the viscosity as the conformation changes and the polymer chains move past each other, and since these movements do not occur, the energy is not dissipated, so the ball bounces again.

The videos show how high a bouncy ball bounces at different temperatures. The videos were filmed at 500 frames a second, and played back at 50 frames a second, so are at one tenth of actual speed.

- View video of ball bouncing at 25°C, well above T_g (980 KB) ... in separate window ... video alone
- View video of ball bouncing at -50°C, just above T_g (630 KB) ... in separate window ... video alone
- View video of ball bouncing at -70°C, close to T_g (420 KB) ... in separate window ... video alone
- View video of ball bouncing at -190°C, well below T_g (610 KB) ... in separate window ... video alone

The second set of videos are close ups of the bounce itself, showing the deformation of the ball. The ball bounces both above and below T_g, although the process is very different. Above T_g the conformation of the polymer chains changes, and the deformation of the ball can clearly be seen. Below T_g, the conformation is frozen, so it is only the interatomic bonds that are strained, and the macroscopic deformation is much less, and is not observable in the videos.

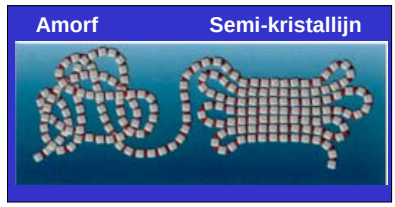
- View video of rubbery bounce, well above T_g (520 KB) ... in separate window ... video alone
- View video of bounce near T_g (690 KB) ... in separate window ... video alone
- View video of glassy bounce, well below T_g (720 KB) ... in separate window ... video alone



A. Thermoplasten

(E.: *thermoplastics*)

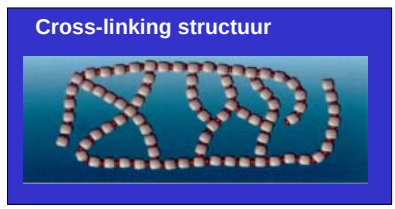
- **Wat ?** : lange keten moleculen met zwakke bindingen tussen ketens; verweken en ev. smelten bij verwarming
- **Structuur** : Amorf of Kristallijn § 3.4.2
- **Temperatuur effecten** :
  - Amorfe zones worden visceuze vloeistoffen boven Tg (glastemperatuur)
  - Kristallijne zones (indien aanwezig) smelten bij Tmp (smeltpunt polymeer)
- **Eigenschappen** :
  - Makkelijk (her-)vormbaar / recycleerbaar boven Tg (Tmp indien semi-kristallijn)
  - Gebruik normaliter beperkt tot matige temperaturen
  - Verhoging kristalliniteit verhoogt sterkte en stijfheid, verlaagt ductiliteit
- **Voorbeelden** :
  - Polyethyleen (PE), polyvinylchloride (PVC)



B. Thermoharders

(E.: *thermosets*)

- **Wat ?** : 3-dimensionaal netwerk van ketens met vele cross-links, welk na vorming en verwarming de 3-D structuur zal behouden
- **Structuur** : normaliter Amorf
- **Temperatuur effecten** :
  - (Lichte) verweking boven Tg (glastemperatuur); maar blijft een vaste stof
  - Bij hoge temperatuur : desintegratie, verkoling, ...
- **Eigenschappen** :
  - Hard en rigied, zeker beneden Tg
  - Hoge dimensionele stabiliteit
  - Resistent aan kruip en vervorming onder belasting
  - Hogere temperatuur capaciteiten dan thermoplastics
- **Voorbeelden** :
  - Fenolen, Expoxyharsen

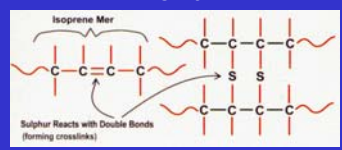


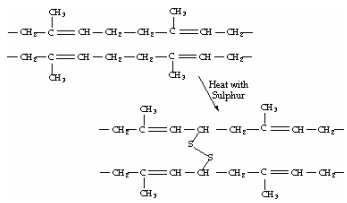
C. Elastomeren

(incl. rubbers)

- **Wat ?** : Capaciteit tot zeer grote elastische vervorming (> 100%), maar terugkeer tot originele vorm na wegnemen belasting
- **Structuur** : Lange ketens, met enkele cross-links tussen ketens
- **Temperatuur effecten** :
  - Bros beneden Tg (glastemperatuur)
  - Erg elastisch boven Tg
- **Eigenschappen** :
  - Naarmate cross-link dichtheid toeneemt stijgen sterkte en stijfheid, doch daalt ductiliteit
- **Voorbeelden** :
  - Natuurrubber (poly-isopreen), Siliconen

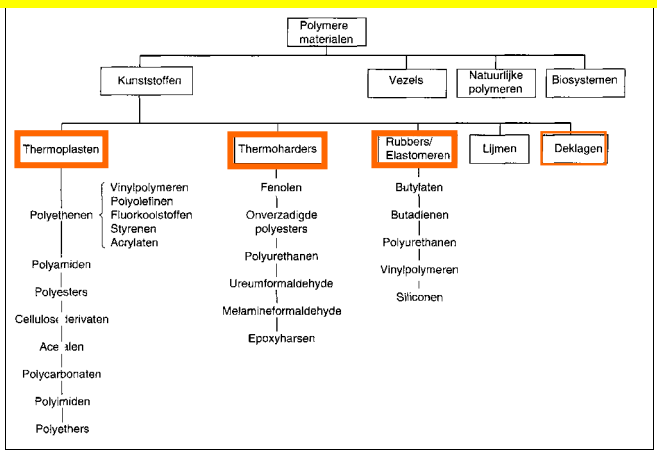
'S' cross-linking bij Natuurrubber





Soorten Polymeren *(2)*

Indeling volgens Chemische Samenstelling



Video …

Inhoud

- Inleiding
- **Polymeerchemie**
  - Polymerisatie-reacties
  - Soorten Polymeren
- **Belangrijkste eigenschappen**
  - Versterkingsmethoden
- Fabricagetechnieken

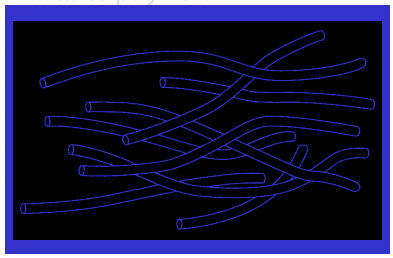
http://www-materials.eng.cam.ac.uk/mpsite/interactive_charts/default.html

Versterkingsmethoden

- Lineaire polymeren
- Vertakte polymeren
- Cross-linking
- Ketenverstijving
- Kristalliniteit
- Toevoegmaterialen
- Mengpolymeren
- IPNs

Versterkingsmethoden

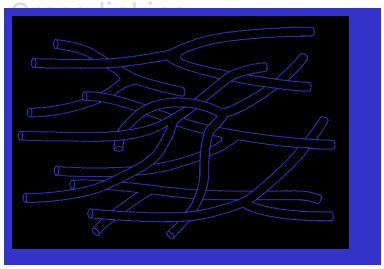
- **Lineaire polymeren**
- Vertakte polymeren



- Lange dunne ketens; met elkaar verstrengeld, doch afzonderlijke polymeerketens
- Bindingskrachten =
  - vanderwaalskrachten
  - waterstofbinding
  - interactie tussen polaire groepen
- Buiging = rond C-'bolscharnieren'
- Hoger MG (hogere polymerisatie-graad) ⇔ grotere trek- & druk-sterkte
- Buigzaamheid = afhank. van mate van vervlochten zijn + van onderlinge oriëntatie in ruimte (***kristallijn*** / ***amorf***)

Versterkingsmethoden

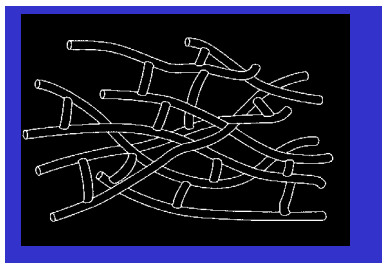
- Lineaire polymeren
- **Vertakte polymeren**



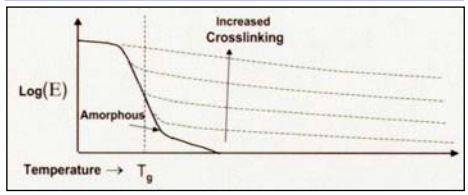
- Veel sterker vervlochten polymeer-ketens
- → Grotere stijfheid
- Speciale katalysatoren en bijzondere procestechnieken voor bevordering vertakkingen
- N.B.: Veel *elastomeren* na vulkanisatie hebben vertakte structuur.

Versterkingsmethoden

- Lineaire polymeren
- Vertakte polymeren
- **Cross-linking**
- Ketenverstijving
- Kristalliniteit

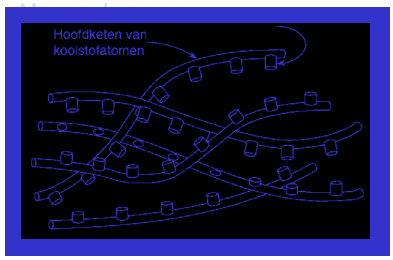


- ‘Cross-links’ = chemische brug-verbindingen
- Ketens die zich tijdens polymerisatie-reactie met elkaar verbinden
- Structuur = zeer sterk & stijf
- Meer cross-links :
  - grotere stijfheid
  - minder chemisch oplosbaar
  - niet of minder hersmeltbaar
- Thermoharders

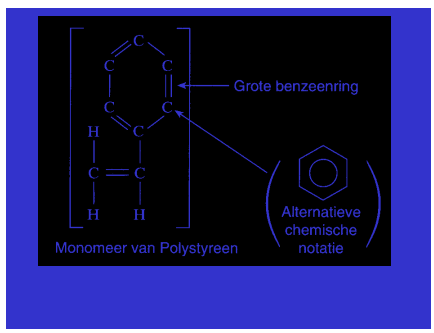


Versterkingsmethoden

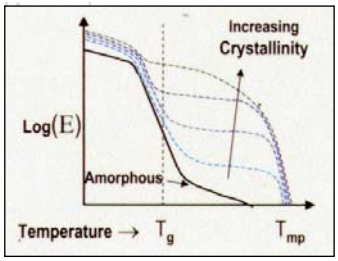
- Lineaire polymeren
- Vertakte polymeren
- Cross-linking
- **Ketenverstijving**
- Kristalliniteit
- Toevoegmaterialen



- Ketenstijfheid door substitutie met omvangrijke moleculaire groepen
- Voorbeeld : PS (polystyreen)

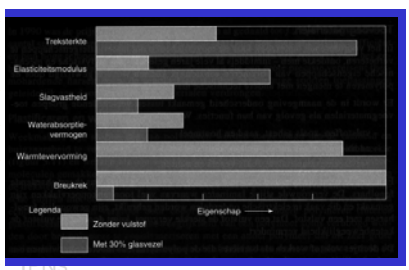


Versterkingsmethoden



- Ruimtelijke verdeling in polymeer ≠ helemaal willekeuring
- Soort kristallijne structuur indien polymeerketens zich +/- evenwijdig oriënteren
- Kristalliniteit : bevorderd door e.g.
  - tijdens vormen in matrijzen
  - straling
  - (mechanische) invloed uitoefenen op ketenoriëntatie
- Hoger kristalliniteit = verhoging smeltpunt, afname chemische oplos-baarheid, vermindering slagvastheid, gunstig effect op andere mech. eig.
- LCP's: Liquid Crystal Polymers (e.g. *Kevlar* = p-fenyleen-tereftalamide -> ***Weefsels***

Versterkingsmethoden



Invloed van glasvezel-vulstof of eigen-schappen van nylon 6/6

- Vulstoffen in plastics : **... / ...**
  - hout (bv. & fenolhars) , asbest, zand, glas
  - rol = cfr. aggregaat (grind) in beton
  - → sterkte, maatvastheid (o.m. chemisch inerte anorgan. mat.)
  - Opm.: ev.*schurende werking* op apparatuur
- Bijz.: Versterkingsmaterialen =
  - vezels, matten
  - textielweefsels, glasvezel weefsels
  - ev.: "*anisotropie*"
- Additieven :
  - ander doel dan mech. eig.-schappen
  - anti-oxidantia, UV-absorbers, kleur-stoffen, vlamvertragende middelen, cross-link middelen
  - weekmakers & plastificeren **... / ...**

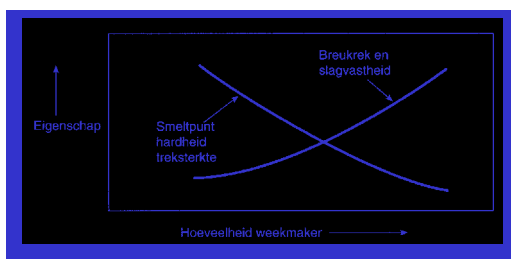
Vulstoffen en hun Effecten

Toevoegmateriaal	Effect
Houtmeel	Verhoogt de sterkte, maar heeft een ongunstige invloed op de vochtabsorptie
Asbest	Vermindert de sterkte en de stijfheid; verhoogt de verwekingstemperatuur; heeft een schurende werking
Korte vezels	Verhoogt de slagvastheid, maar heeft een ongunstige invloed op de elektrische eigenschappen en op de waterbestendigheid
Glasvezel	Verhoogt de sterkte en vermindert de vervormbaarheid; heeft een schurende werking
Anorganische vezel	Verbetert de maatvastheid en de warmtebestendigheid; vermindert het vochtabsorptievermogen; heeft gewoonlijk een schurende werking
Molybdeendisulfide	Verbetert de wrijvingseigenschappen
Polytetrafluoretheen (PTFE)	Vermindert de sterkte en de stijfheid, maar verbetert de wrijvingseigenschappen
Koolstof	Verlaagt de diëlektrische eigenschappen; amorfe koolstof heeft een schurende werking; koolstof in de vorm van grafiet verbetert de wrijvingseigenschappen
Metaalpoeder	Verlaagt de soortelijke weerstand; als voldoende metaalpoeder wordt toegevoegd, kan dat het polymeer tot een elektrische geleider maken
Holle microbollietjes	Kan de dichtheid met 20% verlagen; verbetert het thermisch isolatievermogen; veroorzaakt soms vermindering van de sterkte
Koolstofvezel	Verhoogt de sterkte (meer dan glasvezel); verhoogt de elasticiteitsmodulus; verlaagt de uitzettingscoëfficiënt; is duurder dan glasvezel

Plastificeren en **Weekmakers**

- *Weekmaker* = additief om taaiheid & buigzaamheid te verhogen
- cfr. smeermiddel; laten lange polymeermoleculen makkelijker t.o.v. elkaar bewegen
- 2 soorten :
  - **organisch chemicalie** (met hoog kookpunt)
  - **interne plastificering** : 'blend' of copolymerisatie met ander polymeer dat uit zeer grote moleculen bestaat --> grotere afstand tussen ketens
- Opm.: veroudering ! (migratie weekmaker); vaak niet geschikt als duurzaam constructiemateriaal

- Vulstoffen in plastics
- Bijz.: Versterkingsmaterialen
- Additieven :
  - …
  - **weekmakers & plastificeren**



Versterkingsmethoden

- Lineaire polymeren
- Vertakte polymeren
- Cross-linking
- Ketenverstijving
- Kristalliniteit
- Toevoegmaterialen
- **Mengpolymeren**
- IPNs

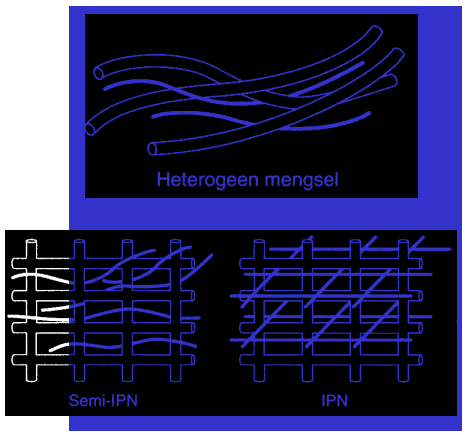
- Cfr. supra
- Mengpolymeren
  - homogeen mengsel
  - 1-fasig
  - Vb.: PVC + Acrylpolymeer
    → dunne platen met buigzaamheid v. PVC-component + sterkte & zonlichtbestendigheid van Acrylcomponent
- Polymeermengsels
  - heterogeen
  - meerfasig
  - Opm.: verschil in Tg tussen verschillende fasen geeft ev. problemen bij het vormgeven
- Research !

Versterkingsmethoden

- Lineaire polymeren
- Vertakte polymeren
- Cross-linking
- Ketenverstijving
- Kristalliniteit
- Toevoegmaterialen
- Mengpolymeren
- **IPNs**

- **"Interpenetrerende Netwerken"**
- Inleiding :
  - ° medio / eind '80s
  - mengsel (2) polymeren; bijzonder synergetisch effect
- Eén v/d polym. (= meestal thermo-harder) en vormt netwerk dat geheel doorvlochten is met ander polymeer
- Eerste polymeer (*het netwerk*) = 3-deminsionale versterking v/h tweede polymeer (*de matrix*)
- 2 Groepen :
  - semi-IPN materialen
  - (totale) IPN materialen **... / ...**

IPN : Interpenetrerende Netwerken



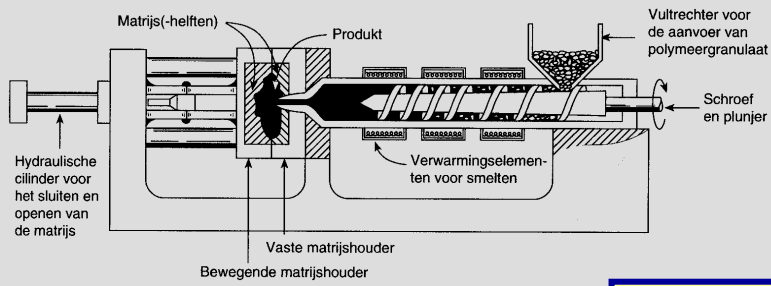
- Eén v/d polym. (= meestal thermo-harder) en vormt netwerk dat geheel doorvlochten is met ander polymeer
- Eerste polymeer (*het netwerk*) = 3-deminsionale versterking v/h tweede polymeer (*de matrix*)
- 2 Groepen :
  - semi-IPN materialen
  - (totale) IPN materialen
- Semi-IPN : 2de polymeer (matrix) = ***lineair polymeer***, gepolymeriseerd binnen netwerk van 1ste polymeer (Nb.: matrix = grootste volume !)
- Totale IPN : 2de polymeer = eveneens ***cross-linked netwerk***, ontstaan binnen netwerk van 1ste polymeer
- Superieure eigenschappen (mechanisch, chemisch), vergeleken met afzond. componenten
- Vb.: PU (polyurethaan) + isocyanaat
- Ev.: semi-IPN met "zelfde" 2 polym.(vb.: nylon)

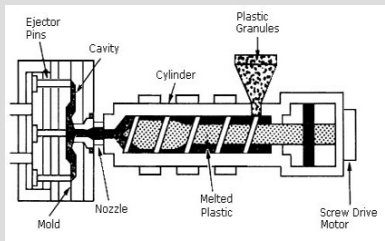
Inhoud

- Inleiding
- **Polymeerchemie**
  - Polymerisatie-reacties
  - Soorten Polymeren
- **Belangrijkste eigenschappen**
  - Versterkingsmethoden
- Fabricagetechnieken

Spuitgieten, persen, blazen, extrusie, …, …, reaction injection molding (RIM) , …, … .

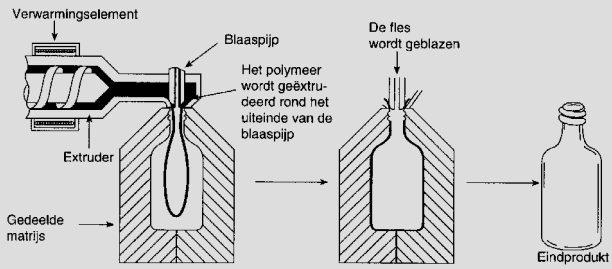
Fabricagetechnieken *(1)*



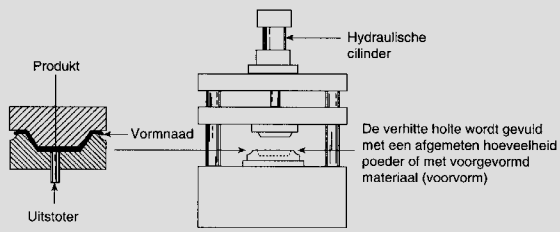


Spuitgieten
(injection molding)

Fabricagetechnieken *(2)*



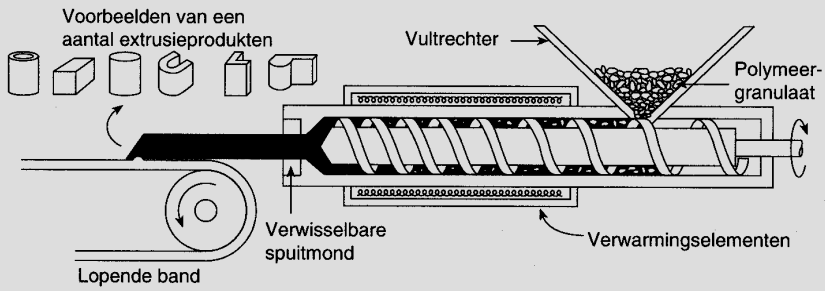
Blazen



Persen

Fabricagetechnieken *(3)*

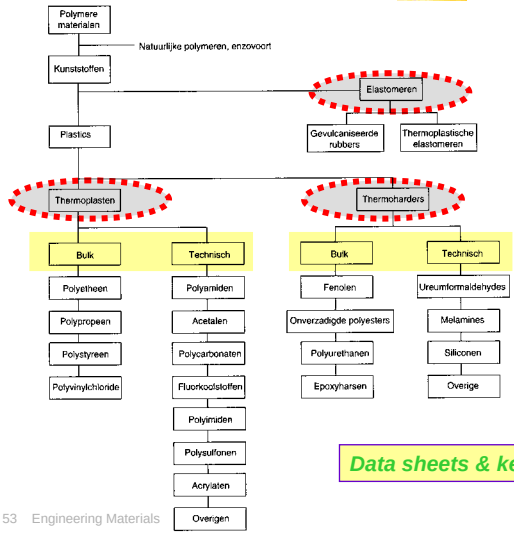
Extrusie



Inhoud

- Inleiding
- **Polymeerchemie**
  - Polymerisatie-reacties
  - Soorten Polymeren
- **Belangrijkste eigenschappen**
  - Versterkingsmethoden
- Fabricagetechnieken

Soorten Polymeren



www.psrc.usm.edu /macrog/

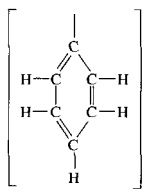
- Thermo-plasten
- Thermo-harders
- Elastomeren

> homopolymeren

Data sheets & kenmerken Polymeren …

Thermoplasten *(1)*

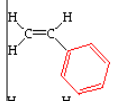
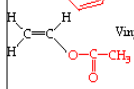
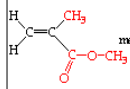
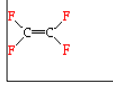
Ethenen

Polymeer	Substitiegroep(en)
Polyvinylchloride	Cl
Polyvinylideenchloride	Cl + Cl
Polypropeen	$[CH_3]$*
Polyisobuteen	$[CH_3] + [CH_3]$
Polytetrafluoretheen	F + F + F + F
Polytrifluorchlooretheen	F + F + F + Cl
Polyvinylacetaat	$\left[O{=}\overset{\overset{\displaystyle O}{\|}}{C}{-}CH_3 \right]$
Polyvinylalcohol	[OH]
Polystyreen  of	
Polymethylmetacrylaat	$[CH_3] + [COOCH_3]$
Polyacrylonitril	[CN]

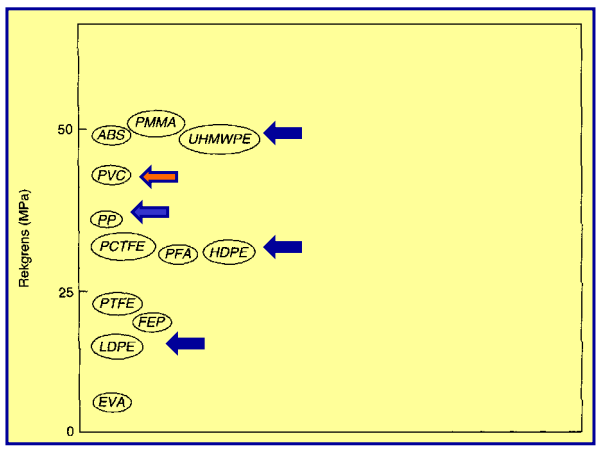
- Afgeleid van ethyleen-molecule (…/…) ; grondstof = aardolie
- Meeste : lineaire structuur met minimum aantal vertakkingen en cross-linking
- Meeste : thermoplastisch (& rubberachtig)
  & makkelijk tot vormproducten te verwerken;
  uitz.: UHMWPE, enkele Fluorpolymeren
- PE, PP, PS, PVC = 60% van markt
- Mechanische eigenschappen: sterk uiteenlopend …

Ethylene polymer derivatives

Formula	Monomer name	Polymer name	Uses
	Ethylene	Polyethylene	Bottles, bags films, toys
	Propylene	Polypropylene	Bottles, films carpets
	Vinylchloride	Polyvinylchloride	Floortiles, coats pipe
	Acrylonitrile	Polyacrylonitrile	Carpets, fabric

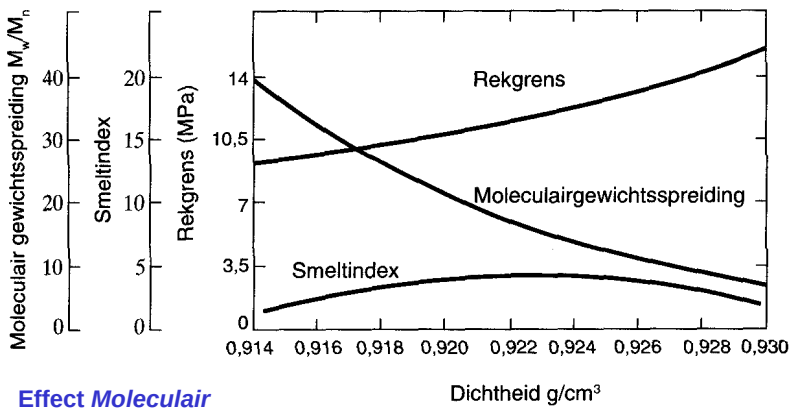
Formula	Monomer name	Polymer name	Uses
	Styrene	Polystyrene	Food containers, building insulation
	Vinylacetate	Polyvinylacetate	Latex paints, adhesives
	Methyl methacrylate	Polymethyl methacrylate	High quality transparent objects contact lenses
	Tetrafluoro ethylene	Polytetrafluoro ethylene	Engine gaskets, bearings, non-stick pan coatings

Mechanische eigenschappen : etheenachtigen (1/2)



Rekgrens
Etheenachtige homopolymeren

Mechanische eigenschappen : etheenachtigen (2/2)



Effect *Moleculair Gewichtspreiding* *(LDPE)*

Thermoplasten *(2)*

- **Polyolefinen** : onverzadigde KWS : C_nH_{2n}
  - **Polyethyleen**
    - LDPE : hoge druk (200 MPA !) ; ketens aanzienlijk vertakt; doorzichtig indien dun; *Toep*.: e.g. verpakkingsfolies, coatings
    - HDPE : lage druk / katalysator (Ziegler-Natta); minder vertakt, hogere kristalliniteit; spuitgieten; *Toep*.: e.g. flessen, pijpleidingen
    - *LLPE*
    - *UHMWPE* : lineair, MG = 3 à 5,000,000 ! ; niet makkelijk te vormen → extrusie ; *Toep*.: e.g. slijtvaste onderdelen in machines
  - **Polypropyleen**
    - PP-H : polypropyleen homopolymeer ; *eig*.: cfr. HDPE; hogere stijfheid, harder, sterker, beter bij hoge T; minder taai, verbrossing bij lage T
  - Polyallomeren : kristallijne copolymeren van olefinen

PP-C : polypropyleen blok copolymeer: P-P-P-E-E-E-P-P-P-E-E-E-P-P-P-
PP-R : polypropyleen random copolymeer : P-P-E-E-E-P-P-E-P-P-P-P-E-E-

- Eigenschappen sterk afhank. van MG (ketenlengte) + verdeling MG
- Buigzaam; goede chemische resistentie (“corrosie-gedrag”)
- Hoe hoger MG, hoe beter chemische resistentie
- PE : niet héél sterk; uitg. UHMPE
- PP : sterker dan PE
- NB: Polybuteen = taaie vloeistof / rubberachtig mat. → kleefmiddelen, dichting (kit)

LDPE - HDPE - PP – Polyolefinen

Polyethelene

low density polyethylene
(LDPE)

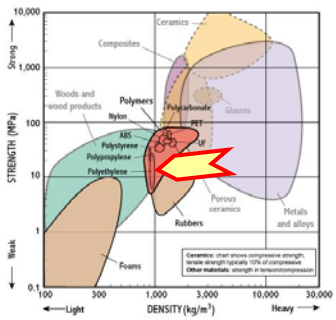
- Easy to blend & process
- Low melting point
- More clarity than polypropylene, but -
- Least rigid material (very flexible)
- Low tensile strength
- Scratches easily (low hardness)
- *Uses:* clear bags for dry cleaning, bread and frozen foods; squeeze bottles, insulation.
- Inexpensive plastic for short-term storage.

4
LDPE

high density polyethylene
(HDPE)

- ***Milky white*** or colored with pigments
- *Uses:* milk cartons, photographic film canisters, cereal box liners, printed shopping bags

2
HDPE



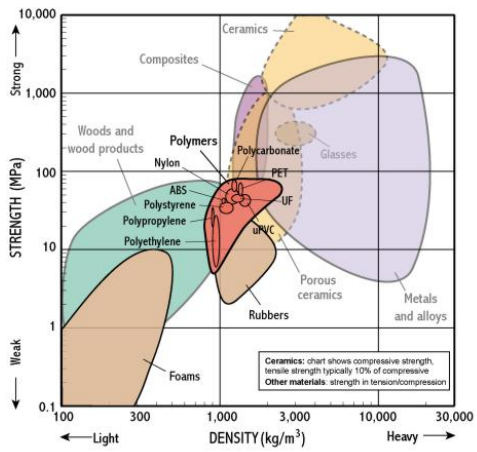
polypropylene (PP)

- Lightweight but strong
- Non-yellowing
- Resistant to chemicals and heat
- Crisper than polyethylene (less flexible)
- Can be "oriented" (like mylar) for strength & stiffness
- Less static than mylar
- Less protection from air and moisture than mylar
- The best storage products are made *without* adding vinyl (PVC), plasticizer, softeners or surface treatments.
- ***Quality plastic storage products.***

5
PP

"Ashby charts" .../...

Ashby charts ...



Thermoplasten *(3)*

- **Polyvinyls** :
  - **PVC** : polyvinylchloride (.../...)
    - Hard PVC : zonder weekmakers; *Toep.*: e.g. grijze kunststofbuizen
    - Zacht PVC : weekmakers; "vinyl"; *Toep.*: e.g. imitatieleder, bekledingen, … o.m. elektrische leidingen
    - PVC-C (of CPVC) : gechloreerd PVC; *Toep.*: e.g. heetwaterleidingen (max. ca. 80°C); ***geringe O_2 penetratie***
  - **(ABS)** : acrylonitrile-butadieen-styreen copolymeer
    (styreen = bevat vinyl groep)
    betere lage T eigenschappen dan PVC; zeer goede taaiheid & slagvastheid
    Toep.: e.g. telefoontoestellen & 'automotive'

- PVC : goedkoop; +/- niet ontvlambaar, zelfdovend
- PVC : bijna sterk & stijf genoeg voor een *'technisch plastic'* .../...
- PVC : geringere taaiheid, kerfgevoeligheid
  ➔ voorkom spannings-concentraties !
- Goede weerstand tegen zuren en basen; ondoorlaatbaar → flessen
- Slechte resistentie tegen organische (oplos-) middelen

PVC : Polyvinylchloride

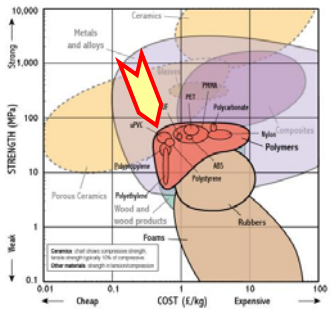
Enige Historiek

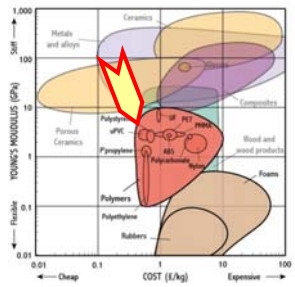
In **1912** ontdekte **Fritz Klatte** de basisprincipes voor de industriële produktie van PVC. Deze principes werden voor het eerst toegepast om het milieu te beschermen tegen giftig chloor dat bij de produktie van natronloog vrijkomt. Door er PVC mee te produceren werd het chloor chemisch gebonden en kon het zonder gevaar afgevoerd worden.

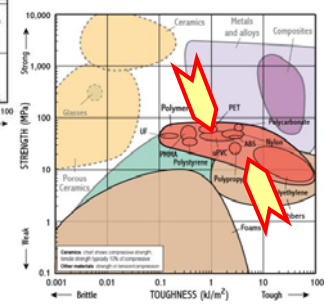
De massaproduktie van deze kunststof begint echter pas in **1938**, toen duidelijk werd waarvoor men PVC zoal kon gebruiken.

Cf.1835 : Regnault !

Mechanische Eigenschappen PVC





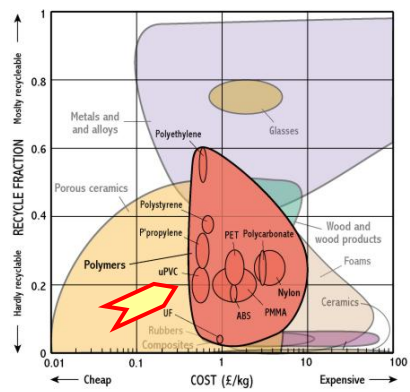


Behoorlijk sterk & stijf – goedkoop plastic;
Doch: normaliter vrij bros (kerfgevoelig) →
weekmakers ! ***of:*** ABS !

PVC – Vinyl

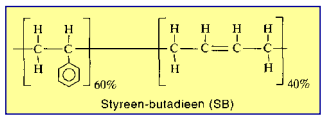
"vinyl" (V) or **polyvinyl chloride** (PVC)

- Good transparency (clarity)
- Chemical and weather resistant
- Scratch-proof
- All PVC polymers are degraded by light and heat, hydrogen chloride is eliminated and oxidation occurs
- Retains water (8%)
- Chemicals used to make this type of plastic can react with water vapor to form *hydrochloric acid* and quickly damage a paper collection.
- *Uses*: "leatherette" fabric, gloves, flying discs, carpet & flooring, pipes, exterior siding, 3-ring binders, bubble wrap.
- *Not recommended for use with silver*
- Used for short-term business document storage
- Not suitable for archival storage purposes



Thermoplasten *(4)*

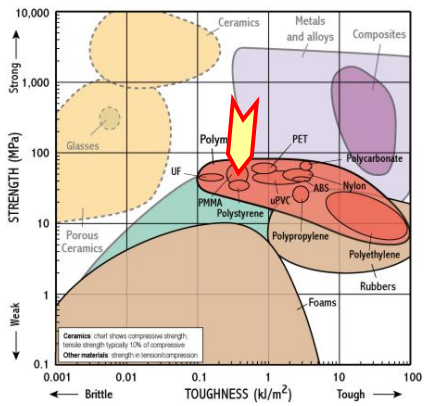
- **Polystyreen** :
  - **PS** : polystyreen
    - benzeenring: ketenverstijving; amorf (atactisch); *Toep.*: consumptieartikelen (e.g. wegwerpbestek, eetbakjes, ...)
  - **SB** (styreen-butadieen copolymeer) slagvast polystyreen
    - *Toep.*: meeste PS als gemodifieerd polymeer (e.g. SB); ook in rubber, "latexverven", …
  - Ook : ABS (cfr. supra) **…/…**
  - **EPS** : expanded polystyreen (schuimpolystyreen)



- Goedkoop; 20% van alle thermoplasten; wegwerpmateriaal & speelgoed
- PS : bros & hard (lage slagvastheid) **…/…**
- Stevig schuim = thermische isolatie, drijfmateriaal, …
- Vergeling onder UV
- Minder corrosieresistent dan PE, PP; aantasting door meeste oplosmiddelen
- Vele verbeteringen door co-polymerisatie en/of weekmakers

Polystyreen

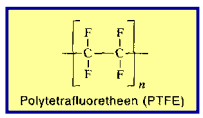
polystyrene (PS)
- **Clear**, ***hard and brittle***
- *Uses*: Compact Disk "gem" cases, toys, house wares, and luggage; cups, plates (foam), egg cartons (foam) and insulation (foam).

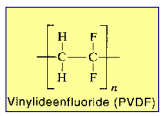


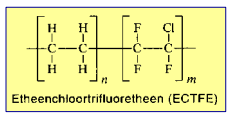
Thermoplasten *(5)*

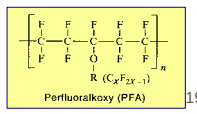
- **Fluoroplastics** :
  - **PTFE** : polytetrafluorethyleen (*Teflon®, Hostaflon®, Halon®*)
    - in het (ethyleen-)monomeer is elk waterstofatoom vervangen door F atoom !
  - FEP : fluor-ethyleen-propyleen (*Teflon®*)
  - PFA : perfluoralkoxy (*Teflon®, Hostaflon®*)
  - PVDF : polyvinylideenfluoride (*Kynar®, Solef®*)
  - E-CTFE : ethyleen-chlorotrifluorethyleen (*Halar®*)

- Duur; PTFE : niet erg sterk; kruip → minder voor constructie
- Zéér goed bestand tegen chemicaliën en oplosmiddelen (veruit best)
- Hoge temperaturen
- Lage wrijving
- PTFE : moeilijkere verwerking (niet smelten; niet vloeibaar)
  ➔ **alternatieve methode**: PM
  ➔ **alternatieve polymeren** (bv. ook spuitgieten mogelijk)
- **E.g. PFA** : ook minder kruip bij bijna zelfde temp.resistentie, etc...


Polytetrafluoretheen (PTFE)

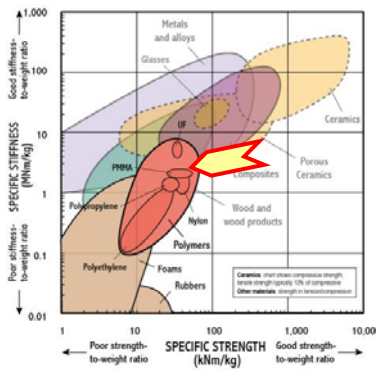

Vinylideenfluoride (PVDF)

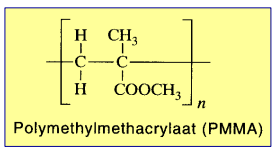

Etheenchloortrifluoretheen (ECTFE)


Perfluoralkoxy (PFA)

Thermoplasten *(6)*

- **Andere "etheen-achtigen"** :
  - **PMMA** : polymethylmethacrylaat
    - acrylaten = helder transparante materialen met **grote stijfheid**;
      Toep.: "plexiglas" ("perspex"); transparante laklagen (verven); lenzen, ...
  - Polyvinylacetaat, Polyvinylalcohol, etc ...

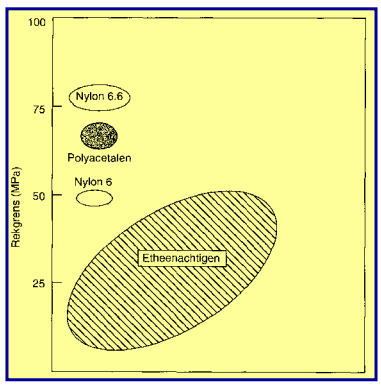



Polymethylmethacrylaat (PMMA)

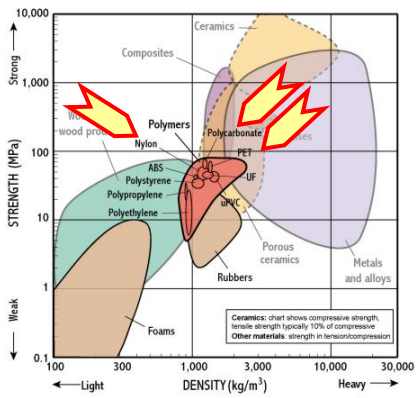
Thermoplasten *(7)*

- **Enkele andere Thermoplasten :**
  - Nylons (polyamiden) & Aramidevezels (LCPs)
  - Polyacetalen, Polysulfon
  - PET : thermoplastisch polyester
  - Polycarbonaten
  - PEEK & composieten

Mechanische eigenschappen



Rekgrens
Etheenachtigen, Nylons en Acetaal-homopolymeren

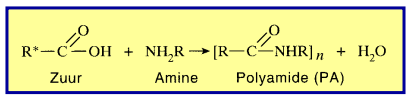


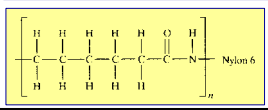
Rekgrens in vgl. met andere Mat.
Etheenachtigen, Nylons, Polycarbonaat, PET, …

Thermoplasten *(8)*

- **<u>Polyamiden</u> PA** (nylons) :
  - Polycondensatie-product van *zuur* + *amine*
  - Types : Nylon 6, Nylon 6.6, Nylon 6.10, Nylon 6/12, Nylon 11, Nylon 12
    cijfers wijzen op aantal C-atomen in uitgangsproducten; "/" = copolymeer, e.g. Nylon 6 & Nylon 12
  - *Kristallijne* thermoplastische stoffen (➔ sterk, slijtvast)
  - Volumeveranderingen (door vochtabsorptie)
  - → Nieuwe verstevigingssystemen

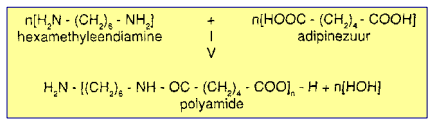
- PA = meest gebruikte "engineering plastic"
- Lange geschiedenis
  (2de WO : nylon parachutes i.p.v. zijde)
- (Zeer) goede mechanische eigenschappen
  ➔ constructie-onderdelen
  (vezels, tandwielen, nokken, …)
- Treksterkte ≈ zachte Al-legeringen
- Doch : vochtabsorptie;
  water = weekmaker voor PA
  (sterkst: 6 & 6.6, minst: 11 & 12)



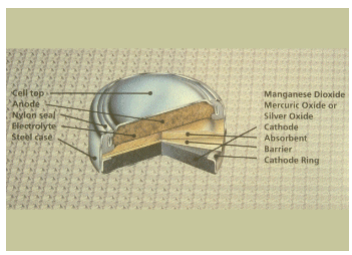


PA 6

PA 6.6

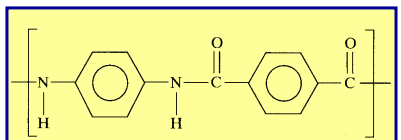


"Nylon"



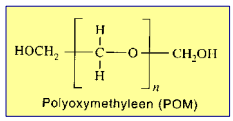
Thermoplasten *(9)*

- **Aramidevezels** (*kevlar®*)
  - = polyamiden waarvan monomeer **2 benzeen-ringen** bevat
  - kristallijn (LCPs)
  - (extreem) hoge sterkte door stijve structuur van keten
  - continue gebruikstemp. tot 260°C
  - gebruiksvorm = vezels, dunne platen

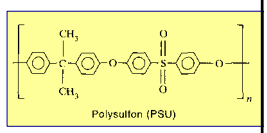


Aromatische polyamide (aramide) [Kevlar®]

- **Polyacetalen**
  - "heteroketen" (C / O); sterk kristallijn
  - mech. eign ≈ nylons
  - minder vochtabsorptie



Polyoxymethyleen (POM)

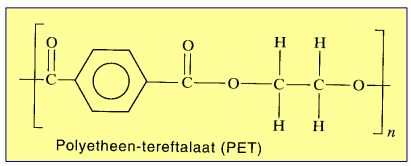


Polysulfon (PSU)

- **Polysulfon**
  - keten van benzeenringen
  - amorf, stijf thermoplastisch materiaal
  - kamertemp.: mech. eign ≈ nylons; doch behoud tot wel ca. 160-180°C

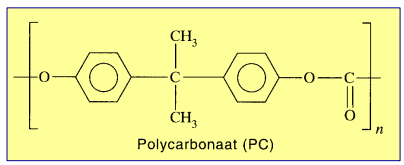
Thermoplasten *(10)*

- **PET** : polyetheentereftalaat
  - = thermoplastisch **polyester**
  - kristallijn; *enigszins kerfgevoelig* …/…
  - *sterk*; maatvast (*stijf*) …/…
  - bestand tegen hoge T …/…
  - resistent à olie & vetten; niet à sterke zuren (koolzuur = OK), basen, of heet water
  - *Toep.*: PET flessen, verpakkingsfolie, magneetbanden, fotografische film



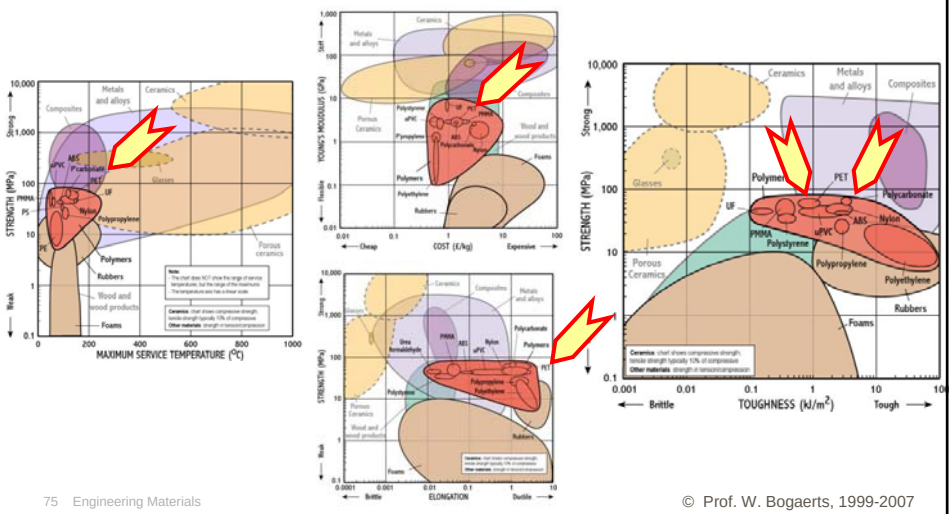
Polyetheen-tereftalaat (PET)

- **Polycarbonaten**
  - = ester van koolzuur + aromatische difenylolverbinding; i.e. = een **polyester**
  - amorf, lineair polyester
  - hard, stijf, **maatvast**, bijzonder ***slagvast*** ! **…/…**
  - glashelder
  - temp.- & weer-resistent
  - *Toep.*: zoals acrylaten, doch slagvastheid tot 16x hoger / duurder



Polycarbonaat (PC)

Mechanische eigenschappen – Sterkte & temp. resistentie PET; Sterkte, slagvastheid (& taaiheid) van PC; Stijfheid PC & PET



PET – Polyethyleen Terephtalaat

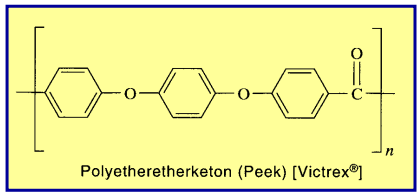
Polyester - any of a group of polymers that consist basically of repeated units of an ester, used especially in making fibers and sheets of plastic film.
Polyethylene Terephthalate (PET) in Europe (PETE) is one form of polyester that **can be completely recycled into thousands of new products** (refer to the "chasing arrows" logo number one).
Uses: soda bottles, leisure suits, x-ray film, video tape and packaging.
Recycled into carpet and fiberfill insulation for ski jackets.

"**Mylar D**" and "**Melinex 516**" are trade names for a special way to make a crystal-clear and strong form of PET plastic, used for **true archival-quality storage and conservation products**. Mylar is "bi-axially extruded polyester film", which aligns the "chains" of molten plastic both vertically and horizontally, similar to the 'grain' in a sheet of paper.

- Crystal clear and very strong
- Very effective barrier against air & moisture
- Resistant to grease, oil, heat, oxidation
- Chemically inert & non-yellowing
- Will not shrink - "dimensionally stable"
- Naturally UV resistant
- Can be produced without harmful additives
- Generates static electricity which attracts dust
- Mylar is more expensive than "Poly" products
- Mandatory for archival conservation - long-term protection for paper (100 years); best plastic for storage of a valuable collection.

Thermoplasten *(11)*

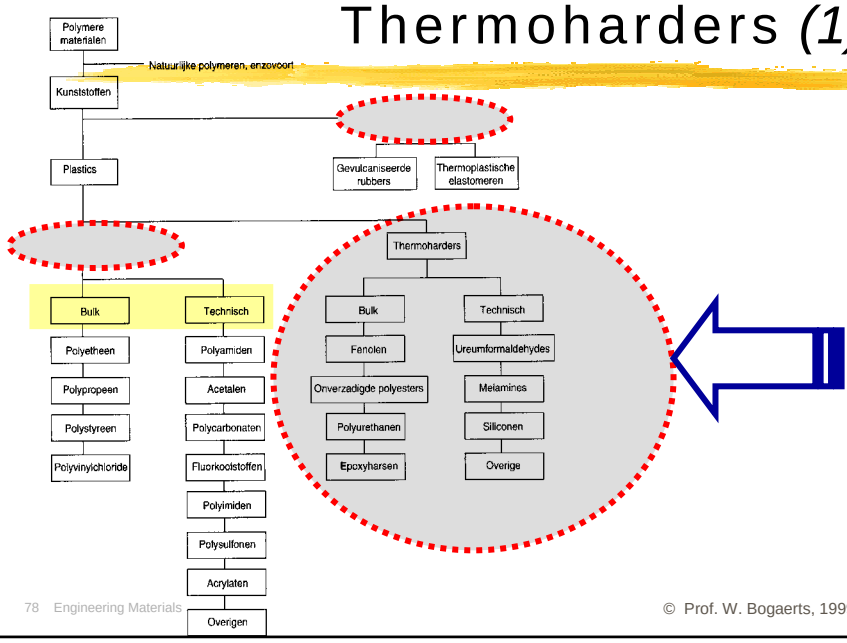
- **PEEK** : polyetheretherketon
  - benzeenringen volgens karakteristieke R-O-R etherstructuur met elkaar verbonden
  - gedeeltelijk kristallijn
  - Bestand tegen *zeer hoge T* (continu gebruik tot 315°C !...)
  - Mech. eign : even goed als nylons (soms zelfs beter) + goede maatvastheid bij hoge temp.
  - Resistent à heet water, stoom !
  - Resistent à vele chemicaliën, incl. vele organische oplosmiddelen
  - prijs : 60-70 Euro/kg



Polyetheretherketon (Peek) [Victrex®]

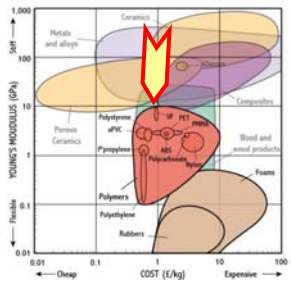
- Varianten :
  - PEEK zonder vulstof
  - PEEK met bv. PTFE als smeermiddel
  - PEEK met glasvezel of koolstofvezel
    - ***koolstofvezel-composiet*** : *stijfheid* > Aluminium
      ≈ Titanium of Cu-legeringen
    - *Toep.* = lucht- & ruimtevaart

Thermoharders *(1)*



Thermoharders *(2)*

- **Enkele belangrijke Thermoharders :**
  - Fenolharsen (cfr. bakeliet)
  - Polyesterharsen (onverzadigde polyesters)
  - Epoxyharsen
  - Technische Materialen :
    - MF : Melamineformaldehydes
    - UF : Ureumformaldehydes →→
    - Alkydharsen :
      alcohol + *acid* (in feite: polyesters)
      (+ oliën & pigmenten) ➔ verven
    - Furaanharsen
  - Polyurethanen

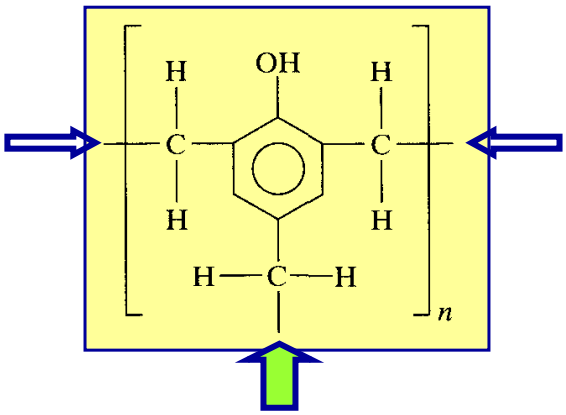


Thermoharders *(3)*

- **FENOLHARSEN**
  (*Fenoplasten*)
- Fenolhars = fenol (aromatisch alcohol) + formaldehyde (CH_2O)
  .../...
- Cross-links door verwarming
- Verschillende stadia van polymerisatie :
  - A-stadium (nog geen cross-links)
  - B-stadium (overgangsstadium: rubberachtig & kleverig; of: al bros)
  - → ev. menging met versterking / vulstoffen (ev. als poeder)
  - C-stadium (cross-linking voltooid)

- Fenolformaldehyde-polymeer : bakeliet
  - vulstoffen (houtmeel, mineraal poeder)
  - elektrische isolator, lage vochtabsorptie, vrij hoge gebruikstemperatuur (200°C)
  - bros
  - *meest gebruikte thermoharder*
    - 1/3 : kleefmiddel in multiplex, ...
    - elektrische printplaten (o.m. met katoen of glasvezelwapening)
    - stopcontacten, schakelaars, ...
    - machine-onderdelen via verspanende bewerking !
    - Schuim

Structuur



Fenolformaldehyde
(PF)

Cross-links !...

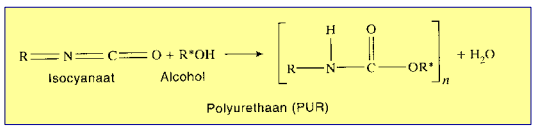
Thermoharders *(4)*

- **POLYESTERS**
- cfr. staal bij de metalen
- 2 Groepen :
  - thermohardende polyesterharsen (onverzadigd)
  - thermoplastische polyesters (sterk kristallijn)
- Ester : alcohol + zuur (organ./ anorgan.)
- Gebruik : als harsmatrix in composieten
  - talrijke toepassingen: boten, vishengels, auto's, etc...
- vaak verkocht als vloeibaar materiaal (i.e. oplossing v/h hars in bv. styreen)
  ➔ katalysator toevoegen voor "uitharding" (cross-linking) ; slechts enkele ml / liter

Thermoharders *(5)*

- **POLYURETHANEN**
  (PUR) (PIR)
- Condensatie-reactie tussen isocyanaat (R=N=C=O) + alcohol (ROH)

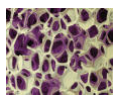
- Rubber, of ...**/**...
- stijve Thermoharder, of
- Schuimen
  - *hard* (zelfs vervangmiddel v. hout in meubels)
  - *zacht & buigzaam*
- Coating : urethaanlakken
  - uitstekende slijtvastheid (vloer-coatings, etc...)



Veelzijdig gebruik POLYURETHANEN ...

- Rubber
- Thermoharder
- Schuimen
  - *hard* (zelfs vervangmiddel van hout in meubels)
  - (uitstekend) isolatiemateriaal
  - *zacht & buigzaam*
- Lijmen & Coatings : urethaanlakken
  - uitstekende slijtvastheid (vloer-coatings, etc...)

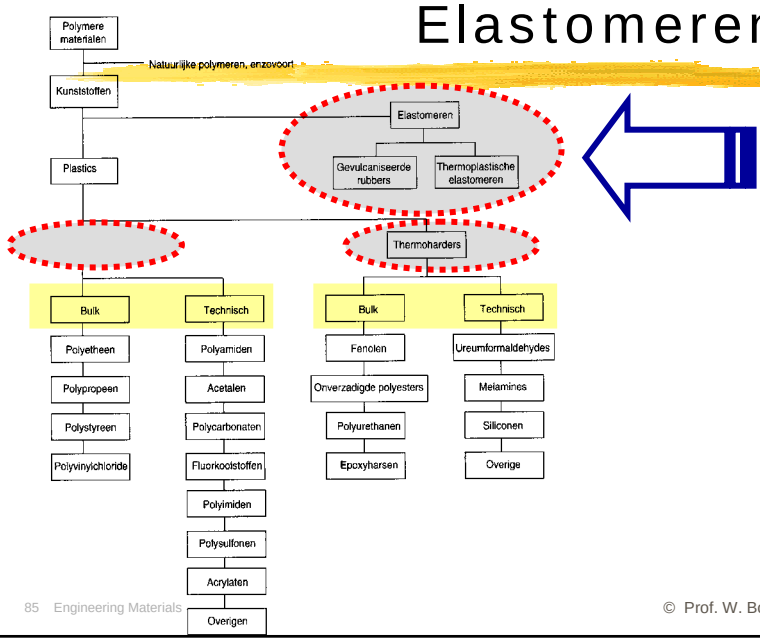






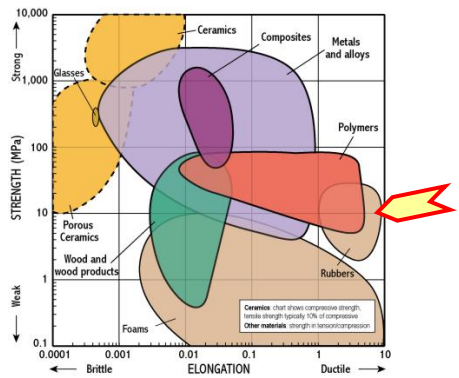



Elastomeren *(1)*



Elastomeren *(2)*

Mechanische Eigenschappen Rubbers / Elastomeren …



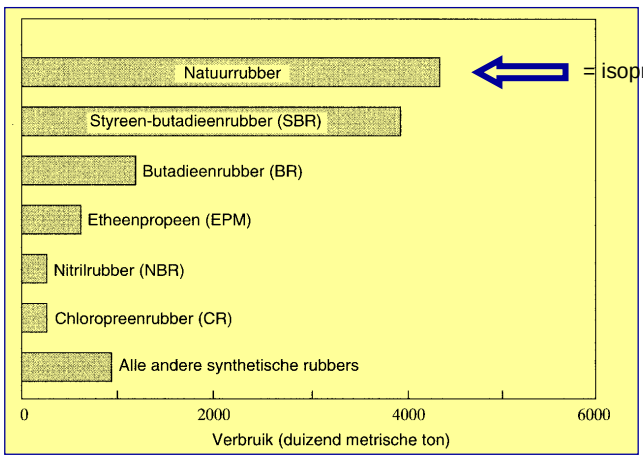
Elastomeren *(3)*

- **Enkele belangrijke Elastomeren :**
  - Latex rubbers
    - natuurrubbers (E.: "*rub* out")
      - zacht & kleverig (T+) ↔ hard & bros (T-)
      - & S + T ; "vulcanisatie"
      - zacht, medium, hard ('*eboniet*') = ca. 20% S vulcanisatie
    - = isopreen; neopreen/chloropreen, SBR, …, ...
  - Polyethyleen rubbers
  - Fluoro-elastomeren !!…
  - Andere elastomeren :
    - Siliconen-rubbers
    - Polyurethaan-rubbers

Aanvullend Overzicht Belangrijke Elastomeren

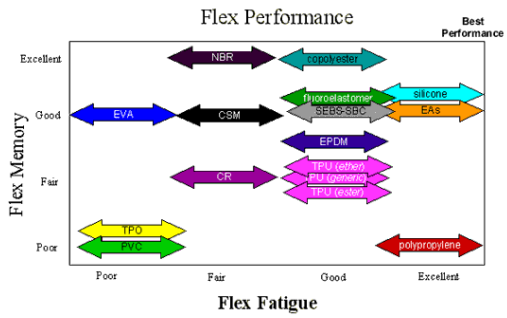
- Cfr. ***aanvullende nota's :*** *lezen* + *kennen* …

Elastomeren : relatief gebruik



= isopreen

Elastomeren : enkele belangrijke eigenschappen



Flex Performance :

Flex Memory: The tendency of elastomers to (eventually) spring back to its original shape after being exposed to stress.

Flex Fatigue Resistance: The tendency of elastomers to eventually spring back to its original shape after being exposed to cyclic stress.

	Dilute Acid	Oxid-ants	Bases	Oils	Water	Ozone
Polyisoprene	Good	Poor	Fair	Poor	Good	Fair
Neoprene	Good	Poor	Good	Good	Fair	Excellent
Nitrile	Good	Poor	Fair	Excellent	Excellent	Fair
Styrene-Butadiene	Good	Poor	Fair	Poor	Good	Fair
Silicone Rubber				Good	Fair	Excellent

Materiaalkunde voor Ingenieurs

= *"Eind-GEBRUIKER"*

- "***Engineering Materials***" : Metalen, ***Niet-metalen***, Legeringen, Coatings, ...
- ***Eigenschappen***, Bereiding en Processing, ...
- ***Beschrijving***, ***Begrijpen***, ***Selectie***, ...
- Etc...

✓ ***Polymeren***
- Composieten
- Keramische Materialen
- Staal
- Staalsoorten & Roestvast staal
- Corrosie
- Schade-analyse & -preventie / NDT
- Gieten, PM, Vormgeven, Verspanen, Lassen
- Cu
- Al
- Ni, Zn, Ti, Mg, Refractaire
- Opp. behand. & Coatings
- Selectie

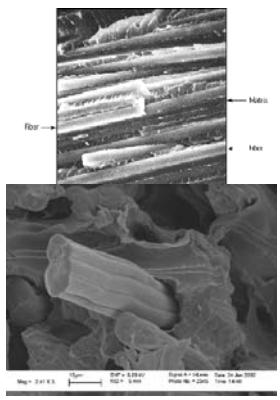
Inhoud

- Inleiding
- **Polymeerchemie**
  - Polymerisatie-reacties
  - Soorten Polymeren
- **Belangrijkste eigenschappen**
  - Versterkingsmethoden
- Fabricagetechnieken
- Polymeermatrixcomposieten

The F/A-22 Raptor in flight. This one of several aircraft with components built with advanced composite materials.

Composieten *(1)*

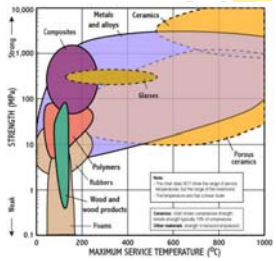
- ***Composiet*** = 2 of meer materialen gecombineerd tot een nieuw materiaal met andere eigenschappen dan de afzonderlijke componenten
- Natuurlijke composieten : bv. hout
- Kunstmatige composieten : PMC (polymeer matrix comp.)
  - wapeningsmateriaal
  - vulstoffen
  - deklagen
- Oud vb.: triplex, multiplex (anisotropie !) ***.../...***
- Vooral : FRP (fibre reinforced plastics)

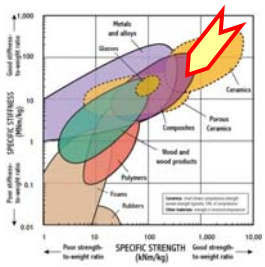


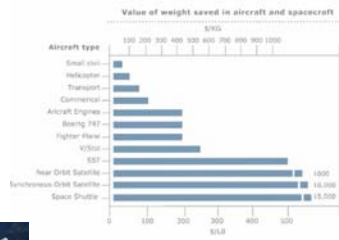
Toepassingen / Illustraties ... /...

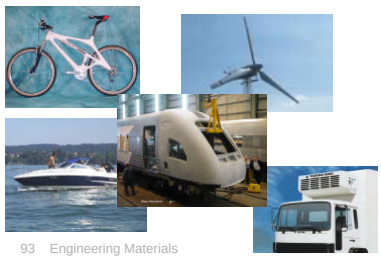
http://www.lightweight.nl/composites.htm

Polymeercomposieten – Gebruiksredenen …



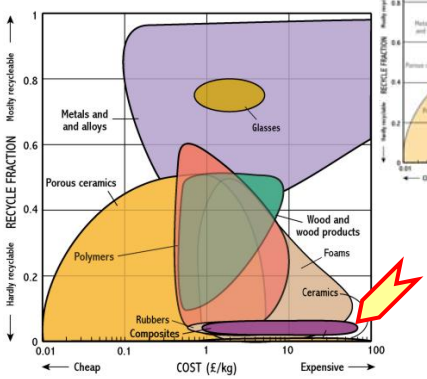


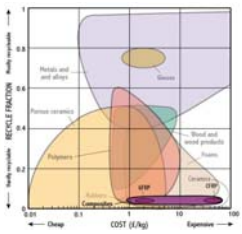


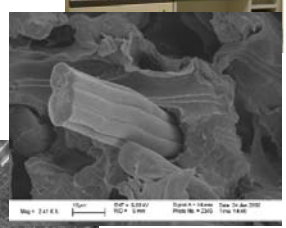


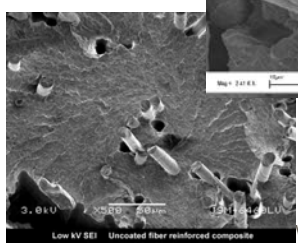
Spaceship 1

Polymeercomposieten – Tegenindicaties / Problemen …

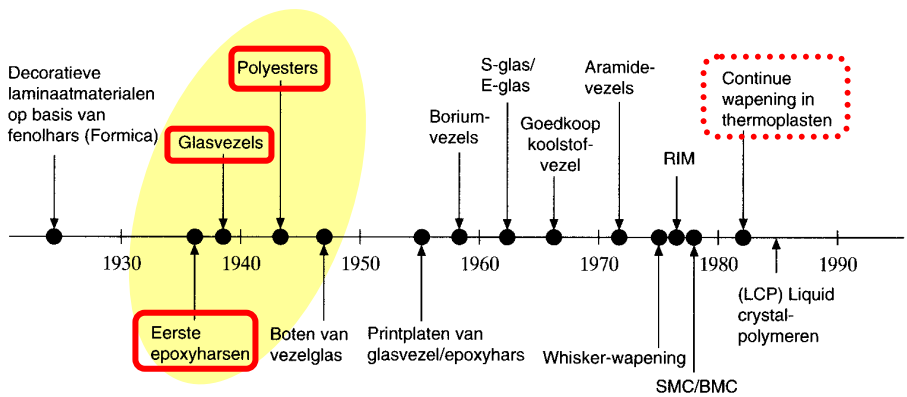








Ontstaansgeschiedenis Polymeercomposieten

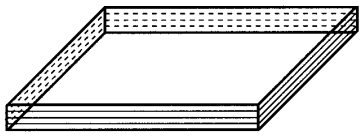


Composieten *(2)*

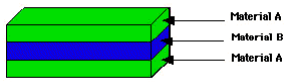
1. Wapeningsschema's :

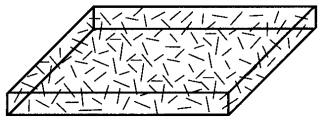
- Wapening: functie = sterkte, stijfheid, kruipvastheid
- Discontinue wapening (sterkte / korte termijn)
  - korte vezels
  - schilfers
  - korrels
- Continue wapening (lange termijn sterkte, kruip)
  - lange vezels
  - vezelmat of weefsel
- NB: "Sandwich" & 2.5- / 3-D structuren
- .../...

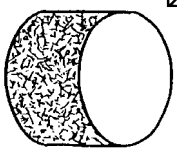
Soorten wapening in polymeercomposieten *(1/3)*



Laminaatwapening

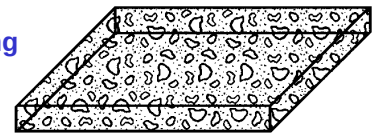




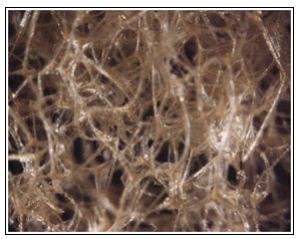


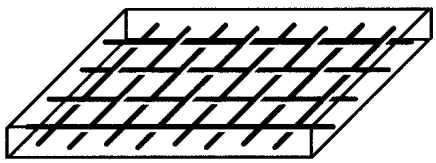
Discontinue wapening

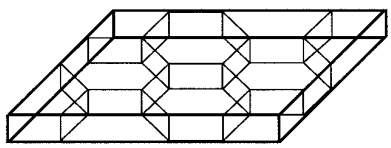
- korte vezels
- korrels
- schilfers



Soorten wapening in polymeercomposieten *(2/3)*



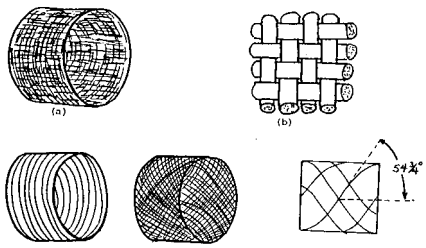




Continue wapening

- Vezelmat of Weefsel **(.../...)**
- (honingraat) skelet

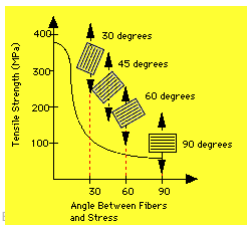
Soorten wapening in polymeercomposieten *(3/3)*



geweven wapening
- "roving" (→ untwisted) / streng bevat vaak ca. 6,000 filamenten (of meer)
- "thread" → 'twisted'

'filament winding' :
- 90°
- 54 3/4 °

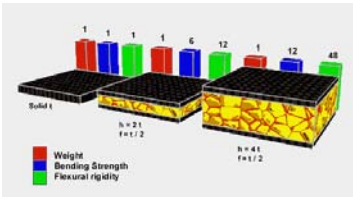
Anisotropie

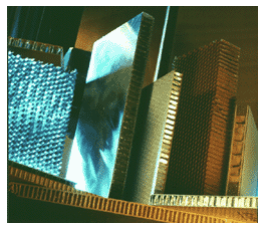


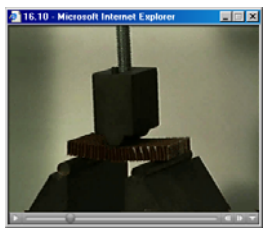
Continue wapening

Soorten wapening in polymeercomposieten – *p.s.*

Sandwich structuren







Composieten *(3)*

2. Matrixmaterialen :

- **Thermoplasten**
  - probleem = hechting vezel - thermoplast
  - tot eind '80s : (enkel) met korte glasvezels (enkele mm); minder sterk dan lange vezels
  - continue wapening : laatste 10 jaar; opl. = vezel bekleed met dun laagje thermoplast
  - "*prepreg*" : vooraf met gewenste matrix materiaal geïmpregneerd weefsel
    → + matrix thermoplast : verhitting & druk (autoklaaf)
- **Thermohardende harsen** (95%)
  - fenol
  - epoxy
  - polyester

Composieten *(4)*

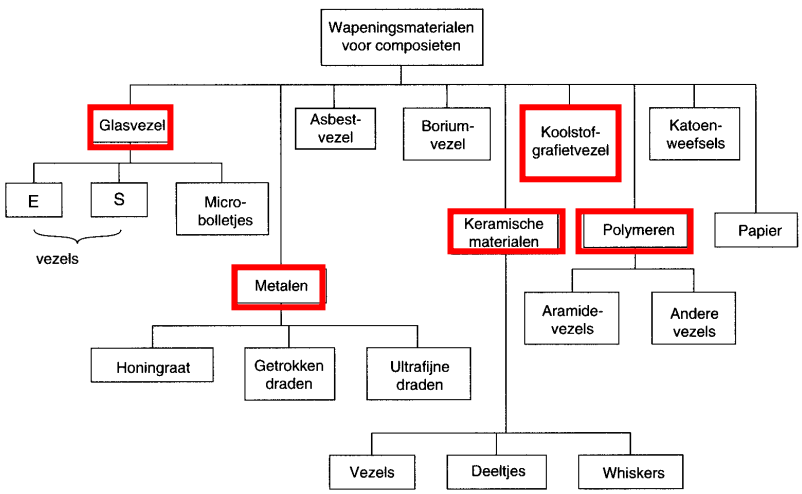
- **Thermohardende harsen**
  - matrix = vloeistof van lage viscositeit
    + katalysator toevoegen; of: warmte; of: (UV-)straling
  - Meest gebruikte :
    - **fenol** : aangekocht als B-hars (≈ thermoplast) = groot voordeel
    - **epoxy** :
      - epoxy = driehoek met 2 C en 1 O ;
        vóór cross-linking: korte ketenmoleculen (ca. 10 monomeren)
      - uniek : geen condensatieproducten of oplosmiddelen afgestoten
        ➔ weinig dimensionele veranderingen bij polymerisatie / cross-linking
      - ca. 25 soorten in handel
    - **polyester** : styreen-polyester ('shelf-life' ≥ 1 jr) + katalysator
      - = verreweg het belangrijkste PMC matrixmateriaal

Composieten *(5)*

3. Wapeningsmaterialen :

- Groot spectrum van materialen ...**/**...
- Metalen : weinig gebruikt (gewicht, hechting); Al honingraat ! (vliegtuigen)
- Keramische materialen : SiC, Al_2O_3, Si_3N_4 (ev. als dunne vezels); ev. hogere sterkte en stijfheid dan glasvezel
  Opm.: 'whiskers' (éénkristallen; +/- zonder roosterfouten; enorm sterk)
- Polymeren :
  - Aramidevezels (kevlar), treksterkte = 3100 MPa !
    gebruik: als continue vezel, geweven materiaal, korte vezel; zowel voor thermoharders als thermoplasten
    taaier & lichter dan glasvezel : vb. kano 6 m Kevlar + vinylester = 8 kg
  - Alternatief : nylons,
    (polypropyleen vezels) : qua sterkte ≈ glasvezel ; onbruik, nu:
    hoog kristallijn polyethyleen

Spectrum van wapeningsmaterialen



Composieten *(6)*

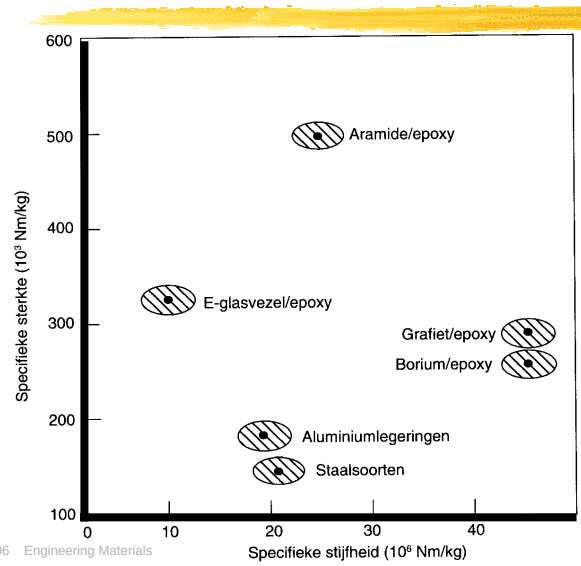
3. Wapeningsmaterialen :

'semi-preg carbon'

- Metalen
- Keramische materialen
- Polymeren
- Koolstof-grafiet
  - wapeningskoolstof
    - ≠ koolstof als Vulstof (vb. rubber); C = amorf
    - = kristallijne koolstof (hexagonaal), "grafiet"
  - vezels met treksterkte = 5500 MPa,
    en E-modulus = 480000 MPa
- Glasvezel

.../...

Vergelijking sterkte en stijfheid



Opm.:diagonaal / epoxymatrix PMC

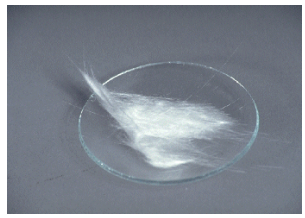
Grafiet/epoxy

Composieten *(7)*

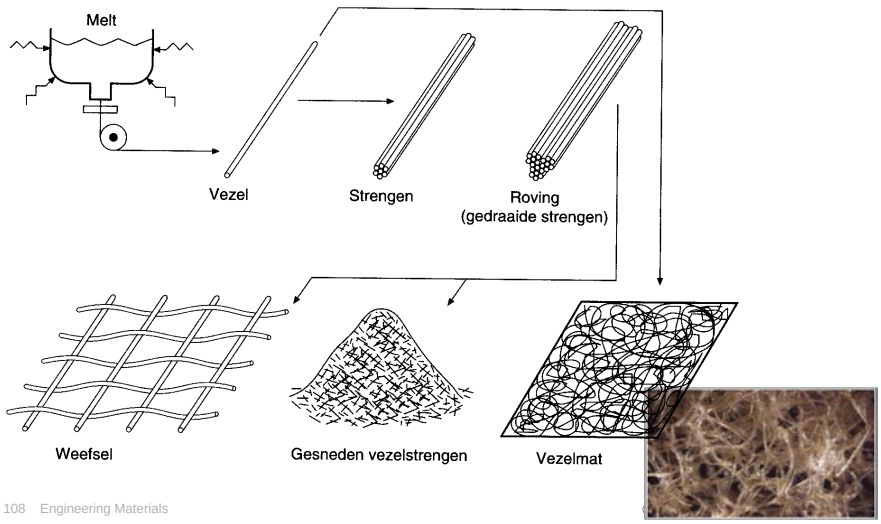
3. Wapeningsmaterialen :

- Metalen
- Keramische materialen
- Polymeren
- Koolstof-grafiet
- Glasvezel
  - Soorten :
    - E-glas (= borosilicaatglas; “pyrex”) -- toep. = *elektrisch*
    - S-glas (= Mg, Al, Si - oxiden) -- *hoge sterkte*
  - 5 à 25 micron
  - Vormen :
    - korte vezels (vnl. in thermoplasten)
    - strengen voor *wikkelen* of *weefsels* (2D, 2.5D)
    - *vezelmat* : willekeurig vervlochten

.../...



Glasvezelvormen



Composieten *(8)*

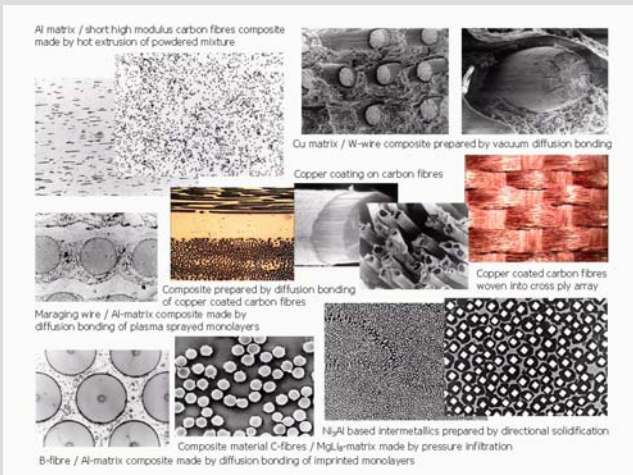
1. Wapeningsschema's
2. Matrixmaterialen
3. Wapeningsmaterialen

4. Fabricagemethoden

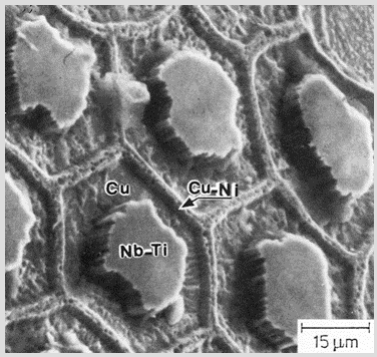
5. Toepassing van polymeermatrix-composieten

Video …

Nota : *"Metaal Matrix Composieten"*



“Metaal Matrix Composieten”



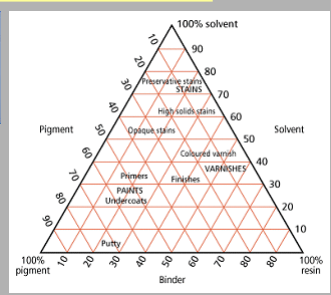
Close-up van Nb-Ti multifilament supergeleidende kabel.
De supergeleidende Nb-Ti filamenten zijn omringd door een Cu matrix.

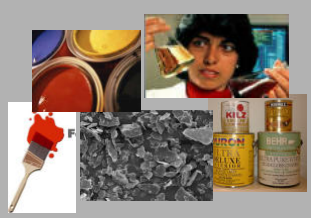
Materiaalkunde voor Ingenieurs

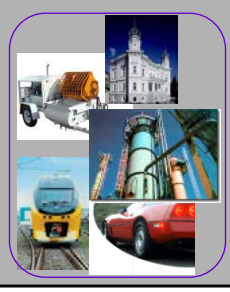
= “Eind-GEBRUIKER”

- “***Engineering Materials***” **:** Metalen, ***Niet-metalen***, Legeringen, Coatings, ...
- ***Eigenschappen***, ***Bereiding*** en Processing, ...
- ***Beschrijving***, ***Begrijpen***, ***Selectie***, ...
- Etc...

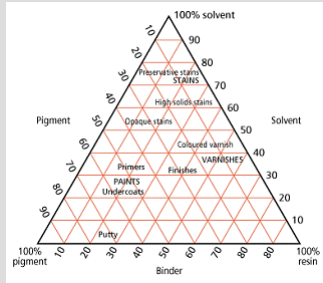
✓ ***Polymeren***
✓ ***Composieten***
- “toemaatje”: ***verven***

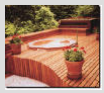




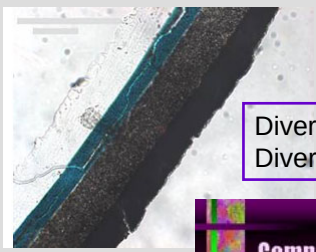


Verf – Coating – Lining – Vernis – Etc …

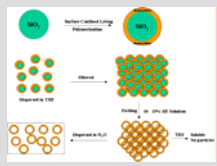


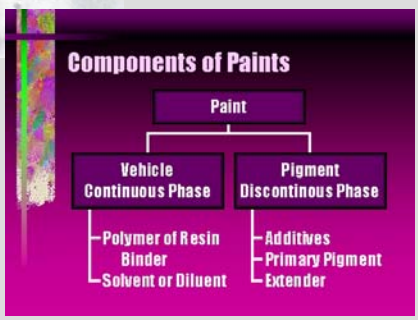


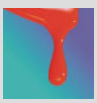
Verf / Coating : Samenstelling = Composiet …

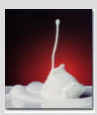


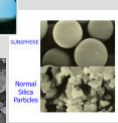
Diverse Lagen …
Diverse Componenten …







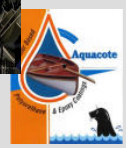




Video …

Coatings : Toepassing / Aanbrengen

Oppervlakte-voorbehandeling ! …



[Video …]

Materiaalkunde voor Ingenieurs

= *"Eind-GEBRUIKER"*

- "***Engineering Materials***" **:** Metalen, ***Niet-metalen***, Legeringen, Coatings, …
- ***Eigenschappen***, ***Bereiding*** en Processing, …
- ***Beschrijving***, ***Begrijpen***, ***Selectie***, …
- Etc…

- ✓ ***Polymeren***
- ✓ ***Composieten***
  - ✓ "toemaatje": ***verven***
- Keramische Materialen
- Staal
- Staalsoorten & Roestvast staal
- Corrosie
- Schade-analyse & -preventie / NDT

- Gieten, PM, Vormgeven, Verspanen, Lassen
- Cu
- Al
- Ni, Zn, Ti, Mg, Refractaire
- Opp. behand. & Coatings
- Selectie

Thema 2

Keramische Materialen

Inhoudstabel ...

Algemeen :

Niet-metallische Anorganische Materialen ...

Keramische Materialen

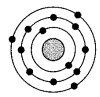
- Metalen: 1, 2 of 3 valentie-elektronen
- Niet-metallische elementen: valentie 5, 6, of 7
- Edelgassen: 8 valentie-elektronen
- Elementen met valentie 4 = metalloïden

- **Keramisch Materiaal** = combinatie v. 1 of meer metalen met 1 of meer niet-metallische elementen
- ***Vnste verschil met andere technische materialen = aard van hun bindingen***

.../...

Atomaire binding *(1)*

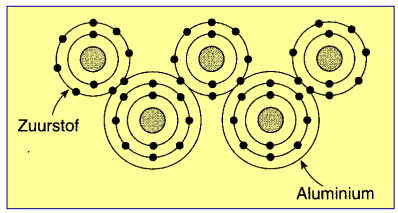
- *Metaal:* atomen bij elkaar gehouden door 'elektronen-wolk' ("metaalbinding")
- *Keramisch Mat.:* zeer stijve covalente of ion-bindingen
- Vb.: Aluminium-oxide
  verbinding v. Al en O atomen in verhouding 2 : 3; Valentie-elektronen zijn zo verdeeld dat elk atoom een buitenste schil met 8 elektronen heeft ...



3-waardig aluminiumatoom

6-waardig zuurstofatoom

- "Ionbinding": ene atoom staat valentie-elektronen af aan andere, zodat positief en negatief geladen ionen ontstaan die elkaar elektrostatisch aantrekken.
- "Covalente binding": valentie-elektronen zijn gemeenschappelijk "bezit" van 2 atomen.



Atomaire binding *(2)*

- **Sterke binding** (covalent of ionbinding)
  ➔ eigenschappen :
  - (erg) bros : rekbelasting leidt tot kristalsplijting
  - grote hardheid
  - geringe chemische reactiviteit
  - gering elektrisch geleidingsvermogen (isolatoren) :
    valentie-elektronen zijn onderdeel van binding tussen atomen, waardoor ze zich niet vrij door het kristal kunnen verplaatsen
  - Soms: versteviging (niet veel) door toevoeging elementen, of door wijziging kristalstructuur
    vb: *boornitride* : hexagonaal = zeer zacht; kubisch = extreem hard

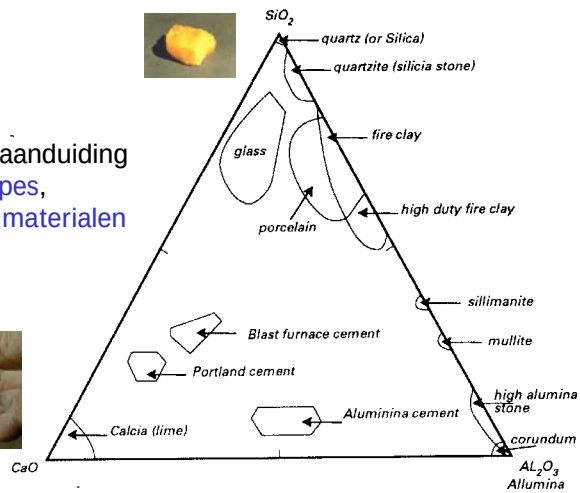
Niet-met. Anorgan. Mat.

- Soorten :
  - *"Echte"* Keramische materialen ("Technische Keramieken")
    - klei- & steen-producten / bouwmaterialen ...
    - "neo"-keramiek: Zr-Oxiden, Al_2O_3, SiC, Si_3N_4
  - Glas & Glasachtige materialen
  - Cementproducten
  - Koolstof en Grafiet
  - Samenstellingen ...**/...**
- = Analoge Technische Eigenschappen;

  deze eign.: bijzonder; veelal afwijkend van metalen of kunststoffen

Ternair Diagramma : Al_2O_3 , SiO_2 en bv. CaO

Ternair diagramma met aanduiding van cementtypes, glastypes, porcelein, en refractaire materialen



Eigenschappen *(1)*

- **Algemene eigenschappen anorganische materialen :**
  - goede temperatuurvastheid
  - hoge druksterkte
  - vormvastheid
  - brosheid
  - slechte warmtegeleidbaarheid
  - grote chemische inertheid

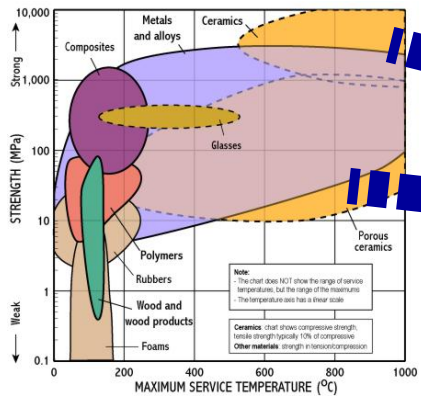
Eigenschappen *(2)*

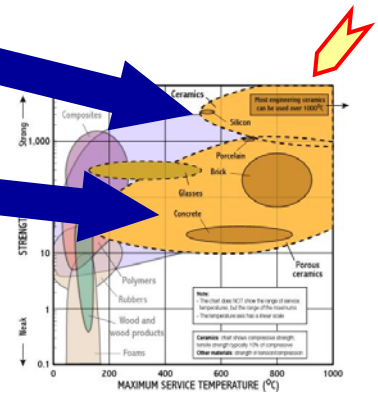
1. Temperatuurvastheid

- Anorgan.mat. = goede temp.vastheid :
  - hoog smeltpunt (800 - 3000°C)
  - bruikbare eigenschappen tot hoge Temp. ***…/…***
  - uitz.: cement- & betonproducten (wel gemaakt bij hoge T)
- Vormgeving & eigenschappen :
  - door chemische en fysische reacties
  - poeder- of korrelvormige grondstoffen → door verhitting: sinteren of smelten
    → hierbij: transport door vaste stof diffusie, verdamping / condensatie, of vloeistofdiffusie (visceuze vloei) → door wederzijds oplossen, reageren en kristalliseren: ontstaan van nieuwe componenten in amorfe of kristallijne toestand
  - door deze reactie: vaak krimp (porie-volume, i.e. ruimte tussen grondstofdeeltjes wordt kleiner)
  - na afkoeling (=eindtoestand): zuiver kristallijn of amorf, of kristallijne delen in amorfe matrix (i.e. composietstructuur)

Illustratie: Sinteren & Krimp …

Vergelijking Thermische Eigenschappen





Eigenschappen *(3)*

2. Brosheid en Hardheid

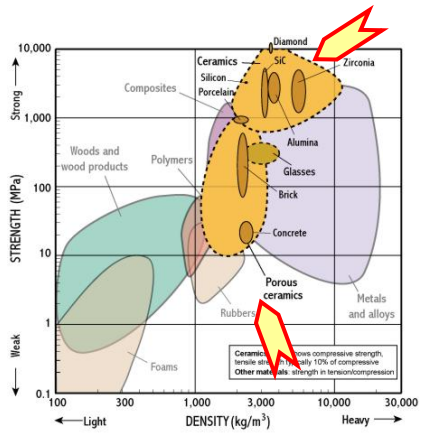
- groot verschil treksterkte & druksterkte bij zelfde T :
  - treksterkte << druksterkte ...**/**...
- Spanning-vervorming diagram: nauwelijks vervorming bij breuk; Hoge elasticiteitsmodulus; Zeer hoge hardheid
- Uitz.:
  - glas & C-vezels : hoge treksterkte
  - amorfe C = hard; grafiet = zacht

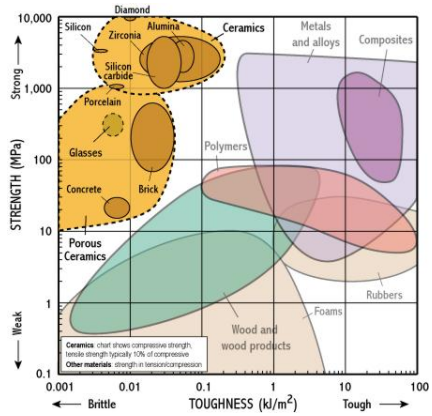
3. Elektrische & Thermische Geleiding

- geen vrije elektronen → weinig geleiding warmte & elektriciteit; d.w.z.: isolatoren
- Uitz.: SiC en Grafiet; hier wel vrije elektronen aanwezig

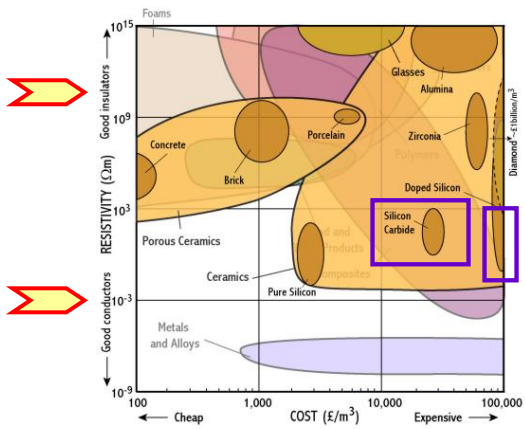
...**/**...

Vergelijking Mechanische Eigenschappen





Vergelijking Elektrische Eigenschappen



Eigenschappen *(4)*

4. Gevoeligheid voor thermoshocks

- Combinatie slechte warmtegeleiding, hoge elasticiteits-modulus en lage treksterkte (brosheid)
  ➔ gevoelig voor thermoshocks
- Abrupt temp.verschil → thermische uitzetting → plaatselijk hoge trekspanningen door slechte warmte-geleiding → scheurvorming
- Gevoeligheid voor thermoshocks: "*thermische sterkte*"

$$F = (R_t \,/\, \alpha_{th} \,.\, E) \,.\, (\lambda \,/\, \rho \,.\, C_p)^{1/2}$$

R_t = treksterkte
α_{th} = therm. uitzettingscoëff.
E = elasticiteitsmodulus
λ = warmtegeleidingscoëff.
ρ = specifieke dichtheid
C_p = soortelijke warmte

1. Keramieken *(1)*

- Keramiek : Gr. "*keramos*" = drinkhoorn
  → kruik & pot gebakken uit klei → aardewerk & porselein
- Nu : = oxidische & niet-oxidische materialen verkregen door sinterprocessen bij hoge temperatuur
- Vbn. keramiek op <u>kleibasis</u> :
  - <u>Bouwmaterialen</u>: bakstenen, grespijpen, zuurvaste en vuurvaste stenen, tegels, ...
- Vbn. <u>moderne</u> keramische materialen :
  - TiC, WC, SiC, BeO, ZrO_2, Al_2O_3, Si_3N_4, BN, AlN, Sialons

  dwz.: zowel carbiden, oxiden, als nitriden

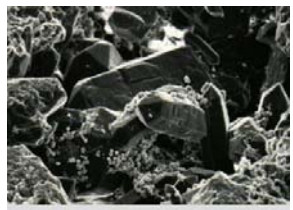
Keramieken *(2)*

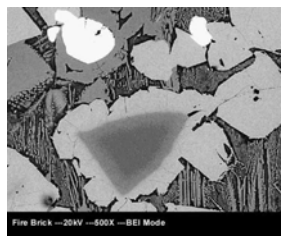
A. Bouwmaterialen (Aardewerk & Porselein)
("poreuze keramische materialen")

- Grondstof = klei (vele variaties) en porseleinaarde
  = fijn anorganisch bezinksel (uit rivieren, meren, zee); deeltjes <2 micron
  minstens 50% = Al-mineralen (Al_2O_3)
  + onverweerde mineralen als kleine korrels; veelal rijk aan SiO_2
- Kaolien ($Al_2O_3.2\ SiO_2.2H_2O$) en Veldspaat ($KAlSi_3O_8$) = goede grondstof voor porselein
- Klei-types: variëren tussen 70% Al_2O_3 + 25% SiO_2 en 10% Al_2O_3 + 85% SiO_2, met enkele % tot sporen oxiden van Fe, Ca, Mg, K en Na (% gelden voor watervrije massa, i.e. gebakken vorm)
- In natuur : klei watergehalte = 10 à 60%

Keramieken *(3)*

- **Drogen en Sinteren** (1/2 ...)
  - Watergehalte bepaalt plasticiteit & vervormbaarheid ➔ relatief eenvoudig allerhande vormen maken
    (eenvoudige tegels, meest ingewikkelde technische of artistieke voorwerpen)
  - Na vormgeving: voorzichtig drogen (vrije water verdampen)
  - Voorzichtig verhitten: verdwijnen van fysisch-chemisch gebonden *hydraat* water
  - Vanaf 900-1000°C: "*sinteren*"; d.w.z. echte reactiestap v/h bakken:
    - elkaar rakende poeder- & korreldeeltjes reageren; bruggen van nieuwe chemische verbindingen ontstaan en/of wederzijdse oplossingen i/d vorm v. niet of slechts deels gekristalliseerde massa's.
    - door deze reacties ontstaat de keramische binding
  - Als resultaat v. drogen & sinteren: +/- poreuze structuur
    - lang, hoge T => minder porievolume, doch: grote krimp ! (maat = ?)

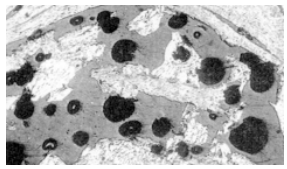

Kaolin particles under electron microscope



Illustratie: Sinteren & Krimp ...

Keramieken *(4)*

- **Drogen en Sinteren** (... 2/2)
  - Als resultaat v. drogen & sinteren: +/- poreuze structuur
    - lang, hoge T => minder porievolume, doch: grote krimp ! (maat = ?)
  - Oplossing voor Technische Producten :
    - mengsel met grofkorrelige componenten (e.g. brokjes bauxiet)
    - deze korrels in eindproduct omringd door gesinterde massa
    - grove delen zorgen voor geringe krimp + betere maatvastheid
- Eigenschappen van keramisch materiaal :
  - e.g.: temp.weerstand, chem.weerstand, temp.shock weerstand
  - hangen af van samenstelling, korrelgrootteverdeling, sintergraad, porievolume



Keramieken *(5)*

- **Ternair Diagramma :**

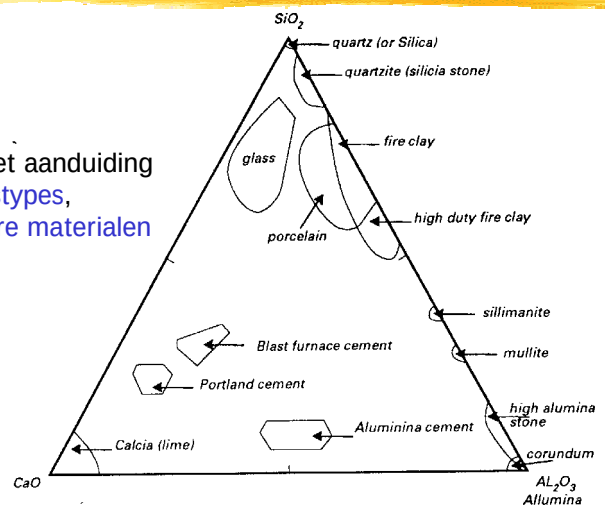
  Al_2O_3 , SiO_2 en enkele % alkali- of aardalkali-oxiden (bv. CaO)

  ➔ ganse serie vuurvaste materialen op de as SiO_2 naar Al_2O_3

  → hogere % alkali- en/of aardalkali-oxiden (bv. K_2O of CaO) : snel slechter wordende temp. bestendigheid; wel: sinteren en bakken gaat makkelijker

Ternair Diagramma : Al_2O_3 , SiO_2 en bv. CaO

Ternair diagramma met aanduiding van cementtypes, glastypes, porcelein, en refractaire materialen



Keramieken *(6)*

Corrosievastheid

- Samenstelling van korrels en -vooral- van de bindende fase bepaalt corrosievastheid
- Algemeen : SiO_2-rijk = beter zuurbestand; Al_2O_3-rijk = beter alkalibestand
- Vaak ook zeer corrosievast in agressieve milieus, als zoutzuur, zwavelzuur, fosforzuur ("zuurvaste" keramiek; vaak tot 300°C)
- Soms : bedekken met laagje laag-smeltend glas → oppervlakte-poriën gesloten → glad en dicht oppervlak

Keramieken *(7)*

B. Nieuwe Materialen (i.e., carbiden / nitriden)

- Voor constructietoepassingen (machines, apparaten) :
  - Aluminiumoxide
  - Siliciumcarbide
  - Siliciumnitride
  - Carbonitrides
  - (Partieel gestabiliseerd) Zirconiumoxide
  - Sialon ($Si_3Al_3O_3N_5$)
  - Gesinterde carbiden
  - Met glas verkitte mica's (verspaanbaar)

- Voor slijtage, corrosie (Tabel 7.7, p.288; Tabel 7.8, p.290) **.../...**
- Voor elektrische, magnetische eigenschappen

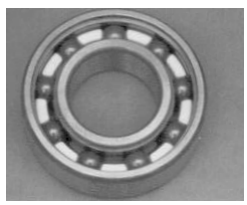
Keramieken *(7b)*

- **Nieuwe Materialen** (i.e., carbiden / nitriden)
  - Voor constructietoepassingen
  - **Voor slijtage, corrosie**

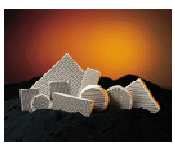
Enkele Voorbeelden:

Zirconia 'crucibles' gebruikt voor het smelten van superlegeringen

Andere zirconia producten: nozzles, verbandingskamers, etc...



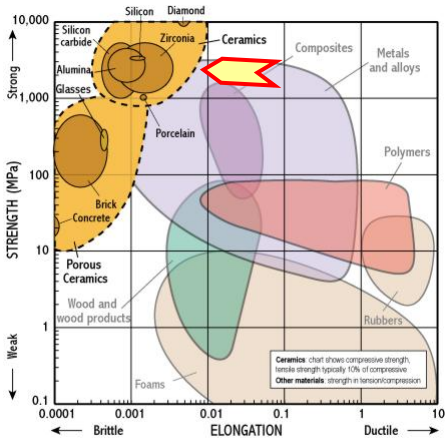
Kogellager: Titanium & Carbonitride

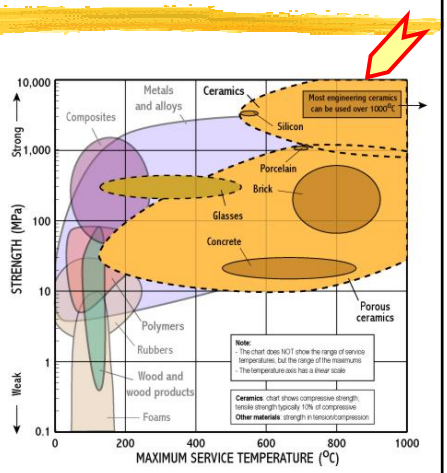


Hoge-temperatuur filters, etc...

Ceramic compound	Formula	Melting point (°C)	Ceramic compound	Formula	Melting point (°C)
Hafnium carbide	HfC	4150	Boron carbide	B_4C_3	2450
Titanium carbide	TiC	3120	Aluminum oxide	Al_2O_3	2050
Tungsten carbide	WC	2850	Silicon dioxide†	SiO_2	1715
Magnesium oxide	MgO	2798	Silicon nitride	Si_3N_4	1700
Zirconium dioxide	ZrO_2*	2750	Titanium dioxide	TiO_2	1605
Silicon carbide	SiC	2500			

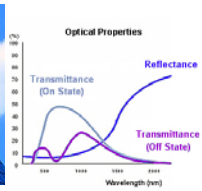
Keramieken *(7c)*



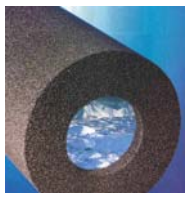


2. Glas & Glasachtige Materialen

Glas : *veelzijdigheid*



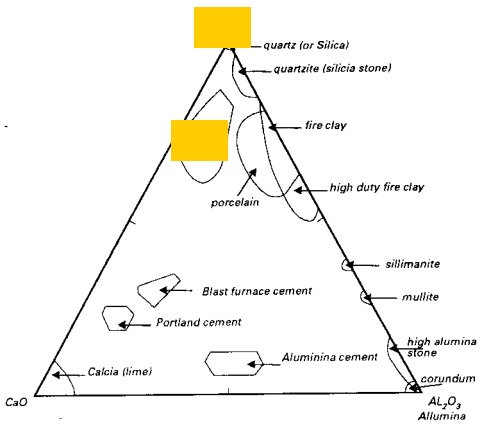
Epitaxial bell jar for semiconductor manufacturing.

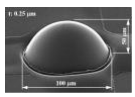


Machined quartz flanges, rings, discs and plates.

Glas *(1)*

- **WAT ?**
  Glas = *amorfe*, niet-kristallijne stof; ontstaan uit gesmolten materiaal dat vast geworden is
- Boven Tg = <u>onderkoelde vloeistof</u> met beweeglijke wanorde
  Onder Tg = vaste stof met vaste wanorde
- Samenstelling : meeste glazen vnl. SiO_2 ;
  maar er zijn ook andere verbindingen die glasvorming kennen, zelfs *metallische glazen* !

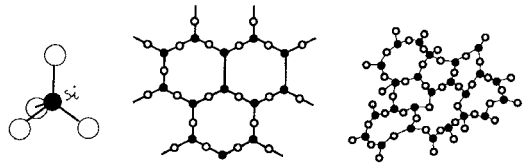




Glas *(2)*

Atomaire Structuur *(1)*

- meeste 'technische' (& corrosie-resistente) glazen = SiO_2 basis
- SiO_2 in glas als volledig willekeurige stapeling van $(SiO_4)^{4-}$ tetraëders, in een open structuur verbonden door Si-O-Si bruggen

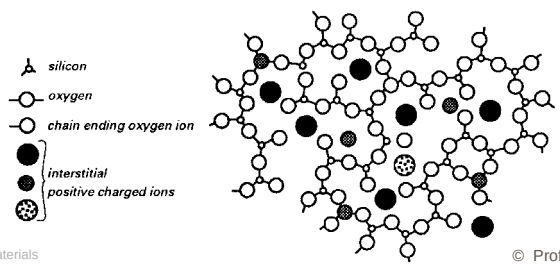


- "kwartsglas" (hard, moeilijk smeltbaar) = zuiver SiO_2 in amorfe glastoestand (<-> kwartskristal in e.g. horloges)
- Om smeltpunt te verlagen: andere ionen in netwerk ingebouwd: bij gewoon vensterglas Na en Ca; voor chemisch resistent glas Boor ➔ "borosilicaat-glas" .../...

Glas *(3)*

Atomaire Structuur *(2)*

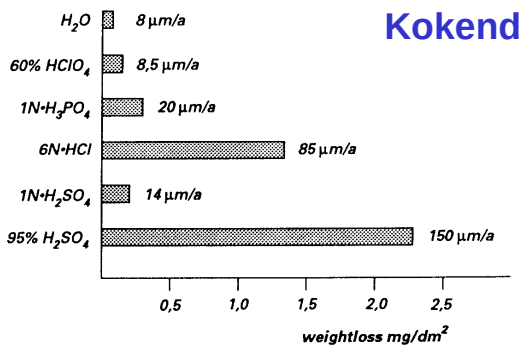
- "kwartsglas" (hard, moeilijk smeltbaar) = zuiver SiO_2 in amorfe glastoestand
- Door toevoeging andere (metaal-)oxiden met 1, 2 of 3-waardige kationen (Na_2O, CaO, B_2O_3, Al_2O_3) wordt deel van Si-O-Si bruggen verbroken en onstaan eindstandige neg. geladen O-atomen. De vreemde kationen (Na^+, Ca^{++}, B^{+++}) vinden een plaats tussen de tetraëders, zodat e-neutraliteit behouden blijft.
- Samenhang is echter verminderd ➔ lager "smelt"-punt (vloeibaarder), etc...
  → vormgeving : blazen, gieten, persen, trekken, ... (nadien T↓: viscositeit ↑)



Glas *(4)*

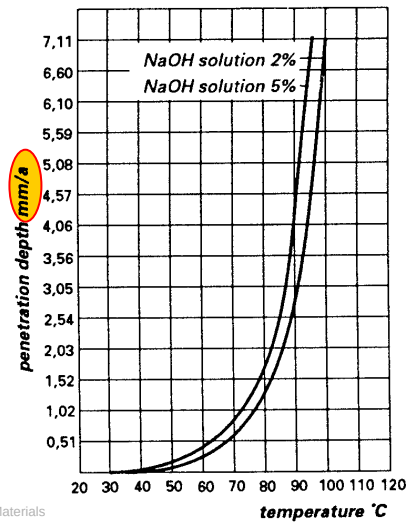
- **Drukspanningen**
  - (1) buitenzijde; (2) binnenmassa ➔ drukkrachten in buitenlaag
  - Snel afkoelen ; "*temperen*"
- **Corrosievastheid**
  - Algemeen : zeer goed
  - Vnl.: borosilicaatglas (≈ 80% SiO_2, 13% B_2O_3, + Na_2O, Al_2O_3)
  - Ev. Aantasting = ionenwisseling van kationen tussen tetraëders, waarna silicaatnetwerk (Si-O-Si) wordt afgebroken
  - Aantasting = altijd uniform (≠ metalen); stijgt exponentieel met temperatuur; verloopt lineair in de tijd => goed extrapoleerbaar !
  - HF, Sterke Basen (vnl. bij hogere Temp.) !!...

Glas *(5a)*



Kokend Water, Zuren

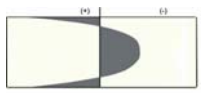
Glas *(5b)*

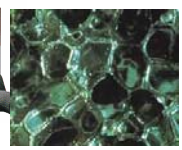


NaOH

Glas *(6)*

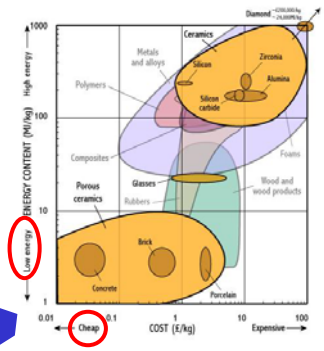
- **Getemperd & Gelaagd Glas**
- **Foamglas**
- **Email**
  - = relatief dunne laag glas, hechtend op metalen ondergrond aangebracht (i.e., laag C-staal of gietijzer) : *"glass-lined steel"*
  - ➔ corrosievaste, slijtvaste, gladde, diffusiedichte coating op een niet-corrosievaste ondergrond (Toep.: o.m. voor pijpen, pompen)
  - Porievrije emaillering ➔ meerdere lagen glas (tot 6; dikte 1 à 2.5mm)
  - **<u>Opbrengen</u>** :
    - spuiten of dompelen in suspensie van fijngemalen glaspoeder
    - drogen & verhitten tot 700-800°C : poeder smelt ➔ laag glas
    - 1ste laag die wordt "gebrand" op staalopp. ('hechtlaag') heeft afwijkende samenstelling : toevoeging van oxiderende metaaloxiden ➔ reactie met staal; resulterende laag: gasbellen, poreus, niet corrosievast
    - bijkomende lagen (vrij van gasbellen, niet poreus)
  - Apparaten-ontwerp & -bouw ⇔ Thermoshocks !

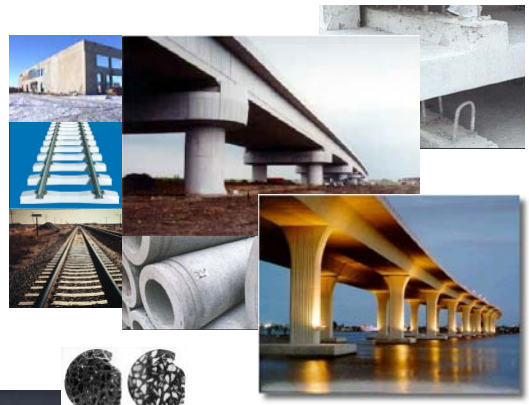




Reglassing of a reactor

3. Cement & Beton *(1)*

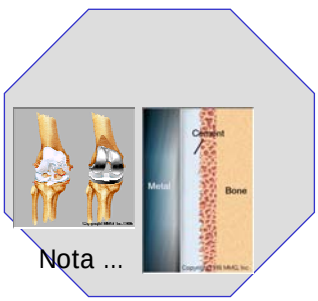




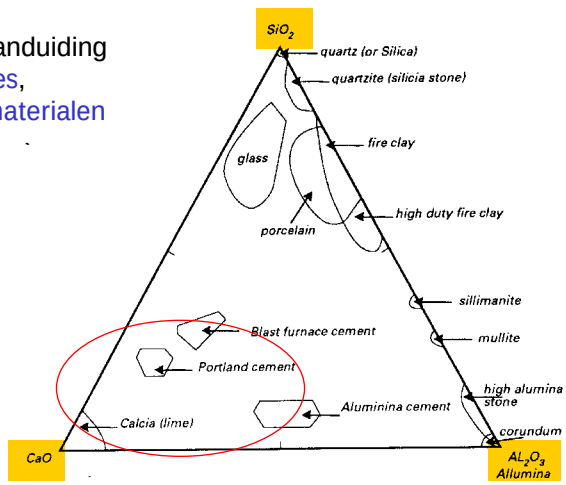
Toepassingen / Illustraties … /…

Ternair Diagramma : Al_2O_3 , SiO_2 en bv. CaO

Ternair diagramma met aanduiding van cementtypes, glastypes, porcelein, en refractaire materialen



Nota …



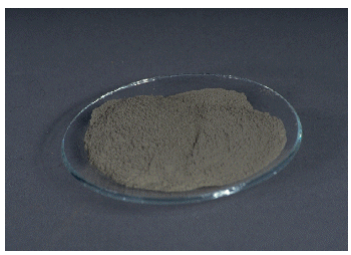
Cement & Beton *(2)*

- **"Bindmiddelen"**
  - *niet-hydraulische (luchtbindmiddelen)* : onder toevoeging van water aan lucht verharden
    - luchtkalk (< 5% klei) :
      $Ca(OH)_2 + CO_2$ (lucht) → $CaCO_3$ (onoplosbaar) + H_2O
    - niet harden onder water
  - *hydraulische* : enkel harden onder invloed van water
    - hydraulische kalk (6.5 - 20% klei)
    - gips
    - alle cementsoorten

  binding = te danken aan vorming (o.i.v. water) van gehydrateerde calciumsilicaten en -aluminaten die harde massa's veroorzaken

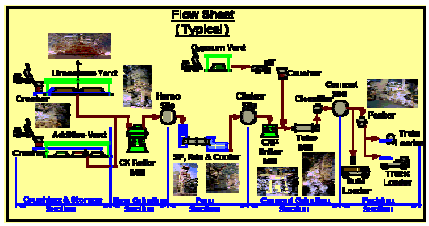
Cement & Beton *(3)*

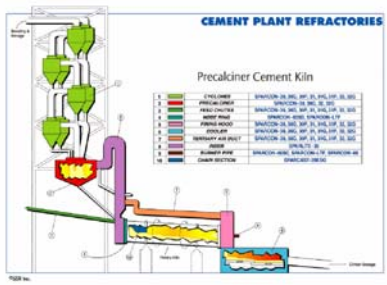
- **"Portland Cement"**
  - *°1818 - F.:* *Vicat* : klei in kalksteen maakt harding van kalk mogelijk onder water : "hydraulische kalk"
  - ~ 1820s - *E.:* *Aspdin* : volgens dit principe: industriële bereiding van "Portland" cement (cfr. kleur na harding = rotsen)
  - Naam : veralgemeend vr. alle gewone artificiële cementen die CaO + SiO_2 + Al_2O_3 bevatten
  - Uitgangsproduct :
    zuiver kalksteen +
    klei (25...40%)



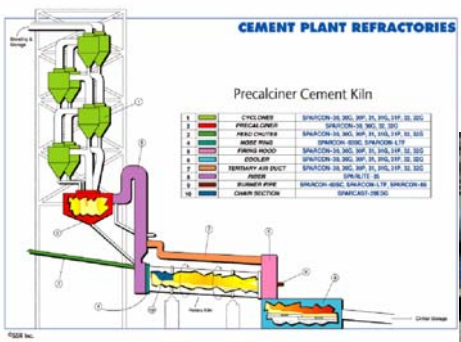
Cement & Beton *(4)*

- **Bereiding** :
  - Cement verkregen door "branden":
    sinteren van fijngemalen en gemengde minerale grondstoffen, i.e. ***kalksteen*** + ***klei*** + ev. *Hoogovenslakken* + ev. nog andere grondstoffen
  - Bij het sinteren : ***…/…***
    - kleimineralen verliezen hun water
    - vallen uiteen in SiO_2, Al_2O_3 en eventueel Fe_2O_3
    - deze reageren tot watervrije Ca-silicaten, Ca-aluminaat en Ca-aluminiumferriet
    - samenbakkende reactie-producten vormen "klinker", die vermalen wordt tot "cement"





Cementoven



http://www.malvern.co.uk/ProcessEng/industries/cement/overview.htm

Reacties bij “Branden”

- bij 100°C : verwijdering niet-chemisch gebonden water
- ca. 500...550°C : verwijdering chemisch gebonden water uit **klei** en ontbinding van het gevormde anhydride
  - kaolien : $Al_2O_3.2SiO_2.2H_2O \rightarrow Al_2O_3 + 2\ SiO_2 + 2\ H_2O$
- boven 800°C : ontbinding van kalksteen in “levende **kalk**” (CaO)
- bij 1400...1500°C : verbinding van de kalk met het SiO_2 en Al_2O_3, vooral tot
  - tricalciumsilicaat $SiO_2.3CaO$ “C_3S” *sterk hydraulisch*
  - β-dicalciumsilicaat $SiO_2.2CaO$ “C_2S” *hydraulisch*
  - tricalciumaluminaat $Al_2O_3.3CaO$ “C_3A” *sterk hydraulisch*

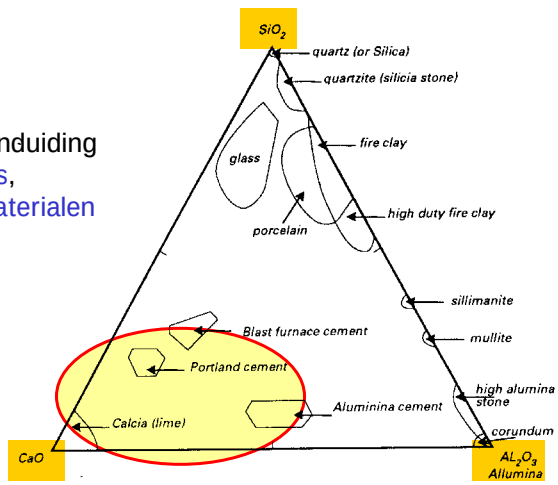
  en bij aanwezigheid van ijzeroxide in de klei :

  tetracalciumaluminiumferriet $4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$ “C_4AF” *hydraulisch*

- *Soorten* : o.m. verschillende “hydrauliciteit”, i.e. snelheid van binding
  hoogovencement : +/- weinig C_3A (slakken bevatten weinig Al_2O_3)
  ijzerportlandcement, *aluminiumcement*, ... *wit cement* (o.m. Fe_2O_3 vrij) ...I...

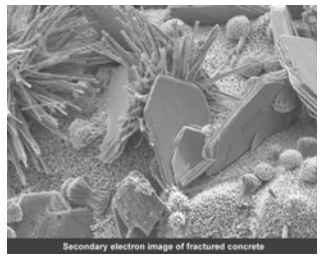
Ternair Diagramma : Al_2O_3 , SiO_2 en bv. CaO

Ternair diagramma met aanduiding van cementtypes, glastypes, porcelein, en refractaire materialen



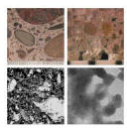
Cement & Beton *(5)*

- **Hydratatie** :
  - door vermenging met water : ***hardingsproces***
  - OORZAAK :
    - deels oplossen van componenten in water
    - daarna: reageren met water tot hydraten (=waterrijke kristalstructuren), waardoor diverse componenten met elkaar samengroeien + zich hechten aan ingebedde vaste bestanddelen (grind, zand, bakstenen, betonijzer)
    - uiteindelijk: groot agglomeraat v. hydraatkristallen, doorsneden met netwerk v. met water gevulde capillairen;
      zulk agglomeraat = *composiet*
  - hydratatie-reacties = langzaam (uren...maanden), afhankelijk v/d hydra-terende verbinding (C_3S, C_3A) en van maalfijnheid

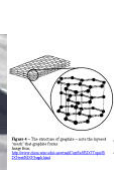


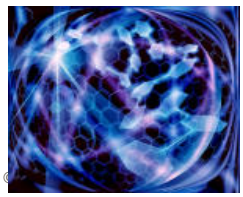
Cement & Beton *(5)*

- **Beton** :
  - uitgeharde cement = massa hydraatkristallen = *bros*
    d.w.z.: druk = OK; trek = ??
    sterkte door (toeslagstoffen: zand, grind) + wapening
  - capillaire water :
    - hydratatie v. Ca-silicaten geeft $Ca(OH)_2$; oplossing in capillaire water geeft pH>12
    - bescherming Fe wapening !
- aantasting (corrosie) :
  - CO_2 : op lange duur vrije kalk i/h capillaire water omzetten in $CaCO_3$ ("*carbonatatie*") ➔ hoge pH daalt; roesten Fe en afbreken betondekking
  - Aantasting door zuren; vooral H_2SO_4 en sulfaten !!...



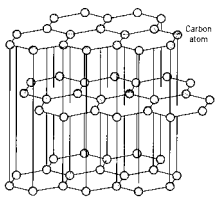
4. Koolstof & Grafiet





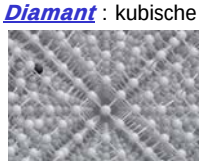
Koolstof & Grafiet *(1)*

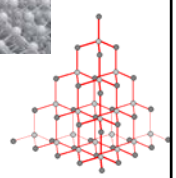
- 3 vormen in natuur : amorf koolstof, grafiet (= zacht) , diamant (= uiterst hard) ; [+ fullerenes; "bucky balls"; °1985; C60 – 20 hexagons + 12 pentagons] [+ DLC : Diamond Like Carbon]

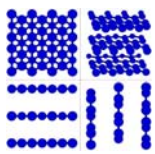


Grafiet : plaatachtige hexagonale structuur; kan zodanig als smeermiddel dienst doen

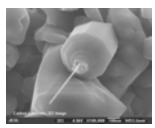
Diamant : kubische structuur

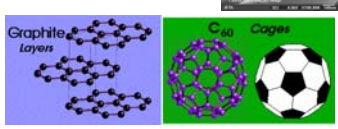






Koolstof Nanotube…





Koolstof & Grafiet *(2)*

- **C & Grafiet = +/- unieke niet-metalen** :
  - Goede warmte- & elektriciteitsgeleiders
  - Hoge thermische geleidbaarheid ➔ excellente thermische schokbestendigheid

    cfr. "*thermische sterkte*"

    $F = (R_t / \alpha_{th} . E) . (\lambda / \rho . C_p)^{1/2}$

    R_t = treksterkte — **λ = warmtegeleidingscoëff.**

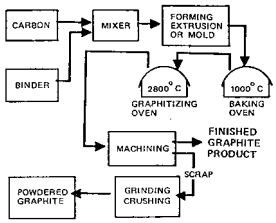
    α_{th} = therm. uitzettingscoëff. — ρ = specifieke dichtheid

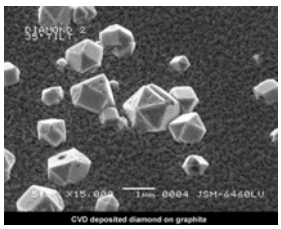
    E = elasticiteitsmodulus — C_p = soortelijke warmte
  - Echter : bros t.o.v. metalen; mechanische schokbestendigheid = slecht
  - Slijtvastheid = slecht
  - Inert t.o.v. vele corrosieve producten

Koolstof & Grafiet *(3)*

- **Fabricatie** : .../...
  - basis C of grafiet constructie = poeder
  - poeder : gemengd met bindmateriaal (e.g. teer, synthetisch hars)
  - onder P in vorm gebracht & 20 à 40 dagen aan elkaar gebakken bij ca. 1000°C in zuurstofvrije atmosfeer (gehele massa verkoolt)
  - Eindresultaat = vrij poreus product van gesinterde +/- amorfe *(meso-morfe)* koolstof
- Verder :
  - Of : *impregneren* met thermoharder (fenol, furaan)
  - Of : *grafitiseren* ; groeien grafietkristallen (10 à 20 dagen in elektro-oven bij 2800°C) → grafiet ("elektro-grafiet"); = eveneens poreus → ook impregneren
  - Impregneren : verhoogt sterkte product aanzienlijk + maakt product "*impervious*", d.w.z. ondoorlaatbaar vr. gassen & vloeistoffen; echter: $T_{gebruik}$ bepert tot ca. 170°C t.g.v. verdamping hars

Fabricatieprocede van Grafietproducten



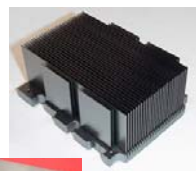


PS *: DLC*

Plasma / CVD

Koolstof & Grafiet *(4)*

- **Toepassing(en)** :
  - Eigenschappen = o.m. uitstekende warmtegeleiding + thermoshockbestendig (+/- als metaal !) + bestendigheid tegen corrosie
  - (Constructieve beperkingen)
  - ➔ Typische toepassingen:
    - = kroezen
    - = heat sinks & koelers micro-elektronica
    - = warmtewisselaars i/d chemische industrie
    - ≠ isolatiepaneeltjes !...



.../...

Koolstof & Grafiet *(5)*

Toepassing : Koolstofvezels

www. Making carbon fibers

- Bereiding :

  Verkoling van polyacrylonitrile (PAN) vezels + vervolgens grafitiseren

  PAN uitgangsmateriaal = ketenmoleculen van benzeenringen

  ➔ in eindvorm ook grafietachtige hexagonale structuur

- Eigenschappen :
  - +/- zelfde fysische & corrosie-eigenschappen als elektrografiet
  - bijzonder hoge treksterkte
  - ➔ TOEPASSING = versterkend vezelmateriaal voor PMC (of voor grafiet !)

.../...

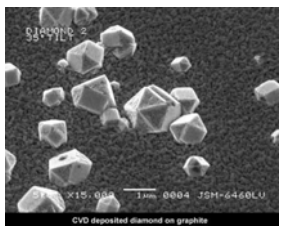
Toepassing : Warmtewisselaar

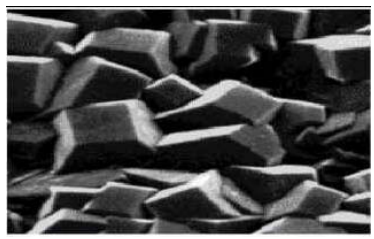
Bloktype WW van elektro-grafiet

Buizen-warmtewisselaar ; Elektrografiet , C-vezel versterkte grafiet buizen

Nota: DLC - Coatings

Diamond-like carbon (DLC) is a term which covers many new forms of carbon which have both graphitic and diamond like characteristics.





DLC: Abrasie- & Corrosie-resistentie; lage wrijvingscoefficient

Materiaalkunde voor Ingenieurs

= *"Eind-GEBRUIKER"*

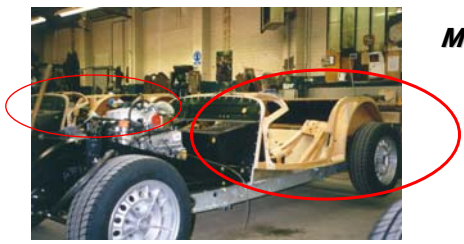
- "***Engineering Materials***" **:** Metalen, ***Niet-metalen***, Legeringen, Coatings, ...
- ***Eigenschappen***, Bereiding en Processing, ...
- ***Beschrijving***, ***Begrijpen***, ***Selectie***, ...
- Etc...

- ✓ ***Polymeren***
- ✓ ***Composieten***
- ✓ ***Keramische Materialen***
- Staal
- Staalsoorten & Roestvast staal
- Corrosie
- Schade-analyse & -preventie / NDT
- Gieten, PM, Vormgeven, Verspanen, Lassen
- Cu
- Al
- Ni, Zn, Ti, Mg, Refractaire
- Opp. behand. & Coatings
- Selectie

Opmerking

- **Andere Niet-Metallische (Constructie-)Materialen**

Alternatieve constructiematerialen : *Hout …*

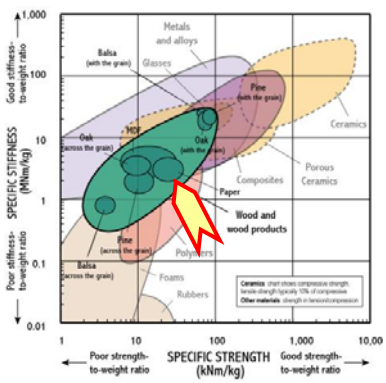


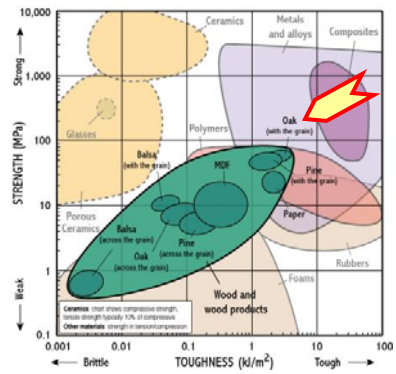
Morgan

koeltorens

Alternatieve constructiematerialen (2)

- Enkele Hout (& houtproduct) eigenschappen …

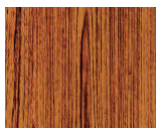




Hout als constructiemateriaal …

Impregneren
& duurzaamheid

Anisotropie / inhomogeen



fabricage

Thema 3

Staal & Staalsoorten

Inhoudstabel ...

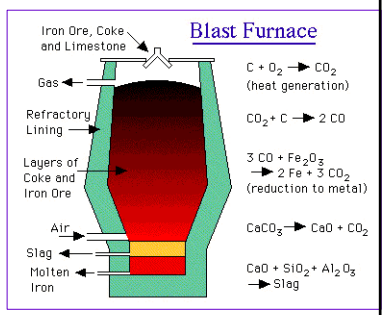
- Staal & staalproductie
- Verwerking (omvormen)
- Staalsoorten, incl.
  warmtebehandeling, structuren, ...
- Legeringen

Staalproductie *(1)*

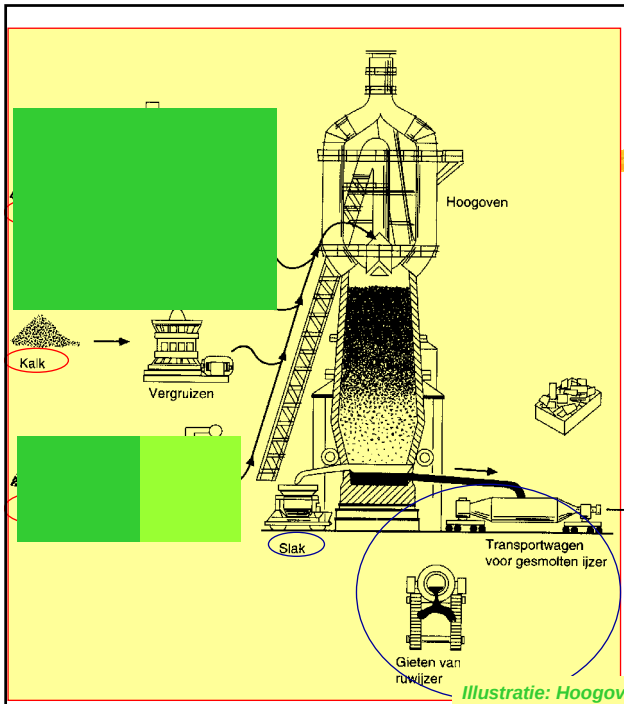
- **Inleiding & Enige GESCHIEDENIS :**
  - Staal = legering Fe + % C (...<%<...)
  - Staal = verzamelnaam = >1000 variëteiten
  - Slechts ...150...jaar op grote schaal gebruikt
- Metallisch IJzer
  - 4000 jaar terug; ijzerhoudende meteorieten
  - IJzertijd :
    ijzererts + houtskool verhitten ➔ deegachtige massa "smeedijzer"
  - 14de eeuw: ijzer smelten + gieten tot bruikbare producten
  - medio 18de eeuw: verontreinigingen weg dr. blazen met lucht
    ➔ ijzer werd smeedbaar bij kamertemperatuur
    = staal

Staalproductie *(2)*

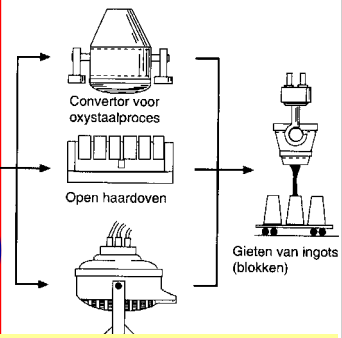
- **IJzerbereiding :**
  - IJzererts :
    - Fe_2O_3 (hematiet), Fe_3O_4 (magnetiet)
    - Rusland, USA, China, Z-Amerika
      ➔ maritiem gelegen fabrieken
    - Pelletiseren / sinteren
  - Cokes : warmte + reducerend gas
    - C (cokes) + O_2 (lucht) → CO_2
    - CO_2 + C (overmaat cokes) → 2 CO
    - Fe_2O_3 (erts) + 3 C (cokes) → 2 Fe + 3 CO↑
    - Fe_2O_3 (erts) + 3 CO → 2 Fe + 3 CO_2
  - Kalk : silicaten uit 'ganggesteente' binden tot dun-vloeibare slak
  - Lucht : zuurstof vr. verbranding cokes
  - Resultaat : "ruwijzer" (+ slak)



Additional Reading:
"How a blast furnace Works …"

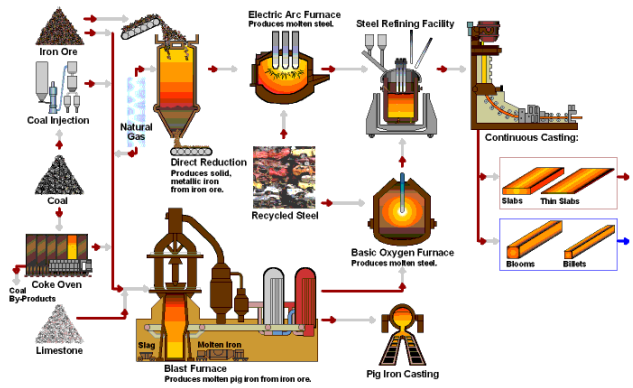


Hoogoven :
bereiding ruwijzer



Illustratie: Hoogoven + Staalproductie Flowsheet …/…

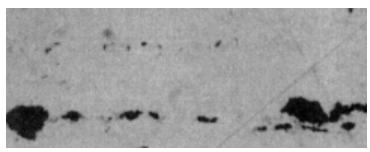
Illustratie: Hoogoven + Staalproductie Flowsheet



Staalproductie *(3)*

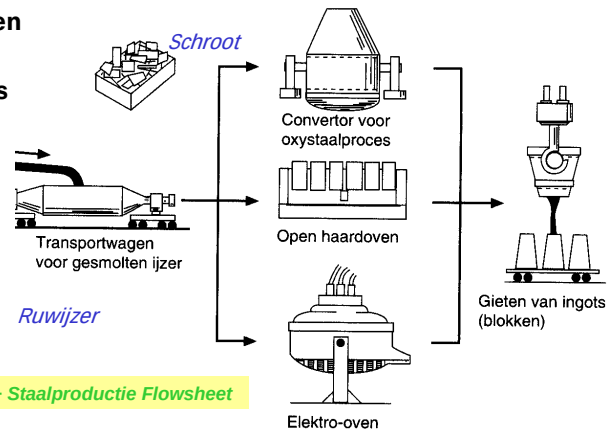
- **Staalbereiding** - Chemische Samenstellingen
  - Zuiver ijzer : <0.005 % C , geen legeringselementen
    - zacht, ductiel, weinig sterk
    - magnetische toep.; geëmailleerd staal
  - Staalsoorten : >0.06 (0.02...0.03) % C ; <2 % C
  - Gietijzers : > 2 wt% C
- **Ruwijzer** : 4...5 % C + Si, S, P, Mn, ...

e.g. verwijdering door oxidatie



Staalproductie *(4)*

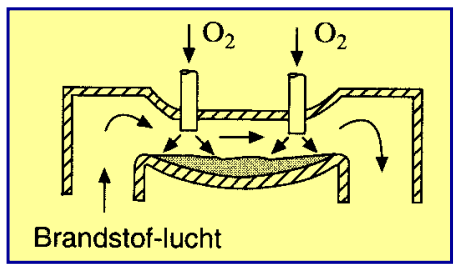
- **Raffinageprocessen :**
  - **Open haardoven**
  - **Elektro-ovens**
  - **Oxystaalproces**

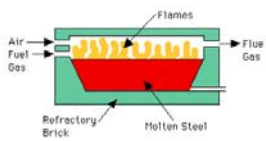


Illustratie: Hoogoven + Staalproductie Flowsheet

Staalproductie *(5a)*

- **Open haardoven** *(Siemens-Martin)* **:**
  - lading = gesmolten ruwijzer + schroot (tot 50%)
  - reactor = ondiep rechthoekig bekken // grote luchtaanvoer (+ brandstof vr. verwarming) + lucht (O_2) lansen
  - Nadat C ↓ : slak aftappen
  - 300 ton lading in ca. 8 uur



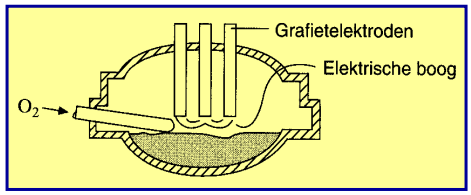


Basic Open Hearth Furnace

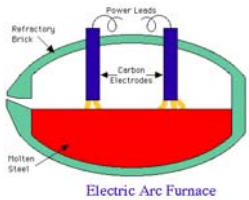
(Vroeger) gebruikt voor hoog-volumeproductie van C-staal ;
quasi verdwenen - cfr. infra

Staalproductie *(5b)*

- **Elektro-oven :**
  - lading = schroot;
  - reactor = lading gesmolten door trekken van elektrische boog // O_2 lansen
  - snel; grote hoeveelheid energie nodig; eenvoudig
  - zuiverder staal dan open haardovens



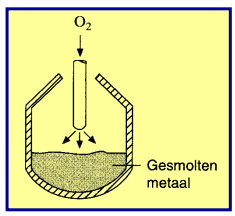
Gebruikt voor productie van gelegeerd staal, gereedschapsstaal, roestvast staal ;
Ook : schroot



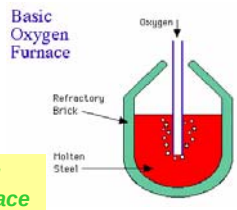
Additional Reading: Electric Arc Furnace Steel Making

Staalproductie *(5c)*

- **Oxystaalproces Convertor :**
  - lading = ca. 75% gesmolten ruwijzer + ca. 25% schroot
  - reactor = peervormig stalen vat // in smelt zuiver-O_2 lansen neerlaten // reactie-warmte levert hitte voor proces (oven niet van buitenaf verhit !)
  - Nadat C ↓ : lansen teruggetrokken, oven gekanteld, lading uitgegoten
  - 300 ton lading in ca. 25 min. !
  - tot ca. 15 Mia

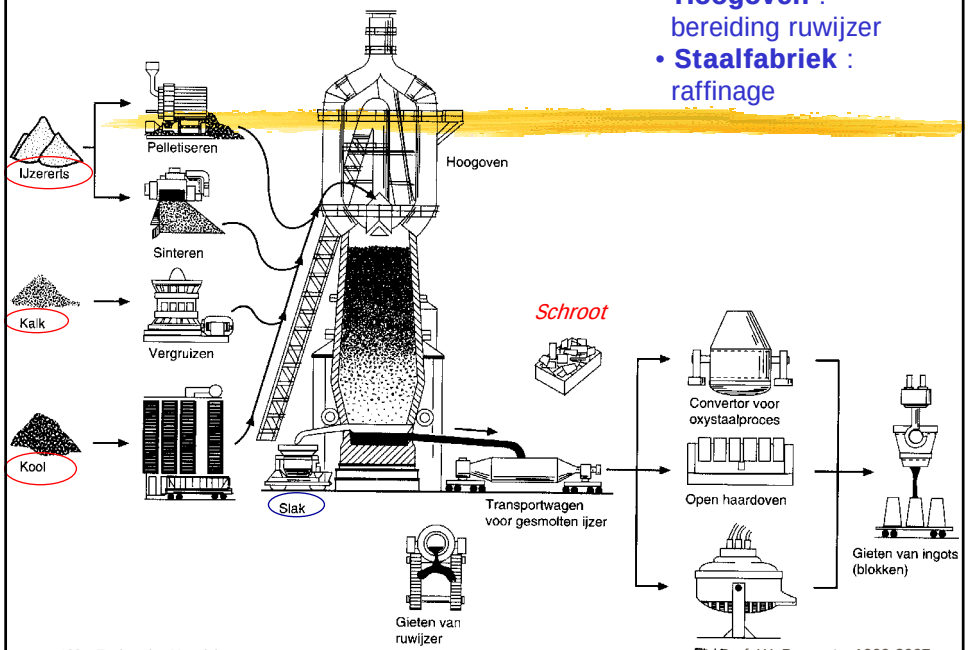


(Nu) Gebruikt voor hoog-volumeproductie van C-staal;
Belangrijkste raffinageproces geworden



Additional Reading: Basic Oxygen Furnace Steel Making

- **Hoogoven** : bereiding ruwijzer
- **Staalfabriek** : raffinage



Staalproductie *(6)*

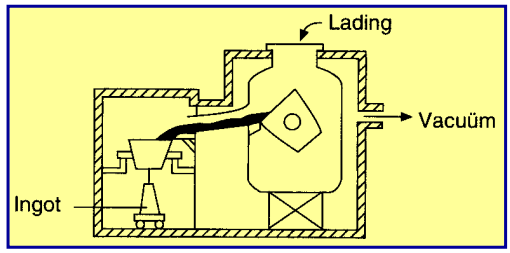
Verdere Zuivering :

- **Doel :** o.m. superieure vermoeiingsweerstand, taaiheid
  ➔ quasi alle insluitsels weg
  (insluitsels = oxiden, silicaten, sulfiden)
- **Vacuümsmelten of omsmelten**
  - vacuümontgassen
  - vacuümboogomsmelten
  - vacuüminductiesmelten
  - elektronenstraalraffinage
- **Chemische reactie**
  - argon-zuurstof ontkoling *(AOD : argon oxygen decarburization)*
  - elektroslakomsmelting
  - gietpanraffinage

Additional Reading:
Steel – Secondary Refining

Staalproductie *(7a)*

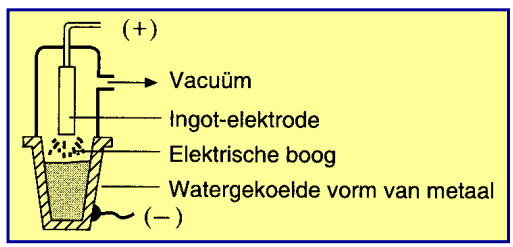
- **Vacuümontgassing :**
  - *vacuüm* => opgeloste gassen in smelt gaan naar oppervlak v. smelt, waar ze aan metaal ontsnappen
  - gesmolten staal geroerd met lans en in grote vacuümruimte gegoten tot ingots



Gebruikt voor verdere zuivering van staal

Staalproductie *(7b)*

- **Vacuümboog-omsmelten**
  - staal uit oxystaalconvertor of elektro-oven gegoten tot cilindrische ingots
  - elektrische boog tussen ingot en watergekoelde koperen vorm
    (cfr. reusachtige laselektrode)
  - zeer effectief : elke druppel metaal blootgesteld aan vacuüm
  - erg veel energie

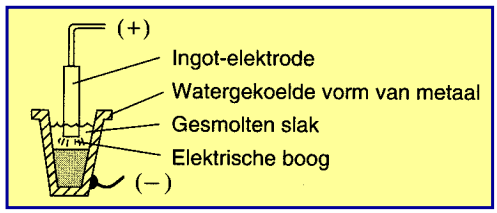


+/- Meest gebruikt. Gebruikt voor productie van superlegeringen en extra zuivere staalsoorten.

Staalproductie *(7c)*

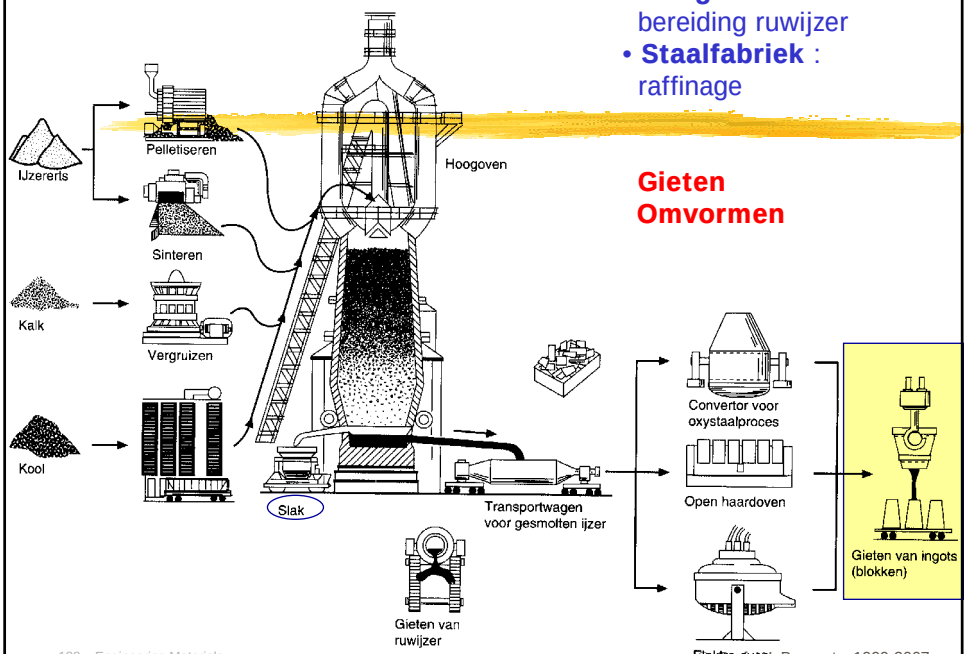
- ***CHEMISCHE PROCESSEN***
  - chemische (& fysische) reactie; niet in vacuüm
- **Argon-Zuurstof ontkoling (AOD)**
  - O_2: reactie met C (ontkoling), S en andere
  - Ar : grote beroering + verwijdering gassen
- **Elektroslak-omsmelten**
  - cfr. vacuümboogomsmelten; doch niet in vacuüm
  - druppels nu doorheen slak (verwijdering verontreinigingen)

Gebruikt voor productie van gereedschapstaal en bijzondere staalsoorten.
De gesmolten slak werkt als een reinigend vloeimiddel.



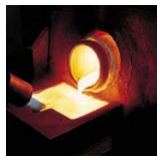
- **Hoogoven** : bereiding ruwijzer
- **Staalfabriek** : raffinage

Gieten
Omvormen



Staalproductie *(8)*

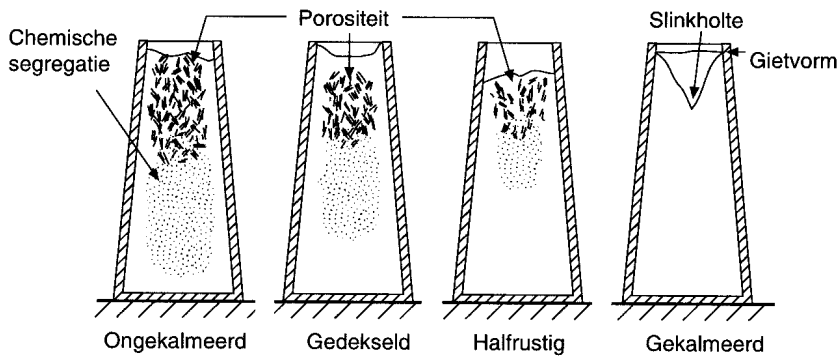
- **Gieten :**
  - **Ingots**
    - gietblokken; gietvorm = met vuurvast materiaal beklede vorm van staal
    - ontstaan van inhomogeniteiten (segregatie) en slinkholten **…/…**
      - metaal dat eerst stolt = zuiverder
    - "kalmeren" van staal : toevoegen van Al en Si als desoxidatiemiddelen (verwijdering opgeloste zuurstof) → stolling verloopt rustiger → segregatie tegengaan & minder gas en slinkholten (hogere prijs)
  - **Continu gieten**
    - enkel gekalmeerd staal



Additional Reading:
Continuous Casting – Basic Principles …

Illustratie: Hoogoven + Staalproductie Flowsheet

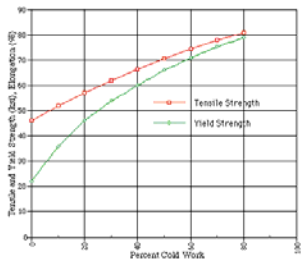
Kenmerken van Ingots

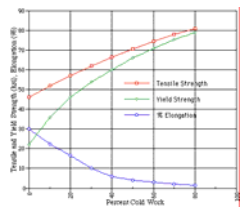


Kenmerken van ingots van verschillende typen staal.

Staalproductie *(9)*

- **Omvormen :**
  - warm (walsen) vs. koud (walsen) *>> illustraties koud / warm*
  - koud bewerken ➔ versteviging (400 → 800 MPa) ; bv. voor auto's
  - ***video***
  - metaalkundige aspecten : structuren *…/…*

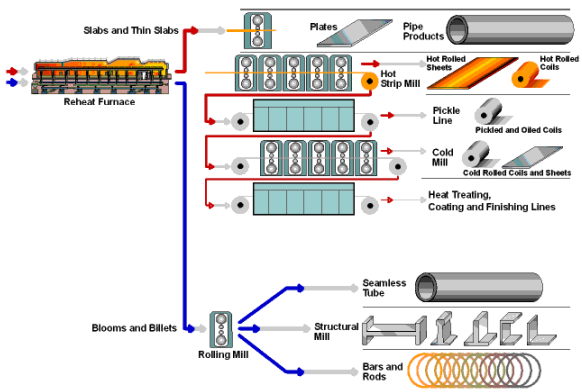




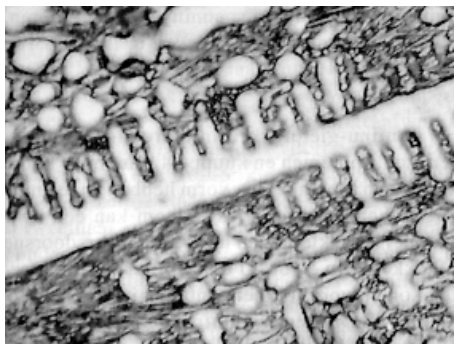
Illustratie: Staal Finishing Flowsheet

AlgemeneVideo :
Hoogoven & Staalfabriek …

Illustratie: Staal Finishing Flowsheet



Metallografische Structuren

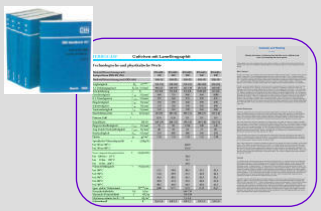


O.I. – Project KULeuven

Dendrieten in een gegoten Co-Cr legering die uit 2 fasen bestaat.
Lichte gebieden = Co-rijke fase; donkere gebieden = Cr-rijke fase.

Staalterminologie / -Normering

- **Termen**
- **Normering** : ***cfr. Infra***
  - AISI
  - UNS
  - EN
  - …



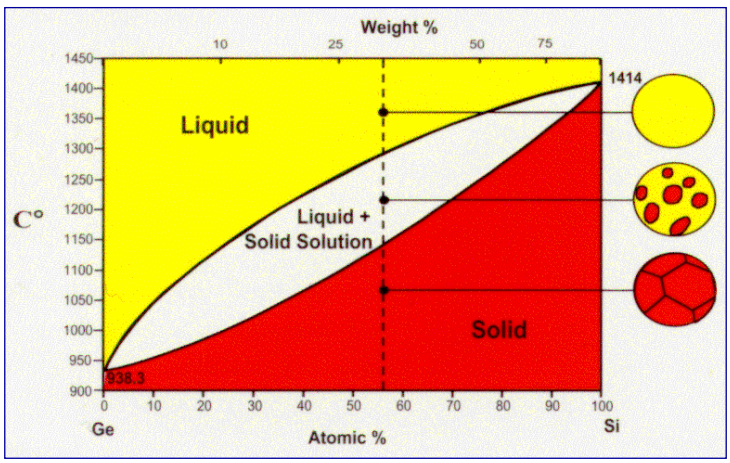
Thema 3

Staal & Staalsoorten

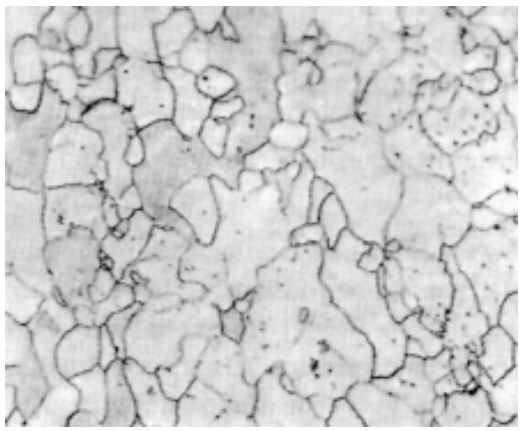
Inhoudstabel ...

- Staal & staalproductie
- Verwerking (omvormen)
- Staalsoorten, incl. warmtebehandeling, structuren, ...
  - **Fasediagrammen & Micro-structuren**
    o.m. : *warmtebehandeling*
- Legeringen

Fasediagrammen *(1)*



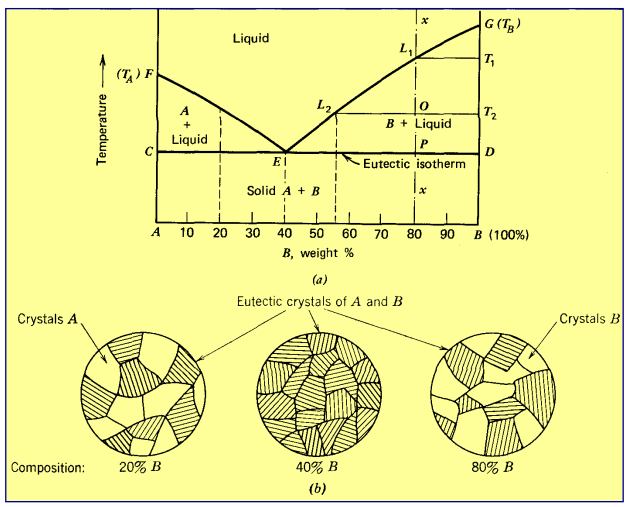
Microstructuur *(1)*



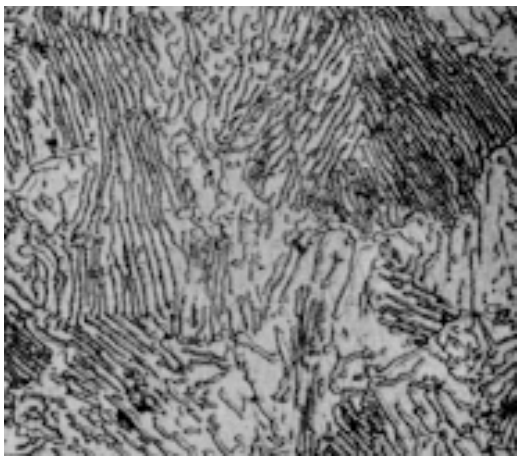
"Enkelfasig" Materiaal

O.I. – Project KULeuven

Fasediagrammen *(2)*

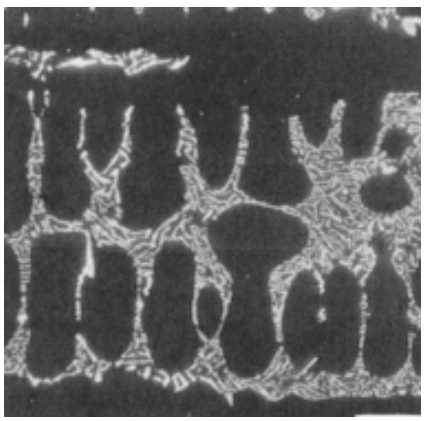


Microstructuur *(2a)*



Eutectische / Eutectoïdische Structuur

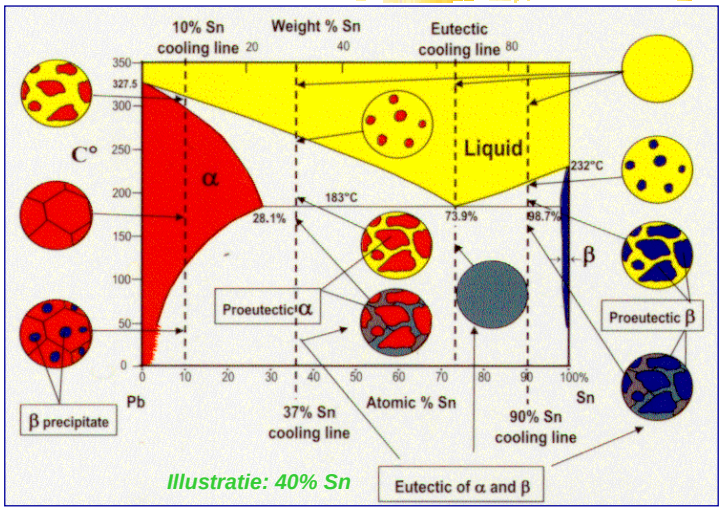
Microstructuur *(2b)*



Hypo-Eutectische Structuur

bestaande uit primaire α-dendrieten (zwart) + een interdendritische eutectische vulling

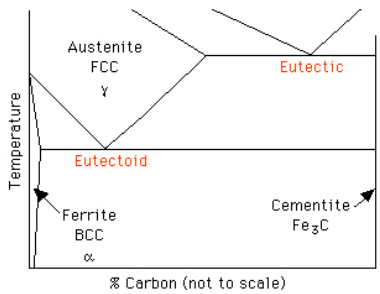
Fasediagrammen *(3)*

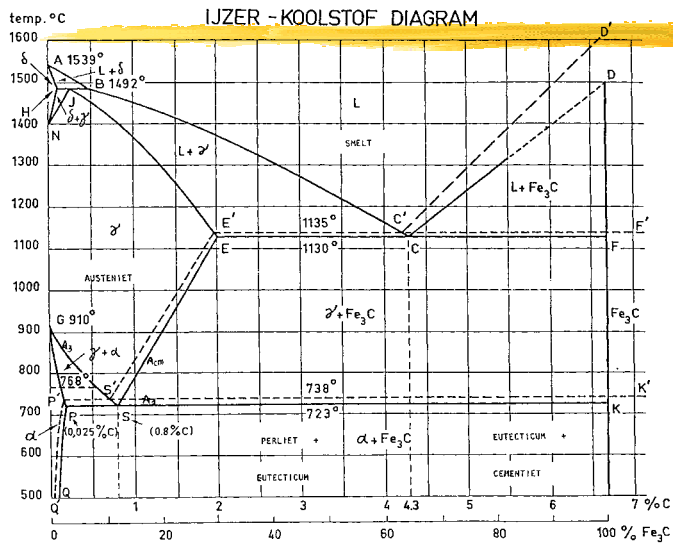


Illustratie: 40% Sn

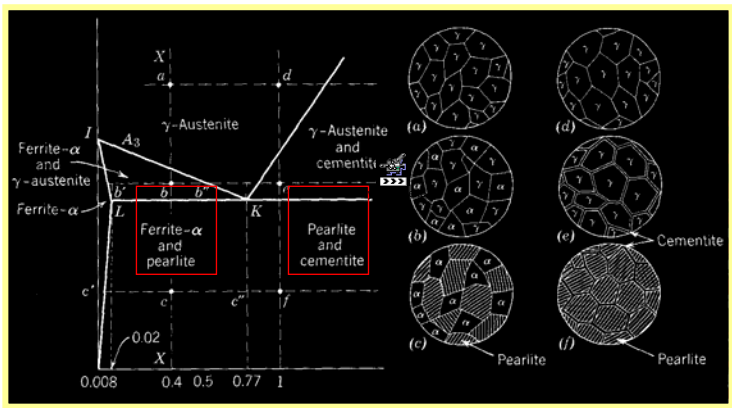
Illustratie: Eutecticum

IJzer - Koolstof Diagramma



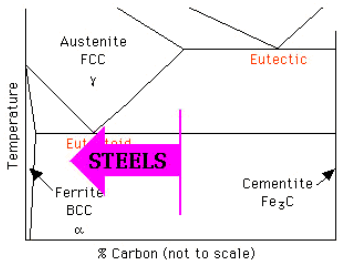


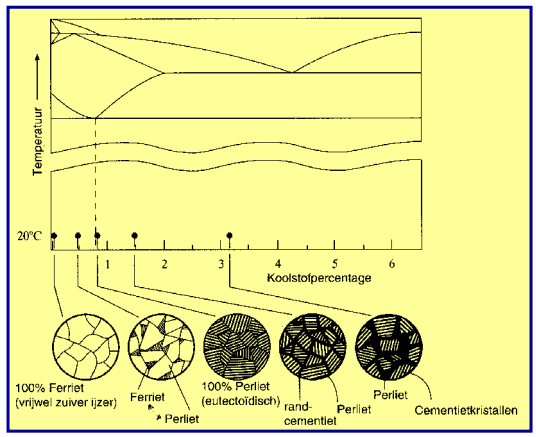
Fe-C diagramma



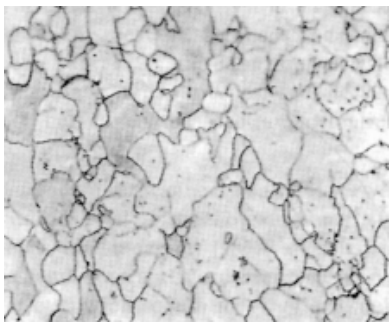
>> Illustraties: ***hypo-eutectoïdisch***
hyper-eutectoïdisch

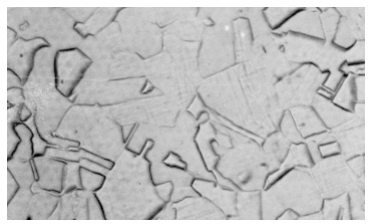
Fe-C diagramma





Microstructuur *(a)*

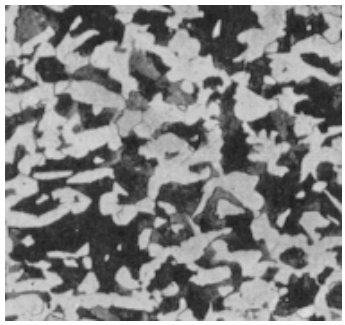




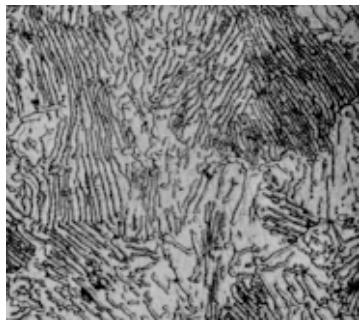
Aust. RVS 18/8

Microstructuur van ongelegeerd C-staal
Ferriet korrels*;*
Austeniet korrels *(hoge temp.)*
= nogal gelijkaardig uitzicht

Microstructuur *(b)*



Witte ***ferriet*** kristallen en donkere ***perliet*** gebieden



Details v/h lamellaire ***perliet*** (= ferriet + cementiet Fe_3C) : ferriet = ondergrond = de samen-hangende fase

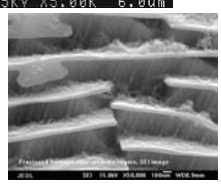
Perliet …

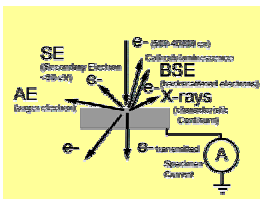
Details v/h lamellaire ***perliet*** (= ferriet + cementiet Fe_3C) : ferriet = ondergrond = de samenhangende fase

SEM – opnames

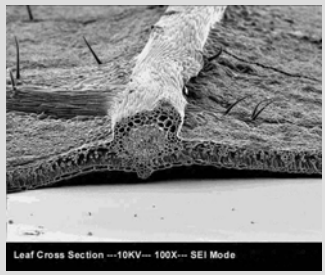
*(Scanning Electron Microscope **…/…**)*

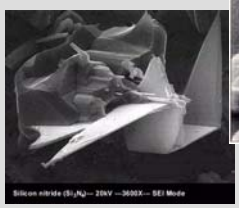
O.I. – Project KULeuven

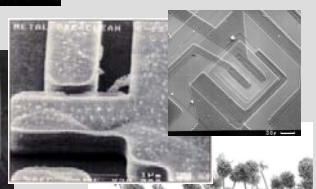


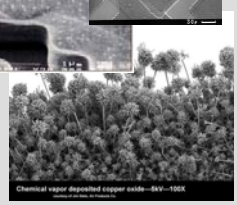


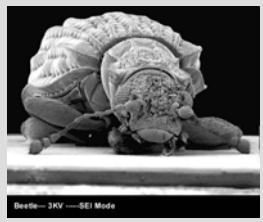
Nota : SEM – Raster Elektronenmicroscoop



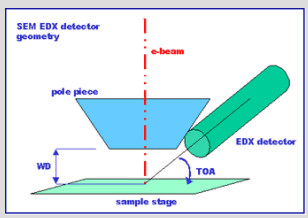


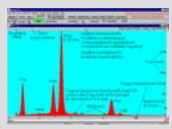


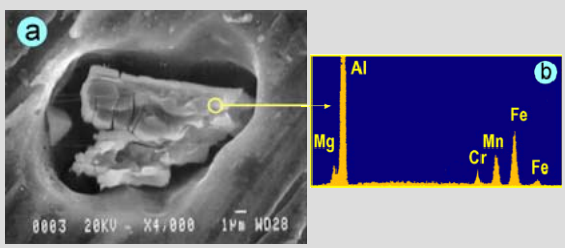


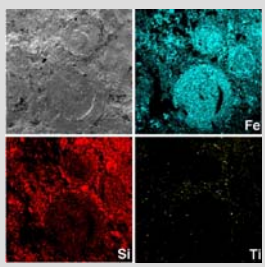


Nota : SEM & EDX : Energy Dispersive X-ray Analysis



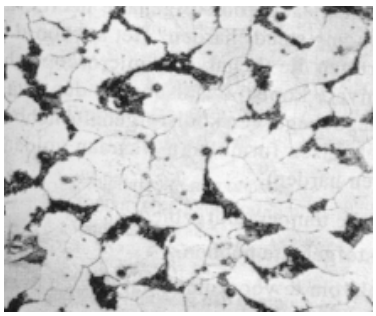




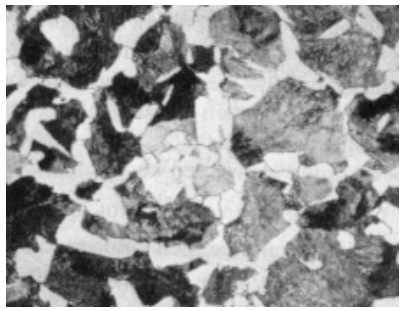


Microstructuur *(c)*

Microstructuren van ontlaten Koolstofstaal
Lichte gebieden = ferriet, donkere gebieden = perliet



0.2 % C



0.6 % C

Cfr. Hfst. 9

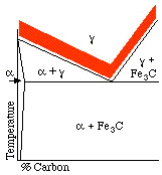
Warmtebehandeling

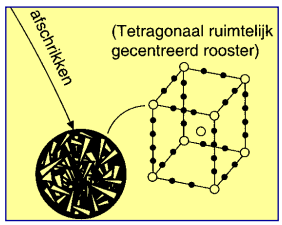
- **Uitgloeien** (annealing)
  - zacht maken van staal (= “zachtgloeien”)
    - vervormbaarheid & bewerkbaarheid verbeteren
  - opheffen van inwendige spanningen (= “spanningsarmgloeien”)
  - verfijnen v/d korrelgrootte (= “normaalgloeien”, “normaliseren)
- **Harden**
- **Ontlaten**

Harden

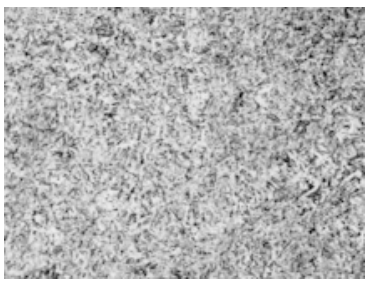
Transformatieharden, Afschrikharden

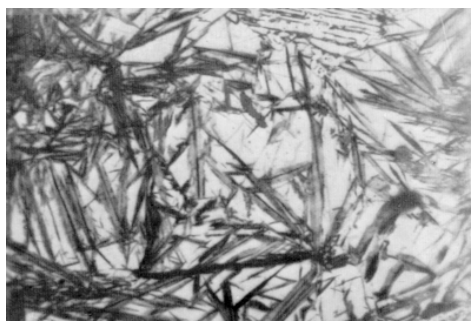
- Austeniteren + "*Afschrikken*" (water, zoutopl., olie, lucht)
  ➔ ***Martensiet***
  (tetragonaal ruimtelijk gecenterd rooster)





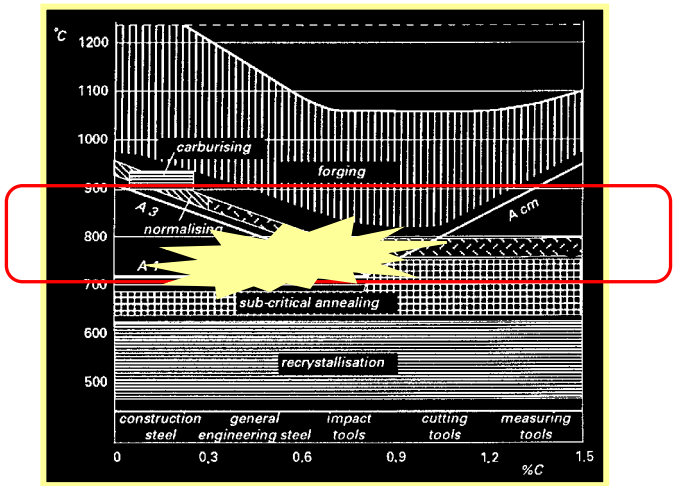
Microstructuur



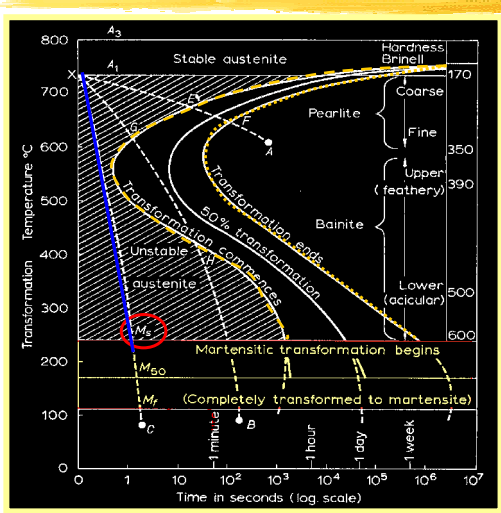


Microstructuur van ongelegeerd C-staal
Martensiet korrels;
door vervormde roosterstructuur is martensiet zéér hard.

Warmtebehandelingen & Fe-C diagramma



Transformatie diagramma's (iTTT, CCT)



(i)Temperatuur
Tijd
Transformatie

Illustratie: Perliet vorming

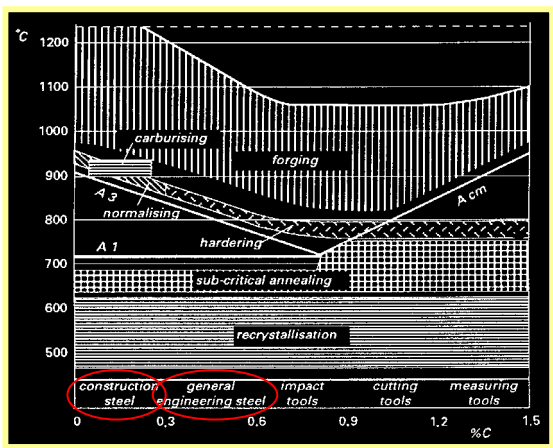
[Continuous Cooling Transformation]

Ontlaten

Temperen

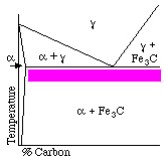
- Martensiet + "*Verwarmen*"
  - 200 - 400 °C
  - 400 - 600+ °C (doch : onder A1 lijn)
- Minder bros
- Reden : bv.
  - C-atomen uit martensiet diffunderen, met ontstaan van carbide-precipitaten
  - afname v/d vervorming v/h martensiet doordat warmte verplaatsing van dislocaties bevordert

Warmtebehandelingen & Fe-C diagramma



Andere Warmtebehandelingen

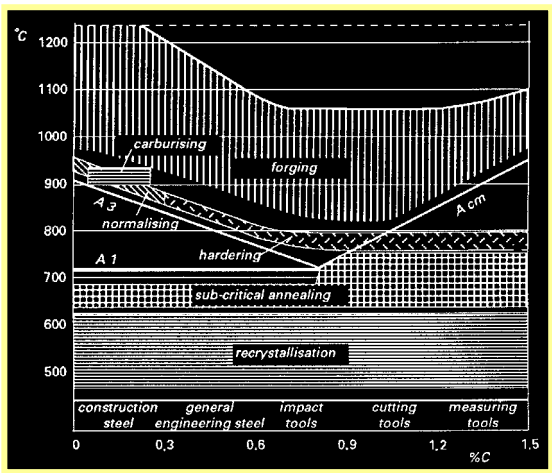
- **Uitgloeien** (“*annealing*”)
  - zacht maken van staal (= “zachtgloeien”)
    - vervormbaarheid & bewerkbaarheid verbeteren
  - opheffen van inwendige spanningen (= “spanningsarmgloeien”)
  - verfijnen v/d korrelgrootte (= “normaalgloeien”, “normaliseren”)



.../...

- Harden
- Ontlaten

Warmtebehandelingen & Fe-C diagramma



Thema 3

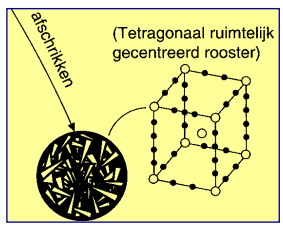
Staal & Staalsoorten

- Staal & staalproductie
- Verwerking (omvormen)
- Staalsoorten, incl. warmtebehandeling, structuren, ...
  - **Fasediagrammen & Micro-structuren**
    o.m. : *warmtebehandeling* - *HARDEN*
- Legeringen

Harden - 2 *(a)*

- Transformatieharden, Afschrikharden

  Martensiet
- **Oppervlakteharden & Selectief Harden**
  - Door bepaalde elementen in het oppervlak te laten ***diffunderen***
  - Door hardbaar staal ***plaatselijk*** te austeniteren en afschrikken

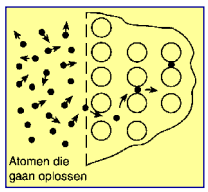


Cfr. Hfst. 10

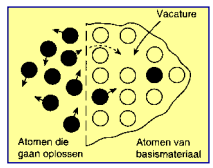
Harden - 2 *(b)*

(1) **Oppervlakte-diffusie**

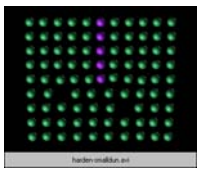
- Carboneren : C
- Nitreren : N
- Carbonitreren : C + N
- Boreren : B
- 'Chromizing' : Cr



Interstitiële diffusie



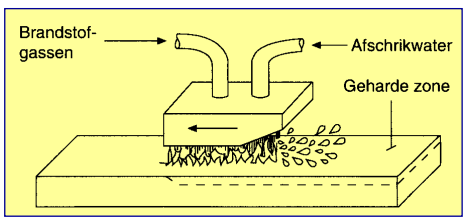
Substitutionele diffusie



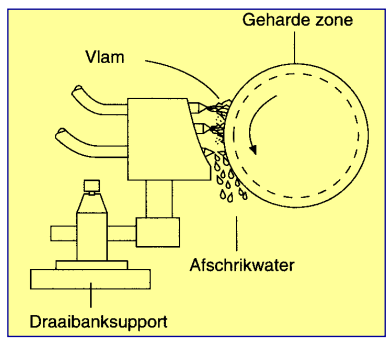
Illustraties:
- *Plastische vervorming*
- *Harden door substitutie met kleinere atomen*
- *Harden door substitutie met grotere atomen*
- *Harden door interstitiëlen*

Harden - 2 *(c)*

(2) ***Lokaal martensiet*** :
bv. **"vlamharden"**



Vlamharden v. vlakke platen

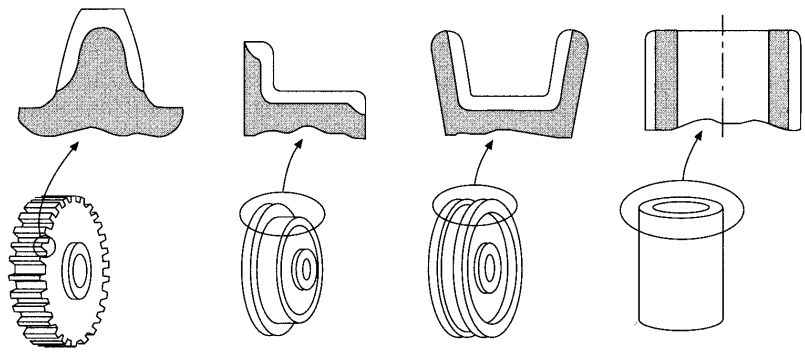


Vlamharden v. ronde staven in een draaibank

.../...

Voorbeelden

vlamharding : machine-onderdelen



Thema 3

Staal & Staalsoorten

- Staal & staalproductie
- Verwerking (omvormen)
- Staalsoorten, incl. warmtebehandeling, structuren, ...

  Fasediagrammen & Micro-structuren

  o.m. : *warmtebehandeling - HARDEN*
- Legeringen

C-stalen, Gelegeerde Staalsoorten, Roestvaste Staalsoorten

(selectie)

Materiaalkunde voor Ingenieurs

= *"Eind-GEBRUIKER"*

- "***Engineering Materials***" : ***Metalen***, Niet-metalen, Legeringen, Coatings, ...
- Eigenschappen, ***Bereiding en Processing***, ...
- ***Beschrijving***, ***Begrijpen***, ***Selectie***, ...
- Etc...

- ✓ ***Polymeren***
- ✓ ***Composieten***
- ✓ ***Keramische Materialen***
- ✓ ***Staal***
- Staalsoorten & Roestvast staal
- Corrosie
- Schade-analyse & -preventie / NDT
- Gieten, PM, Vormgeven, Verspanen, Lassen
- Cu
- Al
- Ni, Zn, Ti, Mg, Refractaire
- Opp. behand. & Coatings
- Selectie

Staalsoorten

Spectrum

Cfr. Hfst. 11

- "Koolstofstaal" (AISI)
  - max 2% C, ≤ 0.6% Si, ≤ 0.6% Cu, ≤ 1.65% Mn
- Gelegeerde stalen (DIN)
  - Laaggelegeerd
  - Hooggelegeerd
- Gereedschapsstalen **Cfr. Hfst. 12**
- Staalsoorten vr. speciale toepassingen
- Nieuwere staaltypen :
  - HSLA (NIET gehard & ontlaten)
  - Ultrahoge-sterkte staalsoorten
  - Veredelingsstalen

Aanduidingen …/…

Aanduidingen & Normering

- **Aanduidingen**
- **Normering ...**
  - AISI
  - UNS
  - EN
  - ...

Naamgeving *(1)*

- DIN
  - C-stalen : vb. **C 15** W
    = koolstofstaal, 0.15% C, W (Werkzeug) = gereedschapstaal
  - Laaggelegeerde : vb. **34 CrNiMo 6 6 2**
    = 0.34% C, 1.5% Cr (x 4 = 6), 1.5% Ni (x 4 = 6),
    0.2% Mo (x 10 = 2)
  - Hooggelegeerde : vb. **X 12 CrNi 18 8**
    X ; = 0.12% C, 18% Cr, 8% Ni *(= AISI 302 / AISI 304)*
- Oude DIN
  - St 37 ➔ 37 kg / mm^2 ; nu : ***Euronorm*** : Fe 360 (360 N /mm^2)
- Euronorm : vb. **Fe B 240** ; ***B*** = Betonstaal / ***E*** = Profielstaal

Naamgeving *(2)*

- Werkstoffnummer : **X. XXXX**
  - X. = hoofdelement: 1=Fe , 2=Ni, 3=Al
    XXXX = nummer in groep (Stahlschlussel)
- AISI (SAE) / UNS
  - C-stalen & Gelegeerde stalen : vb. **23XX**
    2 = Ni-gelegeerd; **3** ca.3%; 0.XX% C
    10 = C-staal
    11 = C-staal met extra S
    13, 15 = Mn
    2 = Ni
    3 = Ni-Cr
    4 = Mo
    5 = Cr
    6 = Cr-V
    8 = meervoudig

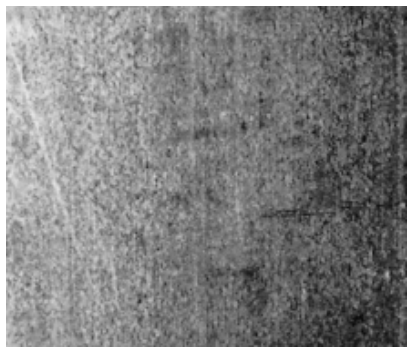
AISI 1040 = C-staal
0.40% C

Koolstofstalen *(1)*

- **Warmgewalst**
  - warm bewerken = makkelijker (minder stappen)
  - producten = goedkoper
  - beter lasbaar
  - bij 'machining' : stabieler (weinig residuele spanningen)
  - meestal : C ≤ ca. 0.25%
  - slechte opp. afwerking
  - minder precieze controle maten eindproduct (+/- ongeschikt vr. machine-onderdelen die enige precisie vragen)
  - Vb.: AISI 1020, 1025, 1030 {=%C}
- **Koudvervormd**
  - vervormingsharding (verandering kristalvorm; toename dislocatiedichtheid)
  - sterkte soms tot x10(0) **(fig)**
  - d.i.: betere mechanische eigenschappen
  - betere oppervlakte-afwerking
  - kleinere maatspeling
  - lagere ductiliteit
  - meer instabiliteit bij machinale bewerking
  - soms: hogere prijs
  - Vb.: AISI 1006, 1050, 1112, 1117
  - nb: Blik

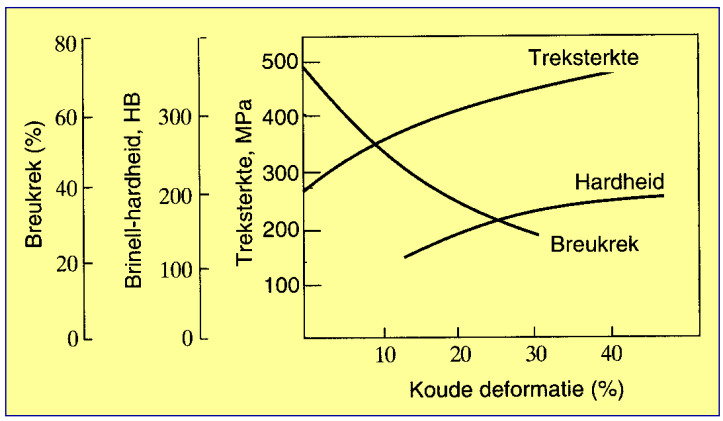
>> illustraties warm ⇔ koud

Koolstofstalen *(2)*



Oppervlaktetoestand v. ***Warmgewalste*** en ***Koudgewalste*** AISI 1020 staalplaat

Koolstofstalen *(3)*



Effect van mechanische vervorming op eigenschappen van ijzer

Koolstofstalen *(4)*

- Naast vervormingsharden : fasetransformatie-harden (i.e., ***martensiet***; *cfr. supra*)
  - Belangrijk = (door-)**hardbaarheid**
- Ook belangrijk : Lasbaarheid ;
  O.m. Problemen bij booglassen van
  - staal met *hoog zwavelgehalte* (vb.: 11XX automatenstaal)
  - *hardbare* staalsoorten
    - scheuren i/d las
    - oorzaak : metaalmassa = afschrikmiddel
      => harde martensiet, niet ontlaten
      Opl. = naverwarmen (temperen)

Staalsoorten
Spectrum

- "Koolstofstaal"
  - max 2% C, ≤ 0.6% Si, ≤ 0.6% Cu, ≤ 1.65% Mn
- Gelegeerde stalen (DIN)
  - Laaggelegeerd
  - Hooggelegeerd

Zie ook Handboek:
Tabel 11.11 ! .../...

- Gereedschapsstalen
- Staalsoorten vr. speciale toepassingen
- Nieuwe(re) staaltypen :
  - HSLA
  - Ultrahoge-sterkte staalsoorten
  - Veredelingsstalen

(laag-)Gelegeerde stalen *(1)*

- Belangrijkste effect = hardbaarheid

Mn - Mo

  - cfr. AISI 13XX, 4XXX, etc...
  - *KOOLSTOFEQUIVALENT* :

$$CE = \%C + Mn/6 + Ni/15 + Cr/5 + Mo/4 + V/4 + Cu/15$$

cfr. TTT (.../...)

Bepaalt ook lasbaarheid !

- CE hoger = beter hardbaar
  = mogelijk minder lasbaar

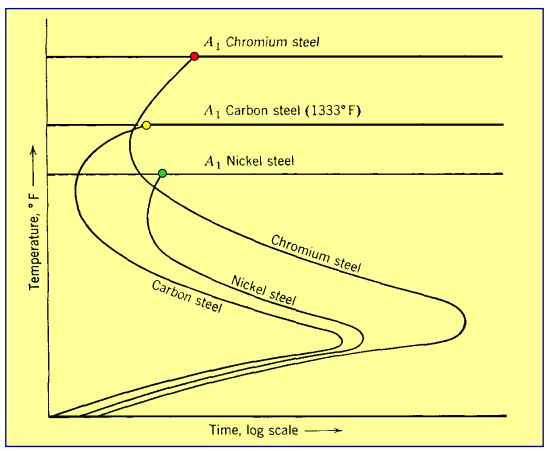
- Daarnaast :
  - **Corrosie-eigenschappen**:
    - Cu
  - **Verspaanbaarheid** :
    - S, P, Pb
      => spanen brokkelen
    - Echter: onlasbaar vanaf ca. > 0.06% S (“warmscheuren”)
  - **Fysische eigenschappen**

C-stalen & Gelegeerde stalen vb. **23XX**

2 = Ni-gelegeerd; 3 ca.3%; 0.XX% C

10 = C-staal ; 11 = C-staal met extra S
13, 15 = Mn
2 = Ni ; 3 = Ni-Cr ; 4 = Mo ; 5 = Cr ; 6 = Cr-V
8 = meervoudig

(laag-)Gelegeerde stalen *(2)*



HARDBAARHEID

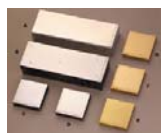
- C-staal
- Cr-staal
- Ni-staal

Tabel 11.11 De invloed van legeringselementen (afhankelijk van staalsoort)

	Gangbare gehalten in laaggelegeerde staalsoorten (%)	Belangrijkste mogelijke effecten
Aluminium	< 2	Vergemakkelijkt nitreren
		Beperkt korrelgroei
		Verwijdert zuurstof bij smelten van staal
Zwavel	< 0,5	Verhoogt verspaanbaarheid
		Vermindert lasbaarheid en ductiliteit
Chroom	0,3-4	Verhoogt weerstand tegen corrosie en oxidatie
		Verhoogt hardbaarheid
		Verhoogt sterkte bij hoge temperaturen
		Kan zich met koolstof verbinden tot harde, slijtvaste microbestanddelen
Nikkel	0,3-5	Bevordert austenitische structuur
		Verhoogt hardbaarheid
		Vergroot taaiheid (vervormbaarheid)
Koper	0,2-0,5	Bevordert hecht oxidelaagje dat de weerstand tegen atmosferische corrosie vergroot
		Veroorzaakt brosheid bij lassen
Mangaan	0,3-2	Verhoogt hardbaarheid
		Bevordert austenitische structuur
		Bindt zich aan zwavel, zodat de nadelige effecten van zwavel afnemen
		Verhoogt sterkte en slijtvastheid
Silicium	0,2-2,5	Verwijdert zuurstof bij staalbereiding
		Verbetert taaiheid
		Verhoogt hardbaarheid
Molybdeen	0,1 -0,5	Bevordert korrelverfijning
		Verhoogt hardbaarheid
		Kan zich met koolstof tot slijtvaste microbestanddelen verbinden
		Verhoogt sterkte bij hoge temperaturen

(laag-)Gelegeerde stalen *(3)*

- Enkele bijzondere types :
  - Raffinaderijen (+ HT) : Cr-Mo stalen
  - Lage (cryogene) temperaturen : Ni stalen (AISI 2XXX serie)
  - Massaproducten (vb. automotive) :
    - "H-staalsoorten"
    - niet al te duur
    - makkelijk vereiste sterkte & slijtvastheid door te harden
    - gegarandeerde hardingskenmerken (steeds zelfde na +/- zelfde behandeling) ; *i.e.* > 1,000 à 1,000,000 exemplaren
  - Gelegeerde Carboneerbare staalsoorten
  - B-staalsoorten
    - B + N (vs. C)
    - laag C en (goedkoop B) i.p.v. dure legerings-elementen als Cr en/of Mo
      => toch zelfde *hardbaarheid*



B-steel Test Blocks and Accessories for Hardness Testers

Staalsoorten

Spectrum

- "Koolstofstaal"
  - max 2% C, ≤ 0.6% Si, ≤ 0.6% Cu, ≤ 1.65% Mn
- Gelegeerde stalen (DIN)
  - Laaggelegeerd
  - Hooggelegeerd
- Gereedschapsstalen
- Staalsoorten vr. speciale toepassingen
- Nieuwe(re) staaltypen :
  - HSLA
  - Ultrahoge-sterkte staalsoorten
  - Veredelingsstalen

Speciale toepassingen

- *Cfr. supra*
- Hoge & Lage temperatuur
- Veren ("verenstaal")
- Drukvaten
- Ketels
- Wapening van beton
- Andere : spoorrails, ...
- ....

- Beklede staalsoorten :
  staal met allerlei deklagen ; continu !
  - vertind blik
  - blik met laagje Al
  - ...

- ASTM normering + ASME
  (+ merknamen)
- Bijzonder : Gereedschapsstalen
  (vs. Constructiestalen)

Staalsoorten
Spectrum

- "Koolstofstaal"
  - max 2% C, ≤ 0.6% Si, ≤ 0.6% Cu, ≤ 1.65% Mn
- Gelegeerde stalen (DIN)
  - Laaggelegeerd
  - Hooggelegeerd
- Gereedschapsstalen
- Staalsoorten vr. speciale toepassingen
- Nieuwe(re) staaltypen :
  - HSLA
  - Ultrahoge-sterkte staalsoorten
  - Veredelingsstalen

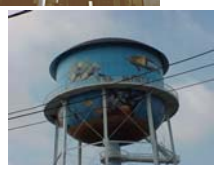
'Nieuwere' Stalen *(1)*

- HSLA : *high strength low alloy steel*
  - Vb.: Fe (& C) + Cu, Mn, Nb, Cr, Si, Ti, V, N, ...
  - betere mechanische eigenschappen
  - soms : atmosferische corrosie
    - "weathering steel"
    - "Cor-Ten" // of: ASTM , vb: A572, A607

  - Bijzonder :
    - gebruikt in *warmgevormde toestand*
    - laag C (< 0.2 %C)
    - $\sigma_{0.2}$ = 290...480 MPa ; treksterkte = 410...620 Mpa
    - harding : niet door warmtebehandeling; oplossingsharding !
    - *goed lasbaar*
    - constructiestaal; architecturaal
  - Enkele Toepassingen: o.m. architecturaal, containers, technische constructies in maritieme atmosfeer, etc...

.../...

‘Corten’ Staal (HSLA) - toepassingen



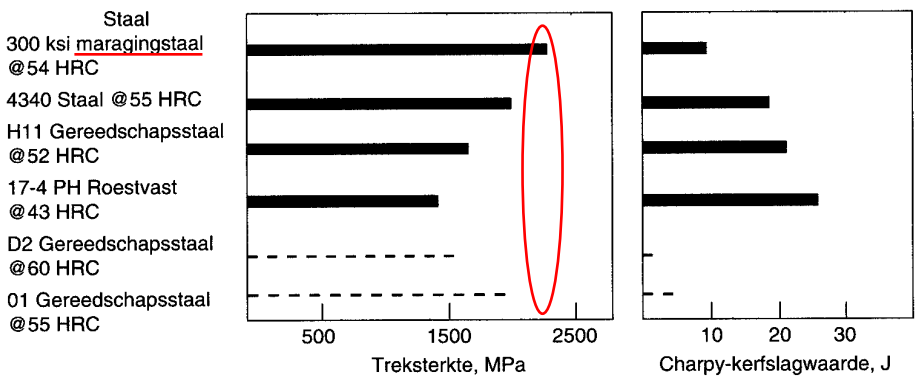
‘Nieuwere’ Stalen *(2)*

- “Verdelingsstalen”
  - chemische samenstelling : +/- cfr. HSLA;
    doch nu “genormaliseerd” (“normaal gegloeid”) of: afgeschrikt + getemperd
  - elasticiteitsgrens tot ...760 MPa
- UHS : *ultra high strength steel*
  - bonte verzameling: gelegeerde staalsoorten, gereedschapsstaalsoorten, bepaalde roestvaste stalen, ...
  - elasticiteitsgrens, zelfs na ontlaten, vele malen hoger dan bij C-staal *[=> nog weinig vervormbaar]*
  - elasticiteitsgrens & treksterkten mogelijk tot 2000 MPa (!!)
    vb.: 18% Nikkel-“maraging” staalsoorten

.../...

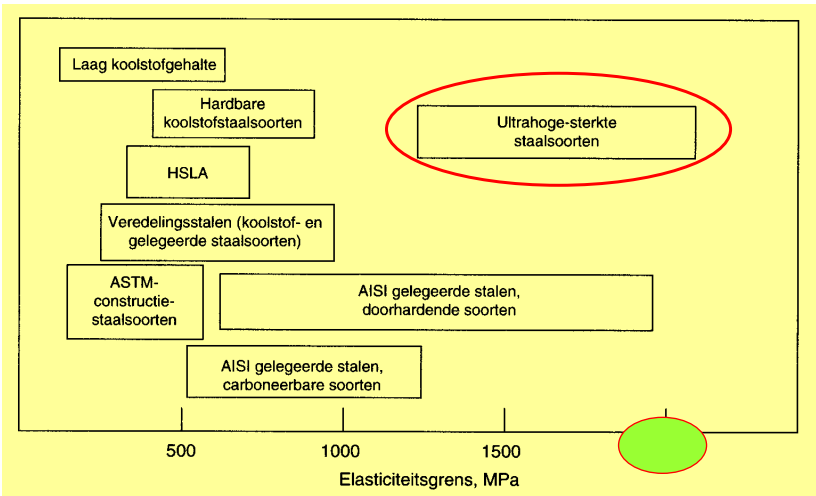
Treksterkte

Vergelijking *(1)*



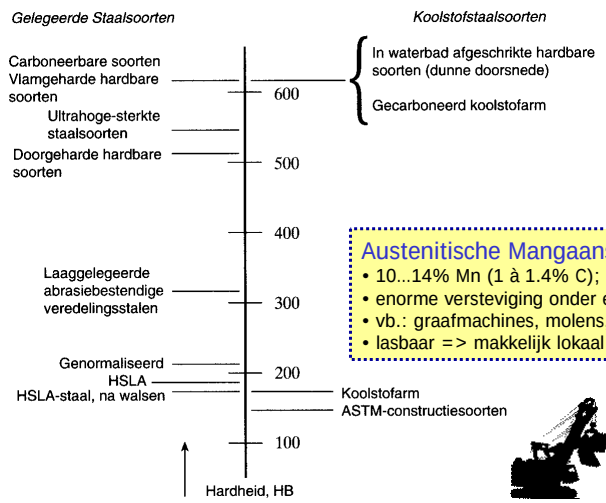
Elasticiteitsgrens

Vergelijking *(2)*



Hardheid

Vergelijking *(3)*



Austenitische Mangaanstalen :

- 10...14% Mn (1 à 1.4% C); austeniet = stabiel bij RT
- enorme versteviging onder e.g. stootbelasting
- vb.: graafmachines, molens, ... (<-> slijtage /abrasie !)
- lasbaar => makkelijk lokaal aan te brengen

Staalsoorten

Spectrum

- "Koolstofstaal"
  - max 2% C, ≤ 0.6% Si, ≤ 0.6% Cu, ≤ 1.65% Mn
- Gelegeerde stalen (DIN)
  - Laaggelegeerd
  - Hooggelegeerd
- Gereedschapsstalen
- Staalsoorten vr. speciale toepassingen
- Nieuwe(re) staaltypen :
  - HSLA
  - Ultrahoge-sterkte staalsoorten
  - Veredelingsstalen

Cfr. Hfst. 12

Gereedschapsstalen *(1)*

- 5 Hoofdgroepen :
  gebaseerd op gebruikskenmerken :
  - warmwerkend staal
  - koudwerkend staal
  - snelstaal
  - schokvast staal
  - matrijzenstaal (e.g. voor kunststoffen)

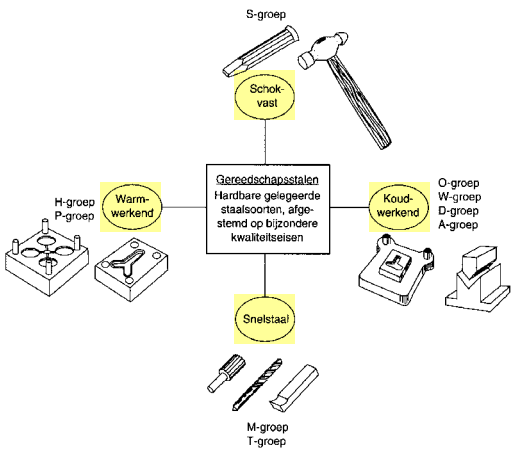
…/…

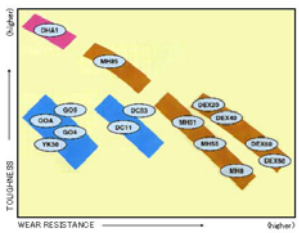
- Chemische samenstelling : + W, Co, V
- Microstructuur : carbiden van legeringselementen
- Gereedsschapsstalen = beste hardbaarheid
  (cfr. TTT diagrammen)

…/…

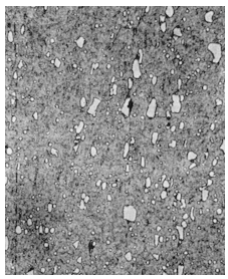
…/…

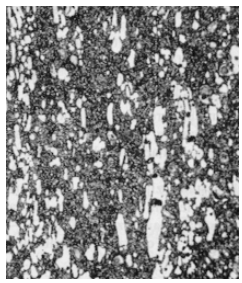
Gereedschapsstalen *(2)*

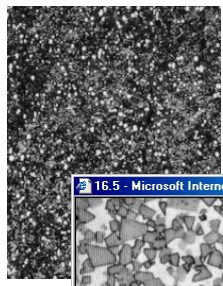


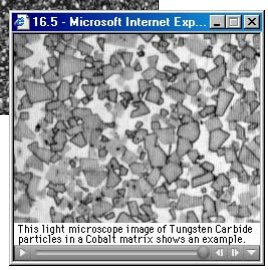


Gereedschapsstalen *(3)*

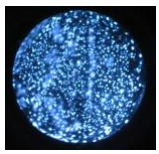


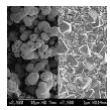






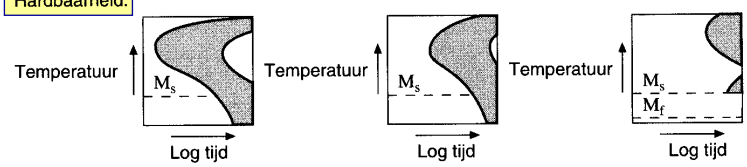
(W, Co, V) - carbiden



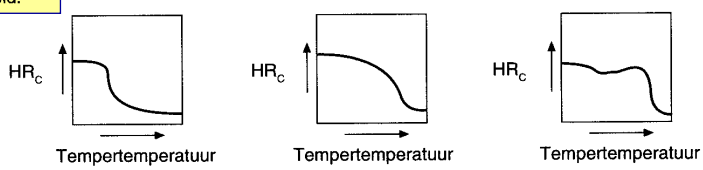


Gereedschapsstalen *(4)*

Hardbaarheid:



Hardheid:



Koolstofstaal ***Gelegeerd staal*** ***Gereedschapsstaal***

Materiaalkunde voor Ingenieurs

= *"Eind-GEBRUIKER"*

- "***Engineering Materials***" : ***Metalen***, Niet-metalen, Legeringen, Coatings, ...
- ***Eigenschappen***, Bereiding en Processing, ...
- ***Beschrijving***, ***Begrijpen***, ***Selectie***, ...
- Etc...

- ✓ ***Polymeren***
- ✓ ***Composieten***
- ✓ ***Keramische Materialen***
- ✓ ***Staal***
- ✓ ***Staalsoorten*** & Roestvast staal
- ✓ Corrosie
- Schade-analyse & -preventie / NDT

- Gieten, PM, Vormgeven, Verspanen, Lassen
- Cu
- Al
- Ni, Zn, Ti, Mg, Refractaire
- Opp. behand. & Coatings
- Selectie

Intermezzo

Corrosie (-preventie)

= tevens inleiding tot RVS

Intermezzo

illustration of essential corrosion basics …

Introduction to CORROSION & Some important Corrosion Types

Prof.dr.ir. W. BOGAERTS

What is Corrosion ?

- Corrosion is the "destructive interaction between a *material* and its *operation environment*". It leads to material degradation and contamination of the environment.
- It is a more general term than "rusting", a concepts that only relates to a homogeneous type of attack (often of iron or steel, in natural environments).
- Also non-metals can "corrode".

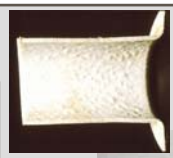
Corrosion of metals

CORROSION

Of metals

Of polymers, ceramics, etc ...

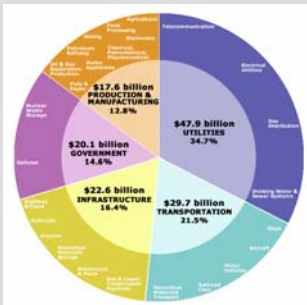
Of coatings & linings



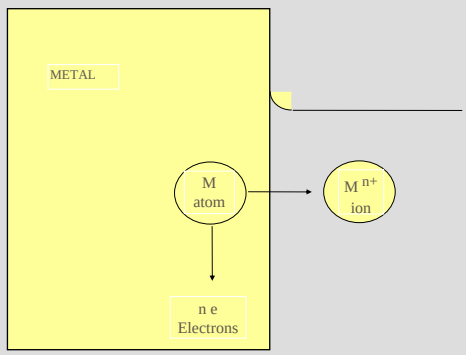
"... Is probably the commonest electrochemical phenomenon encountered in day-to-day life ..."

or : **... METALLURGY IN REVERSE ...**

Cost & Importance of Corrosion



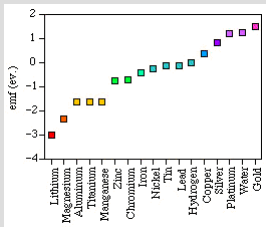
Metal (in-)stability : Origin of Electrode Potential – *E*



EMF Series

E^0 – Data :

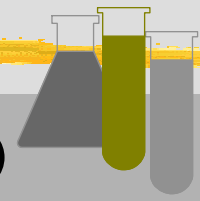
			E_H (Volts)
Noble End (electro-positive)			
$Au^{++} + 2e$	=	Au	+1.7
$^1/_2\, O_2 + 2H^+ + 2e$	=	H_2O	+1.23
$Pt^{++} + 2e$	=	Pt	+1.2
$Hg^{++} + 2e$	=	Hg	+0.85
$Ag^{+} + e$	=	Ag	+0.80
$Fe^{+++} + e$	=	Fe^{++}	+0.77
$Cu^{++} + 2e$	=	Cu	+0.34
$2H^+ + 2e$	=	***H_2***	***0 (def.)***
$Pb^{++} + 2e$	=	Pb	-0.13
$Ni^{++} + 2e$	=	Ni	-0.25
$Cd^{++} + 2e$	=	Cd	-0.40
$Fe^{++} + 2e$	=	Fe	-0.44
$Cr^{+++} + 3e$	=	Cr	-0.70
$Zn^{++} + 2e$	=	Zn	-0.76
$Ti^{++} + 2e$	=	Ti	-1.63
$Al^{+++} + 3e$	=	Al	-1.66
$Mg^{++} + 2e$	=	Mg	-2.38
Base End (electro-negative)			



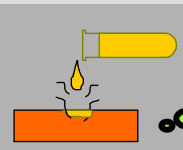
Nernst :

$$E = E^0 + RT/nF * \ln [\, a_{ox} / a_{red} \,]$$

Corrosion mechanism



Fe +



Corrosive environment

$Fe^{2+} + 2\ e^-$

anodic (oxidation) reaction

Reduction reactions

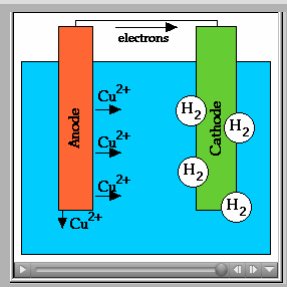
<u>Depending on the nature & components of the environment :</u>

- acid environment :

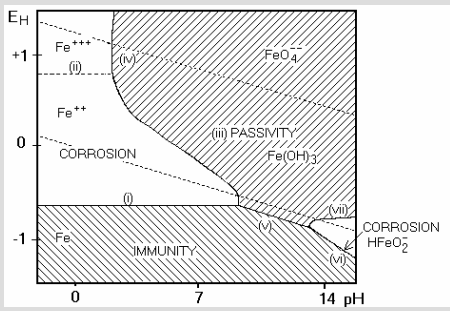
  $2H^+ + 2e^- \Rightarrow H_2$

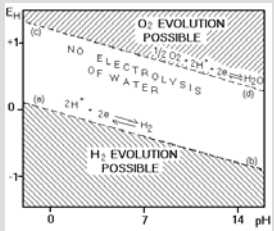
- alkaline or neutral environment :

  $O_2 + 2H_2O + 4e^- \Rightarrow 4OH^-$



Thermodynamics: E-pH Diagrams & Passivation





"Pourbaix" diagrams …

E-pH Iron/Steel

Fe ~ C-staal

$Fe \rightleftharpoons Fe^{++} + 2e^-$

$Fe^{++} \rightleftharpoons Fe^{+++} + e^-$

$Fe^{++} + 3OH^- \rightleftharpoons Fe(OH)_3 + e^-$

$Fe^{+++} + 3H_2O \rightleftharpoons Fe(OH)_3 + 3H^+$

$Fe + 3H_2O \rightleftharpoons Fe(OH)_3 + 3H^+ + 3e^-$

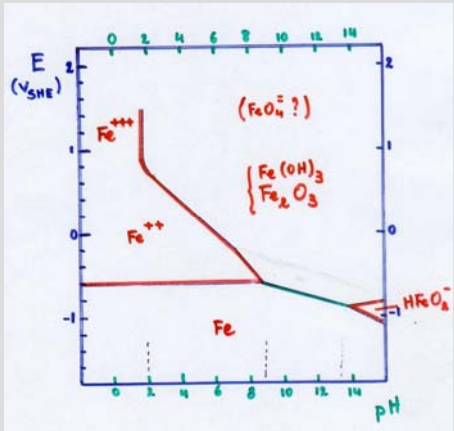
$Fe + 2H_2O \rightleftharpoons HFeO_2^- + 3H^+ + 2e^-$

$HFeO_2^- + H_2O \rightleftharpoons Fe(OH)_3 + e^-$

Additional Information **:**

Video – cf. CBA Library …

E-pH



E-pH Water

H_2O — aq

(a) $2H^+ + 2e^- \rightleftharpoons H_2$

$2H_2O + 2e^- \rightleftharpoons H_2 + 2OH^-$

(b) $O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightleftharpoons 2H_2O$

$O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightleftharpoons 4OH^-$

(a) → $E = 0 + \frac{0.059}{2} \log \frac{[H^+]^2}{pH_2}$

$E = 0 - 0.059\,pH - \cancel{0.03 \log pH_2}$

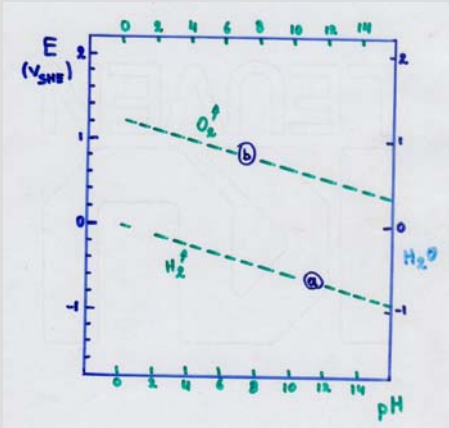
$\boxed{E = 0 - 0.059 \cdot pH}$

(b) → $E = 1.2 + \frac{0.059}{4} \log \frac{[H^+]^4 \cdot pO_2}{1}$

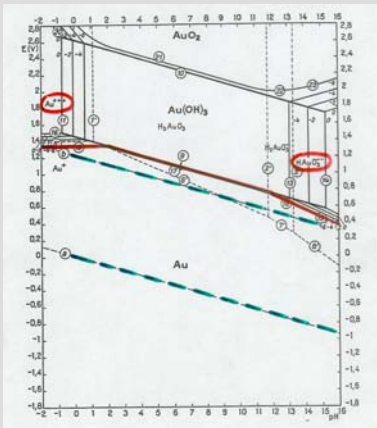
$E = 1.2 - 0.059\,pH + \cancel{0.015 \log pO_2}$

$\boxed{E = 1.2 - 0.059\,pH}$

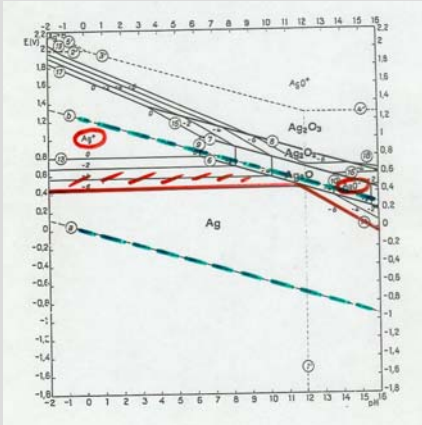
E-pH



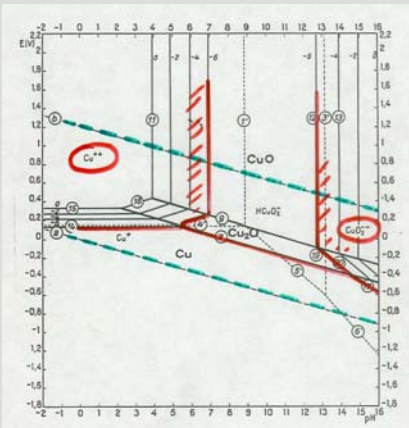
E-pH Gold



E-pH Silver



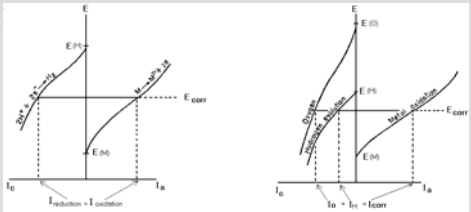
E-pH Copper

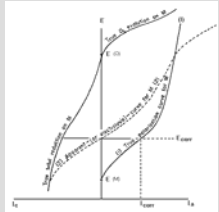


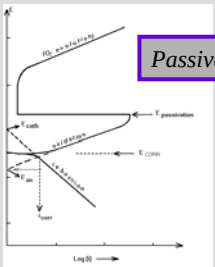
Additional Reading:
"Electrochemistry of Corrosion" …

"Polarization curves" …

Kinetics







Passivating metal

Faraday's Law …

Corrosion Rates

Rates of corrosion are affected by several important variables. The amount of metal removed (*w*) can be calculated using Faraday's equation from the total current density (*i*), the area (*A*), the atomic mass (*M*), the valence (*n*), the time (*t*), and Faraday's constant, (*F* = 96500 Cmb).

$$w = \frac{i \cdot A \cdot t \cdot M}{n \cdot F}$$

Increasing the resistance to the internal current flow can reduce the current, and hence, the rate.

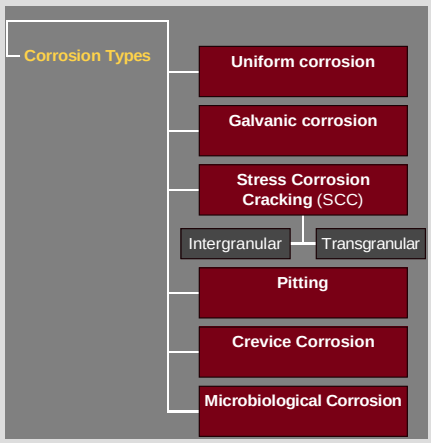
Electrochemical Measurements & Monitoring …

Additional Information & Training **:**

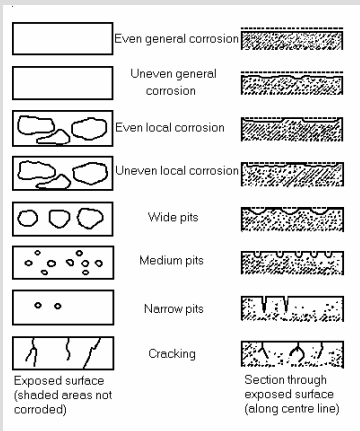
- *Lab Session / Demo*
- *Video (45') – cf. CBA Library …*

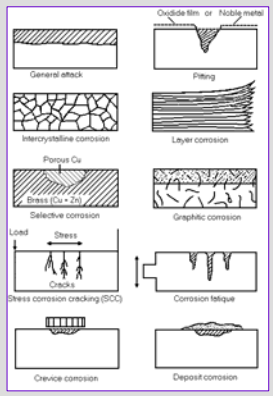
Corrosion Types

Some Important Examples :



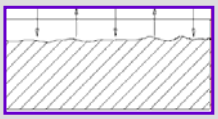
Corrosion Types





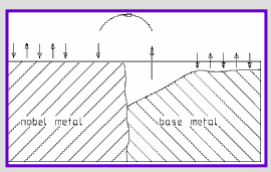
General (uniform) corrosion

- “Rusting”
- “Wastage”
- “White Rust”

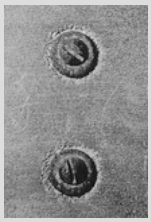


Galvanic corrosion

- Corrosion between a noble and less noble metal in the presence of an aggressive medium
- The more electro-positive = cathode, the least electropositive = anode

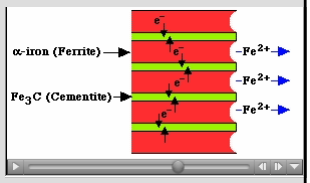


Galvanic corrosion (2)

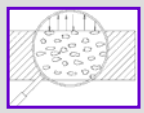


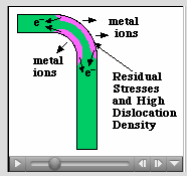
Bimetallic Corrosion

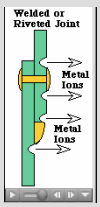
Selective Leaching (Dealloying)

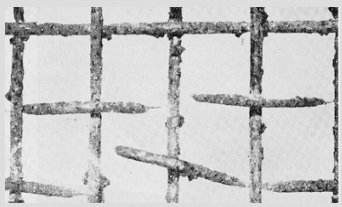


Microstructural Effects









(Oxygen) Concentration Cell

Galvanic series in seawater at 77°F (25°C) [2]

Least noble = anodic = most susceptible to corrosion

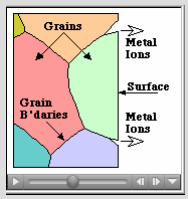
Magnesium and its alloys
Zinc
Galvanized steel or galvanized wrought iron
Aluminum alloys 3004, 3003, 1100, in this order
Cadmium
Low carbon steel
Wrought iron
Cast iron
Nickel cast irons
Stainless steel, Type 410 (active)
50-50 lead-tin solder
Stainless steel, Type 304 (active)
Stainless steel, Type 316 (active)
Lead
Tin
Muntz metal, C28000
Alloy 200 (active)
Alloy 600 (active)
Yellow brass, C27000
Aluminum bronzes, C61400
Red brass, C23000
Commercially pure copper, C11000
Silicon bronze, C65500
Alloy 200 (passive)
Alloy 600 (passive)
Alloy 400
Stainless steel, Type 410 (passive)
Stainless steel, Type 304 (passive)
Stainless steel, Type 316 (passive)
Alloy 825
Alloy 625
Alloy C
Silver
Titanium
Gold

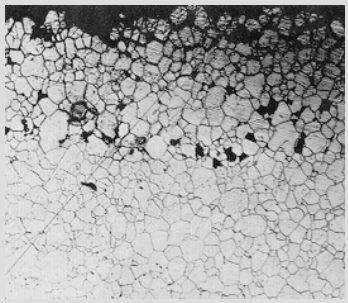
Most noble = cathodic = most corrosion-resistant

Galvanic (3)

Bimetallic corrosion : practical …

IGA & Sensitization

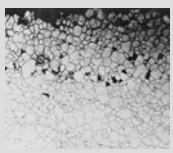




Mechanisms ...

Weld Decay …/…

Sensitization & Weld Decay



Mechanism :

$Cr_{23}C_6$

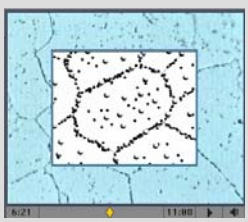
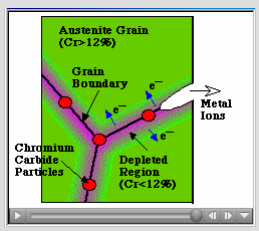
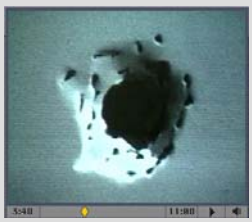


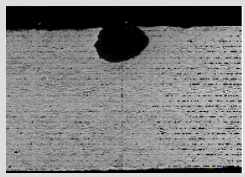
Illustration 'weld decay' …

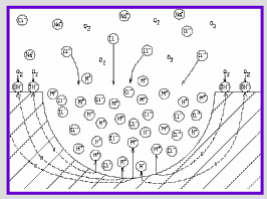


Pitting corrosion

- Caused by Chlorides (halides)
- Passive metals & alloys = susceptible



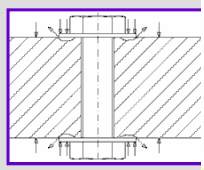


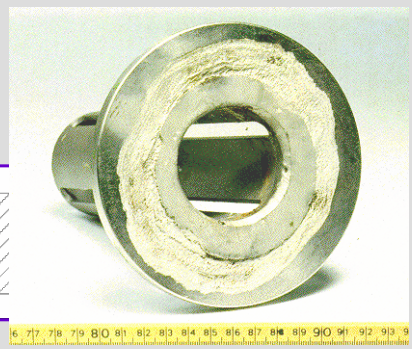


Mechanism …

Crevice corrosion

- Accelerated corrosion in a narrow crevice between two parts of a component,
  …one of which is made from a metal …

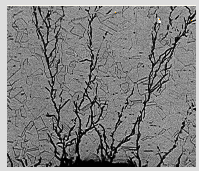


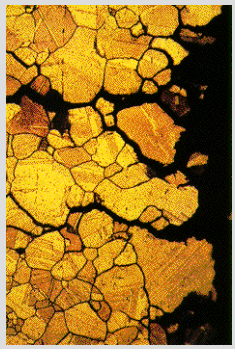


Stress Corrosion Cracking (SCC)

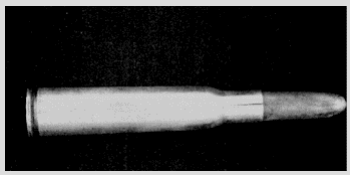
(Sudden) fracture of a metal upon exposure to a corrosive environment

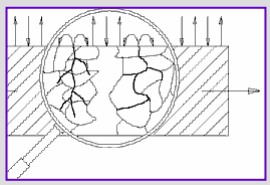
- Intergranular …
- Transgranular …



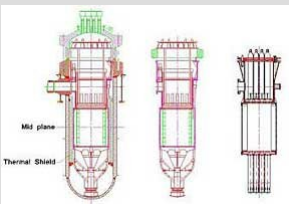


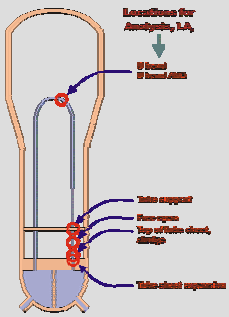
"season cracking"

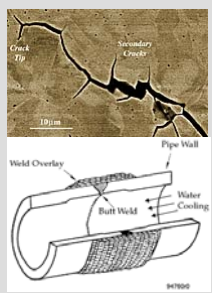


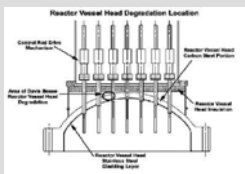


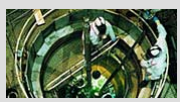
e.g. Nuclear …

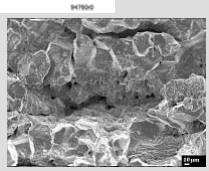




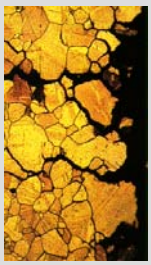


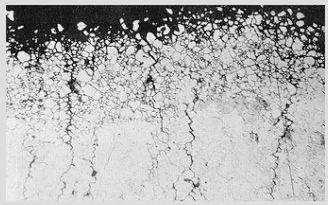


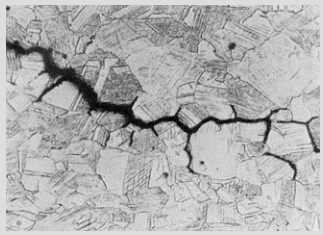




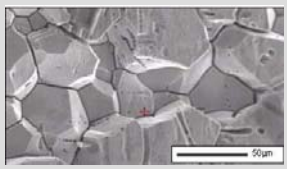
Intergranular Stress Corrosion Cracking (IGSCC)





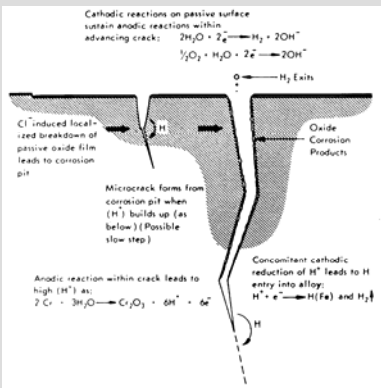


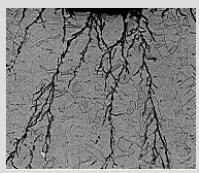
Mechanisms …

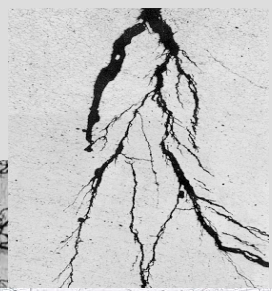


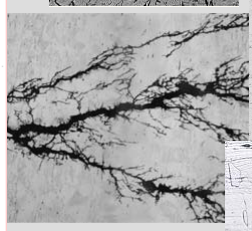
Prof. W. Bogaerts, 1999-2007

Transgranular Stress Corrosion Cracking (TGSCC)



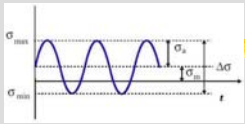


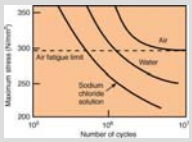


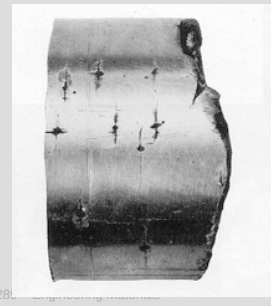


Mechanism (theories) …

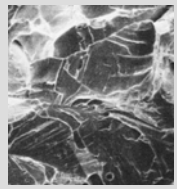
Corrosion Fatigue



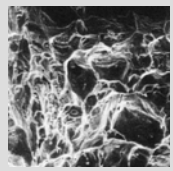




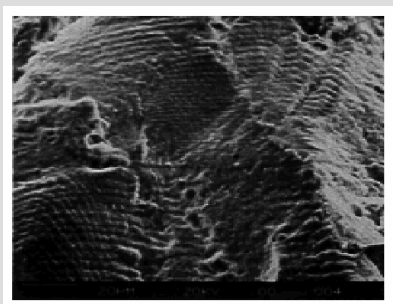
brittle

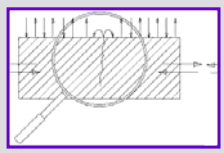


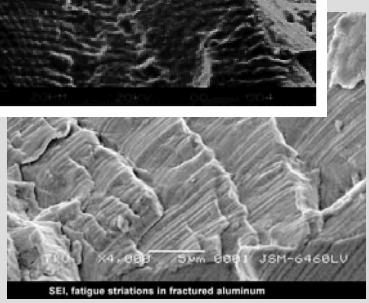
ductile

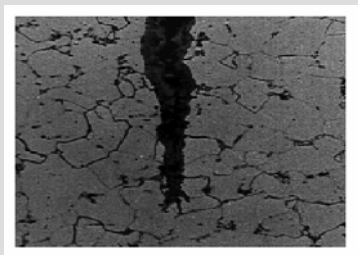


Corrosion Fatigue (2)



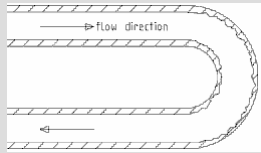




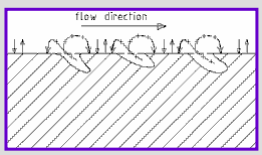


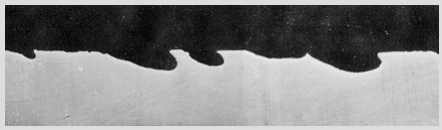
Striations, "beach marks" …

Erosion-corrosion



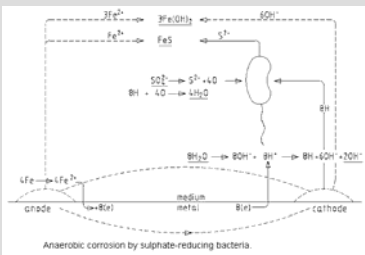
Localized grooved attack …



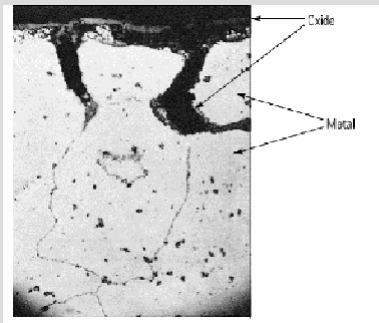


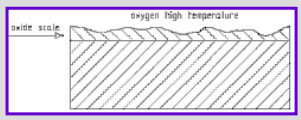
"MIC" - Microbiologically Induced Corrosion

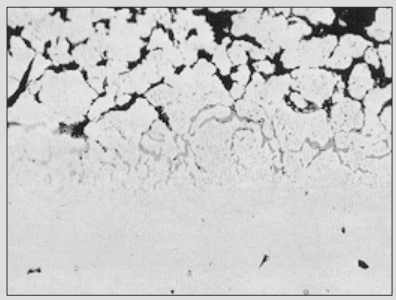
- Various ways :
  - SRBs
  - Iron-oxidizing
  - Etc …, etc …



High-Temperature Corrosion







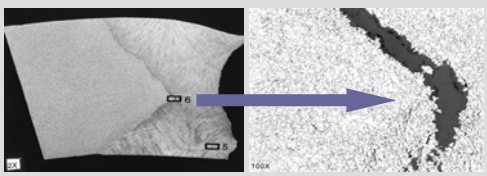
Oxidation
Sulfidation
Carburization
….

Other …

Hydrogen blistering

Filiform,
Cavitation,
Fretting, wear, …

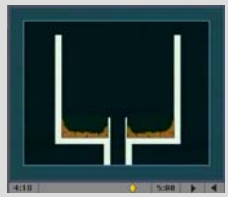
Etc …



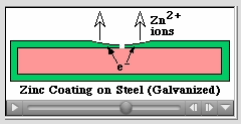
High-temperature Creep …

How to avoid corrosion ?...

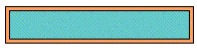
- Design
- Material selection:
  e.g. Stainless Steels, Polymers, ...
- Coatings
- Changing the environment (incl. CP) ...



Video ...



	Weak Acid	Strong Acid	Weak Base	Strong Base	Organic Solvent	Ozone
Fluorocarbons	Resistant	Resistant	Resistant	Resistant	Resistant	Resistant
PMMA	Resistant	Attacked	Resistant	Attacked	Attacked	Resistant
Nylon	Resistant	Attacked	Resistant	Resistant	Resistant	Attacked
Low Density PE	Resistant	Attacked	Resistant	Resistant	Resistant	Attacked
High Density PE	Resistant	Attacked	Resistant	Resistant	Resistant	Attacked
Polypropylene	Resistant	Attacked	Resistant	Resistant	Resistant	Attacked
Polystyrene	Resistant	Attacked	Resistant	Resistant	Attacked	Attacked
Polyvinyl Chloride	Resistant	Resistant	Resistant	Resistant	Attacked	Resistant
Epoxy	Resistant	Attacked	Resistant	Resistant		Attacked
Phenolics	Attacked	Attacked	Attacked	Attacked	Attacked	
Polyesters	Attacked	Attacked	Attacked	Attacked	Attacked	Attacked

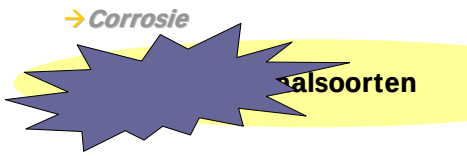


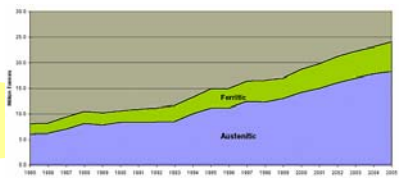
Thema 3

Staal & Staalsoorten

- Staal & staalproductie
- Verwerking (omvormen)
- Staalsoorten,
  incl. warmtebehandeling, structuren, ...
- Legeringen

→ *Corrosie*





Materiaalkunde voor Ingenieurs

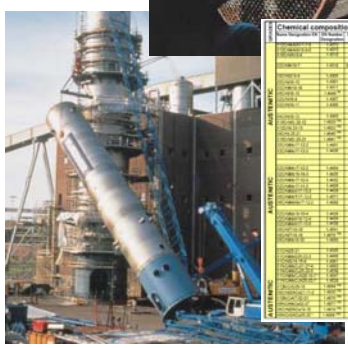
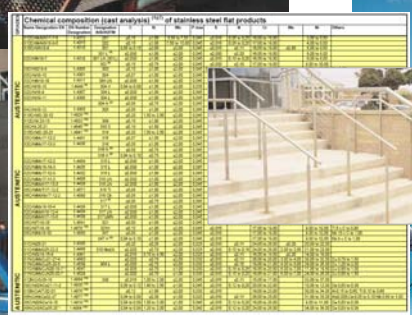
- "*Engineering Materials*" : ***Metalen***, Niet-metalen, Legeringen, Coatings, ...
- ***Eigenschappen***, Bereiding en Processing, ...
- ***Beschrijving***, ***Begrijpen***, ***Selectie***, ...
- Etc...

- ✓ ***Polymeren***
- ✓ ***Composieten***
- ✓ ***Keramische Materialen***
- ✓ ***Staal***
- ✓ ***Staalsoorten*** & **Roestvast staal**
- ✓ ***Corrosie***
- Schade-analyse & -preventie / NDT

- Gieten, PM, Vormgeven, Verspanen, Lassen
- Cu
- Al
- Ni, Zn, Ti, Mg, Refractaire
- Opp. behand. & Coatings
- Selectie

"Roestvast staal"




Zie transparanten & video !

- Wat ? ...
  - ➔ Zelf-passivatie (& corrosierisico's) (video)
- Effect legeringselementen : ***... / ...***
- Austenitische
- Ferritische
- Martensitische
- Duplex
- P-H
- ...

Verbanden, typische samenstellingen, karakteristieken, etc ...

Vergelijking

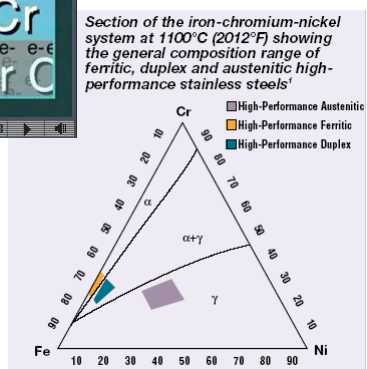
Additional Reading: "High-performance Stainless Steels" ...

Additional Reading: "Stainless Steels in Construction & Architecture" ...

Roestvast staal: Wat ?

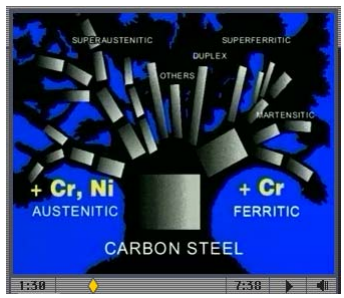
Illustratie: 'Self-passivation of Stainless Steels' (+ corrosion threats & prevention)

Section of the iron-chromium-nickel system at 1100°C (2012°F) showing the general composition range of ferritic, duplex and austenitic high-performance stainless steels[1]



Roestvaste staalsoorten *(0)*

Ferritic	Martensitic	Austenitic	Precip.Hard.	Duplex
<0.1% C 13-18% Cr no Ni	0.20-1.10% C 12-18 % Cr 0-2.5% Ni	<0.1% C 16-26% Cr 4-22% Ni		
Ferritic structure	Ferritic structure (un-hardened) Martensitic structure (hardened)	Austenitic structure	Occurs in mart-ensitic, semi-austenitic, and austenitic types	Contains both Austenite and Ferrite
Not hardenable by heat treatment	Hardenable	Not hardenable	Hardenable	
Slightly cold-hardening	Slightly cold-hardening	Cold hardening		
Ferro-magnetic	Ferro-magnetic	Not ferro-magnetic		
Reasonably corrosion resistant	Fairly corrosion resistant in hardened condition	Good corrosion resistance		Better resistance to SCC than other types of stainless steel
		Large thermal expansion Poor thermal conductivity Poor electrical conductivity	Very strong	



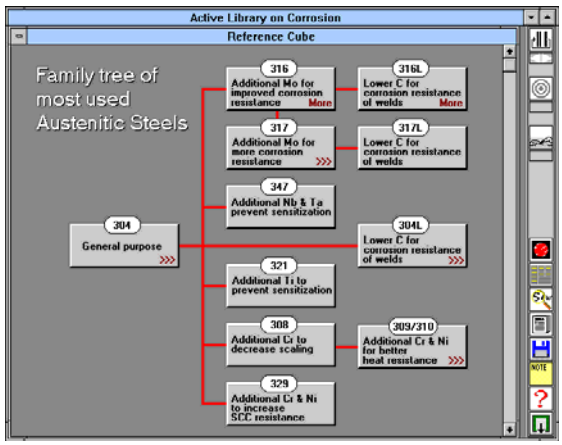
Video …

Chemical composition (cast analysis) [(1)(7)] of stainless steel flat products

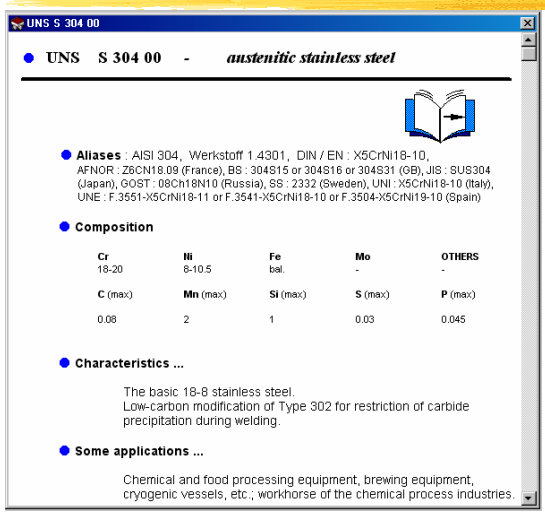
GRADES	Name Designation EN	EN Number Designation	Designation AISI/ASTM	C	Si	Mn	P max	S	N	Cr	Mo	Ni	Others
AUSTENITIC	X12CrMnNiN17-7-5	1.4372	201	≤0,15	≤1,00	5,50 to 7,50	0,045	≤0,015	0,05 to 0,25	16,00 to 18,00		3,50 to 5,50	
	X12CrMnNiN18-9-5	1.4373	202	≤0,15	≤1,00	7,50 to 10,50	0,045	≤0,015	0,05 to 0,25	17,00 to 19,00		4,00 to 6,00	
	X10CrNiN18-8	1.4310	301	0,05 to 0,15	≤2,00	≤2,00	0,045	≤0,015	≤0,11	16,00 to 19,00	≤0,80	6,00 to 9,50	
			301 L [(8)]	≤0,030	≤1,00	≤2,00	0,045	≤0,030	≤0,20	16,00 to 18,00		6,00 to 8,00	
	X2CrNiN18-7	1.4318	301 LN (301L)	≤0,030	≤1,00	≤2,00	0,045	≤0,015	0,10 to 0,20	16,50 to 18,50		6,00 to 8,00	
			302 [(8)]	≤0,15	≤0,75	≤2,00	0,045	≤0,030	≤0,10	17,00 to 19,00		8,00 to 10,00	
	X8CrNiS18-9	1.4305	303	≤0,10	≤1,00	≤2,00	0,045	0,15 to 0,35	≤0,11	17,00 to 19,00		8,00 to 10,00	Cu≤1,00
	X5CrNi18-10	1.4301	304	≤0,07	≤1,00	≤2,00	0,045	≤0,015 [2)]	≤0,11	17,00 to 19,50		8,00 to 10,50	
	X2CrNiN18-10	1.4311	304 LN	≤0,030	≤1,00	≤2,00	0,045	≤0,015 [2)]	0,12 to 0,22	17,00 to 19,50		8,50 to 11,50	
	X6CrNi18-10	1.4948 [(9)]	304 H	0,04 to 0,08	≤1,00	≤2,00	0,035	≤0,015 [2)]	≤0,11	17,00 to 19,00		8,00 to 11,00	
	X2CrNi18-9	1.4307	304 L	≤0,030	≤1,00	≤2,00	0,045	≤0,015 [2)]	≤0,11	17,50 to 19,50		8,00 to 10,00	
	X2CrNi19-11	1.4306	304 L	≤0,030	≤1,00	≤2,00	0,045	≤0,015 [2)]	≤0,11	18,00 to 20,00	2,00 to 2,50	10,00 to 12,00	
			304 N [(8)]	≤0,08	≤0,75	≤2,00	0,045	≤0,030	0,10 to 0,16	18,00 to 20,00		8,00 to 10,50	
	X4CrNi18-12	1.4303	305	≤0,06	≤1,00	≤2,00	0,045	≤0,015 [2)]	≤0,11	17,00 to 19,00		11,00 to 13,00	
	X15CrNiSi 20-12	1.4828 [(10)]		≤0,20	1,50 to 2,50	≤2,00	0,045	≤0,015	≤0,11	19,00 to 21,00		11,00 to 13,00	
	X12CrNi 23-13	1.4833 [(10)]	309	≤0,15	≤1,00	≤2,00	0,045	≤0,015	≤0,11	22,00 to 24,00		12,00 to 14,00	
	X8CrNi 25-21	1.4845 [(10)]	310 S	≤0,10	≤1,50	≤2,00	0,045	≤0,015	≤0,11	24,00 to 26,00		19,00 to 22,00	
	X15CrNiSi 25-21	1.4841 [(10)]	314	≤0,20	1,50 to 2,50	≤2,00	0,045	≤0,015	≤0,11	24,00 to 26,00		19,00 to 22,00	
	X5CrNiMo17-12-2	1.4401	316	≤0,07	≤1,00	≤2,00	0,045	≤0,015 [2)]	≤0,11	16,50 to 18,50	2,00 to 2,50	10,00 to 13,00	
	X3CrNiMo17-13-3	1.4436	316	≤0,05	≤1,00	≤2,00	0,045	≤0,015 [2)]	≤0,11	16,50 to 18,50	2,50 to 3,00	10,50 to 13,00	
			316 N [(8)]	≤0,08	≤0,75	≤2,00	0,045	≤0,030	0,10 to 0,16	16,00 to 18,00	2,00 to 3,00	10,00 to 14,00	
			316 H [(8)]	0,04 to 0,10	≤0,75	≤2,00	0,045	≤0,030		16,00 to 18,00	2,00 to 3,00	10,00 to 14,00	
	X2CrNiMo17-12-2	1.4404	316 L	≤0,030	≤1,00	≤2,00	0,045	≤0,015 [2)]	≤0,11	16,50 to 18,50	2,00 to 2,50	10,00 to 13,00	
	X2CrNiMo18-14-3	1.4435	316 L	≤0,030	≤1,00	≤2,00	0,045	≤0,015 [2)]	≤0,11	17,00 to 19,00	2,50 to 3,00	12,50 to 15,00	
	X2CrNiMo17-12-3	1.4432	316 L	≤0,030	≤1,00	≤2,00	0,045	≤0,015 [2)]	≤0,11	16,50 to 18,50	2,50 to 3,00	10,50 to 13,00	
	X2CrNiMoN17-11-2	1.4406	316 LN	≤0,030	≤1,00	≤2,00	0,045	≤0,015 [2)]	0,12 to 0,22	16,50 to 18,50	2,00 to 2,50	10,00 to 12,00	
	X2CrNiMoN17-13-3	1.4429	316 LN	≤0,030	≤1,00	≤2,00	0,045	≤0,015	0,12 to 0,22	16,50 to 18,50	2,50 to 3,00	11,00 to 14,00	
	X6CrNiMoTi17-12-2	1.4571	316 Ti	≤0,08	≤1,00	≤2,00	0,045	≤0,015 [2)]		16,50 to 18,50	2,00 to 2,50	10,50 to 13,50	Ti:5 x C to 0,70
	X6CrNiMoNb17-12-2	1.4580	316 Cb	≤0,08	≤1,00	≤2,00	0,045	≤0,015 [2)]		16,50 to 18,50	2,00 to 2,50	10,50 to 13,50	Nb:10 x C to 1,00
			317 [(8)]	≤0,08	≤0,75	≤2,00	0,045	≤0,030	≤0,10	18,00 to 20,00	3,00 to 4,00	11,00 to 15,00	
	X2CrNiMo18-15-4	1.4438	317 L	≤0,030	≤1,00	≤2,00	0,045	≤0,015 [2)]	≤0,11	17,50 to 19,50	3,00 to 4,00	13,00 to 16,00	
	X2CrNiMoN18-12-4	1.4434	317 LN	≤0,030	≤1,00	≤2,00	0,045	≤0,015	≤0,11	16,50 to 19,50	3,00 to 4,00	10,50 to 14,00	
	X2CrNiMoN17-13-5	1.4439	317 LMN	≤0,030	≤1,00	≤2,00	0,045	≤0,015	0,12 to 0,22	16,50 to 18,50	4,00 to 5,00	12,50 to 14,50	
	X6CrNiTi18-10	1.4541	321	≤0,08	≤1,00	≤2,00	0,045	≤0,015 [2)]		17,00 to 19,00		9,00 to 12,00	Ti:5 x C to 0,70
	X8CrNiTi18-10	1.4878 [(10)]	321H	≤0,10	≤1,00	≤2,00	0,045	≤0,015		17,00 to 19,00		9,00 to 12,00	Ti:5 x C to 0,80
	X6CrNiNb18-10	1.4550	347	≤0,08	≤1,00	≤2,00	0,045	≤0,015		17,00 to 19,00		9,00 to 12,00	Nb:10 x C to 1,00
			347 H [(8)]	0,04 to 0,10	≤1,00	≤2,00	0,045	≤0,015		17,00 to 19,00		9,00 to 12,00	Nb:8 x C to 1,00
	X1CrNi25-21	1.4335		≤0,20	≤0,25	≤2,00	0,025	≤0,010	≤0,11	24,00 to 26,00	≤0,20	20,00 to 22,00	
	X1CrNiMoN25-22-2	1.4466	310 MoLN	≤0,020	≤0,70	≤2,00	0,025	≤0,010	0,10 to 0,16	24,00 to 26,00	2,00 to 2,50	21,00 to 23,00	
	X10NiSi18-15-4	1.4361		≤0,015	3,70 to 4,50	≤2,00	0,025	≤0,010	≤0,11	16,50 to 18,50	≤0,20	14,00 to 16,00	
	X1NiCrMoCu31-27-4	1.4563		≤0,020	≤0,70	≤2,00	0,030	≤0,010	≤0,11	26,00 to 28,00	3,00 to 4,00	30,00 to 32,00	Cu:0,70 to 1,50
	X1NiCrMoCu25-20-5	1.4539	904 L	≤0,020	≤0,70	≤2,00	0,030	≤0,010	≤0,15	19,00 to 21,00	4,00 to 5,00	24,00 to 26,00	Cu:1,20 to 2,00
	X1CrNiMoCuN20-18-7 *	1.4547		≤0,020	≤0,70	≤1,00	0,030	≤0,010	0,18 to 0,25	19,50 to 20,50	6,00 to 7,00	17,50 to 18,50	Cu:0,50 to 1,00
	X1NiCrMoCuN25-20-7	1.4529		≤0,020	≤0,70	≤1,00	0,030	≤0,010	0,15 to 0,25	19,00 to 21,00	6,00 to 7,00	24,00 to 26,00	Cu:0,50 to 1,50
	X12NiCrSi35-16	1.4864 [(10)]	330	≤0,015	1,00 to 2,00	≤2,00	0,045	≤0,015	≤0,11	15,00 to 17,00		33,00 to 37,00	
	X9CrNiSiNCe21-11-2	1.4835 [(10)]		0,05 to 0,12	1,40 to 2,50	≤1,00	0,045	≤0,015	0,12 to 0,20	20,00 to 22,00		10,00 to 12,00	Ce:0,03 to 0,08
	X10NiCrAlTi32-21	1.4876 [(10)]		≤0,12	≤1,00	≤2,00	0,030	≤0,015		19,00 to 23,00		30,00 to 34,00	Al:0,15 to 0,60; Ti:0,15 to 0,60
	X6NiCrNbCe32-27	1.4877 [(10)]		0,04 to 0,08	≤0,30	≤1,00	0,020	≤0,010	≤0,11	26,00 to 28,00		31,00 to 33,00	Al:≤0,025;Ce:0,05 to 0,10;Nb:0,60 to 1,00
	X6CrNiSiNCe19-10	1.4818 [(10)]		0,04 to 0,08	1,00 to 2,00	≤1,00	0,045	≤0,015	0,12 to 0,20	18,00 to 20,00		9,00 to 11,00	Ce:0,03 to 0,08
	X6NiCrSiNCe35-25 *	1.4854 [(10)] *		0,04 to 0,08	1,20 to 2,00	≤2,00	0,040	≤0,015	0,12 to 0,20	24,00 to 26,00		34,00 to 36,00	Ce:0,03 to 0,08

ELEMENT	EFFECT
Chromium	Enhances passivity and, therefore, tends to improve resistance to initiation of attack. Once corrosion starts, it aggravates acidity and results in rapid propagation.
Molybdenum	Enhances passivity and improves pitting and crevice corrosion resistance.
Nickel	Balances austenite structure and has a small positive effect in enhancing resistance to crevice corrosion initiation. If corrosion starts, it significantly reduces the rate of attack.
Copper	Correct levels of copper (approx. 1% or less) improve resistance to crevice corrosion initiation. Other levels, particularly higher levels, reduce resistance to initiation of corrosion, although higher levels reduce the rate of attack.
Silicon	High levels (>4%) improve pitting resistance. Otherwise, negligible influence except in conjunction with Mo.
Manganese	Reacts with sulfur to form MnS, which act as sites for initiation of pitting and crevice corrosion. At relatively high sulfur levels (0.02 to 0.03%), reducing Mn from 1.5% to 0.5% or less improves resistance. At lower sulfur levels (<0.01%), resistance is already high and lowering manganese levels has only a small effect.
Nitrogen	Balances austenite and strengthens. At levels above 0.15%, it significantly improves resistance to initiation of pitting and crevice corrosion.

Roestvaste staalsoorten *(1)*



Austenitisch RVS



UNS S 304 00

UNS S 304 00 - *austenitic stainless steel*

Aliases : AISI 304, Werkstoff 1.4301, DIN / EN : X5CrNi18-10,
AFNOR : Z6CN18.09 (France), BS : 304S15 or 304S16 or 304S31 (GB), JIS : SUS304 (Japan), GOST : 08Ch18N10 (Russia), SS : 2332 (Sweden), UNI : X5CrNi18-10 (Italy), UNE : F.3551-X5CrNi18-11 or F.3541-X5CrNi18-10 or F.3504-X5CrNi19-10 (Spain)

Composition

Cr	Ni	Fe	Mo	OTHERS
18-20	8-10.5	bal.	-	-
C (max)	**Mn** (max)	**Si** (max)	**S** (max)	**P** (max)
0.08	2	1	0.03	0.045

Characteristics ...

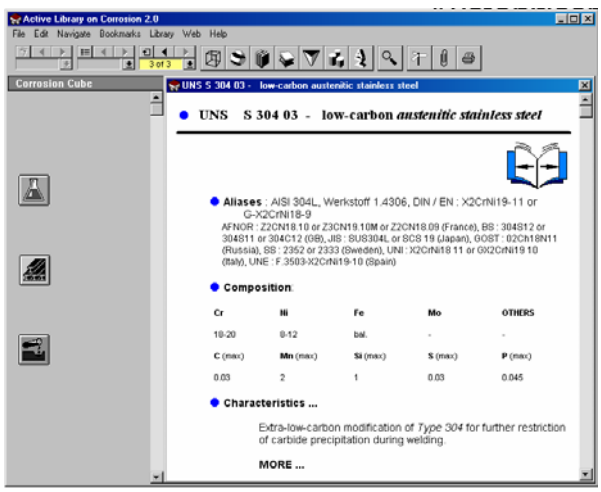
The basic 18-8 stainless steel.
Low-carbon modification of Type 302 for restriction of carbide precipitation during welding.

Some applications ...

Chemical and food processing equipment, brewing equipment, cryogenic vessels, etc.; workhorse of the chemical process industries.

Basismateriaal ...

Austenitisch RVS



Active Library on Corrosion 2.0

File Edit Navigate Bookmarks Library Web Help

3 of 3

Corrosion Cube

UNS S 304 03 - low-carbon austenitic stainless steel

UNS S 304 03 - low-carbon *austenitic stainless steel*

Aliases : AISI 304L, Werkstoff 1.4306, DIN / EN : X2CrNi19-11 or G-X2CrNi18-9
AFNOR : Z2CN18.10 or Z3CN19.10M or Z2CN18.09 (France), BS : 304S12 or 304S11 or 304C12 (GB), JIS : SUS304L or SCS 19 (Japan), GOST : 02Ch18N11 (Russia), SS : 2352 or 2333 (Sweden), UNI : X2CrNi18 11 or 0X2CrNi19 10 (Italy), UNE : F.3503-X2CrNi19-10 (Spain)

Composition

Cr	Ni	Fe	Mo	OTHERS
18-20	8-12	bal.	-	-
C (max)	**Mn** (max)	**Si** (max)	**S** (max)	**P** (max)
0.03	2	1	0.03	0.045

Characteristics ...

Extra-low-carbon modification of *Type 304* for further restriction of carbide precipitation during welding.

MORE ...

Type 304L

ALC: Active Library on Corrosion ...

Austenitisch RVS

UNS S 321 00 - stabilized

- **UNS S 321 00 - stabilized *austenitic stainless steel***

- **Aliases** : AISI 321, Werkstoff 1.454, DIN / EN : X6CrNiTi18 10
  AFNOR : Z6CNT18.10 (France), BS : 321S12 or 321S3 (GB), JIS : SUS321 (Japan), GOST : 12Ch18N10T or Ch18N10T or 09Ch18N10T (Russia), SS : 2337 (Sweden), UNI : X6CrNiTi18 11 (Italy), UNE : F.3553-X7CrNiTi18-11 or F.3523-X6CrNiTi18-11 (Spain)

- **Composition :**

Cr	Ni	Fe	Mo	OTHERS
117-19 9-12	bal.	-	Ti = 5x %(C + N) ; max. 0.7	
C (max)	**Mn** (max)	**Si** (max)	**S** (max)	**P** (max)
0.08	2	1	0.03	0.045

- **Characteristics ...**

  This is an 18/10 stainless steel stabilized with titanium to prevent weld decay or intergranular corrosion.

"stabilisatie" ...

Austenitisch RVS

UNS S 316 00 - molybdenum

- **UNS S 316 00 - molybdenum *austenitic stainless steel***

- **Aliases** : AISI 316, Werkstoff 1.4401, DIN / EN : X5CrNiMo17 12 2 or X5CrNiMo17 13 3
  AFNOR : Z6CND17.11 or Z6CND17.12 (France), BS : 316S16 or 316S31 (GB), JIS : SUS316 (Japan), SS : 2343 or 2347 (Sweden), UNI : X5CrNiMo17 12 or X5CrNiMo17 13 (Italy), UNE : F.3543-X5CrNiMo17-12 or F.3534-X6CrNiMo17-12-03 (Spain)

- **Composition :**

Cr	Ni	Fe	Mo	OTHERS
16-18	10-14	bal.	2-3	-
C (max)	**Mn** (max)	**Si** (max)	**S** (max)	**P** (max)
0.08	2	1	0.03	0.045

- **Characteristics ...**

  The basic molybdenum-bearing 18-8 stainless steel.

  Higher corrosion resistance than Types 302 and 304. Higher creep strength.

  The average composition of this steel is 17/12/2.5 chromium/nickel/molybdenum. The addition of molybdenum greatly improves the resistance to corrosion in reducing conditions, such as dilute sulfuric acid, and to pitting in solutions containing halides.

- **Some applications ...**

Molybdeen als legeringselement ...

Austenitisch RVS

UNS S 316 03 - low-carbon molybdenum

- UNS S 316 03 - low-carbon molybdenum *austenitic stainless steel*

- **Aliases** : AISI 316L, Werkstoff 1.4404 or 1.443
  DIN / EN : X2CrNiMo17 13 2 or X2CrNiMo18
  AFNOR : Z2CND18.13 or Z2CND17.12 or Z2CND17.
  316S11 or 316S12 (GB), JIS : SUS316L or SCS16 (Ja
  (Russia), SS : 2348 or 2353 (Sweden), UNI : X2CrNiN
  GX2CrNiMo19 11 (Italy), UNE : F.3533-X2CrNiMo17-1
- **Composition :**

Cr	Ni	Fe	Mo
16-18	10-14	bal.	2-3
C (max)	**Mn** (max)	**Si** (max)	**S** (ma
0.03	2	1	0.03

- **Characteristics ...**

  Extra-low-carbon modification of *Type*
  precipitation during welding.
- **Some applications ...**

UNS S 316 53 - controlled nitrogen austenitic stainless steel

- UNS S 316 53 - controlled nitrogen *austenitic stainless steel*

- **Aliases** : AISI 304LN, Werkstoff 1.4406 or 1.4429,
  DIN / EN : X2CrNiMoN17 12 2 or X2CrNiMoN17 13 3
  AFNOR : Z2CN18.12Az or Z2CN18.13Az (France), BS : 316S61 or 316S62 (GB), JIS : SUS316LN (Japan), SS : 2375 (Sweden), UNI : X2CrNiMoN17 12 or X2CrNiMoN17 13 (Italy)
- **Composition**:

Cr	Ni
16-18	10-14
C (max)	**Mn** (max)
0.03	2

- **Characteristics ...**

  Controlled (high) nitrogen modification of *Type 316*.

Molybdeen als legeringselement & dezelfde verdere verbeteringen ...

Austenitisch RVS

Active Library on Corrosion
Reference Cube

- UNS S 317 00 - molybdenum *austenitic stainless steel*

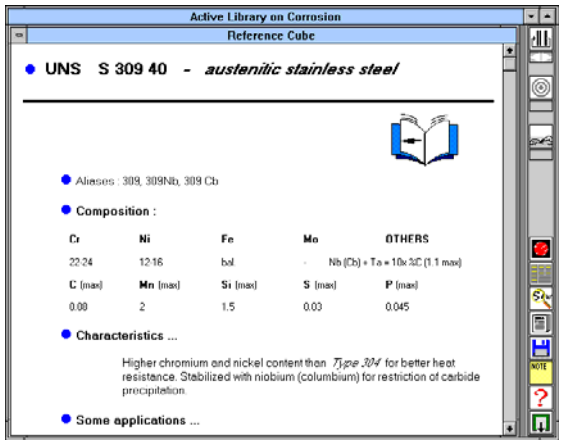
- Aliases : AISI 317
- **Composition :**

Cr	Ni	Fe	Mo	OTHERS
18-20	11-15	bal.	3-4	-
C (max)	Mn (max)	Si (max)	S (max)	P (max)
0.08	2	1	0.03	0.045

- **Characteristics ...**
- **Some applications ...**

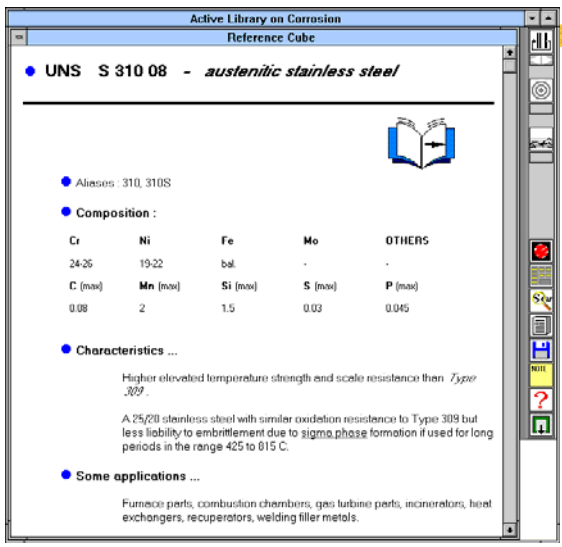
Hoger gelegeerde varianten (a) : (Cr), Ni, Mo ...
→ Chemische resistentie

Austenitisch RVS



Hoger gelegeerde varianten (b) :
Cr, Ni, + Stabilisatie …
→ Temperatuur-resistentie

Austenitisch RVS



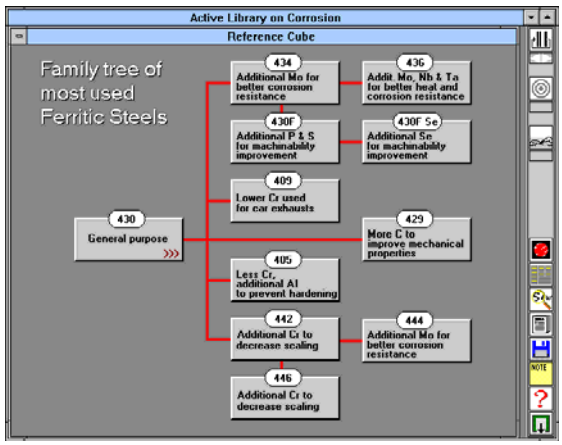
Hoger gelegeerde varianten (b-bis) :
Cr, Ni +
"stabilisatie" …
→ Temperatuur-resistentie

Austenitisch RVS : Samenvatting !...

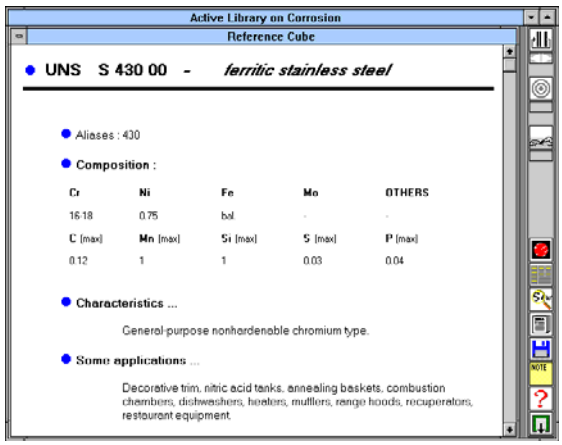
Addition	Alloy Example	Goal (compared to Type 304)	Influence on Corrosion Resistance
Ni	*Ni-Fe-Cr Alloys*	Better corrosion resistance at elevated temperatures	Positive
Cr + Ni	*309*, *310*, 314, 330	Strength and Oxidation resistance	Positive
Mo	*316*, *317*	Pitting corrosion resistance Resistance against acids	Very positive
-C	*304L* *316L*, 317L	By reduced C-content: less risk for intergranular attack (IGA)	Positive
Ti	*321*	Reduced sensitivity for IGA	Positive
Nb (+Ta)	*347*	Reduced sensitivity for IGA	Positive
Se or S	303Se, 303	Improved machinability	Negative
Mn + N	*Fe-Ni-Mn-N Alloys*	High strength	Negative
Cu+Ti+Al	*Precipitation-hardening Alloys*	*Improved strength*	*Negative*

"PRE", etc …

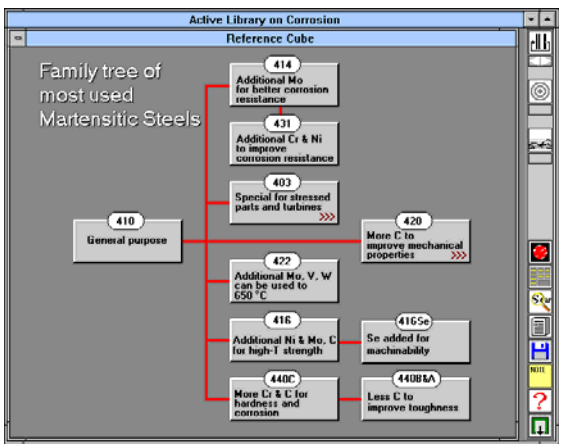
Roestvaste staalsoorten *(2)*



Ferritisch RVS



Roestvaste staalsoorten *(3)*



Martensitisch RVS

Active Library on Corrosion

Reference Cube

MARTENSITIC STAINLESS STEELS

- **General :**

With lower Cr and higher C content, it is possible to produce stainless steels that are hardenable by heat treatment. These steels are usually selected when their excellent strength is required.

AISI Type 410 is the most widely used of the martensitic grades. It is occasionally used in the handling of chemicals, but because of its lower Cr and higher C content, its corrosion resistance is substantially less than that of, for example, Type 304 (austenitic) stainless steel.

The straight-chromium martensitic stainless steels may be resistant to chloride stress corrosion cracking but are susceptible when fully hardened.

- *Family Tree >>>*
- *Type 403 >>>, Type 420 >>>*
- **See also ...**

Martensitisch RVS

Active Library on Corrosion

Reference Cube

UNS S 403 00 - *martensitic stainless steel*

- Aliases : 403
- **Composition :**

Cr	Ni	Fe	Mo	OTHERS
11.5-13	-	bal	-	-
C	**Mn**	**Si**	**S** (max)	**P** (max)
0.15	1.0	0.5	0.03	0.04

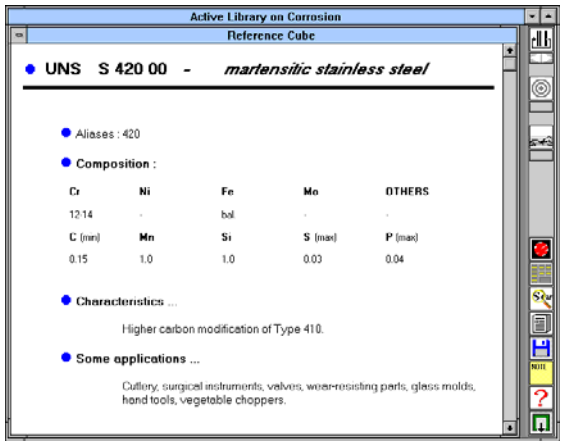
- **Characteristics ...**

"Turbine-quality" grade (special for stressed parts and turbines).

- **Some applications ...**

Steam turbine blading and other highly stressed parts including jet engine rings.

Martensitisch RVS



Materiaalkunde voor Ingenieurs

- "*Engineering Materials*" : ***Metalen***, Niet-metalen, Legeringen, Coatings, ...
- ***Eigenschappen***, Bereiding en Processing, ...
- ***Beschrijving***, ***Begrijpen***, ***Selectie***, ...
- Etc...

- ✓ ***Polymeren***
- ✓ ***Composieten***
- ✓ ***Keramische Materialen***
- ✓ ***Staal***
- ✓ ***Staalsoorten & Roestvast staal***
- ✓ ***Corrosie***
- Schade-analyse & -preventie / NDT
- Gieten, PM, Vormgeven, Verspanen, Lassen
- Cu
- Al
- Ni, Zn, Ti, Mg, Refractaire
- Opp. behand. & Coatings
- Selectie

Thema 4
Vormgeven

Inhoudstabel ...

- Vloeibaar vormgeven
  - Gieten *(= intermezzo 2)*
  - **Gietijzer & Gietlegeringen**
- PM : poedermetallurgie
- Afnemende (o.m. verspanende) technieken
- Lassen, Lijmen, ...

Materiaalkunde voor Ingenieurs

= *"Eind-GEBRUIKER"*

- ✓ *Polymeren*
- ✓ *Composieten*
- ✓ *Keramische Materialen*
- ✓ *Staal*
- ✓ *Staalsoorten & Roestvast staal*
- ✓ *Corrosie*

- *Gieten, PM, Vormgeven, Verspanen, Lassen*
- Cu
- Al
- Ni, Zn, Ti, Mg, Refractaire
- Opp. behand. & Coatings
- Selectie
- Schade-analyse & -preventie / NDT

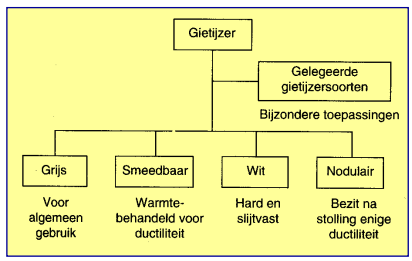
Gietprocessen

- Zandvorm
  - HT materialen, grote stukken
- Coquille gieten
  - LT materialen
- Spuitgieten
  - dunwandig ; cfr. ook kunststoffen !
- Verloren (was) model
  - maatnauwkeurigheid
- Andere : centrifugaal gieten (buizen, pijpen)

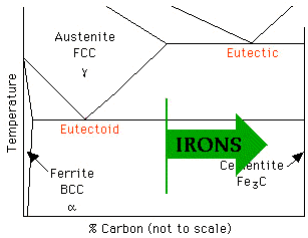
Video

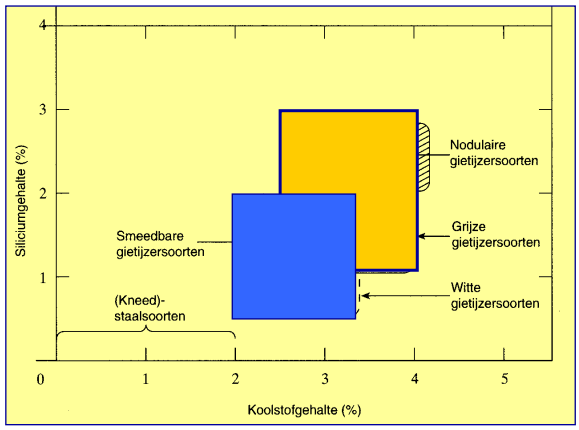
Gietijzer & Gietlegeringen *(1)*

- Gietijzer (.../...)
  - Grijs gietijzer
  - Wit gietijzer
  - Nodulair (ductiel) gietijzer
  - Smeedbaar gietijzer
  - Gelegeerde gietijzersoorten
- Gietproducten van staal
- Gietlegeringen (vs. 'kneedlegeringen')
  - chemische toevoegstoffen : - lagere viscositeit smelt;
    - minder slink / krimp



Gietijzer & Gietlegeringen *(2)*

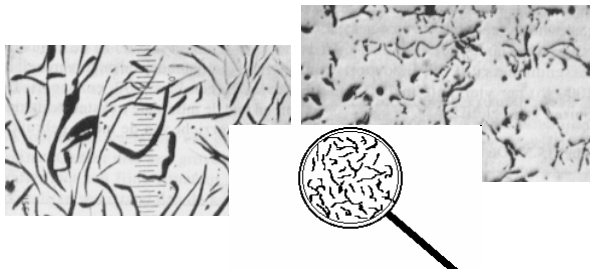




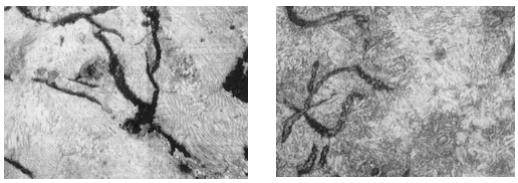
Grijs Gietijzer *(1)*

- Meest gewone gietijzer
- 2...4 % C, 1...3 % Si, Mn & Fe
- Metaalkunde :
  - Eutectische reactie : vloeibaar → austeniet + *grafiet*
  - T < 738°C : austeniet ➔ martensiet, ferriet, of perliet
    (afhank. van afkoelsnelheid & legeringssamenstelling)
- Koolstof : 2 componenten; gebonden (= opgeloste; vaak <1%!) + grafiet
- Grafiet = 3-dimensionale roosachtige structuur; lamellen (plaatjes) (.../...)
  vorm, grootte, verdeling ➔ invloed op eigenschappen

Grijs Gietijzer *(2)*



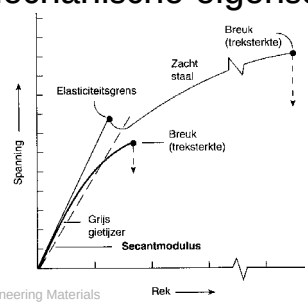
Grove & fijne **grafiet** in grijs gietijzer



Microstructuur van perlitisch grijs gietijzer, voor & na harden

Grijs Gietijzer *(3)*

- Fysische & chemische eigenschappen :
  - cfr. gewone koolstofstaalsoorten (die grafiet bevatten)
  - dempingsvermogen
  - betere corrosie-vastheid (cfr. oppervlak van grafietlamellen + Si)
- Mechanische eigenschappen



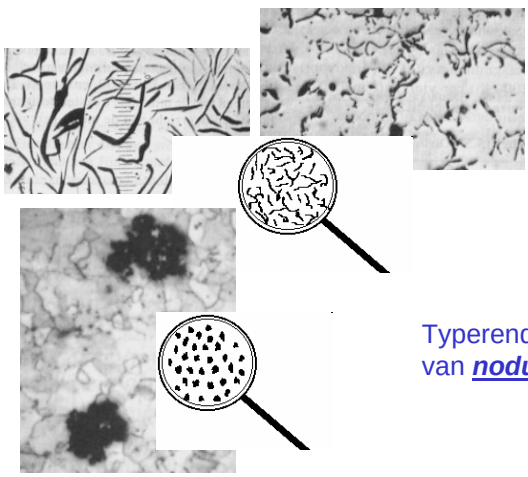
<u>WARMTEBEHANDELINGEN</u> :
alle warmtebehandelingen
v. koolstofstaal = mogelijk
(e.g. normaalgloeien, ontlaten, harden, …)

Nodulair (ductiel) Gietijzer *(1)*

- Als grijs gietijzer, doch : vorming kleine (bolvormige) grafietnodulen
- Verkregen door toevoegstoffen aan legering (Ni, Mg) of door inoculatie met “entstoffen” in gietpan (Mg, Ce)
- Ook : ferritisch, perlitisch, martensitisch
- Superieure mechanische eigenschappen (o.m. slagvastheid); vergelijkbare corrosieweerstand ; (veel) lagere elektrische weerstand

(.../...)

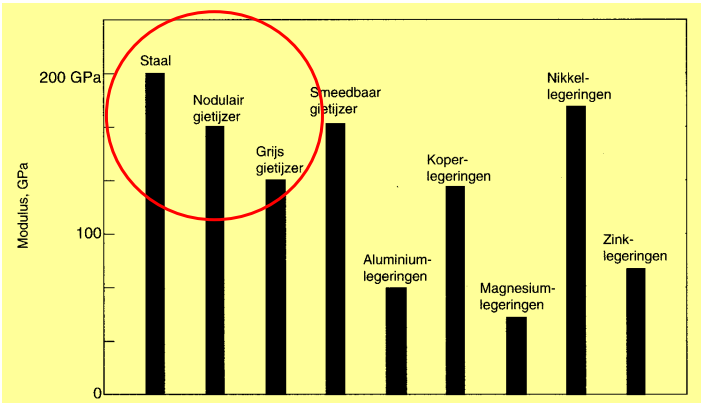
Nodulair Gietijzer *(2)*



Typische microstructuur van *grijs* gietijzer

Typerende microstructuur van ***nodulair*** gietijzer

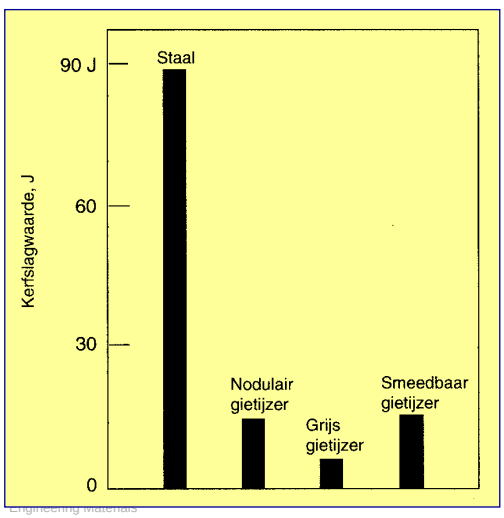
Nodulair Gietijzer *(3)*



(.../...)

Elasticiteitsmodulus van diverse gietmetalen

Nodulair Gietijzer *(4)*

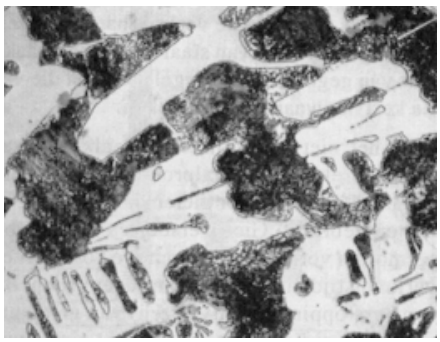


Charpy-kerfslagwaarde van diverse gegoten ferrometalen

Wit Gietijzer *(1)*

- Gecontroleerde samenstelling (e.g. laag Si, hoog Mn) & stollingssnelheid
- 2 ... 3.5% C, 0.5 ... 2 %Si, Mn (0.5%) & Fe
- Metaalkunde :
  - Snelle koeling ➔ +/- alle koolstof behouden als opgelost Fe_3C *(cementiet)* **(.../...)**
  - "Wit" : geen vrije grafiet in microstuctuur
- Resultaat : harde, brosse, +/- niet machienbare legering
- Toepassing : abrasie-resistentie

Wit Gietijzer *(2)*

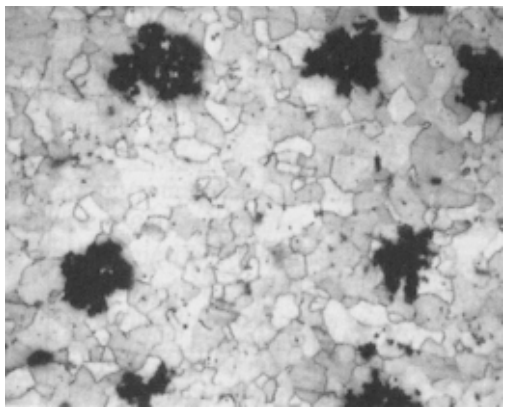


Microstructuur van ***wit*** gietijzer :
géén vrije grafiet; fijnkorrelig perliet (donker) & vrije cementiet (licht)

Smeedbaar Gietijzer *(1)*

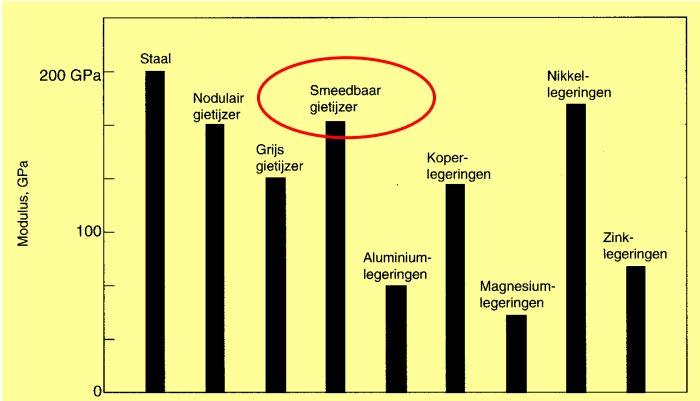
- Als <u>wit</u> gietijzer, doch verlengde verwarming (*warmtebehandeling*) van gietstukken
- Hierdoor : ontbinding van carbides & vorming van grafiet aggregaten (cfr. nodulair gietijzer, doch minder bolvormig) (.../...)
- Superieure mechanische eigenschappen (o.m. taaiheid, verlenging bij breuk, ...) ; zeer goede slijtageweerstand (.../...)
  ➔ buigen zonder scheuren; koudbewerking mogelijk

Smeedbaar Gietijzer *(2)*



Typische microstructuur van ***smeedbaar*** gietijzer

Smeedbaar Gietijzer *(3)*



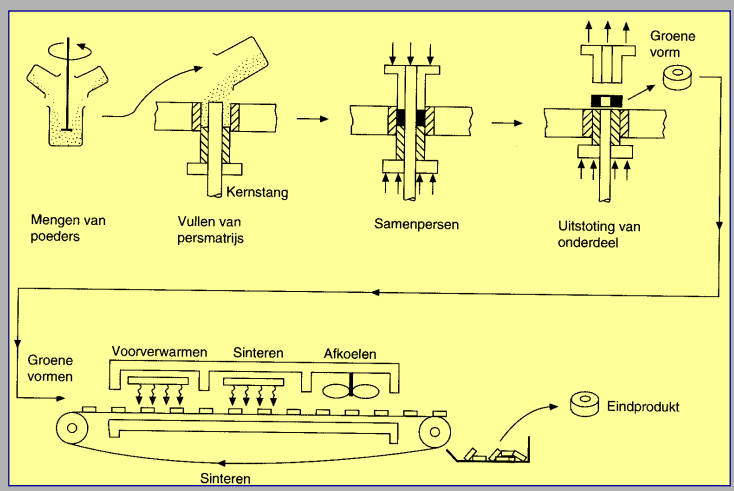
Elasticiteitsmodulus van diverse gietmetalen

(.../...)

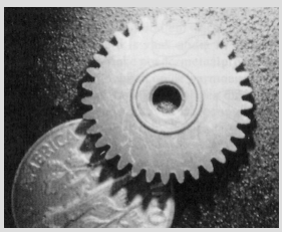
Gietstaal & Andere

- *"gietijzer = bros"* ...
- Alle soorten gietijzer = lagere stijfheid
- Staal = beter taaiheid & ductiliteit
- **GIETEN** :
  - staal = moeilijker gieten
  - gietijzers
    - smelten bij lagere temperaturen
    - door hoog C & Si : lagere viscositeit smelt
    - minder slinkholten bij stollen; minder krimp
  - staal : gieteigenschappen verbeteren door iets gewijzigde chemische samenstelling (0.3 ... 0.65% Si ; 1% Mn)

Poedermetallurgie *(1)*



Poedermetallurgie *(2)*



Typerend voorbeeld van een PM product :
klein tandwiel voor het mechanisme van een camera

Afnemende Technieken

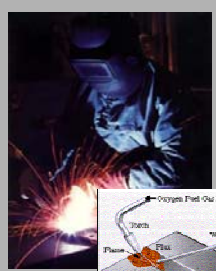
- Mechanische
- Chemische (incl. foto-chemische)
- Elektro-chemische
- Thermische
- Elektro-thermische (vonkerosie)
- Opto-thermische

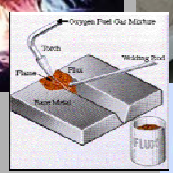
Video

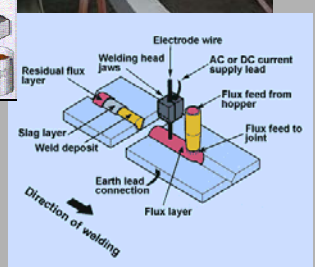
- *Nabewerkingen* (opp. behand., polijsten, ...)

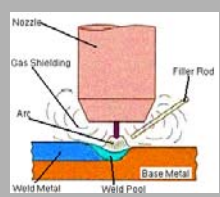
Lassen, lijmen, ...

Grote waaier aan technieken ... /...





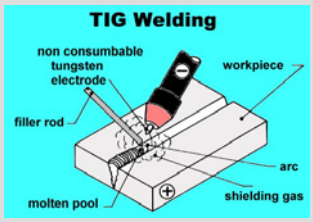


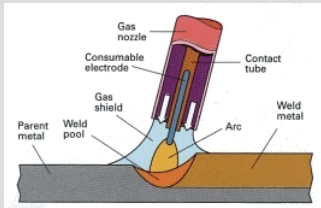


TIG: Tungsten Inert Gas welding ...

SAW: Submerged Arc Welding;
Etc ...

TIG, MIG, SAW,…





TIG: Tungsten
Inert Gas welding …

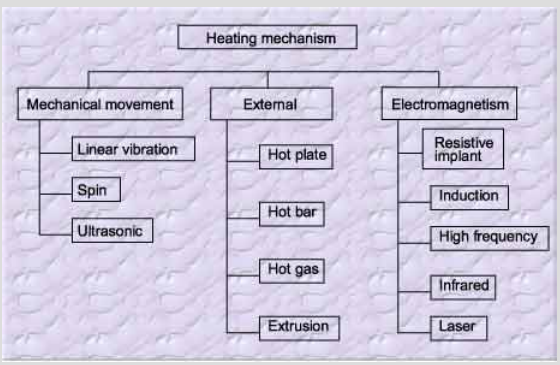
MIG: Metal
Inert Gas welding …

Laserlassen …

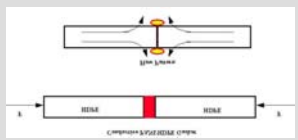
Overview …

Polymeren …

Grote waaier aan technieken …



Microgolven …



Materiaalkunde voor Ingenieurs

= *"Eind-GEBRUIKER"*

- "*Engineering Materials*" : ***Metalen***, Niet-metalen, Legeringen, Coatings, ...
- ***Eigenschappen***, Bereiding en Processing, ...
- ***Beschrijving***, ***Begrijpen***, ***Selectie***, ...
- Etc...

- ✓ ***Polymeren***
- ✓ ***Composieten***
- ✓ ***Keramische Materialen***
- ✓ ***Staal***
- ✓ ***Staalsoorten & Roestvast staal***
- ✓ ***Corrosie***
- Schade-analyse & -preventie / NDT

- ✓ ***Gieten, PM, Vormgeven, Verspanen, Lassen***
- Cu
- Al
- Ni, Zn, Ti, Mg, Refractaire
- Opp. behand. & Coatings
- Selectie

Non-Ferro Metalen

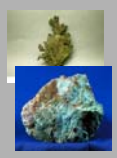
Thema 5 (a) : Cu & Al

Elektrochemische Technieken

Inhoudstabel ...

- Koper : raffinage
  & *hydro- / elektro-metallurgische processen*
- Aluminium : ertsbereiding & winning
  & *winningsmetallurgie + smeltelektrolyse*
- Enkele Cu- en Al-legeringen : Soorten & Toepassingen
  (+ Metallurgie)

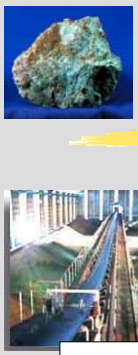
Elektrochemische Technieken



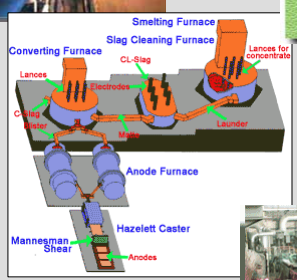
- Koper : raffinage
  & *hydro- / elektro-metallurgische processen*
- Aluminium : ertsbereiding & winning
  & *winningsmetallurgie + smeltelektrolyse*

Electrorefining of Copper

Electrowinning of Aluminum



Koper bereiding & raffinage *(0)*



Electrorefining of Copper

Winning / bereiding *(1)*

- Ertsen: 5% (arm); malachiet, sulfidisch, ... → prijs !
- Vergruizen, flotatie etc... → concentratie
- Pyrometallurgie:
  - Roostovens (chemische conversie) + smelter (→ 30% koper)
  - Koperconvertor (oxidatie sulfides) ➔ o.m. Fe etc... in slak + H_2SO_4 + ruw koper (‘***blister copper***’); 98-99% zuiver
- = Anode koper

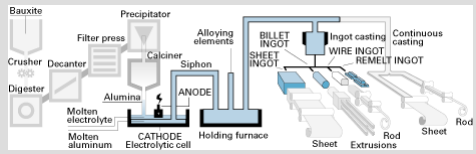
Raffinage *(2)*

- Anode koper: 98-99% = uitgangsproduct uit pyrometallurgie
  → Cu, Ag, Au, Ni, Pb, Co, Bi, ...
- “Elektrisch koper”: > 99.5%
- Doel van raffinage:
  - Zeer zuiver metalen
  - Recuperatie (edele) metalen
- Kathode koper via elektrolyse (“raffinage”) + Anodeslib !

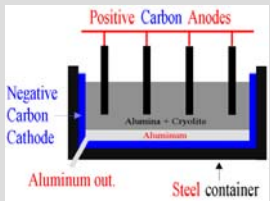
Electrorefining of Copper

bauxiet

Aluminium bereiding



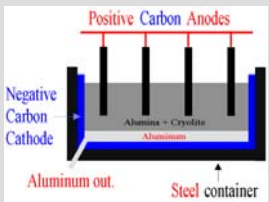
Electrowinning of Aluminum



2 Stappen …

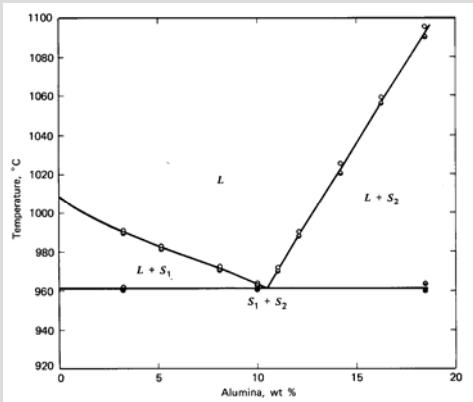
- Ertsen: bauxiet, …
- <u>Zuivering erts</u>:
  - Chemische behandeling (NaOH) + filtratie
    → zuiver Al_2O_3 **…/…**
- <u>Smeltelektrolyse</u> van het zuivere oxide
  - Hall-Héroult proces
  - Kryoliet (eutecticum = ca. 935°C)
  - ➔ zuiver Al metaal

Electrowinning of Aluminum



Fasediagramma …

- Ertsen: bauxiet, …
- Zuivering erts:
  - → zuiver Al_2O_3
  - Smelttemp. = 2050°C
- Smeltelektrolyse
  + Kryoliet
  (eutecticum =
  ca. 960 → 935°C)



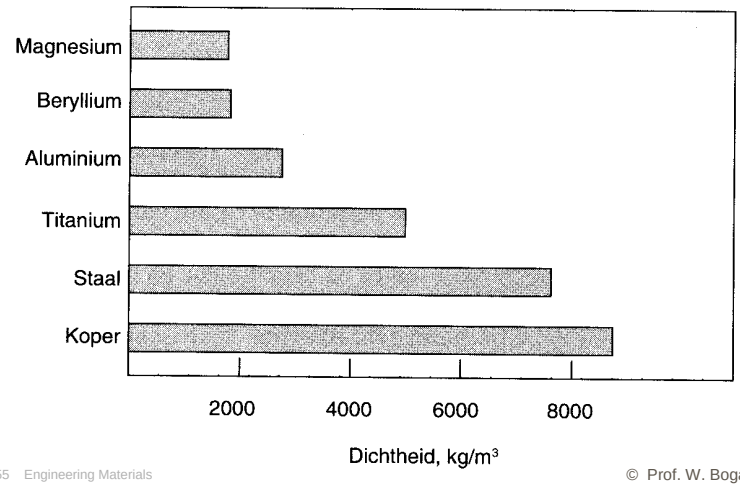
Materiaalkunde voor Ingenieurs

- "*Engineering Materials*" : ***Metalen***, Niet-metalen, Legeringen, Coatings, …
- ***Eigenschappen***, Bereiding en Processing, …
- ***Beschrijving***, ***Begrijpen***, ***Selectie***, …
- Etc…

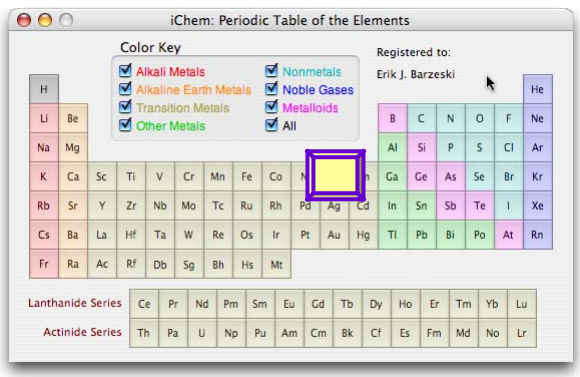
- ✓ ***Polymeren***
- ✓ ***Composieten***
- ✓ ***Keramische Materialen***
- ✓ ***Staal***
- ✓ ***Staalsoorten & Roestvast staal***
- ✓ ***Corrosie***
- Schade-analyse & -preventie / NDT

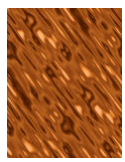
- ✓ ***Gieten, PM, Vormgeven, Verspanen, Lassen***
- Cu
- Al
- Ni, Zn, Ti, Mg, Refractaire
- Opp. behand. & Coatings
- Selectie

Koper & Aluminium

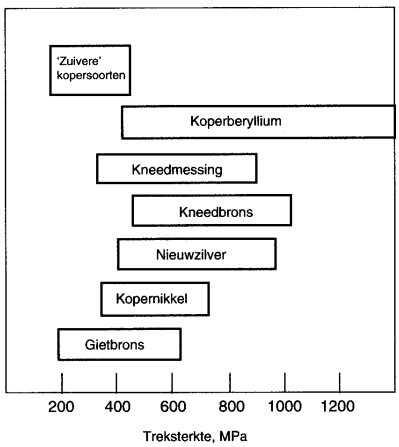


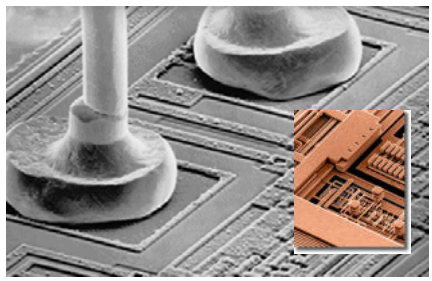
Koper



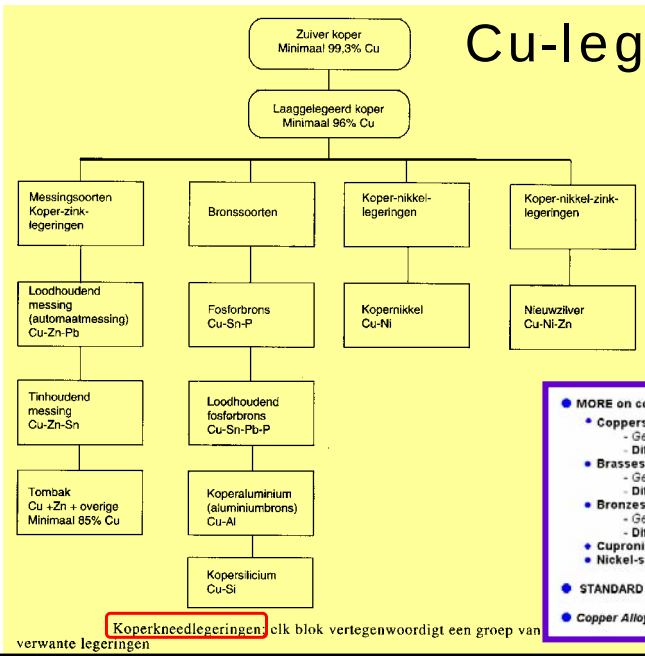


Cu en Cu-legeringen





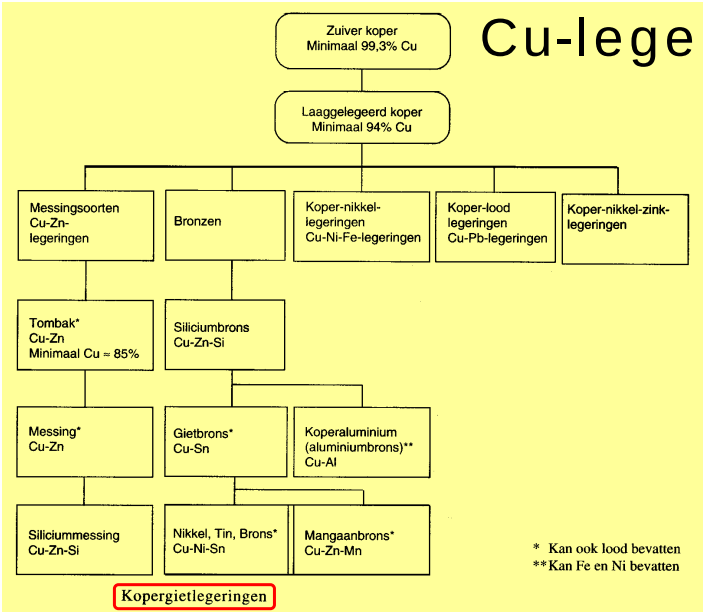
Cu-legeringen



Koperkneedlegeringen: elk blok vertegenwoordigt een groep van verwante legeringen

- MORE on commonly used Coppers & Copper Alloys :
  - Coppers and High-copper Alloys :
    - *General discussion* >>>
    - Different types ...
  - Brasses :
    - *General discussion* >>>
    - Different types ...
  - Bronzes :
    - *General discussion* >>>
    - Different types ...
  - Cupronickels >>>
  - Nickel-silvers >>>
- STANDARD DESIGNATIONS, Composition & Properties
- *Copper Alloy Castings*>>>

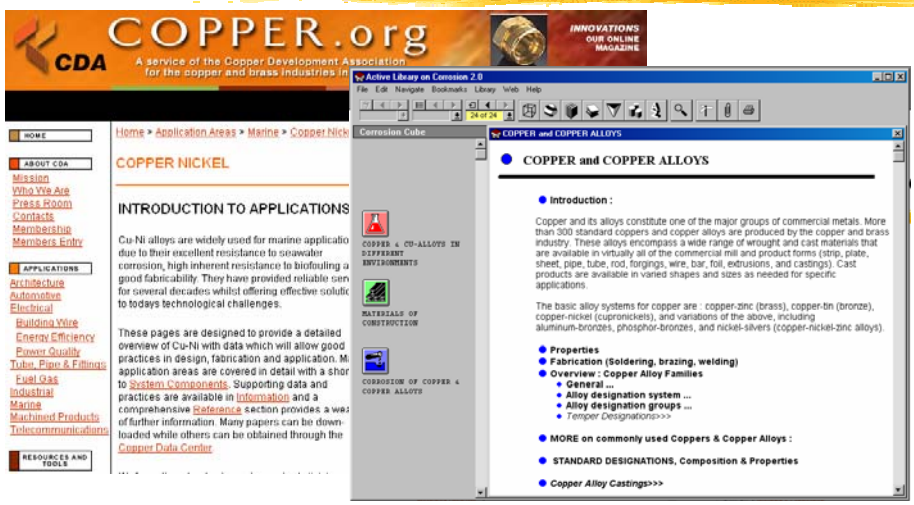
Cu-legeringen



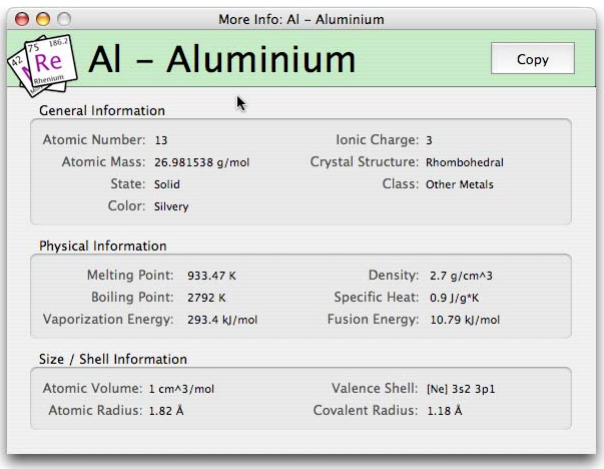
Bijzondere Eigenschappen

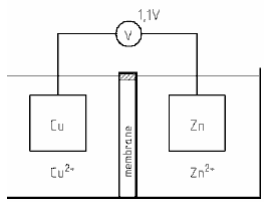
- **Slijtvastheid**
  - Sinds eeuwen voor slijt-toepassingen gebruikt
    - = nog steeds een van belangrijkste toepassingen; e.g.: lagers in elektrische motoren / scheepstoepassingen; zelfs: lagers v. treinen, rollagers in staalfabrieken, ...
    - Kneedlegeringen: e.g. raderen klokken, tijdsmechanismen
  - Slijtage ➔ messing, bronzen, Cu-Be
  - Ook: Cavitatie en andere vormen van corrosieve slijtage
- **Corrosie**
  - 1/3 v. legeringen: buizen en pijpen voor transport van "corrosieve" media; i.e.
    - Atmosfeer
    - Scheepsbouw
    - Warmtewisselaars (i.e. zout water)
    - + breed spectrum van zuren en basen
  - Wel: vatbaar voor een aantal soorten corrosie (cfr. 'season cracking')
  - + "Fouling" preventie

Cu informatie



Aluminium *(2)*





Al-Legeringen

Table 3.2 The International Alloy Designation System (**IADS**) for wrought aluminium alloys.

4-digit series (xxxx)

Each wrought alloy is assigned a four-digit number of which the first digit is determined by the major alloying element(s) present, thus:

Series	Main alloying elements
1xxx	Unalloyed aluminium (99% Al minimum)
2xxx	copper
3xxx	manganese
4xxx	silicon
5xxx	magnesium
6xxx	Mg and Si
7xxx	zinc
8xxx	others

Voornaamste Legerings-elementen

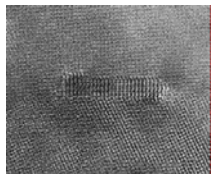
Temper or heat treatment (also applied to Mg alloys)

Suffix letters and digits are added to the alloy number in order to specify the mechanical properties of the alloy and the way in which the properties were achieved, thus:

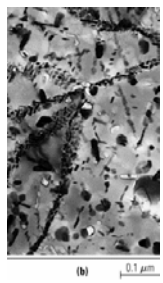
Suffix letter	*Basic condition*
F	as-fabricated
O	annealed wrought products
H	cold worked (strain hardened)
T	heat treated

Suffix digits	
First digit	secondary treatment
Second digit (H only)	degree of cold work

Recourse to detailed specifications or to manufacturers' literature is suggested when several digits are included in the temper designation.

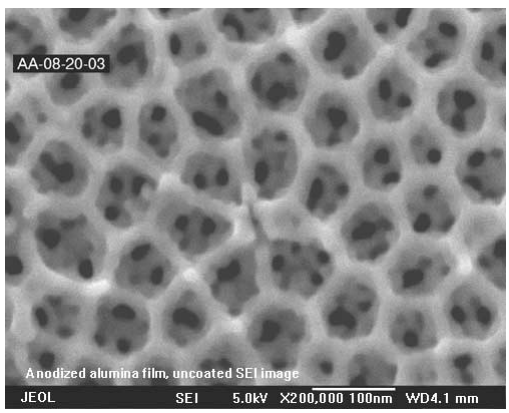


Al_2Cu Mg precipitaat
(aan korrelgrens)
(coherent interface)



Precipitatie-harding = vnste warmtebehande-lingsproces

Nota: "Geanodiseerd Aluminium"



Oppervlakte-behandeling
"Anodiseren"
→ elektrochemisch

e.g. in H_2SO_4
(+ Cr-zuur of P-zuur)
Pb kathode

Bijzondere Eigenschappen

Al – algemeen :
Goede e^--geleider; Ductiel (→ extrusie); Makkelijk gegoten & vespaand; …

- Lichter dan elk ander technisch metaal (1/3 staal)
- Hoog thermisch & elektrisch geleidingsvermogen
- Corrosieweerstand ("roest niet") → atmosferische corrosie
- Mechanische eigenschappen = OK
- + Reflectievermogen, …
  + Niet giftig, …

- **Corrosieweerstand**:
  - Waterige oplossingen: pH 4.5 – 8
    → Organische zuren = OK;
    niet vr. minerale zuren (uitz. = HNO_3)
    → Basen (pH > 8): zelfs korte duur = nefast
    (cfr. schoonmaakmiddelen !)
  - Zeewater → pitting, tenzij met CP en/of deklaag
  - Oplosmiddelen (i.e. organisch) = OK
    ➔ Verpakkingen, ook: voedsel

USA:
25% = verpakking
20% = bouwkunde (ramen, …)
10% = elektrische geleiders
rest = consumptie-art., voertuigen, …
… /…

Al & Al-legeringen: Gebruik / Illustraties

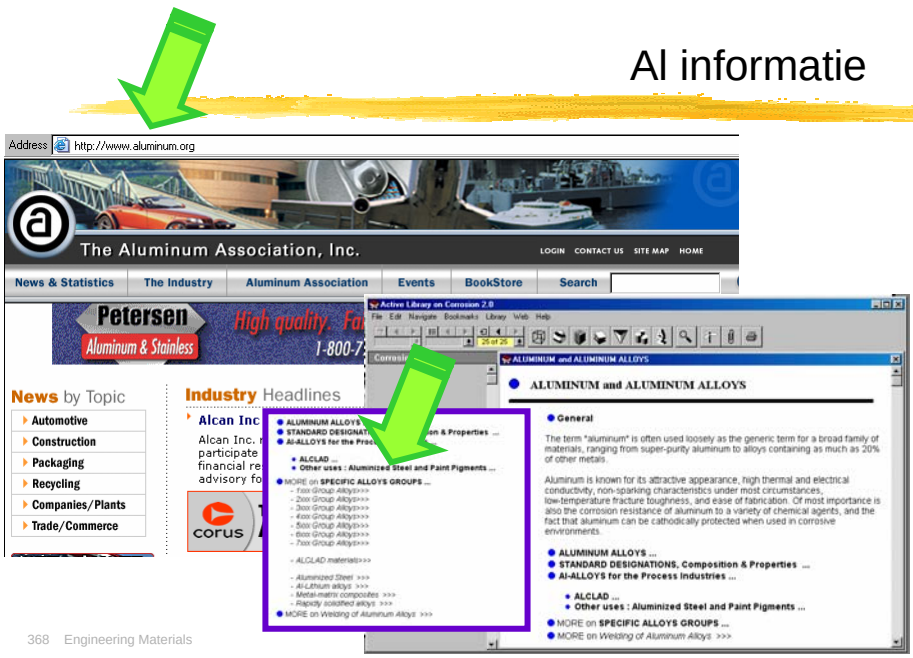
- Licht
- Relatief sterk
- Vervormbaar
- Chemisch resistent
- Niet toxisch (?)
- Reflecterend
- ….

Al & Al-legeringen: Gebruik / Illustraties *(2)*

Jaguar XJ – 2004
> 200 kg gewichtsbesparing

Jaguar had to learn rivet-bonded joining technology and how to glue materials with aerospace-sourced epoxy for its aluminum body shell on the 2004 XJ.

Al informatie



NON-FERRO	Al en legeringen	Cu en legeringen	Pb en legeringen	Mg en legeringen
Legerings-elementen	Cu, Mn, Si, Mg, Zn, Li	Zn, Sn, Pb, Al, Si, Ni	As, Sb, Ca, Cu, Ag	Al, Mn, Zn
Corrosie-weerstand	**Al**: Uitstekend voor een breed gamma agenten **Zn, Cu**: slechter door uitprecipiteren **Si**: geen effect in lage concentratie	**Cu**: Hoge E_0, dus inherent hoog **Si-messing**: slechter door desiliconiseren in aggressief milieu **Messing**: slechter in zeewater, brak water door dezincificatie **Brons, Al-brons**: beter Ni: beter dan brons en messing	**Pb**: Chemisch stabiel in water, lucht, grond. Resistent tegen zwavelzuur, salpeterzuur, fosforzuur en zeewater **Gelegeerd**: minder resistent **Cu**: beter bij hogere T	**Mg**: Goede weerstand in normale en industriële atmosfeer
Mechanisme	Aanmaak van een beschermende Al_2O_3-huid **Mn, Mg, Si, Li**: vorming beschermende precipitaten	Inherent hoge E_0 **Al-brons**: aanmaak van een beschermend laagje	Bij de initiële blootstelling wordt een beschermend loodzout laagje gevormd	Bij initiële blootstelling productie van een oxidisch berschermend laagje
Effect legerings-elementen	**Mg-Si**: goede corrosieweerstand in atm. Condities **Mg**: beter bestand tegen zeewater, amines en Na_2CO_3 **Zn**: beter bestand tegen scc	**Pb, Sn, P in messing**: betere corrosieweerstand in mariene atmosfeer, minder scc **Al**: beter tegen Cl^-, OH^-, org. en min. zuren, alkalies	**Ag**: helpt vorming van harde, passiverende PbO laag **Cu**: helpt vorming passieve laag in H_2SO_4	**Mn**: Uitprecipitatie van de onzuiverheden tot schadeloze intermetallische componenten
Werkings-temperatuur	**Al-Mg**: onder 66°C voor scc	**Al-brons**: -150 – 400°C	**Cu**: Tot 170°C	**Al**: T tot 110 – 120°C
Mogelijke corrosietypes	**>3% Mg**: exfoliatie en scc door precipitatie aan korrelgrens **Mn**: pitting **Al-Li**: scc in transversale richting	**Alle**: Demetalificatie en corrosie onder ox.atmosfeer **Messing**: erosie en scc **Brons**: galvanische corrosie		**Zn-Al**: corrosie in natte omgeving **Zn**: hot cracking bij stolling
Onzuiver-heden	Fe, Si, Cu: precipitatie			Fe, Cu, Ni, Co
Toepassingen	**Al**: dunne coatings, elektrische en procesapparatuur, brandstof, HNO_3, H_2O_2, … **Cu**: hoge sterkte **Mn**: opslagtanks, WW, pijpen, voedsel, chemische processen **Si**: lassen, cryogeen, brandstof **Mg-Si**: ramen, deuren, …	**Cu**: Thermische en elektrische applicaties **Messing, brons**: sierstukken, zware gietstukken, hydraulica, WW, …	**Ag**: anode voor boorplatformen en andere mariene toepassingen	**Mg**: Lichtgewicht toepassingen **Al**: Toepassingen waar licht gewicht en redelijke sterkte vereist zijn

Materiaalkunde voor Ingenieurs

- "*Engineering Materials*" : ***Metalen***, Niet-metalen, Legeringen, Coatings, …
- ***Eigenschappen***, Bereiding en Processing, …
- ***Beschrijving***, ***Begrijpen***, ***Selectie***, …
- Etc…

- ✓ ***Polymeren***
- ✓ ***Composieten***
- ✓ ***Keramische Materialen***
- ✓ ***Staal***
- ✓ ***Staalsoorten & Roestvast staal***
- ✓ ***Corrosie***
- Schade-analyse & -preventie / NDT

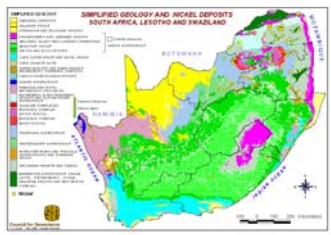
- ✓ ***Gieten, PM, Vormgeven, Verspanen, Lassen***
- ✓ ***Cu***
- ✓ ***Al***
- Ni, Zn, Ti, Mg, Refractaire
- Opp. behand. & Coatings
- Selectie

Non-Ferro Metalen

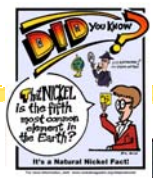
Thema 5 (b) : Ni & Andere Legeringen

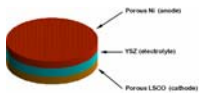
Inhoudstabel ...

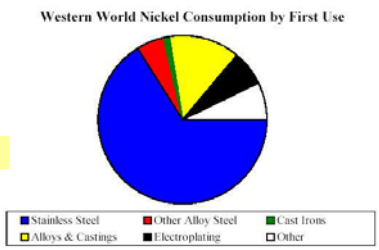
- Nikkel & Ni-legeringen
- Titanium
- Andere .....

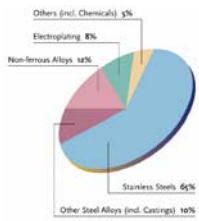


Nikkel



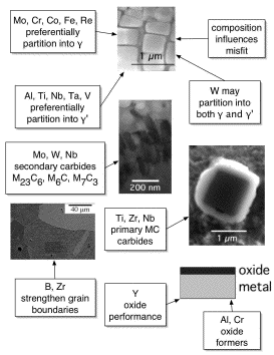




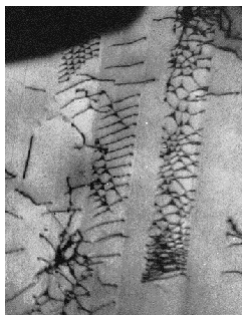


http://www.engr.ku.edu/nickel

Ni-legeringen …

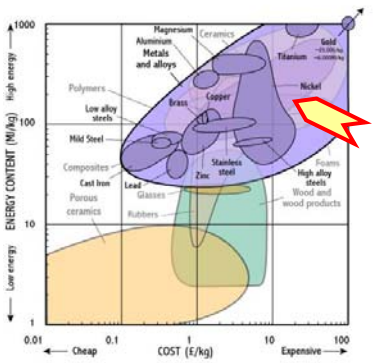


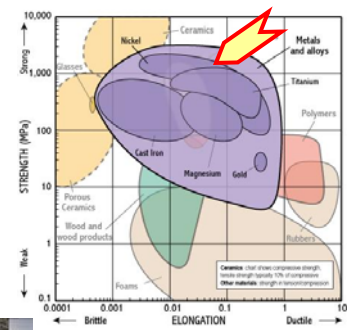
Algemeen …



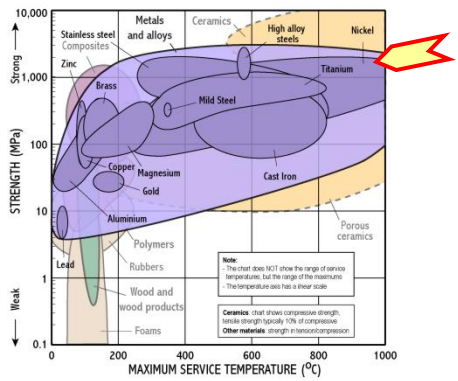
Illustratie 'slip planes' …

Enkele Bijzondere Kenmerken *(1)*





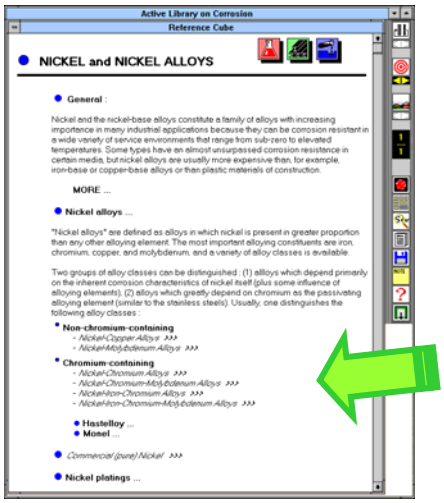
Enkele Bijzondere Kenmerken *(2)*



Ni & Ni-legeringen

合金牌號 (UNS/Werkstoff Nr.)	合金牌號 (UNS/Werkstoff Nr.)	合金牌號 (UNS/Werkstoff Nr.)
Nickel 200	INCONEL alloy 783	NIMONIC alloy 86
Nickel 201	INCOLOY alloy 800	NIMONIC alloy 90
Nickel 205	INCOLOY alloy 800H	NIMONIC alloy 101
Nickel 212	INCOLOY alloy 800HT	NIMONIC alloy 105
Nickel 270	INCOLOY alloy 801	NIMONIC alloy 108
Nickel 290	INCOLOY alloy 803	NIMONIC alloy 115
DURANICKEL alloy 301	INCOLOY alloy 825	NIMONIC alloy 263
MONEL alloy 400	INCOLOY alloy 840	NIMONIC alloy 901
MONEL alloy 404	INCOLOY alloy 903	NIMONIC alloy PE11
MONEL alloy R-405	INCOLOY alloy 907	NIMONIC alloy PE16
MONEL alloy K-500	INCOLOY alloy 908	NIMONIC alloy PK33
INCONEL alloy 600	INCOLOY alloy 909	BRIGHTRAY alloy B
INCONEL alloy 601	INCOLOY alloy 925	BRIGHTRAY alloy C
INCONEL alloy 601GC	INCOLOY alloy MA956	BRIGHTRAY alloy F
INCONEL alloy 617	INCOLOY alloy DS	BRIGHTRAY alloy S
INCONEL alloy 622*	INCO alloy 020	BRIGHTRAY alloy 35
INCONEL alloy 625	INCO alloy 330	NILO alloy 36
INCONEL alloy 625LCF	INCO alloy 25-6MO	NILO alloy 365
INCONEL alloy 686	INCO alloy A-286	NILO alloy 42
INCONEL alloy 690	INCO alloy C-276	NILO alloy 475
INCONEL alloy 706	INCO alloy G-3	NILO alloy 48
INCONEL alloy 718	INCO alloy HX	NILO alloy 55
INCONEL alloy 718SPF	INCO alloy MS250	NILO alloy K
INCONEL alloy 725	INCO Waspaloy	FERRY alloy
INCONEL alloy X-750	NIMONIC alloy 70	NILOMAG alloy 77
INCONEL alloy 751	NIMONIC alloy 75	NIMOLOY alloy PK37
INCONEL alloy MA754	NIMONIC alloy 80A	NI-SPAN-C alloy 902
INCONEL alloy MA758	NIMONIC alloy 81	

Specifieke Ni-legeringen *(1)*



Bijkomende lectuur: e.g. "Active Library on Corrosion" CD-ROM

Specifieke Ni-legeringen *(2)*

Anti-oxidatie eigenschappen
Hoge-temperatuur
Anti-corrosie, …

"Super - Alloys" …

Super Alloys

We comply with ... MIL-SPEC-I-45208A, AMS, ASTM, ASME, FEDERAL SPECS., CORPORATE SPECS., ULTRASONIC TESTING, DIE PENETRANT TESTING, MAGNETIC PARTICLE TESTING.

Super Alloys
Nickel
200
201
205
230
233
270

Nickel-Silver

Duranickel 301

Incoloy 800(H)
825
901

Ni-Chrome

Maraging
250
300

Inconel
600
601
617
625
702
706
718
722
750
751

Monel
400
404
405
K500

Nimonic
75
80

Mu Metal
Hy Mu80
902
904L

Hastelloy
C22
C276
B2
B-3
G30
S
W
X

Haynes
Haynes 21
L605 (Haynes 25)
Haynes 188

MP35N

Elgiloy

Stellite
6B
31

Waspaloy

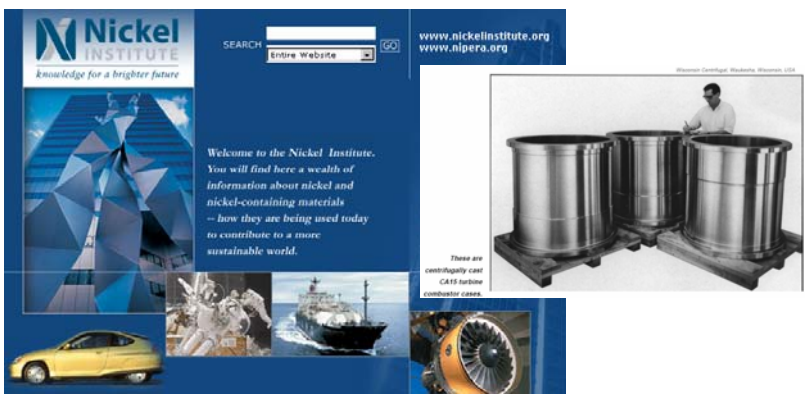
Multimet

N155

www: cam.uk.ac/Ni-based Super Alloys

Ni & Ni-legeringen: Gebruik / Illustraties

Ni-legeringen & informatie

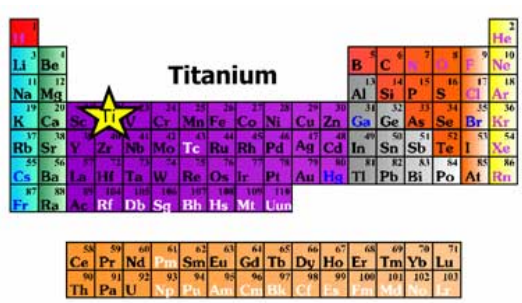


NON-FERRO	Ni en legeringen	Ti en legeringen	Zn en legeringen	Speciale metalen en legeringen
Legerings-elementen	Cu, Cr, Mo	Pd, Ni, Mo, Al	Al, Ti, Cu, Mg	Be, Cr, Co, Mo, Nb, Ta, W, Zr
Corrosie-weerstand(*)	**Ni**: Zeer goed, vooral in basische en NaOH omgevingen **Cu**: beter **Mo**: alleen in reducerende condities en andere niet-oxiderende omgevingen	**Ti**: weerstand tegen nat Cl^-, chloraat, hopychloriet, … Vooral afhankelijk van hoeveelheid opgelost O en Fe	**Zn**: Inherent goed tegen atmosferische corrosie, maar door lage E_0 slecht als gekoppeld aan ander metaal **Al**: betere weerstand in industriële atmosfeer	**Be**: resistent tegen oxidatie bij kamertemperatuur, vormt beschermend oxidelaagje **Cr**: goede oxidatie resistentie, goed tegen zuren behalve HCl, HF en zwavelbevattende zuren **Co**: hoge temperatuur en oxidatie corrosie resistentie **Mo**: Goed (vooral minerale zuren) zolang geen oxidantia aanwezig. Oxideert snel boven 500°C **Nb**: vormt snel een adherent, passief, beschermend oxidelaagje **Ta**: Zeer goed voor sterke zuren onder kookpunt door vorming van beschermend oxidelaagje **W**: slechtere weerstand bij hogere temperatuur **Zr**: vormt een dens, stabiel, zelf-reparerend oxidelaagje
Mechanisme	**Ni**: Relatief edel element. Ox. omgeving versnelt corrosie, red. vertraagt	**Ti**: vorming van zeer stabiel, dun beschermend, laagje dat onoplosbaar, zelf-reparerend en niet poreus is	**Zn**: Vormt beschermende laag	
Effect legerings-elementen	**Cu**: beter resistent tegen oxiderende en reducerende atmosfeer, zeewater en mariene applicaties **Cr**: beter in ox. Atmosfeer **Mo**: bestand tegen HCl in alle concentraties **Cr-Mo**: geen scc en pitting	**Pd, Ni-Mo**: betere corrosieweerstand in zuren en reducerende zuren, zeewater	**Al-Mg**: geen IGA	
Werkings-temperatuur	**Ni**: tot 320°C in NaOH (> 50%) **Cr**: 700 – 900°C	**Pd**: immuun voor corrosie van zouten tot 200°C		
Mogelijke corrosietypes(*)	**Ni**: verbrossing door NaOH als Cl^- en spanning aanwezig is **Cr**: scc **Mo**: IGA bij lassen	**Ti**: hoge oplosbaarheid O en N geven oxidatie en vaste oplossing verharding bij warmtebehandeling **>5% Al**: scc door verbrossing door precipitatie	**Al**: IGA	**Be**: galvanische corrosie **Co**: oxideert (pyrofoor poeder) , aanwezigheid S, V, alkalihaliden, oxiden, brandstof zorgt voor sterke corrosie **W**: slechte oxidatie resistentie
Onzuiverheden		**O, Fe**: Daling corrosieweerstand **C, N**: Verbrossing		
Toepassingen	**Alle**: Hoge T, hoge sterkte, corrosieve toepassingen, chemische en petrochemische processen, elektriciteitscentrales, gasturbines, ruimtevaart, mariene toepassingen, auto's, …	**Ti**: ruimtevaart, chemische processen, mariene toepassingen, papierindustrie, prothesen	**Zn**: Deklaag voor andere te beschermen metalen, batterij-omhulsel	**Alle**: Te duur om te gebruiken voor industriële materialen of constructiematerialen. Worden meestal gebruikt als legeringselement bij andere metalen

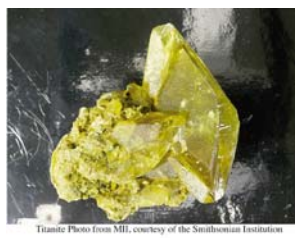
Titaan / Titanium

"Reactive & Refractory Metals …"

Incl. Zr, Hf, V, Nb, Ta, …



Algemene video clip …



Titanite Photo from MH, courtesy of the Smithsonian Institution

Ti-legeringen ...

Algemeen ...

Titanium video clip ...

Corrosie Resistent

Commercially Pure Grade 1
Commercially Pure Grade 2
Commercially Pure Grade 3
Commercially Pure Grade 4
Ti-Pd Grade 7 & Grade 16
Ti-3Al-2.5V Grade 9 & Grade 18
Ti-Pd Grade 11 & Grade 17
Ti-0.3Mo-0.8Ni Grade 12
Ti-3Al-8V-6Cr-4Zr-4Mo (Beta C)
Ti-15Mo-3Nb-3Al-0.2Si (TIMETAL 21S)

Nota: 95% = TiO_2 (pigment)

Hoge Sterkte

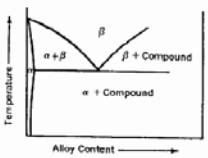
Ti-6Al-4V Grade 5
Ti-5Al-2.5Sn Grade 6
Ti-2.5Cu (IMI 230)
Ti-6Al-7Nb (IMI 367)
Ti-4Al-4Mo-2Sn (IMI 550)
Ti-6Al-6V-2Sn
Ti-10V-2Fe-3Al
Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al
Ti-5.5Al-3Sn-3Zr-0.5Nb (IMI 417)
Ti-5Al-2Sn-4Mo-2Zr-4Cr (Ti 17)
Ti-8Al-1Mo-1V
Ti-6Al-5Zr-0.5Mo-0.25Si (IMI 685)

Hoge Temperatuur

Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo
Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo
Ti-11Sn-5Zr-2.5Al-1Mo (IMI 679)
Ti-5.5Al-3.5Sn-3Zr-1Nb (IMI 829)
Ti-5.8Al-4Sn-3.5Zr-0.7Nb (IMI 834)
Ti-1100
Alpha - Two Aluminide (24/11)
Alpha - Two Aluminide (25/10/3/1)

Ti & Ti-legeringen

β-Stabilized Systems (eutectoid)



Slow cooling allows β phase to transform to α plus others

The most important alloying elements of this system are chromium, iron and silicon

http://www.engr.ku.edu/titanium

Classification of Titanium Alloys

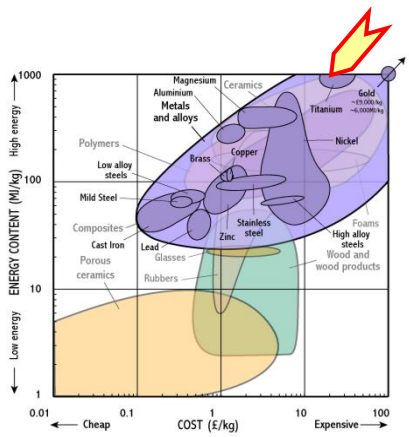
α Titanium alloys α and near-α alloys are generally non-heat-treatable and weldable. They have medium strength, good notch toughness, and good creep resistance at elevated temperatures.

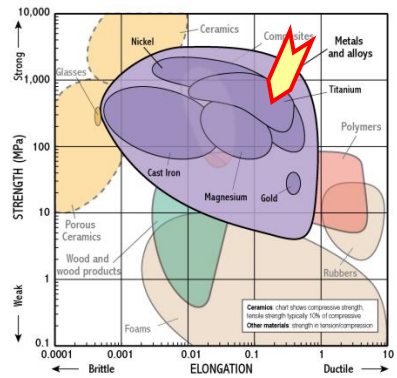
α-β Titanium alloys Most α-β alloys are heat-treatable to a moderate increase in strength. Their strength levels are medium to high. They also have good forming properties, but do not have as good creep resistance at elevated temperatures as the α and near-α alloys.

β Alloys The β-rich alloys are heat-treatable to very high strengths and are readily formable. However, these alloys have relatively high density and in the high-strength condition have low ductility. Because of these disadvantages, they are not used much at present.

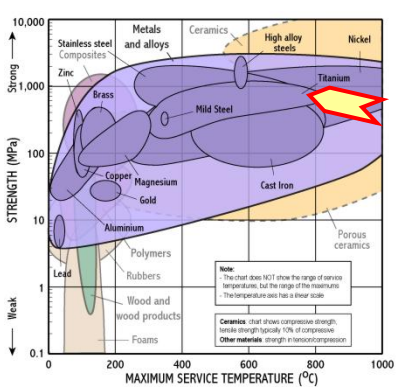
α: primarily α phase
near-α: α phase with small amounts of β stabilizing elements
α–β: mixtures of α and β phases
β: β stabilized at room temperature after cooling from solution heat treatment

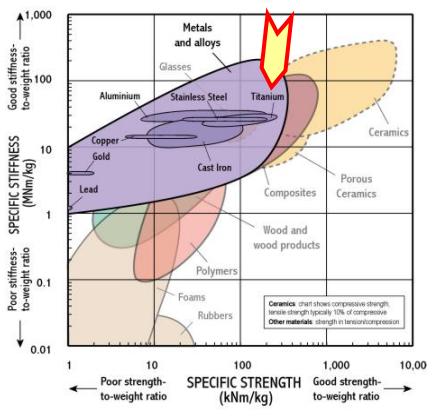
Enkele Bijzondere Kenmerken *(1)*





Enkele Bijzondere Kenmerken *(2)*

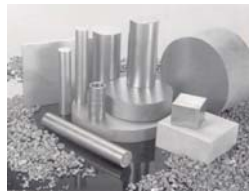




Ti & Ti-legeringen

Nominal Chemical Composition

TIMETAL	ASTM Grade	UNS Desig.	N Max	C Max	H Max	Fe Max	O Max	Al	V	Ni	Mo	Nb	Cr	Zr	Pd	Residuals, Ea Max	Residuals, Total Max
35A	1	R50250	0.03	0.08	0.015	0.20	0.18	—	—	—	—	—	—	—	—	0.10	0.40
35A .05Pd[1]	17	R52252	0.03	0.08	0.015	0.20	0.18	—	—	—	—	—	—	—	.04-.08	0.10	0.40
35A .15Pd	11	R52250	0.03	0.08	0.015	0.20	0.18	—	—	—	—	—	—	—	.12-.25	0.10	0.40
50A	2	R50400	0.03	0.08	0.015	0.30	0.25	—	—	—	—	—	—	—	—	0.10	0.40
50A .05Pd[1]	16	R52402	0.03	0.08	0.015	0.30	0.25	—	—	—	—	—	—	—	.04-.08	0.10	0.40
50A .15Pd	7	R52400	0.03	0.08	0.015	0.30	0.25	—	—	—	—	—	—	—	.12-.25	0.10	0.40
65A	3	R50550	0.05	0.08	0.015	0.30	0.35	—	—	—	—	—	—	—	—	0.10	0.40
Code 12	12	R53400	0.03	0.08	0.015	0.30	0.25	—	—	.6-.9	.2-.4	—	—	—	—	0.10	0.40
3-2.5	9	R56320	0.03	0.08	0.015	0.25	0.15	2.5-3.5	2.0-3.0	—	—	—	—	—	—	0.10	0.40
3-2.5 .05Pd[1]	18	R56322	0.03	0.08	0.015	0.25	0.15	2.5-3.5	2.0-3.0	—	—	—	—	—	.04-.08	0.10	0.40
6-4	5	R56400	0.05	0.08	0.015	0.40	0.20	5.5-6.75	3.5-4.5	—	—	—	—	—	—	0.10	0.40
6-4 ELI	23	—	0.03	0.08	0.015	0.40	0.13	5.5-6.5	3.5-4.5	—	—	—	—	—	—	0.10	0.40
21S	21	R58210	0.03	0.05	0.015	0.40	0.17	2.5-3.5	—	—	14.0-16.0	2.2-3.2	—	—	—	0.10	0.40
21S .05Pd		—	0.03	0.05	0.015	0.40	0.17	2.5-3.5	—	—	14.0-16.0	2.2-3.2	—	—	.04-.08	0.10	0.40
38644	19	R58640	0.03	0.05	0.020	0.30	0.12	3.0-4.0	7.5-8.5	—	3.5-4.5	—	5.5-6.5	3.5-4.5	—	0.15	0.40
38644 .05Pd	20	R58645	0.03	0.05	0.020	0.30	0.12	3.0-4.0	7.5-8.5	—	3.5-4.5	—	5.5-6.5	3.5-4.5	.04-.08	0.15	0.40



Specifieke Ti-legeringen *(1)*

Corrosie Resistent

- Commercially Pure Grade 1
- Commercially Pure Grade 2
- Commercially Pure Grade 3
- Commercially Pure Grade 4
- Ti-Pd Grade 7 & Grade 16
- Ti-3Al-2.5V Grade 9 & Grade 18
- Ti-Pd Grade 11 & Grade 17
- Ti-0.3Mo-0.8Ni Grade 12
- Ti-3Al-8V-6Cr-4Zr-4Mo (Beta C)
- Ti-15Mo-3Nb-3Al-0.2Si (TIMETAL 21S)

Hoge Sterkte

- Ti-6Al-4V Grade 5
- Ti-5Al-2.5Sn Grade 6
- Ti-2.5Cu (IMI 230)
- Ti-6Al-7Nb (IMI 367)
- Ti-4Al-4Mo-2Sn (IMI 550)
- Ti-6Al-6V-2Sn
- Ti-10V-2Fe-3Al
- Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al
- Ti-5.5Al-3Sn-3Zr-0.5Nb (IMI 417)
- Ti-5Al-2Sn-4Mo-2Zr-4Cr (Ti 17)
- Ti-8Al-1Mo-1V
- Ti-6Al-5Zr-0.5Mo-0.25Si (IMI 685)

Hoge Temperatuur

- Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo
- Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo
- Ti-11Sn-5Zr-2.5Al-1Mo (IMI 679)
- Ti-5.5Al-3.5Sn-3Zr-1Nb (IMI 829)
- Ti-5.8Al-4Sn-3.5Zr-0.7Nb (IMI 834)
- Ti-1100
- Alpha - Two Aluminide (24/11)
- Alpha - Two Aluminide (25/10/3/1)

www.titanium.org

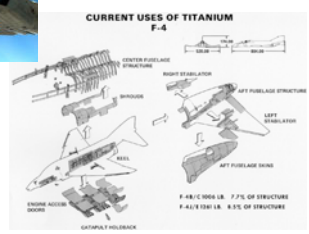
http://en.wikipedia.org/wiki/Titanium

Bijkomende lectuur: e.g.
"Active Library on Corrosion" CD-ROM

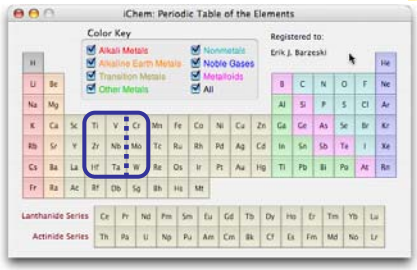
Specifieke Ti-legeringen *(2)*

Traditionele Benaming Ti-Grade	UNS Nr.	Werkstoff Nr.	DIN	Chemical Composition, Weight Percent (max.) O	Fe	Pd	Ni	Mo	Other Elements	Min. Yield Strength MPa (ksi)	Min. Tensile Strength MPa (ksi)
1	R50250	3.7025	Ti 1 (Ti I)	0.12 0.18	0.15 0.20				*	180 (26) 170-310 (25-45)	290-410 (42-59) 240 (35)
1	R50250	3.7035	Ti 2 (Ti II)	0.18 0.18	0.20 0.20					250 (36) 170-310 (25-45)	390-540 (57-78) 242 (35)
2	R50400	3.7055	Ti 3 (Ti III)	0.25 0.25	0.25 0.30					320 (46) 275-450 (40-65)	460-590 (67-86) 345 (50)
3 4	R50550 R50700	3.7065	Ti 4 (Ti IV)	0.35 0.35 0.40	0.30 0.30 0.50					390 (56) 380-550 (55-80) 485-655 (70-95)	540-740 (78-107) 450 (65) 550 (80)
11	R52250	3.7225	Ti Pd	0.12 0.18	0.15 0.20	0.15-0.25 0.12-0.25				180 (26) 170-310 (25-45)	200-410 (42-59) 240 (35)
11	R52250	3.7235	Ti 2Pd	0.18 0.18	0.20 0.20	0.15-0.25 0.12-0.25				250 (36) 170-310 (25-45)	390-540 (56-78) 240 (35)
7	R52400	3.7255	Ti 3Pd	0.25 0.25	0.25 0.30	0.15-0.25 0.12-0.25				320 (46) 275-450 (40-65)	460-590 (67-86) 345 (50)
12	R53400	3.7105	TiNi0,8Mo0,3	0.25 0.25	0.25 0.25		0.60-0.90 0.60-0.90	0.20-0.40 0.20-0.40		345 (50) 345 (50)	480 (70) 483 (70)

Ti-legeringen: Gebruik / Illustraties

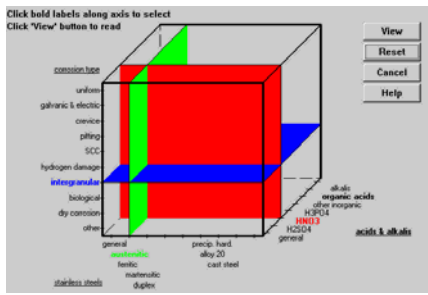


Andere Metalen & Legeringen ...



(Beknopte) bijkomende lectuur:
zie bijvoorbeeld
"Active Library on Corrosion" CD-ROM

-- consulteerbaar in CBA --



Zirconium video clip ...

Niobium video clip ...

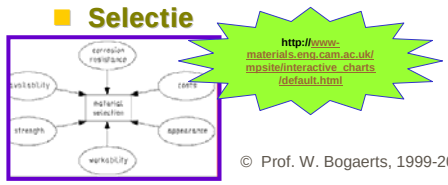
Hafnium & Vanadium video clip ...

Materiaalkunde voor Ingenieurs

- "***Engineering Materials***" : ***Metalen***, Niet-metalen, Legeringen, Coatings, ...
- ***Eigenschappen***, Bereiding en Processing, ...
- ***Beschrijving***, ***Begrijpen***, ***Selectie***, ...
- Etc...

- ✓ ***Polymeren***
- ✓ ***Composieten***
- ✓ ***Keramische Materialen***
- ✓ ***Staal***
- ✓ ***Staalsoorten & Roestvast staal***
- ✓ ***Corrosie***
- Schade-analyse & -preventie / NDT

- ✓ ***Gieten, PM, Vormgeven, Verspanen, Lassen***
- ✓ ***Cu***
- ✓ ***Al***
- ✓ ***Ni, Zn, Ti, Mg, Refractaire***
- Opp. behand. & Coatings
- **Selectie**



Epiloog

Niet - Destructieve Kwaliteitscontrole & Inspectie

Inhoudstabel ...

Materiaalkunde voor Ingenieurs

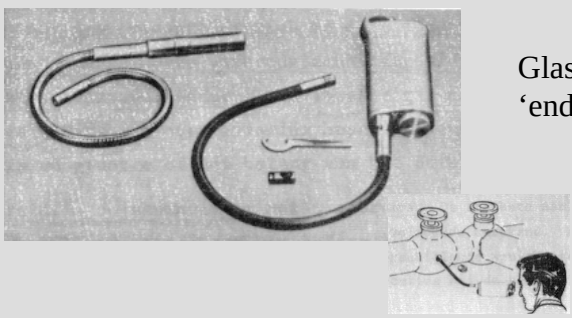
= "Eind-GEBRUIKER"

- ✓ *Polymeren*
- ✓ *Composieten*
- ✓ *Keramische Materialen*
- ✓ *Staal*
- ✓ *Staalsoorten & Roestvast staal*
- ✓ *Corrosie*
- ✓ *Gieten, PM, Vormgeven, Verspanen, Lassen*
- ✓ *Cu*
- ✓ *Al*
- ✓ *Ni*, Zn, Ti, Mg, Refractaire
- ✓ Opp. behand. & *Coatings*
- Selectie
- *Schade-analyse & -preventie / NDT*

Niet-Destructieve kwaliteitscontrole

- NDT, NDE, NDO, Inspectie, ...
- Voordelen – beperkingen
- Algeme(e)n(e) principe(s)
- Methoden :
  - Visuele technieken: opt./microsc./glasvezel/capillaire testen (penetrants) & magnet. deeltjes
  - Radiografie: röntgenstralen/gamma/neutronen
  - Ultrasoon (>20.000 Hz): A-, B-, C-scan
  - Andere: Akoestische Emissie, Elektrochemie, IR, Magnetisch onderzoek, Wervelstroom, ...

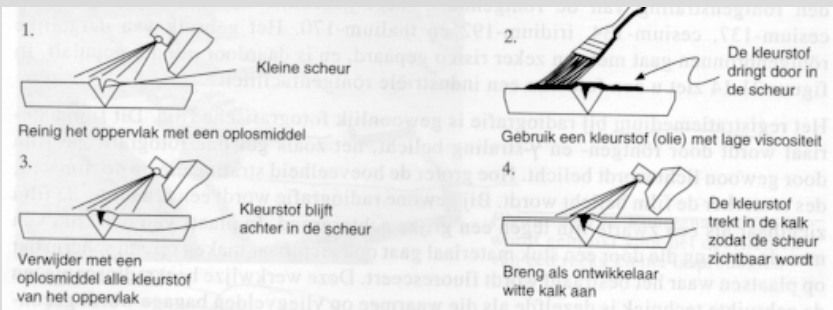
Visueel



Glasvezel: ‘boroscoop’, ‘endoscoop’, …

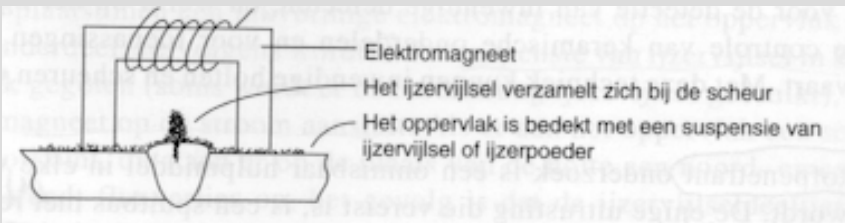
Visueel *(2)* - penetrants

Kleurstofpenetrant onderzoek

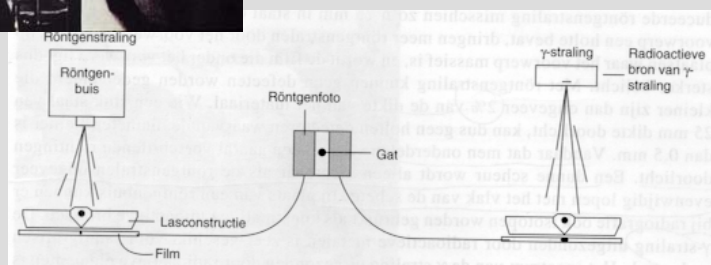


Visueel *(3)* – magnetisch

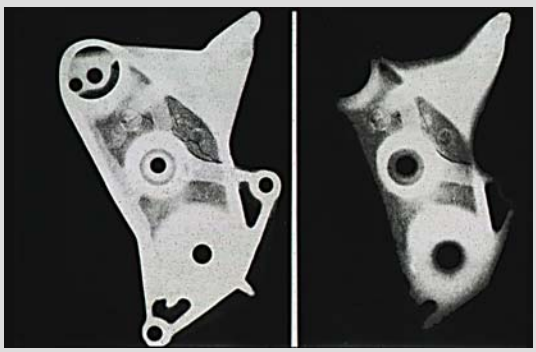
Magnetische detectie



Radiografie



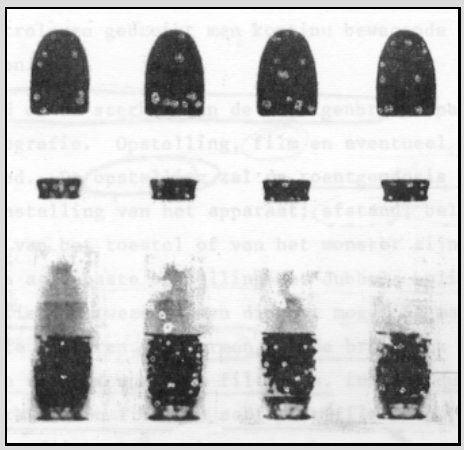
Radiografie



Beeldverbetering
door bv. Pb-schermen

Ook: tomografie (CAT),
etc…

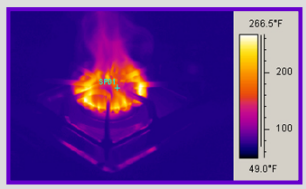
Radiografie

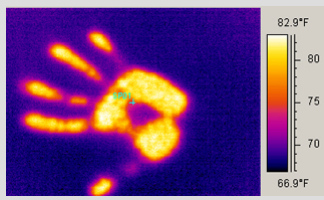


X-stralen &
Gamma-stralen (^{60}Co) :
vnl. metalen delen zichtbaar

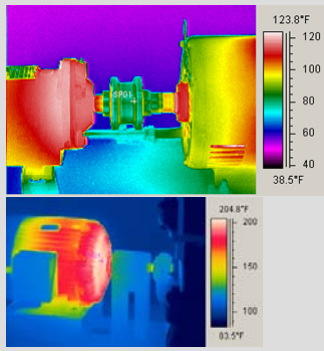
Neutronen :
poeder (H-groepen) zeer goed te observeren; metallisch deel +/- doorschijnend

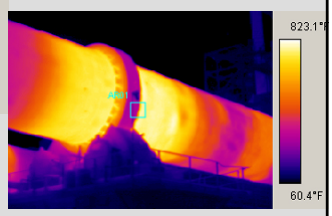
Thermografie / IR

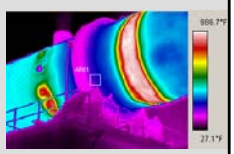


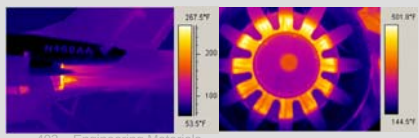


Thermografie / IR









Ultrasoon

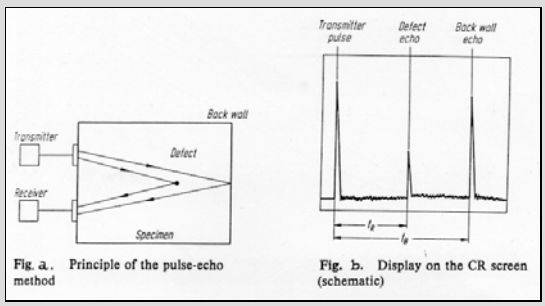
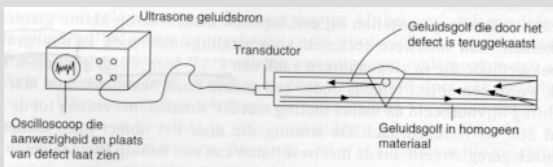


Fig. a. Principle of the pulse-echo method

Fig. b. Display on the CR screen (schematic)

Puls-Echo methode



Ultrasoon

"Field"-inspectie

Niet-Destructieve kwaliteitscontrole

- NDT, NDE, NDO, Inspectie, ...
- Voordelen – beperkingen
- Algeme(e)n(e) principe(s)
- Methoden :
  - Visuele technieken: opt./microsc./glasvezel/capillaire testen (penetrants) & magnet. deeltjes
  - Radiografie: röntgenstralen/gamma/neutronen
  - Thermografie (IR)
  - Ultrasoon (>20.000 Hz): A-, B-, C-scan
  - Andere: Akoestische Emissie, Elektrochemie, *Magnetisch onderzoek*, Wervelstroom, ...

Cursus : Constructiematerialen & Industriële Materiaalkunde – **Materiaalkunde voor Ingenieurs**

= *"Eind-GEBRUIKER"*

- ✓ *Polymeren*
- ✓ *Composieten*
- ✓ *Keramische Materialen*
- ✓ *Staal*
- ✓ *Staalsoorten & Roestvast staal*
- ✓ *Corrosie*
- ✓ *Gieten, PM, Vormgeven, Verspanen,* Lassen
- ✓ *Cu*
- ✓ *Al*
- ✓ *Ni*, Zn, *Ti*, Mg, Refractaire
- ✓ Opp. behand. & *Coatings*
- Selectie
- ✓ Schade-analyse & -preventie / *NDT*

Besluit* & *(Examen) Verwachtingen

Inhoudstabel ...