

CHEM-A1410 Materiaalitieteen  
Perusteet  
Luento 3: Mekaaniset  
ominaisuudet

22.09.2020

Ville Jokinen

Tiedätte kaikki yleiskielessä mitä allaolevat sanat tarkoittavat.

Tällä luennolla opetellaan mitä ne tarkoittavat eksaktisti materiaalin ominaisuuksina.

Luja, hållfast	(strength)
Kova, hård	(hardness)
Pehmeå, mjuk	(softness)
Venyvå, duktil	(ductility)
Elastinen, elastisk	(elasticity)
Jåykkå, stel	(stiffness)
Sitkeå, seg	(toughness)
Hauras, skr	(fragility)

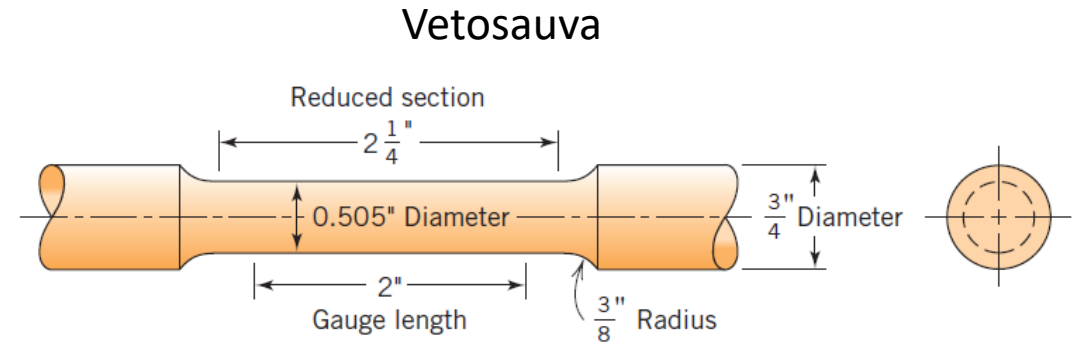
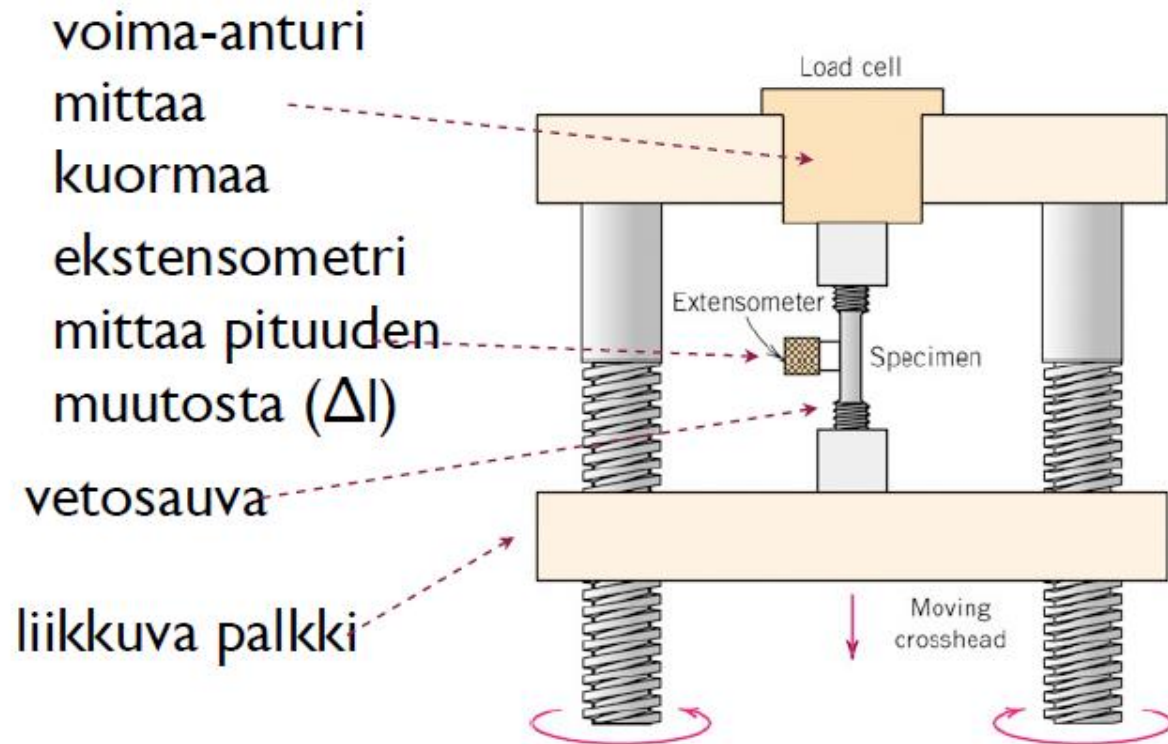
## Oppimistavoitteet:

1. Mitä mekaanisia ominaisuuksia ovat *lujuus, kovuus, venyvyys, elastisuus, sitkeys, hauraus* ja *jäykkyys*.
2. Mitkä ylläolevista määritellään *vetokokeella* ja miten
3. *Kovuus* ja *impakti kokeet*
4. Elastisuuden atomitason mekanismi metalleissa ja keraameissa.

Shackelford luvut 6.1, 6.2, 6.4, 8.4

# Osa 1: Vetokoe

# Vetokoe, vetokone, vetosauva



Vetosauvalla on mittapituus  $L_0$  (Gage length) sekä tietyt mitat poikkileikkaukselle.

Mittapituus standardeja: 5x halkaisija (lyhyt), 10x halkaisija (pitkä)

Sauvan poikkileikkaus voi olla ympyrä, neliö tai suorakaide.

# Jännitys ja venymä

Vetokokeessa yksi mittari mittaa **voimaa** ja toinen **pituuden muutosta**.

Nämä kuitenkin riippuvat materiaalin ominaisuuksien lisäksi kappaleen muodosta, eli vertailu mahdollista vain kahden identtisen muotoisen kappaleen välillä.

Tämän vuoksi käytetään parametreja **jännitys** ja **venymä**.

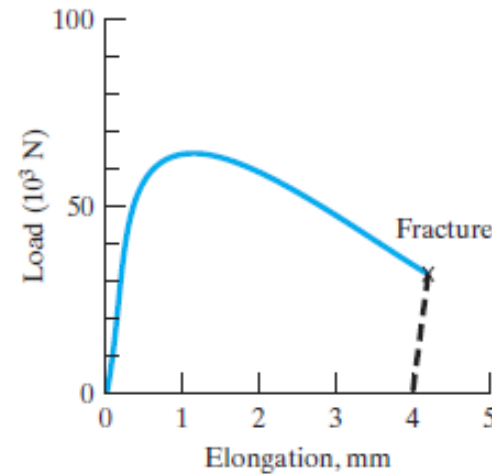
**Jännitys  $\sigma = F / A$  (yksikkö Pascal, usein MPa)**

= kappaleeseen kohdistuva voima jaettuna poikkipinta-alalla.

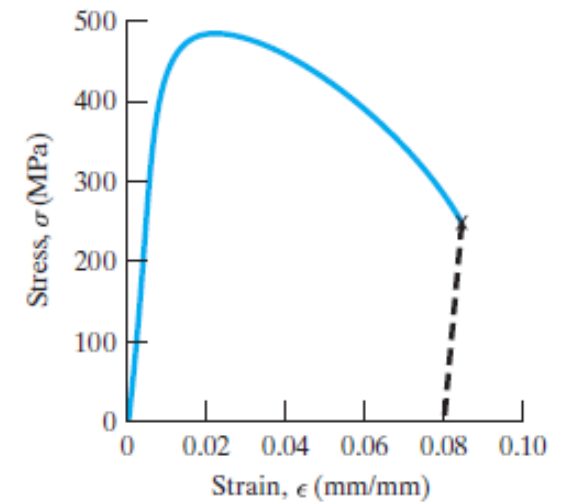
**Venymä  $\epsilon = \Delta L / L_0$  (ei yksikköä, esim 0.1 tai 10%)**

= Pituuden muutos jaettuna alkuperäisellä pituudella

Venymän voi esittää myös prosentteina



“Suoraan mitatut” parametrit:  
voima ja pituuden muutos



Materiaali parametrit:  
jännitys ja venymä

# Materiaalin ominaisuudet

Yleisesti, materiaalien ominaisuuksia kuvaavat parametrit määritellään siten että ne ovat riippumattomia kappaleen koosta tai muodosta.

Esimerkiksi:

## **Objekti**

Massa (kg)

Resistanssi ( $\Omega$ )

“Voima jonka kappale  
kestää” (N)

## **Materiaali**

Tiheys ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

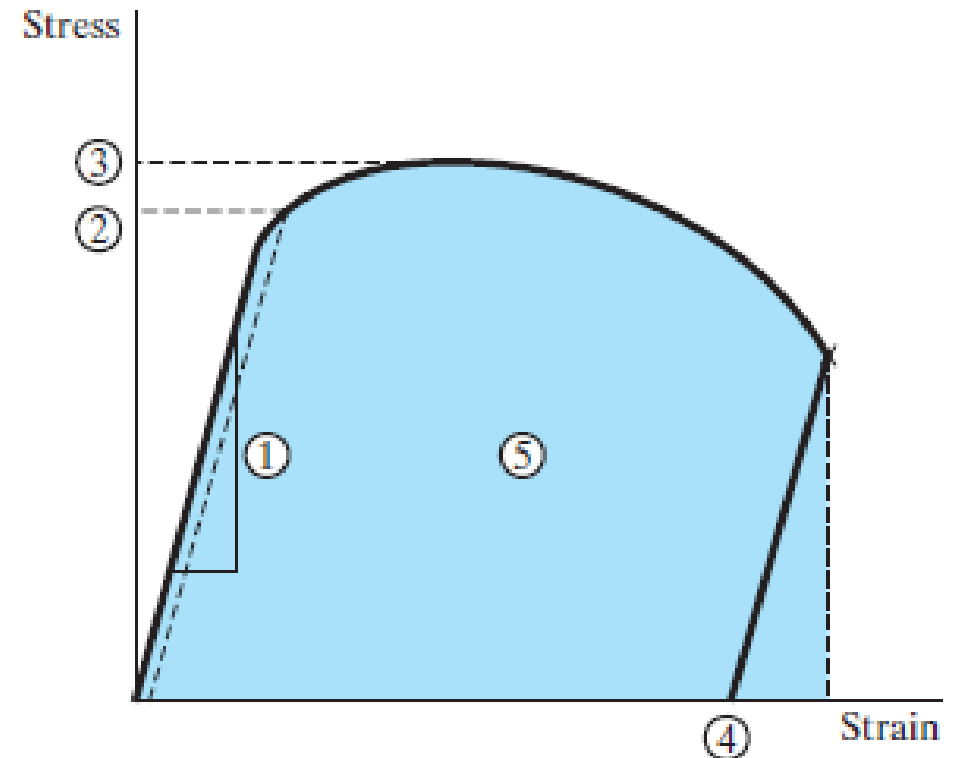
Resistiivisyys ( $\Omega\text{-cm}$ )

Murtolujuus ( $\text{N}/\text{m}^2 = \text{Pa}$ )

# Jännitys-venymä käyrä

Vetokoe tuottaa jännitys-venymä käyrän josta saadaan selville mm.:

1. Kimmokerroin (Young's modulus),  $E$
2. Myötölujuus (Yield strength),  $\sigma_y$ , Y.S.
3. Murtolujuus (Tensile strength, tai ultimate tensile strength), T.S.
4. Murtovenymä /venyvyys (ductility)
5. Sitkeys (toughness)
6. Elastinen raja (elastic limit)





# Elastinen muodonmuutos: kimmokerroin (E)

**Elastinen muodonmuutos:** jos jännitys poistuu, niin kappale palaa täsmälleen ennalleen.

**Kimmokerroin**, tai Youngin moduuli (elastinen moduuli), kuvaa jännityksen ja elastisen venymän suhdetta.

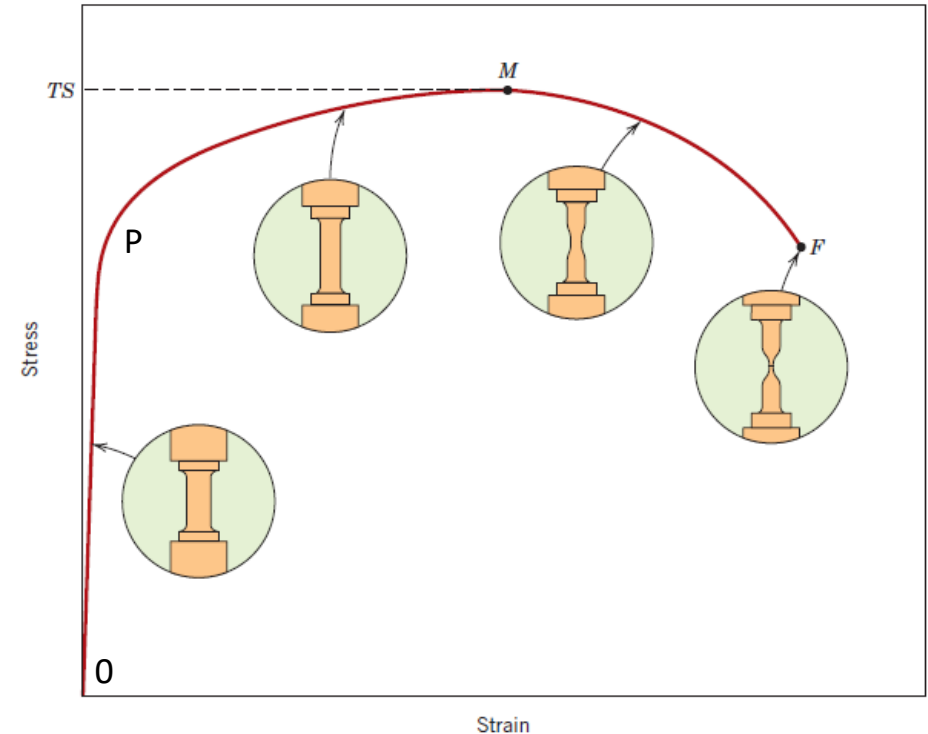
$$E = \sigma / \varepsilon \text{ (vrt. Hooken laki jouselle, } k = F/x \text{)}$$

Kimmokerroin määritetään jännitys venymä käyrästä venymisen alkuvaiheen lineaarisen osan (kuvassa pisteiden 0 ja P välissä) kulmakertoimena:

Yksikkö: Pascal (metalleilla usein GPa)

**Myötölujuus (elastinen raja)** on jännityksen arvo pisteessä P, eli pisteen P y-koordinaatti.

Elastisen rajan ylittyttyä siirrytään **plastisen muodonmuutoksen** alueelle.



# Kimmoeroon ja sidoksen venyminen

Elastinen venymä syntyy siitä että materiaalin sidokset voivat jännityksen alaisena liikkua energiainimistään.

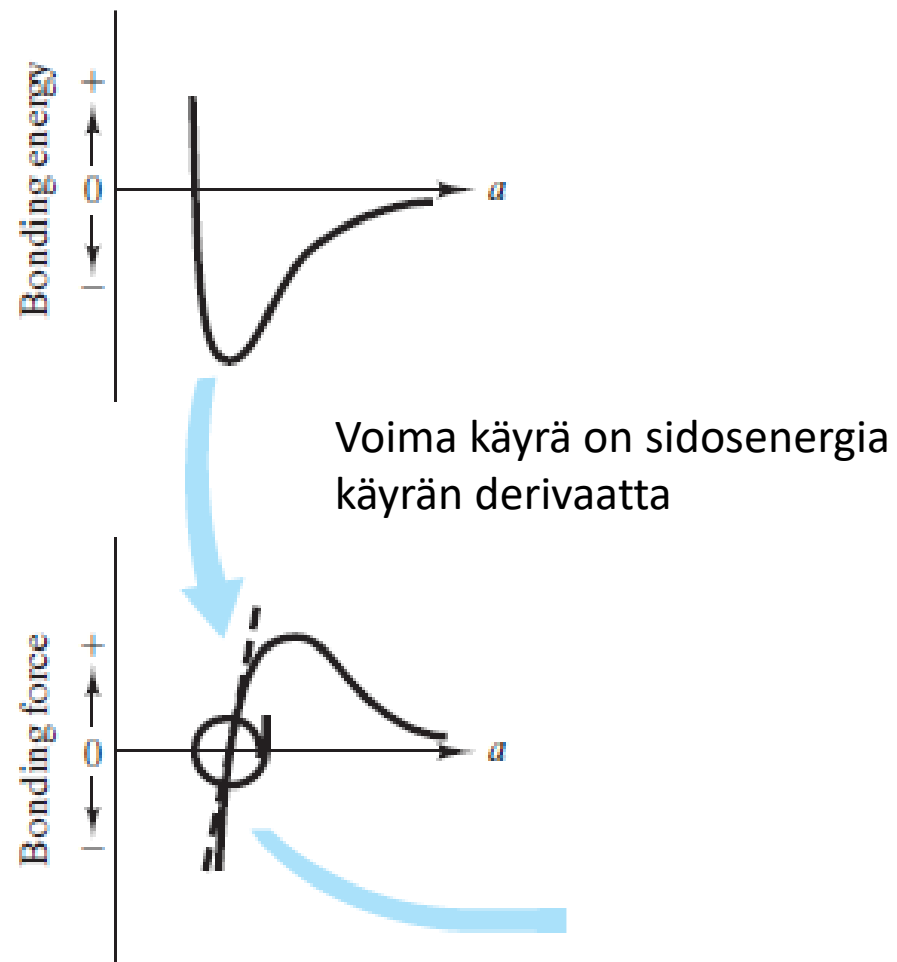
Jännityksen lakkauduttua sidokset minimoivat energiansa ja palaavat alkuperäiselle sidospituudelle.

Voimakuopan symmetria pienillä venymillä: elastinen moduuli vetävällä ja puristavalla jännityksellä likimäärin sama.

Sidoksen kyky venyä on rajallinen. Esim. metalleille raja on yleensä alle 0.005 (0.5%)

Ylläoleva pätee metalleille, keraameille ja puolijohteille.

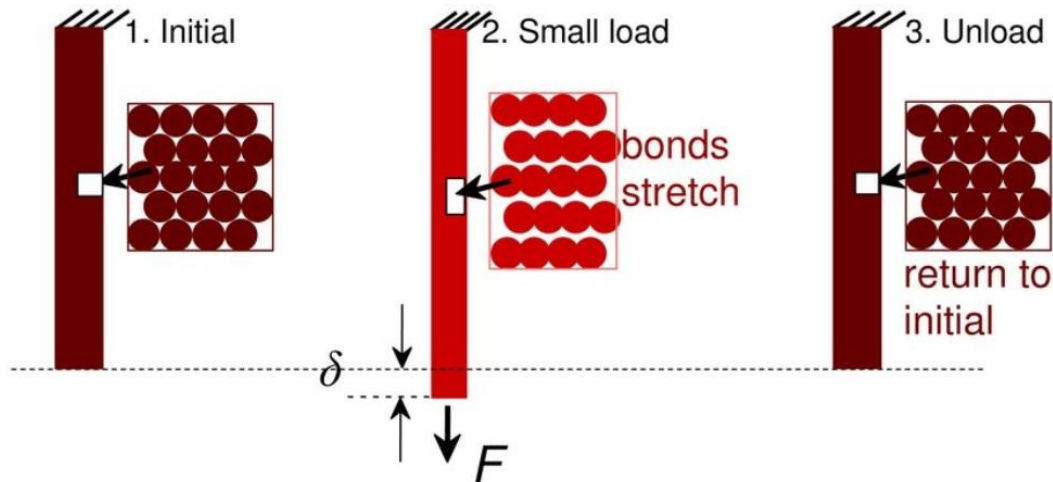
Huomattavasti suurempi elastinen venymä on mahdollista polymeereillä perustuen mm. polymeeriketjujen liikkeeseen.



# Kimmoerooin ei (juurikaan) riipu mikrorakenteesta

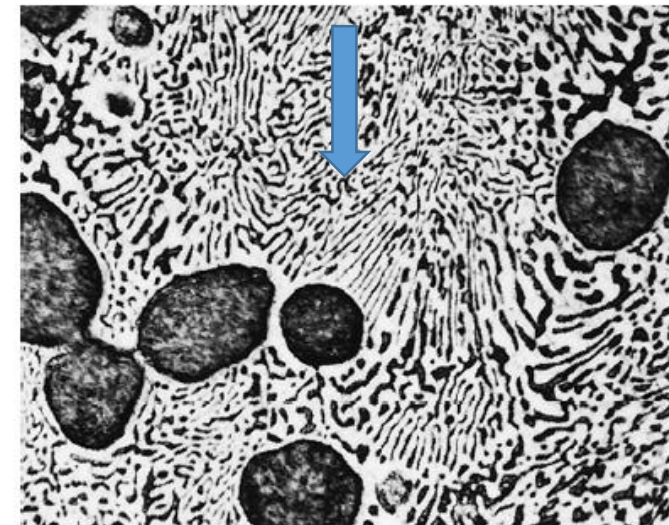
Elastinen venymä **metalleissa, keraameissa ja kovalenttisissa materiaaleissa** on sidosten venymistä.

Tämän määrää sidos eikä mikrorakenne, mikä on poikkeus verrattuna muihin mekaanisiin ominaisuuksiin.



Sidoksen venyminen on lokaali ilmiö, joten sidos ei tiedä mikrorakenteesta.

$\lambda, \omega, e$



Vertaa muihin ilmiöihin jossa joku entiteetti kulkee rakenteen läpi. Nämä riippuvat mikrorakenteesta voimakkaasti.

# Myötölujuus ( $\sigma_Y$ , Y.S.)

Myötölujuus tarkoittaa sitä jännitystä jossa **plastinen eli pysyvä muodonmuutos alkaa** (pisteessä P kuvassa).

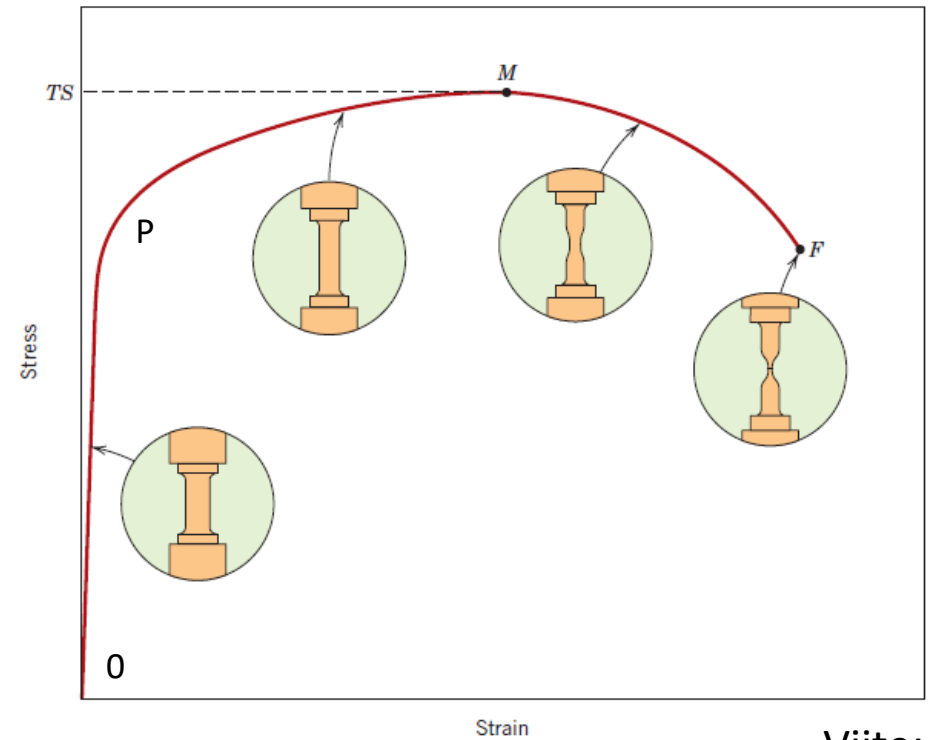
Plastinen muodonmuutos säilyy jännityksen poistuttua.

Plastinen muodonmuutos edellyttää sidoksien katkeamista ja uusien sidoksien syntymistä:

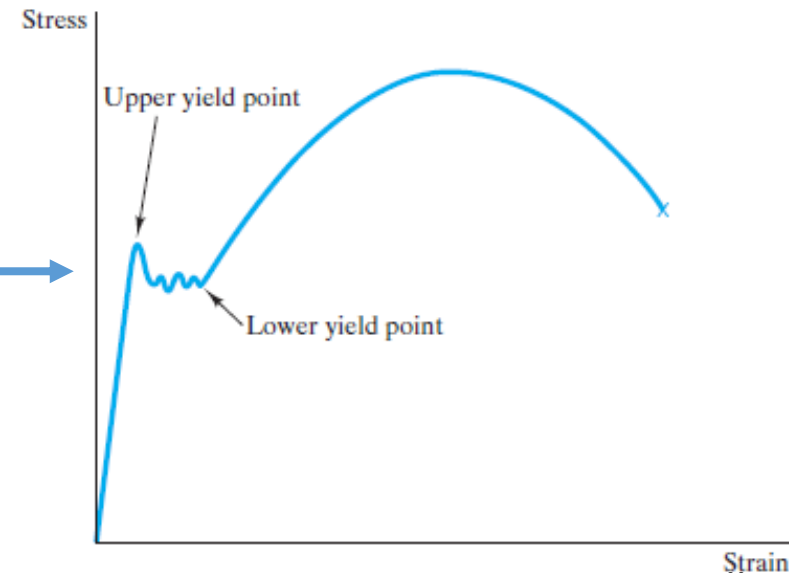
- Metalleissa vahvat sidokset katkeavat ja muodostuvat uudelleen yksi sidos kerrallaan
- Polymeereissä ketjujen väliset sidokset katkeavat ja ketjut järjestyvät uudelleen.

Joillakin materiaaleilla esiintyy ylempi ja alempi murtoraja. Tyypillinen teräksille ja muille tkk metalleille.

Myötölujuuden yksikkö: Pascal (metalleilla usein MPa.)



Viite: Callister



Viite: Shackelfod

# Myötölujuuden määrittäminen

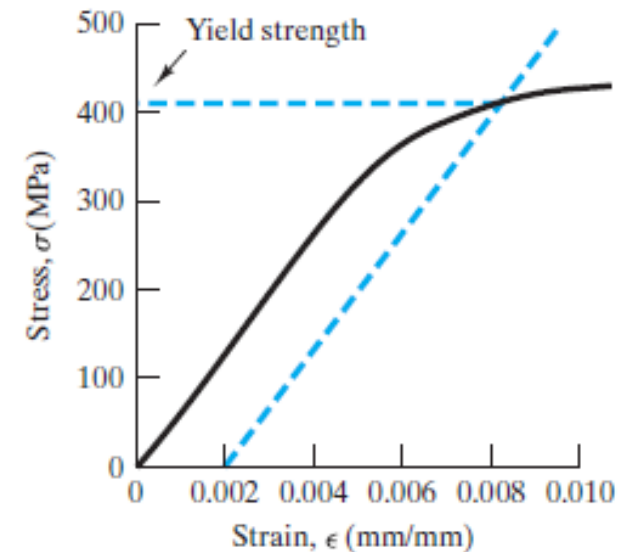
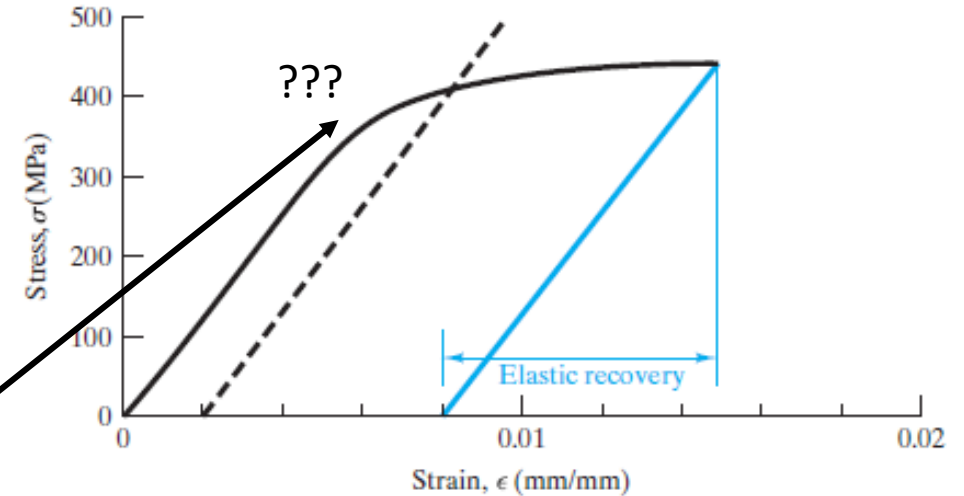
Jännityksen poistuttua elastinen komponentti venymästä poistuu (sidokset palautuvat normaalin mittaisiksi) ja pelkästään plastinen jää jäljelle.

Eli materiaali palautuu kimmokertoimen osoittamaa suoraa pitkin takaisin lopulliseen venymään.

Jännitys-venymä käyrästä voi olla vaikea sanoa tarkasti missä kohtaa elastinen alue loppuu ja plastinen alkaa.

Myötölujuus määritetään jännitys-venymä käyrästä usein jonkun tietyn, usein 0.2%, plastisen venymän aiheuttamana jännityksenä.

(tätä kutsutaan myös 0.2 proof stress)



# Murtolujuus (T.S.)

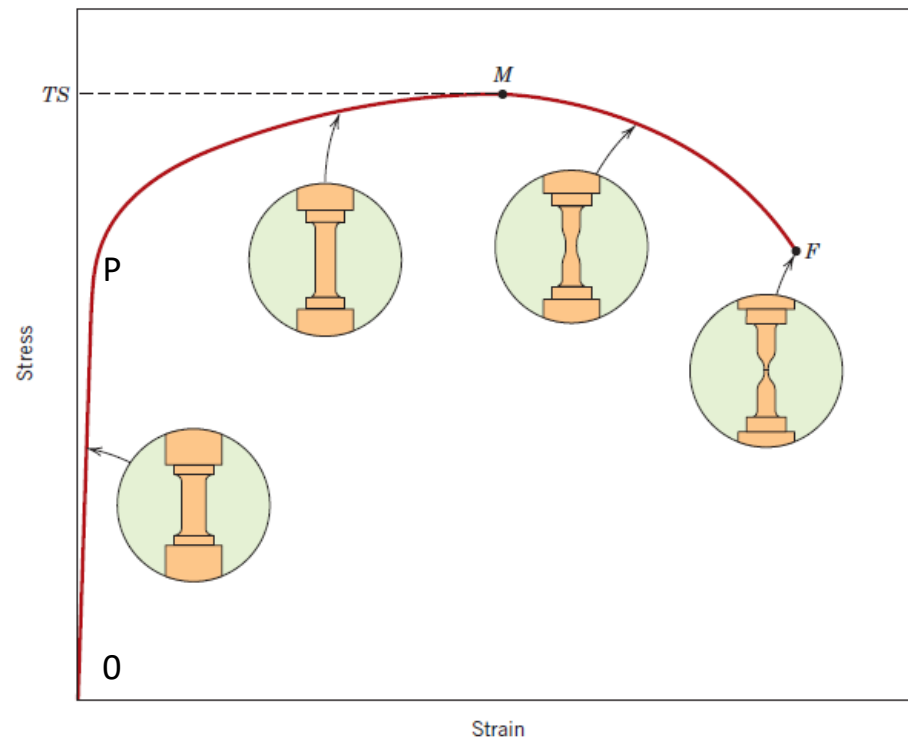
Murtolujuus on pienin jännitys joka vaaditaan kappaleen murtumiseen.

Se määritetään jännitys-venymä käyrästä sen suurimpana jännitys arvona, pisteessä M.

Pisteiden P ja M välissä kappaleen venyessä se ohenee tasaisesti koko pituudeltaan.

Murtolujuuden jälkeen pisteiden M ja F välissä kappaleeseen syntyy alati oheneva kaula, ja lopulta kappale murtuu pisteessä F.

Yksikkö: Pascal (Metalleilla usein MPa)



# Esimerkki:

1040 teräksen kimmokerroin on 200 GPa, myötölujuus 600 MPa ja murtolujuus 750 MPa. Teräsvaijeriin jonka säde on 1 mm ripustetaan a) 10 kg, b) 200kg, c) 1000kg paino.

Lasketaan jännitys, a)  $\sigma = \frac{F}{A} = \frac{10kg * 9.81m/s^2}{\pi * (0.001m)^2} \approx 31 MPa$  b) 620 MPa, c) 3100 MPa

a) Jännitys on alle myötölujuuden eli ollaan elastisella alueella. Kimmokerroin määriteltiin:  $E = \sigma/\epsilon$  eli elastinen venymä on siis:  $\epsilon = \sigma/E = 31 MPa / 200 GPa = 0.016\%$  (jos vaijeri oli 1 m pitkä, elastinen venymä oli 0.16 mm)

b) Jännitys on yli myötölujuuden mutta alle murtolujuuden, vaijeri siis kestää mutta on pysyvästi venynyt jännityksen poistuttua.

c) Jännitys on yli murtolujuuden ja vaijeri murtuu.

# Murtovenymä / venyvyys

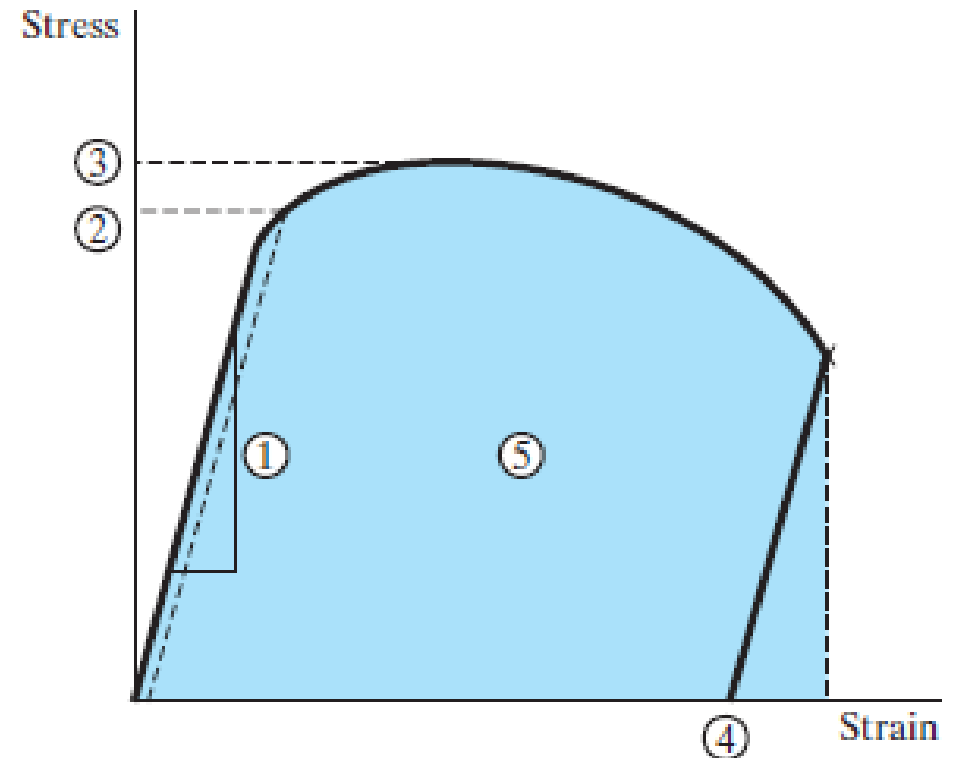
Murtovenymä on se määrä plastista venymää joka kappaleella on sen murtuessa.

Murtovenymä määritetään jännitys-venymä käyrästä pisteestä 4, eli murtumispisteestä tullaan kimmokertoimen osoittamaa suoraa takaisin X-akselille (tällä operaatiolla poistetaan siis elastinen venymä, joka nollautuu kappaleen murtuessa kun jännitys poistuu).

Murtovenymä on siis  $((l_f - l_0) / l_0)$ , missä  $l_f$  on murtuneiden kappaleiden yhteispituus ja  $l_0$  alkuperäinen pituus.

Yksikkö: Ei yksikköä tai %. (Metalleille usein luokkaa 0.05-0.5 eli 5%-50%)

Materiaaleja joilla on pieni murtovenymä kutsutaan hauraiksi. Yksi määritelmä (Callister) on <5%.





# Sitkeys (vetokokeella)

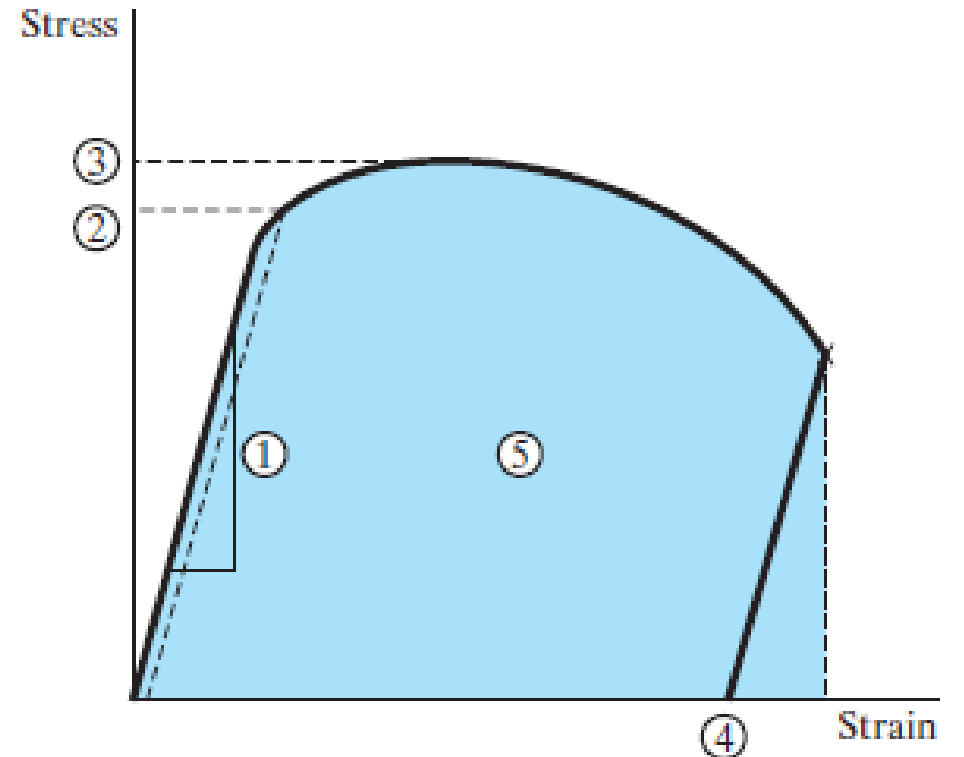
Materiaalin sitkeys kuvaa sen murtamiseen vaadittavaa energia määrää.

Jännitys-venymä käyrästä sitkeys määritetään integraalina käyrän alle jäävän alan pinta-alana.

Sitkeyttä mitataan myös impaktikokeella

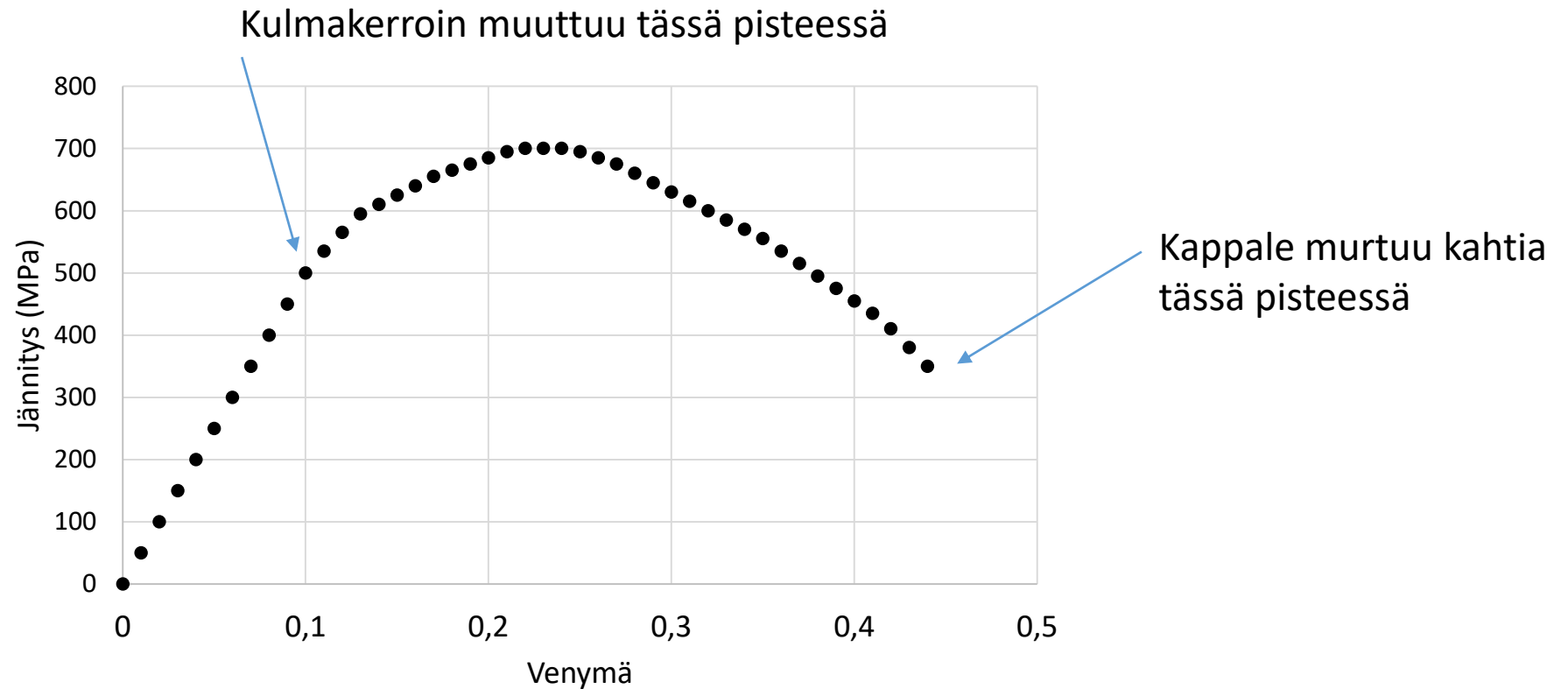
Yksikkö:  $\text{J/m}^3$

(Integraalin yksikkö on  $\text{Pa} \cdot \text{ei}$  yksikköä eli  $\text{N/m}^2$  eli  $\text{J/m}^3$ )



# Harjoitellaan:

Määritä kuvaajan avulla kimmokerroin, myötölujuus, murtolujuus ja murtovenymä.



Kuvitteellisen materiaalin jännitys-venymä käyrä.

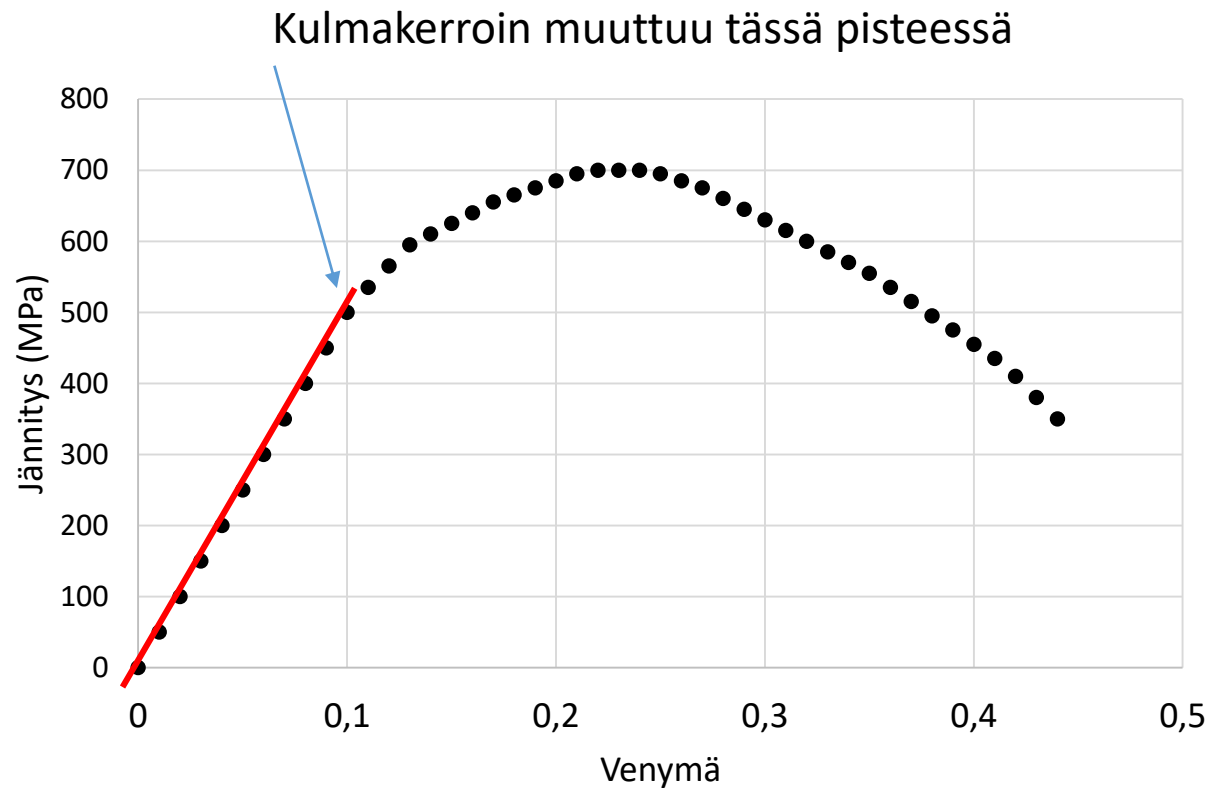
# Vastaukset

Kimmokerroin:

Kimmokerroin määritetään jännitys-venymä käyrän lineaarisen osan kulmakertoimena.

Kimmokerroin  $E = \text{kulmakerroin } \sigma/\varepsilon$ , eli esim:  
 $500 \text{ MPa}/0.1 = 5 \text{ Gpa}$

Tämä materiaali pystyy elastisesti venymään 10%.



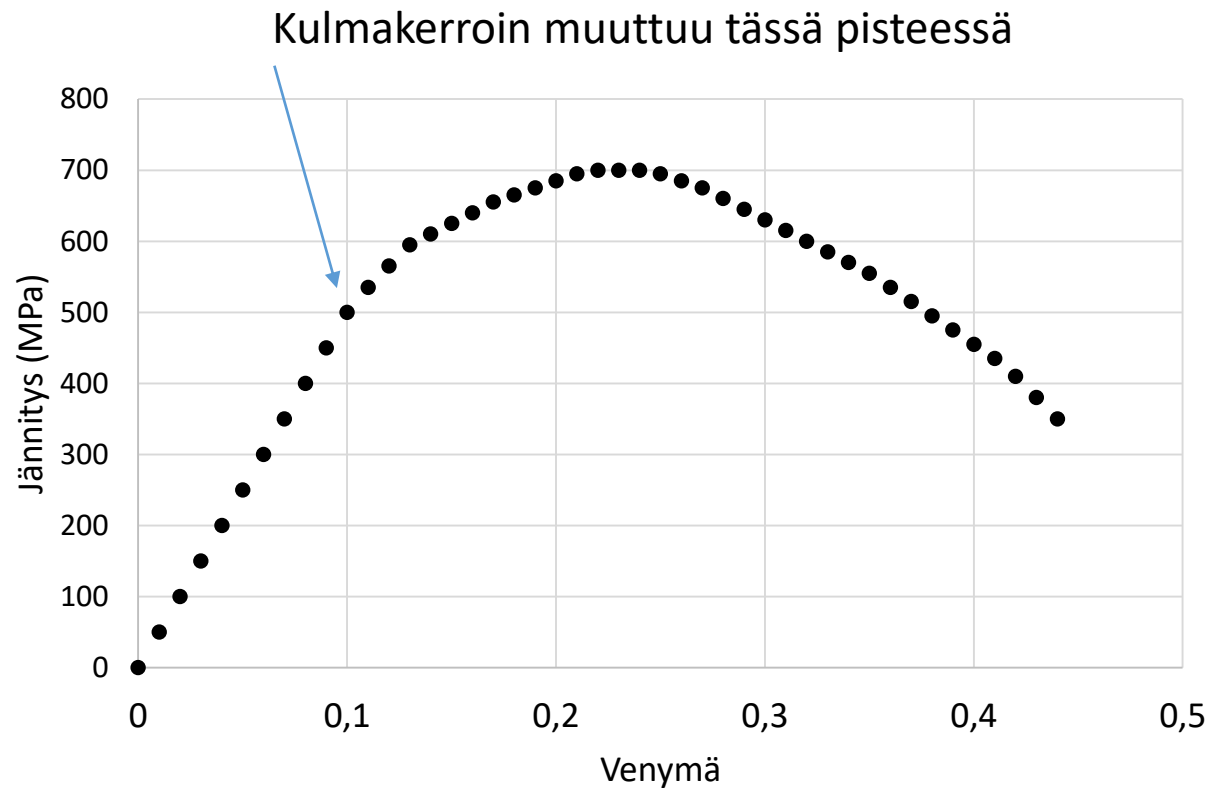
# Vastaukset

Myötölujuus:

Jännityksen arvo (eli Y akselin arvo) pisteessä jossa alun lineaarinen osa alkaa taittumaan.

Tässä harjoituksessa pisteen koordinaatit on annettu:  $x, y = 0,1, 500 \text{ MPa}$

Joten myötölujuus on 500 MPa

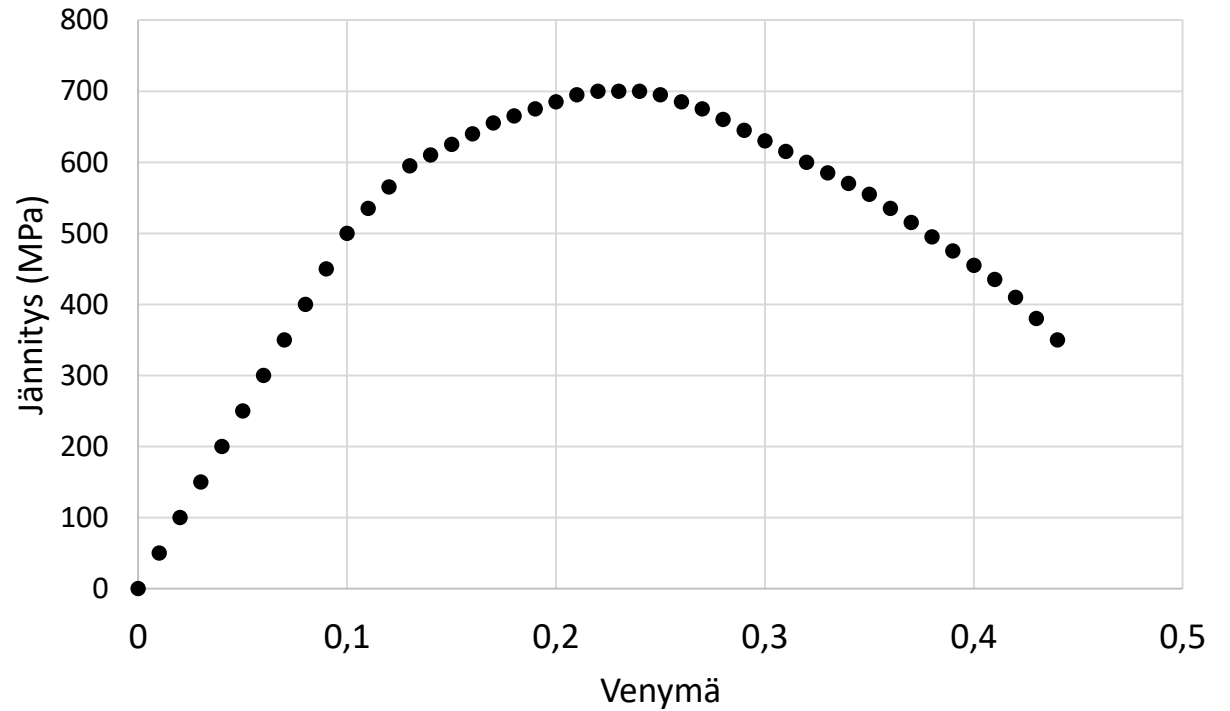


# Vastaukset

Murtolujuus:

Suurin Y akselin jännitysarvo jossa käyrä käy.

Tässä: 700 MPa



# Vastaukset

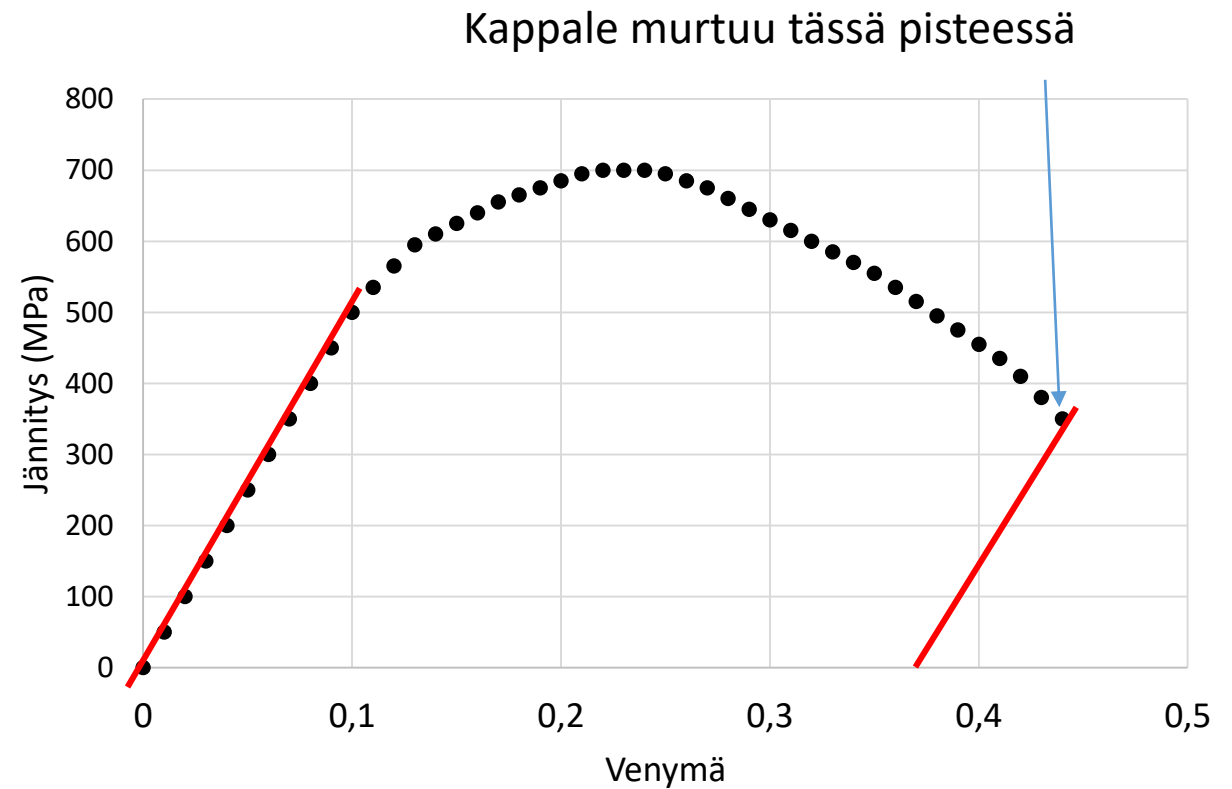
Murtovenymä: Murtuneen kappaleen plastinen venymä.

Murtumispisteessä kappaleen venymä on X akselilta luettuna noin 0.45

MUTTA: tämä venymä 0.45 on elastisen ja plastisen venymän summa.

Elastinen komponentti poistetaan liikkumalla kimmokertoimen suuntaan X akselille.

Murtovenymä on siis arviolta 0.37, eli kappale venyi pysyvästi noin 37% ennen murtumista.



# Bonus: sitkeyden arviointi

Yläraja: Murtolujuus \* maksimi  
venymä (ei siis murtovenymä)

$$700 \text{ MPa} * 0.45 = 315 \text{ MJ/m}^3$$

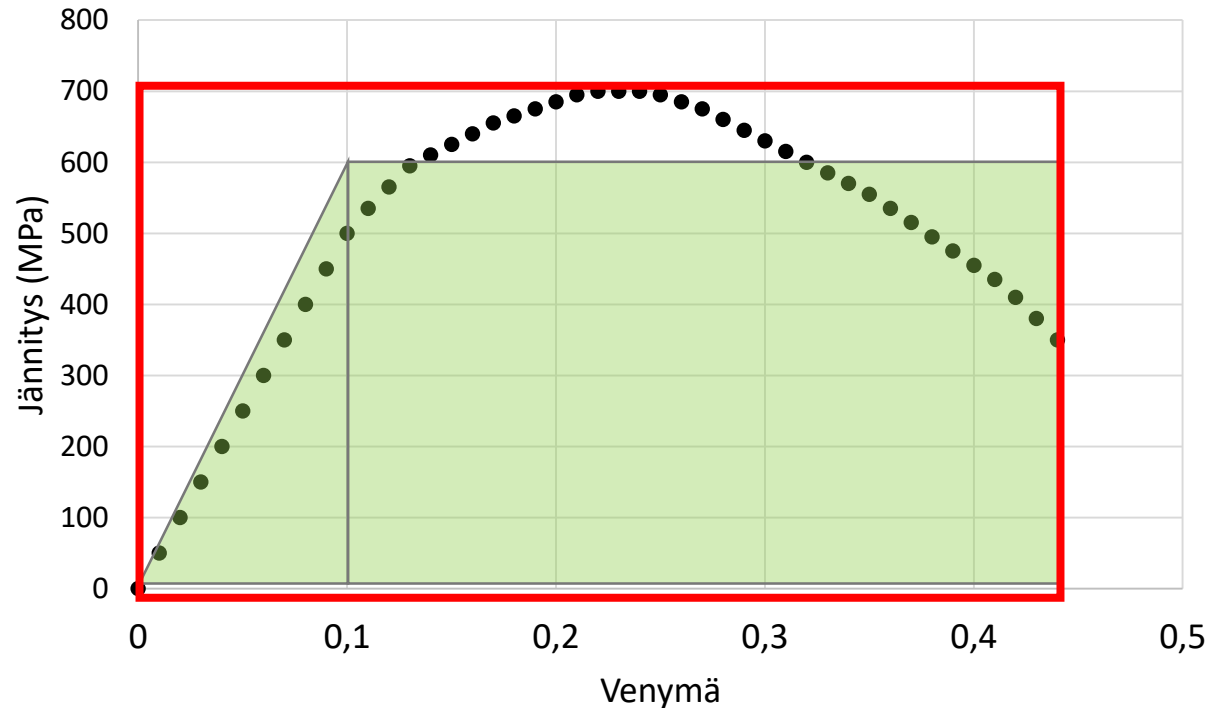
Tarkempi arvio:

Kolmio + suorakaide.

Molempien korkeus (T.S. + Y.S.)/2

Kolmion leveys elastinen venymän  
maksimi, suorakaiteen leveys  
(maksimi venymä – elastinen venymä)

$$0.1 * 600 \text{ MPa} + 0.35 * 600 \text{ MPa} = 270 \text{ MJ/m}^3$$



# Laskuesimerkki: messingin mekaanisia ominaisuuksia

**Kimmokerroin** on elastisen alueen kulmakerroin. Luetaan pisteiksi origo ja  $\sigma=150\text{MPa}$ ,  $\epsilon=0.0016$ . Kimmokerroin =  $(150\text{MPa}-0)/(0.0016-0)\approx 94\text{ GPa}$ . (Taulukko arvo tälle messingille on 97 GPa).

**Murtolujuus** on suurin arvo Y akselilla jonka käyrä saavuttaa. Tässä noin 450 MPa.

**Myötölujuus** on se piste jossa plastinen muodonmuutos alkaa. Se käytännössä määritellään jonkun tietyn (pienen) plastisen venymän aiheuttamiseksi vaadituksi jännitykseksi, usein venymäksi valitaan 0.002. Myötölujuus löytyy laittamalla pisteestä jännitys = 0, venymä = 0.002 alkamaan kimmokertoimen määräämä suora, ja katsomalla leikkauspiste jännitys-venymä käyrän kanssa. Myötölujuus 0.002 venymällä on sitten tämän leikkauspisteen Y koordinaatti, tässä noin 250 MPa.

**Murtovenymä:** Plastisen venymän arvo murtumispisteessä. Tässä noin 0.36 eli 36%. (huomaa että oranssi viiva ei ole suoraan alas vaan kimmokertoimen suuntainen)

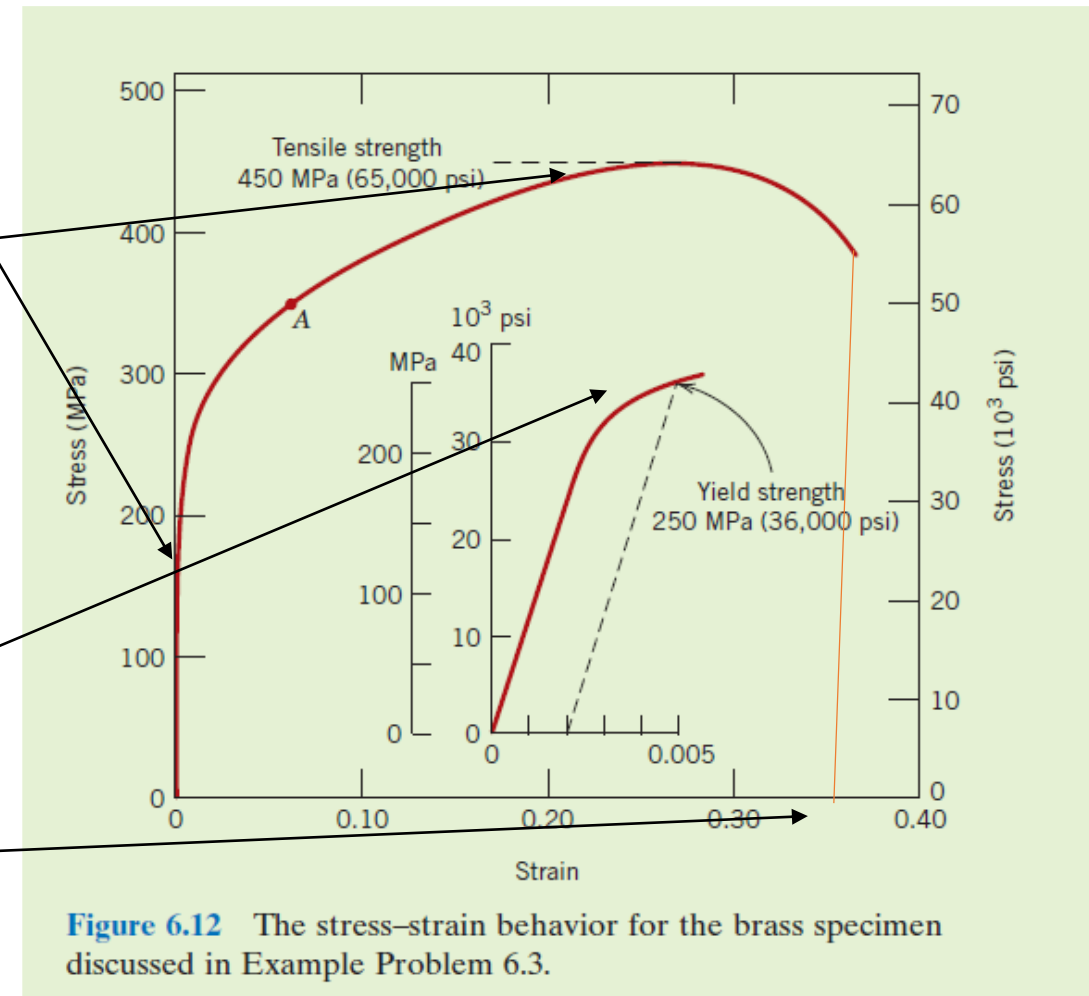


Figure 6.12 The stress-strain behavior for the brass specimen discussed in Example Problem 6.3.



# Materiaaliryhmien vertailua

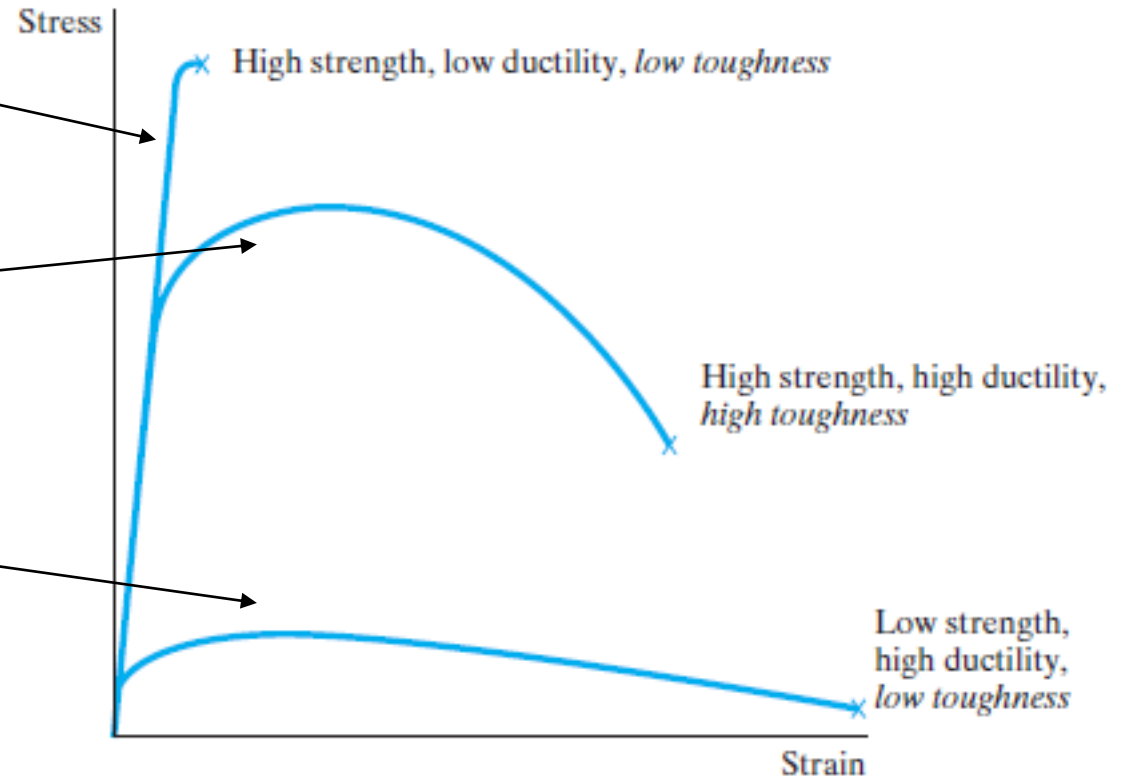
Tyypillisesti:

**Keraamit:** lujia mutta hauraita -> matala sitkeys

**Metallit:** lujia ja venyviä -> korkea sitkeys

**Polymeerit:** ei lujia mutta venyviä -> matala sitkeys

Eli sitkeys edellyttää sekä lujuutta että venyvyyttä (muista että sitkeys oli käyrän alle jäävä integraali)



# Materiaalien vertailua

Metallit:

E: luokkaa 100 GPA

Y.S. ja T.S.: luokkaa 100 MPa

Keraamit:

E: luokkaa 100 GPa

MOR: luokkaa 100 Mpa

(MOR = modulus of rupture, vastaa keraameille T.S.)

Polymeerit:

E: Luokkaa 100 Mpa

T.S: Luokkaa 10 MPa

Metallit

Alloy*	E [GPa (psi)]	Y.S. [MPa (ksi)]	T.S. [MPa (ksi)]	Percent elongation at failure
1. 1040 carbon steel	200 ( $29 \times 10^6$ )	600 (87)	750 (109)	17
2. 8630 low-alloy steel		680 (99)	800 (116)	22
3. a. 304 stainless steel	193 ( $28 \times 10^6$ )	205 (30)	515 (75)	40
b. 410 stainless steel	200 ( $29 \times 10^6$ )	700 (102)	800 (116)	22
4. L2 tool steel		1,380 (200)	1,550 (225)	12
5. Ferrous superalloy (410)	200 ( $29 \times 10^6$ )	700 (102)	800 (116)	22
6. a. Ductile iron, quench	165 ( $24 \times 10^6$ )	580 (84)	750 (108)	9.4
b. Ductile iron, 60–40–18	169 ( $24.5 \times 10^6$ )	329 (48)	461 (67)	15
7. a. 3003-H14 aluminum	70 ( $10.2 \times 10^6$ )	145 (21)	150 (22)	8–16
b. 2048, plate aluminum	70.3 ( $10.2 \times 10^6$ )	416 (60)	457 (66)	8

Keraamit

Material	<i>E</i> ( $10^3$ MPa)	MOR (MPa)
Alumina	380	276–1,034
Sintered <sup>a</sup> alumina (~5% porosity)	370	210–340
Alumina porcelain (90–95% alumina)	370	340
Silicon nitride	120–330	150–1,200
Glass-ceramics	83–138	70–350
Silica glass	73	104
Soda-lime glass	66	150
Borosilicate glass	60	69

Polymeerit

Polymer	<i>E</i> <sup>a</sup> [MPa (ksi)]	T.S. [MPa (ksi)]	Percent elongation at failure
<b>General-use polymers</b>			
Polyethylene			
High-density	830 (120)	28 (4)	15–100
Low-density	170 (25)	14 (2)	90–800
Polyvinylchloride	2,800 (400)	41 (6)	2–30
Polypropylene	1,400 (200)	34 (5)	10–700

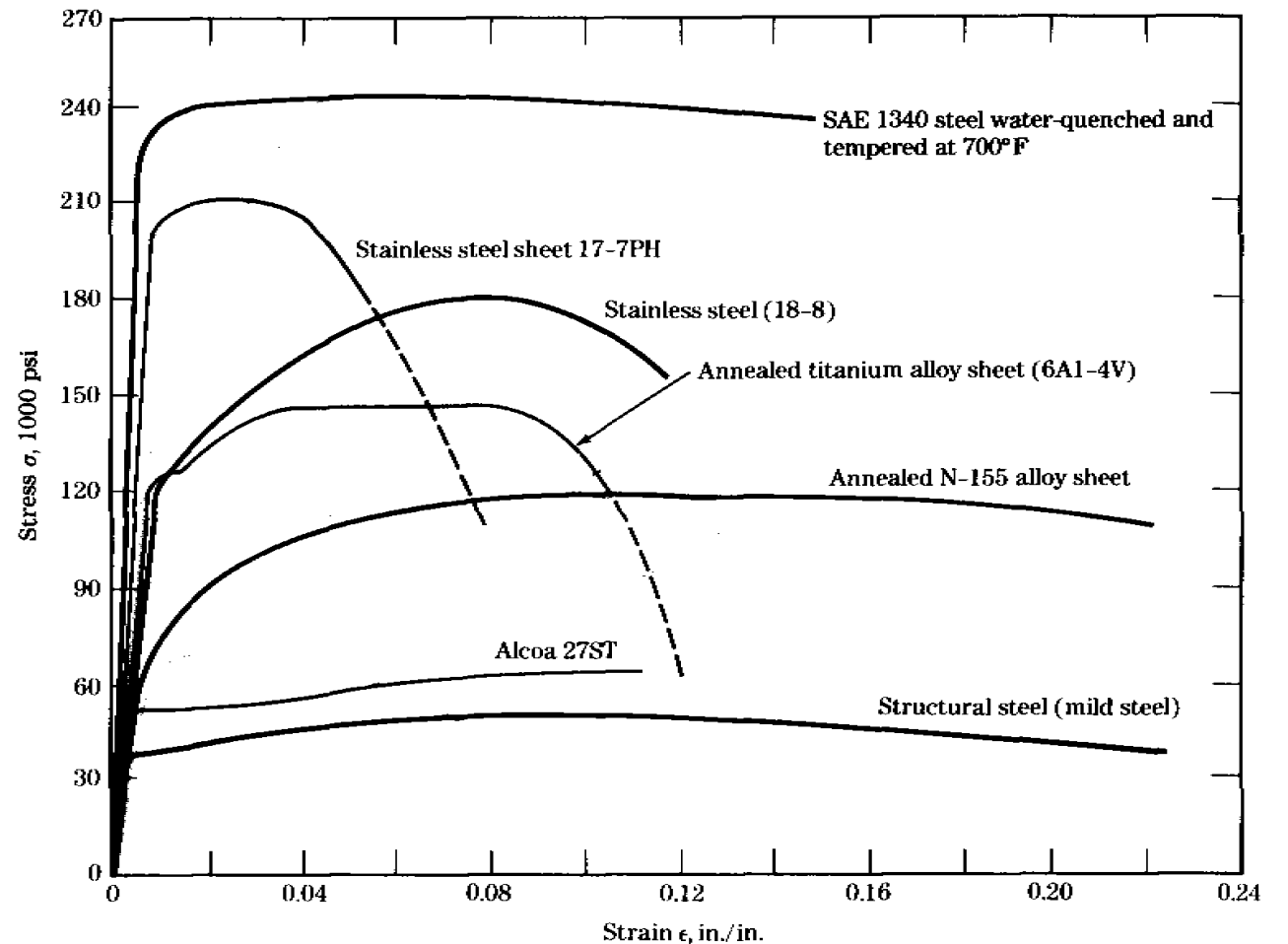
# Koostumuksen ja mikrorakenteen vaikutus

Mekaaniset ominaisuudet riippuvat “materiaalin” lisäksi voimakkaasti myös:

1. Materiaalin tarkasta kompositioista, pienikin määrä toista ainetta liuenneena voi vaikuttaa huomattavasti.
2. Materiaalin mikrorakenteesta.

Esimerkiksi:

1. Raudan ominaisuudet eivät ole samat kuin teräksen.
2. Saman teräslaadun ominaisuudet riippuvat mikrorakenteesta (lämpökäsittelystä).



# Bonuskalvo, ei varsinaisesti tämän kurssin asiaa: Plastisen muodonmuutoksen mekanismi

Plastisen muodonmuutoksen mekanismi liittyy voimakkaasti mikrorakenteeseen.

Plastinen muodonmuutos edellyttää sidosten murtumista ja uudelleen muodostumista.

Tätä prosessia helpottaa viivamainen kidevirhe nimeltä dislokaatiot. Plastisen muodonmuutoksen voi ajatella olevan dislokaatioiden liikettä.

Dislokaatioiden liikettä vastustavat monet kidevirheet, erityisesti raerajat ja liuenneet atomit. Eli mitä enemmän näitä, sitä lujempi materiaali

**Tällä kurssilla riittää** että tiedätte että: 1. plastinen muodonmuutos liittyy läheisesti mikrorakenteeseen ja että 2. erilaisilla mikrorakenteilla voidaan tehdä materiaalista enemmän tai vähemmän lujaa ja enemmän tai vähemmän venyvää.

(Plastisen muodonmuutoksen mekanismi ja mikrorakenteen vaikutus/muokkaus käsitellään kurssilla C2440 Materiaalien Mikrorakenne)

# Lämpötilan vaikutus

Lämpötila vaikuttaa mekaanisiin ominaisuuksiin.

Yleensä lämpötilan **kasvaessa**:

Kimmokerroin **pienenee**

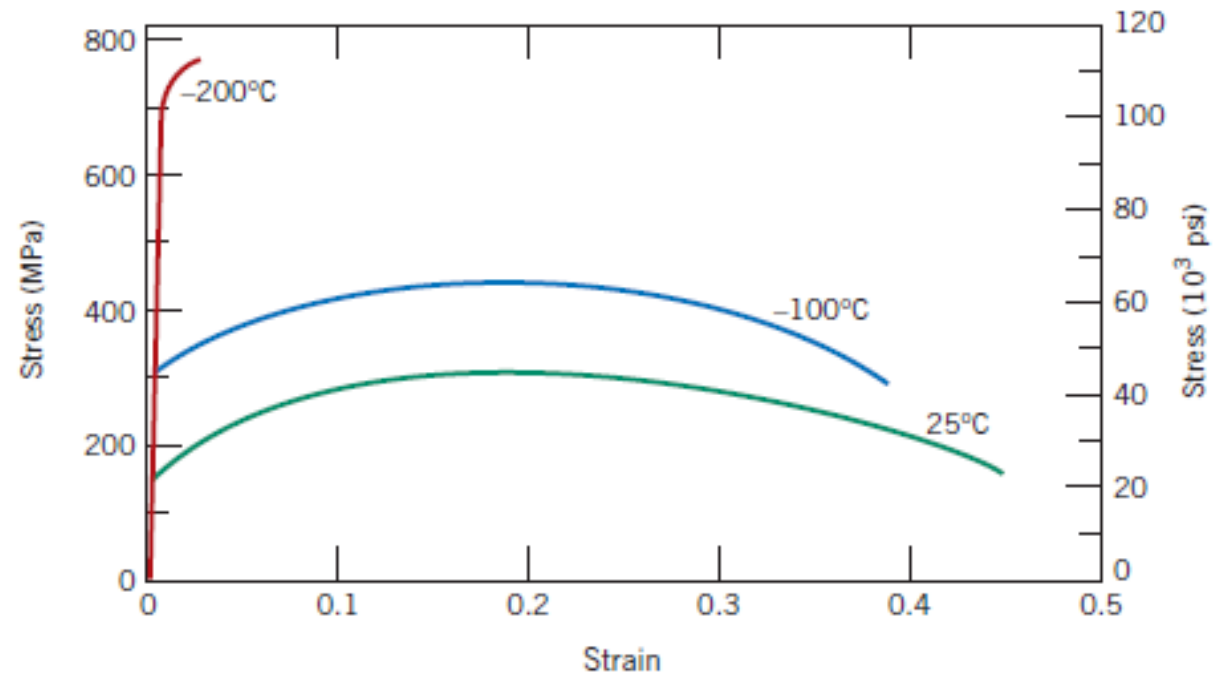
(koska keskimääräinen sidospituus kasvaa, katso sidosenergia "kuopan" muoto)

Lujuus **pienenee**

Murtovenymä **kasvaa**

(koska korkeammassa lämpötilassa sidokset sekä katkeavat että muodostuvat helpommin)

Joillakin materiaaleilla, erityisesti tkk metalleilla, tapahtuu kvalitatiivinen muutos hauraaksi materiaaliksi alhaisissa lämpötiloissa.



Lämpötilan vaikutus raudan mekaanisiin ominaisuuksiin

# Muu kuin vetävä jännitys?

Tässä luennessa materiaalin mekaaniset ominaisuudet esitetään vetokokeen ja vetävän jännityksen kautta.

On olemassa myös puristavaa ja leikkaava jännitystä (+ muita spesifisempiä tilanteesta riippuvia jännityksiä, esim. torsiojännitys)

Vetokokeelle ja siitä saataville parametreille on olemassa vastinkappaleet muunlaiselle jännitykselle.

**Kaikille pätee:** 1. elastinen ja plastinen muodonmuutos. 2. Murtuminen. 3. Tietyt raja-arvot (lujuudet) näiden välillä. 4. Elastinen kerroin joka kuvaa jännitys venymä käyrää elastisella alueella.

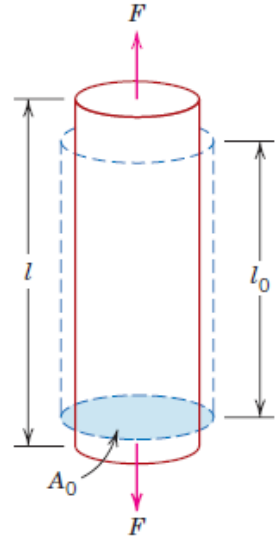
Esim.

	<b>Vetojännitys</b>	<b>Puristusjännitys</b>	<b>Leikkausjännitys</b>
Elastinen kerroin:	Kimmo kerroin/Youngin moduuli	Puristusmoduuli	Liukumoduuli
Murtolujuus	Vetolujuus	Puristuslujuus	Leikkauslujuus

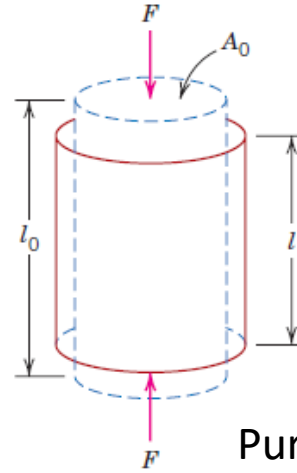
Ilmiöt ja kaavat ovat analogiset, esim, elastiselle **leikkausjännitykselle**:  $\tau = G \gamma$

$\tau$ =leikkausjännitys,  $G$  = liukumoduuli,  $\gamma$  = leikkausmyötymä.

**Materiaaliparametrien arvot sen sijaan yleisesti ottaen eivät ole samat erilaisille jännityksille!** Esim. Keraameilla on tyypillisesti paljon suurempi puristuslujuus kun vetolujuus.

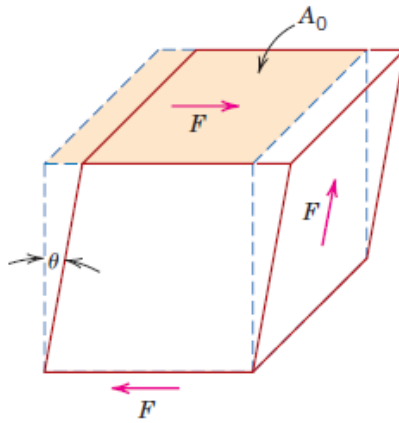


Vetojäännitys (a)

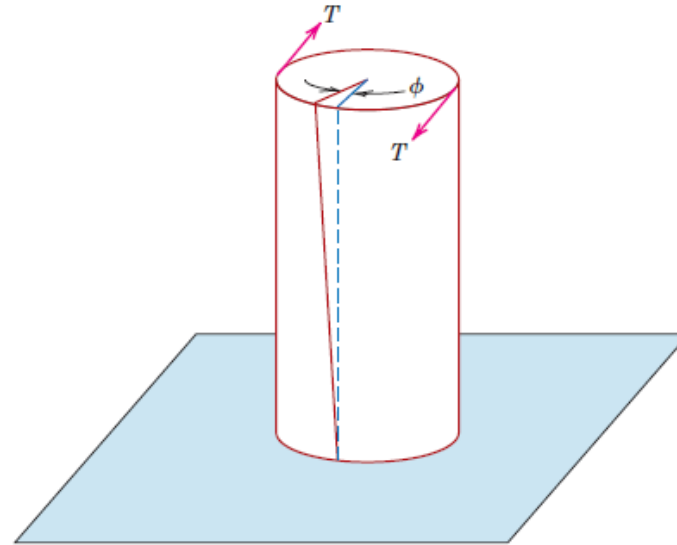


Puristusjäännitys

(b)



Leikkausjäännitys (c)



Torsiojäännitys (d)

# Poissonin suhde

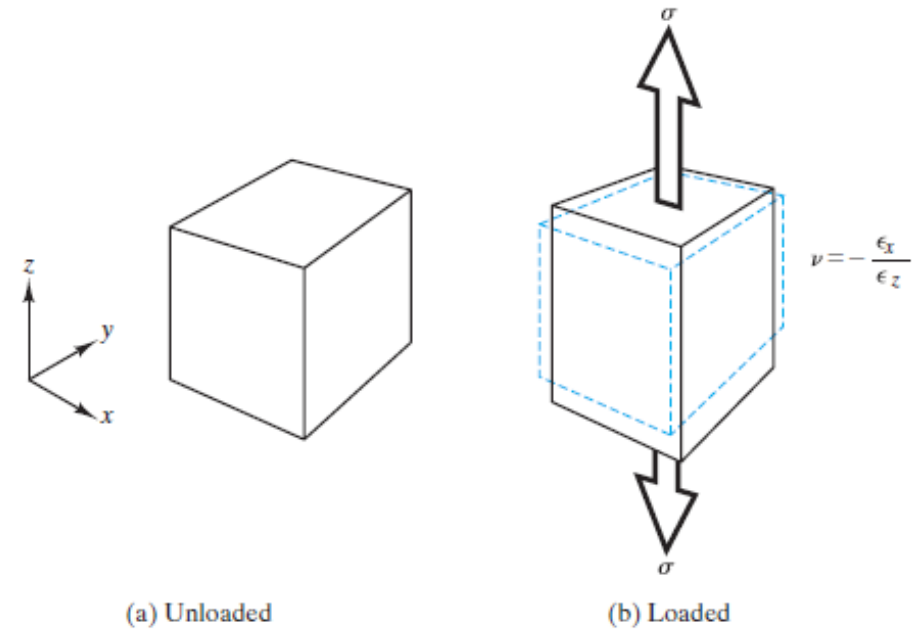
Jos näytettä venytetään/puristetaan z suunnassa, näytteen dimensiot x ja y suunnassa samalla pienenevät/kasvavat.

**Poissonin suhde:**  $\nu = -\epsilon_x/\epsilon_z = -\epsilon_y/\epsilon_z$

Metalleille usein välillä 0.26 – 0.35

Mekaaniset moduulit ovat riippuvaisia toisistaan.  
Isotrooppiselle materiaalille:

$$E=2G(1+\nu)$$





# Osa 2: Kovuustestit

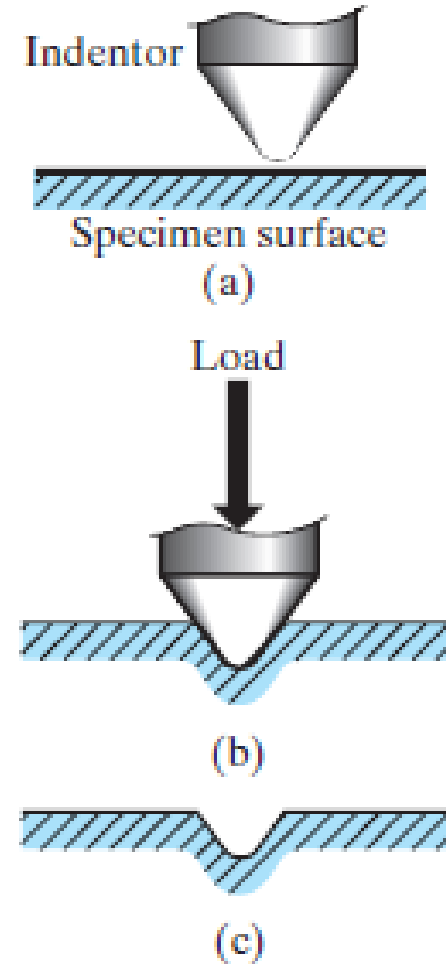
# Kovuus

Vetokokeesta saadaan materiaaliparametreja joilla on fysikaalinen yksikkö. Vetokokeesta saatiin elastisuuteen, lujuuteen, venyvyyteen ja sitkeyteen liittyviä parametreja.

Kovuus on parametri joka kuvaa aineen **pinnan** kykyä vastustaa painavaa voimaa.

Kovuus on mekaaninen ominaisuus mutta se ei ole suoraan fysikaalinen parametri, eli sillä ei ole fysikaalista yksikköä

Kovuus on aina tiettyyn testiin liittyvä numero.

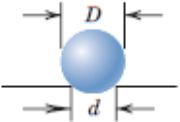
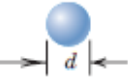
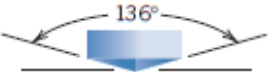

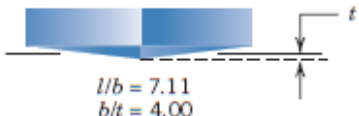
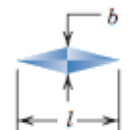
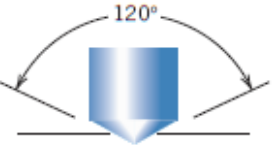
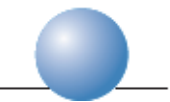




# Kovuustestit

Kovuustestissä materiaalin pintaa painetaan tietyllä voimalla ja tietynlaisella indetterillä (riippuen testistä.)

Testissä mitataan sitä kuinka syväle indentteri tunkeutuu materiaaliin.

Indentterin muoto, materiaali ja painava voima pitää tarkasti standardisoida vertailtavuuden saavuttamiseksi.

Test	Indenter	Side View	Top View	Load
Brinell	10-mm sphere of steel or tungsten carbide			$P$
Vickers microhardness	Diamond pyramid			$P$
Knoop microhardness	Diamond pyramid			$P$
Rockwell and Superficial Rockwell	<ul style="list-style-type: none"> <li>⎧ Diamond cone;</li> <li>⎧ <math>\frac{1}{16}, \frac{1}{8}, \frac{1}{4}, \frac{1}{2}</math> in. diameter steel spheres</li> </ul>	 	 	<ul style="list-style-type: none"> <li>60 kg } Rockwell</li> <li>100 kg }</li> <li>150 kg }</li> <li>15 kg } Superficial Rockwell</li> <li>30 kg }</li> <li>45 kg }</li> </ul>

Yleisiä kovuustestejä

# Rockwell kovuustesti

Rockwell testit luokitellaan kirjaimen perusteella, esim Rockwell B (HRB), Rockwell C (HRC).

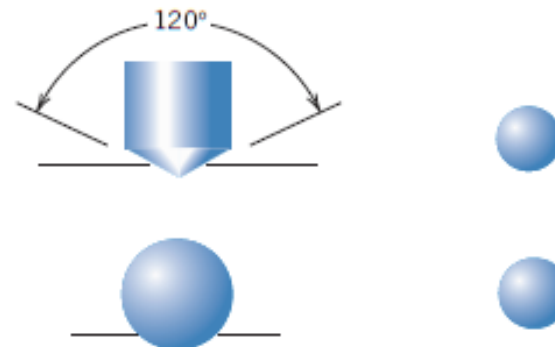
Indentterit joko teräspalloja tai timanttia kartioita, riippuen testistä.

Rockwell testissä indentteri painetaan ensin kontaktiin pinnan kanssa voimalla 10kg, ja sen jälkeen itse testi 60kg, 100kg tai 150kg voimalla, riippuen testistä.

Eli jos tehdään Rockwell C testi, ja tuloksena oli vaikka 50, niin silloin Rockwell C kovuusarvo on 50 (usein merkataan 50 HRC).

**Table 6.6a** Rockwell Hardness Scales

Scale Symbol	Indenter	Major Load (kg)
A	Diamond	60
B	$\frac{1}{16}$ -in. ball	100
C	Diamond	150
D	Diamond	100
E	$\frac{1}{8}$ -in. ball	100
F	$\frac{1}{16}$ -in. ball	60
G	$\frac{1}{16}$ -in. ball	150
H	$\frac{1}{8}$ -in. ball	60
K	$\frac{1}{8}$ -in. ball	150

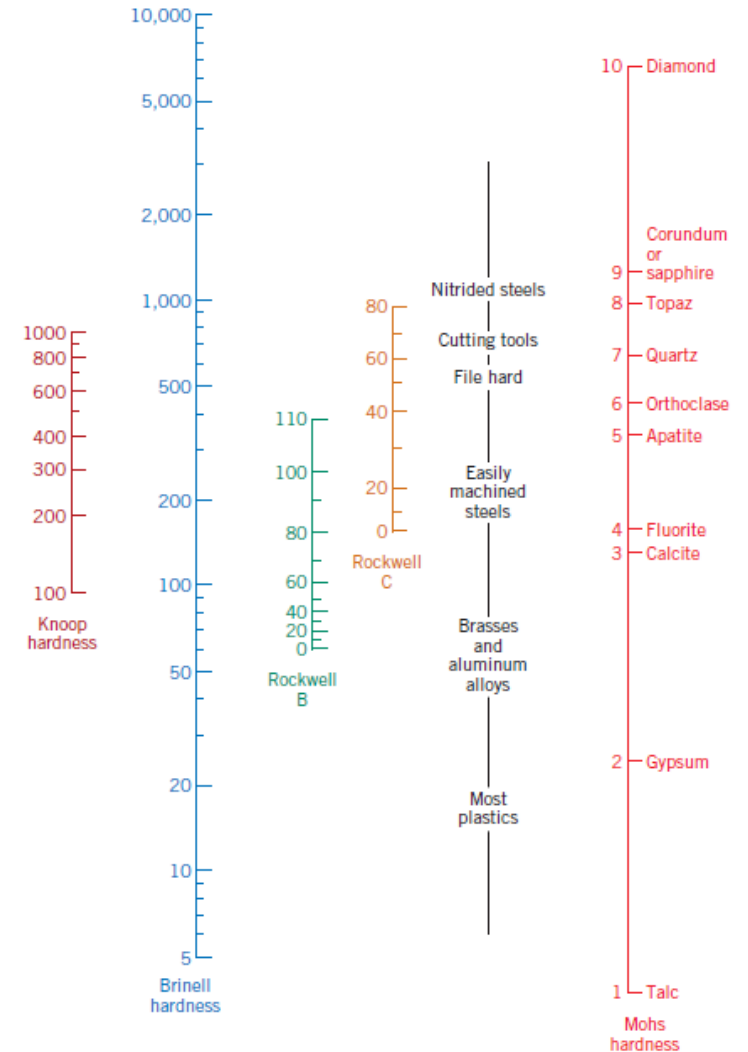
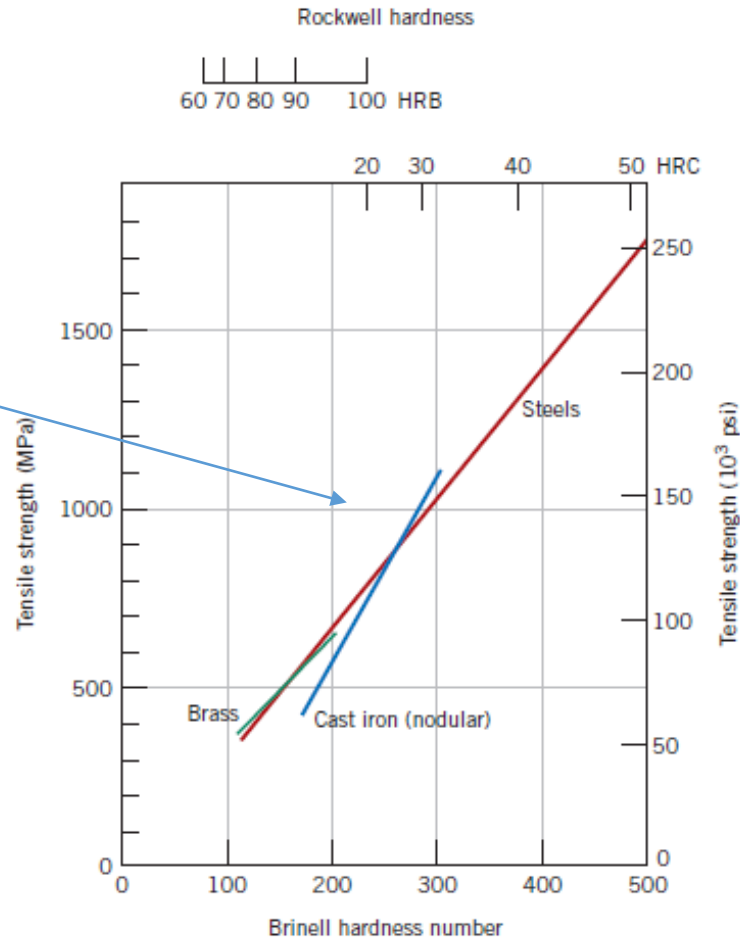


# Kovuustestien korrelaatiot

Kovuustestin tulos korreloi fysikaalisten parametrien (esim. myötölujuus ja murtolujuus) kanssa.

Korrelaatio pätee kuitenkin pääasiassa vain yhden materiaaliryhmän sisällä.

Eri kovuustestien arvot korreloivat myös keskenään.



# Kovuus vs. lujuus

Jos vetokokeella saa fysikaaliset materiaali parametrit suoraan, miksi käyttää kovuustestiä ja korrelaatioita?

1. Kovuustesti on helppo ja nopea koe joka EI vaadi vetosauvan valmistusta.
2. Kovuustesti ei mittaa pelkästään lujuutta korrelaation kautta vaan mittaus kohdistuu enemmän pintaan. Kovuustestillä voidaan mitata esim. pinnoitteita.

# Osa 3: Impaktitestit

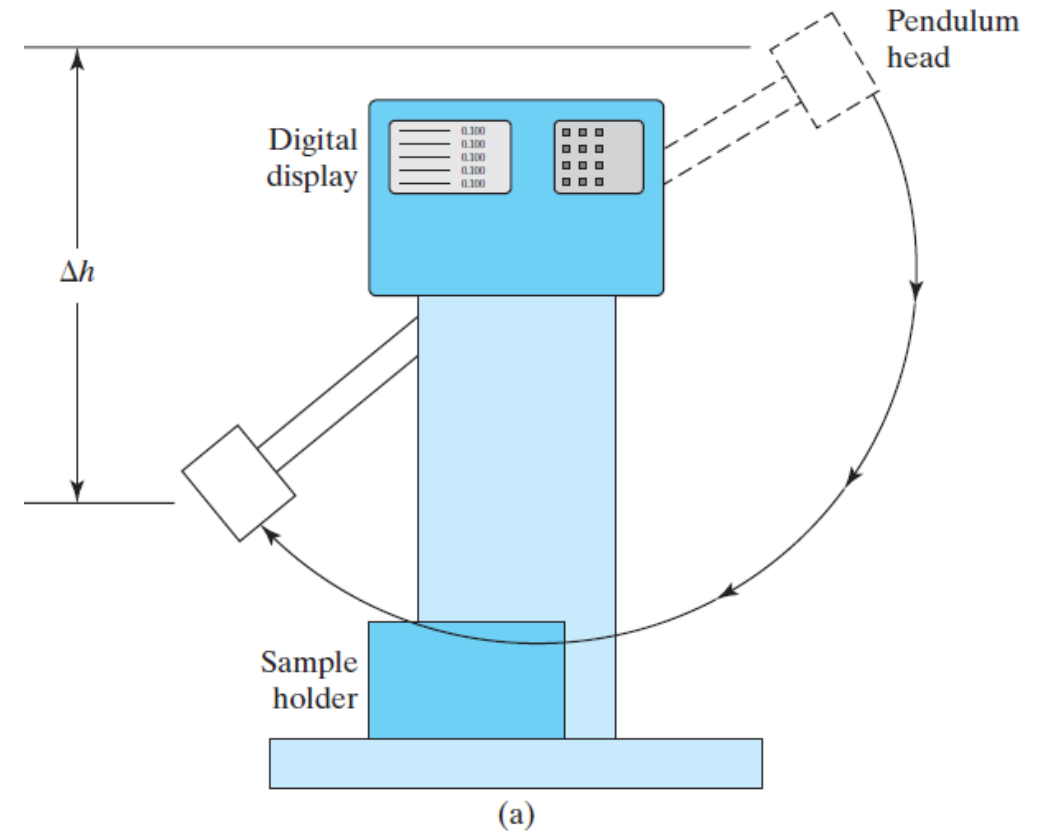
# Impaktitestit

Impaktitestillä mitataan kappaleen murtumiseen kuluvan energian määrää.

Impaktienergia kuvaa materiaalin sitkeyttä ja sen yksikkö on J.

**Sitkeys impaktikokeella määritettynä korreloi, mutta ei ole suoraan sama, kuin sitkeys integroimalla vetokokeesta. (Vetokokeesta määritetyllä sitkeydellä oli myös eri yksikkö, J/m<sup>3</sup>)**

Vaikka impaktikokeen murtuminen tapahtuu suuremmalla nopeudella kun murtuminen vetokokeessa, se mittaa silti samoja perusilmiöitä.



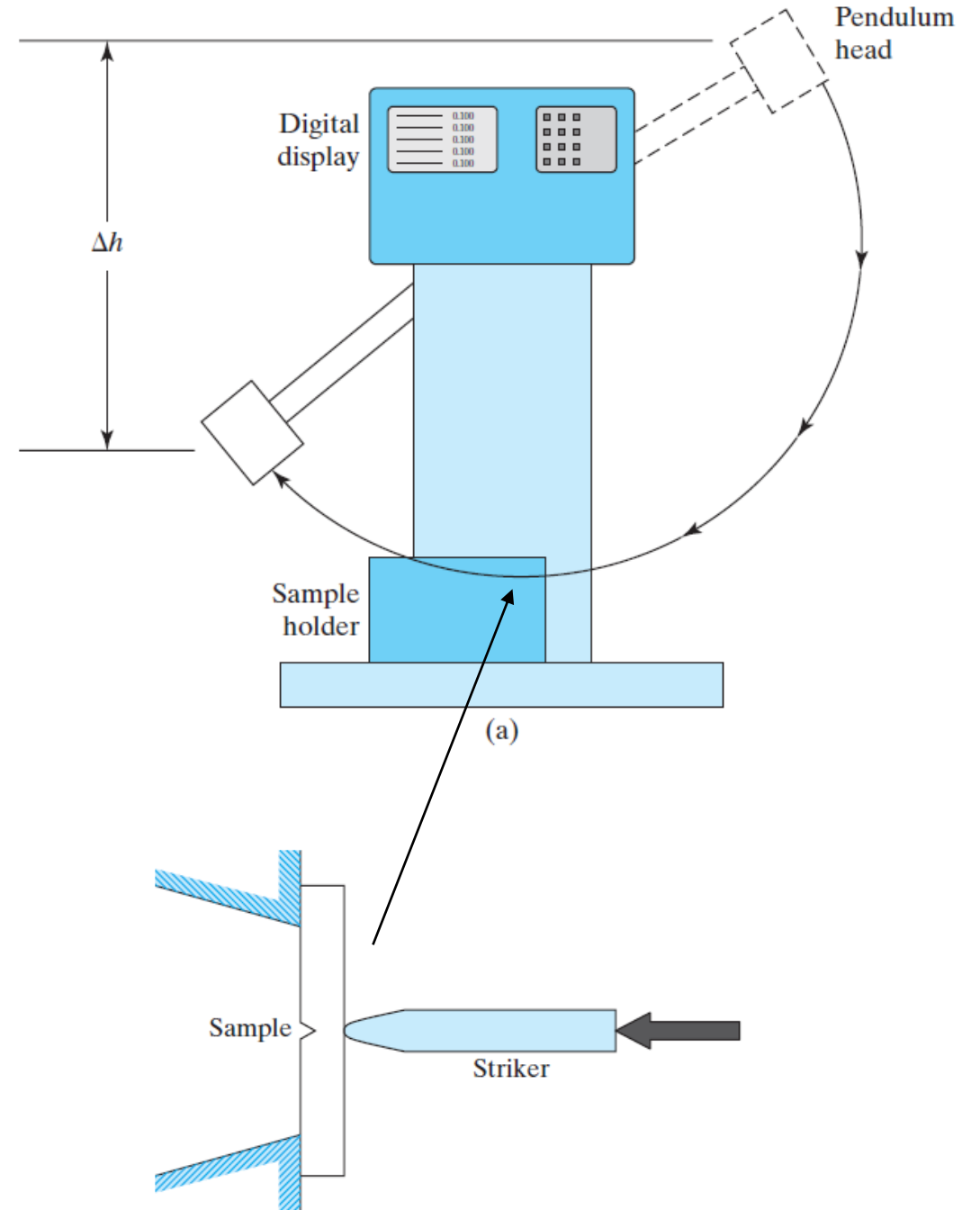


# Charpy-V impakti testi

Murtumiseen kuluva energia saadaan vertaamalla heilurin korkeutta ennen ja jälkeen iskun (eli potentiaalienergia korkeuserosta).

Vertailtavuuden takia iskurit ja näytteet on standardisoitu tarkkaan eri impaktitesteissä.

Charpy testissä näytteeseen tehdään V, muotoinen lovi ja näytettä lyödään iskurille loven vastapuolelta.



# Impaktienergioita

Metallit ovat sitkeitä, suurempi impaktienergia.

Polymeerit eivät ole yleensä sitkeitä, matalampi impaktienergia.

Keraameille impaktikokeet ovat haastavia ja tuloksia on huonosti löydettävissä.

<b>Alloy</b>	<b>Impact energy [J (ft·lb)]</b>
1. 1040 carbon steel	180 (133)
2. 8630 low-alloy steel	55 (41)
3. b. 410 stainless steel	34 (25)
4. L2 tool steel	26 (19)
5. Ferrous superalloy (410)	34 (25)

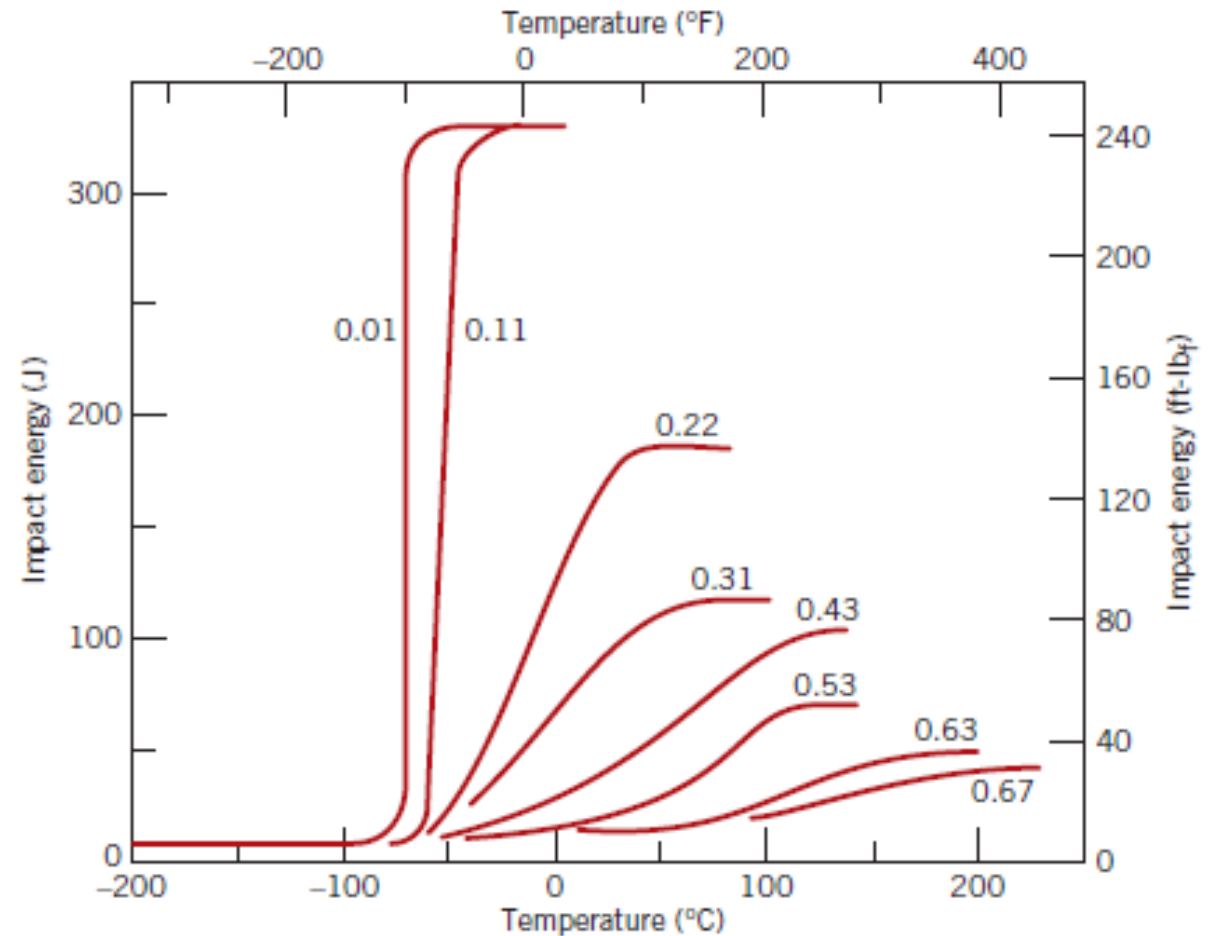
  

<b>Polymer</b>	<b>Impact energy [J (ft·lb)]</b>
<b>General-use polymers</b>	
Polyethylene	
High-density	1.4–16 (1–12)
Low-density	22 (16)
Polyvinylchloride	1.4 (1)
Polypropylene	1.4–15 (1–11)
Polystyrene	0.4 (0.3)

# Lämpötilan vaikutus sitkeyteen

Impaktikokeilla voidaan tutkia lämpötilan vaikutusta sitkeyteen.

Koska sitkeys = venyvyys \* lujuus, niin venyvyyden laskiessa laskee samalla myös sitkeys.



Lämpötilan ja hiilipitoisuuden vaikutus teräksen impaktienergiaan. Sama asia oli aikaisemmassa kalvossa esitetty vetokokeeseen perustuen.

# Osa 4: Yhteenveto

# Lopuksi yleisiä kommentteja

Mekaanisia ominaisuuksia on paljon. Tällä luennolla käsiteltiin tärkeimmät **staattiseen jännitykseen** liittyvät. Murtuminen tapahtuu eri mekanismilla esim. jaksollisen jännityksen tapauksessa (materiaalin väsyminen).

Materiaaliryhmien väliset yleiserot selittyvät sidoksella, mutta plastisen muodonmuutoksen ja murtumisen ilmiöt riippuvat voimakkaasti mikrorakenteesta.

Mekaaniset ominaisuuksien karakterisointi on tarkkaan standardisoitua (SFS/ISO standardeja).

**Lujuus (strength):** Kuinka paljon jännitystä materiaali kestää ennen kuin plastinen muodonmuutos alkaa (myötölujuus) tai materiaali murtuu (murtolujuus). Vetokokeesta.

**Kovuus (hardness):** Paljonko materiaalin pinta vastustaa sisään painautumista/naarmuuntumista. Kovuuskokeista.

**Venyvyys/murtolujuus (ductility):** Paljonko materiaali pystyy venymään plastisesti ennen murtumista. Vetokokeesta.

**Hauraus (brittleness):** Sitkeyden (tai venyvyyden) vastakohta. Vetokokeesta.

**Elastisuus (elasticity):** Paljonko (ja kuinka helposti) materiaali venyy elastisesti. Vetokokeesta.

**Jäykkyys (stiffness):** Kuinka paljon *objekti* vastustaa elastista muodonmuutosta, kimmokerroin vetokokeesta + kappaleen muoto.

**Sitkeys (toughness):** Paljonko energiaa aineen murtaminen vaatii. Vetokokeesta tai impaktikokeista.

**Pehmeys (softness):** Ei suoraa vastausta tästä luennosta. Epävirallisesti joko lujan tai kovan vastakohta.

Materiaaliominaisuuksilla ei yleensä\* ole vastakohtaa:

On olemassa parametri nimeltä tiheys, mutta ei parametria nimeltä “harvuus”.

*Tiheä materiaali: tiheys on suuri*

*Harva materiaali: tiheys on pieni.*

Mitään yleisesti pätevää raja-arvoa ei ole.

\*On olemassa myös poikkeuksia joissa ilmiön luonteen takia on mahdollista määritellä molemmat, esim. sähkön resistiivisyys ja johtavuus.

Alue Shackelfordin kirjasta: luvut 6.1, 6.2, 6.4, 8.4

Lähteet:

Shackelford, Introduction to Materials Science for Engineers

Callister, Materials Science and Engineering an Introduction