

VÄSYMINEN, TAUSTAA

Väsymisellä tarkoitetaan tilannetta, jossa materiaalivaurio tapahtuu **dynaamisen kuormituksen** vaikutuksesta staattista vauriorajaa alhaisemmalla jännitystasolla **suuren** ($10^4 \dots 10^7$) **kuormitusvaihtelumäärän** jälkeen.

Väsymismurtuman syntymiseen vaikuttavat tutkittavan kappaleen pisteen jännitystilän ja materiaaliominaisuuksien lisäksi tarkastelupisteen lähiympäristön jännitystilakenttä (lovivaikutus) ja suuri joukko vaikeasti hallittavia muita tekijöitä (esim. kappaleen koko ja pinnan laatu).

Wöhlerin tutkimukset 1852 – 1869 selvittivät seuraavat perusasiat:

- On tutkittava **kuormitusvaihteluiden lukumäärää** (kestoluku N) eikä kuormitusaikaa.
- Rautametallit kestävät äärettömän monta kuormituskertaa ($N = \infty$), jos jännitykset pysyvät tietyn rajan alapuolella (esim. vaihtolujuus σ_W).

Väsymistutkimuksen alueita

- **Materiaaliopissa** tutkitaan mikrotasolla väsymisilmiön perusmekanismeja ja väsymistapahtumaan liittyviä tekijöitä. Saatuja tuloksia ei voida suoraan hyödyntää lujuuslaskennassa.
- **Klassinen väsymistutkimus** tutkii väsymistä analyyttisesti määritettyyn jännitystilaan perustuen, mutta ottaa muut väsymiseen vaikuttavat tekijät huomioon kokeista ja kokemuksesta saatujen tietojen avulla.
- **Murtumismekaniikka** on n. 50 vuotta tutkimuksen alaisena ollut lujuusopin haara, joka tutkii väsymismurtumaan liittyviä säröjä ja niiden kasvua analyyttisin menetelmin.

Väsymismurtuman syntyvaiheet

- Mikroskooppisten **säröjen synty eli ydintyminen**. Alkusäröt syntyvät tavallisesti paikallisten jännityshuippujen kohdalle (reiät, olakkeet, kierteet, pintaviat, materiaaliaviat).
- **Säröjen kasvu ja yhdentyminen**. Vaihtelevan kuormituksen vaikuttaessa säröt kasvavat vähitellen niiden kärkiin muodostuvien voimakkaiden jännityshuippujen johdosta.
- **Lopullinen äkillinen murtuminen**. Särön kasvun edettyä tarpeeksi pitkälle tapahtuu staattinen murtuminen.

VÄSYTYSKOKEET

Peruskokeiden (veto-puristuskoe, taivutuskoe, vääntökoe) suoritusmenetelmät on standardisoitu (esim. SFS3099, DIN50100). Kokeissa käytetään yleensä sinimuotoisesti vaihtelevaa kuormitusta. Vaihtelevaan kuormitukseen liittyvät **peruskäsitteet** ovat standardin SFS3099 mukaan seuraavat:

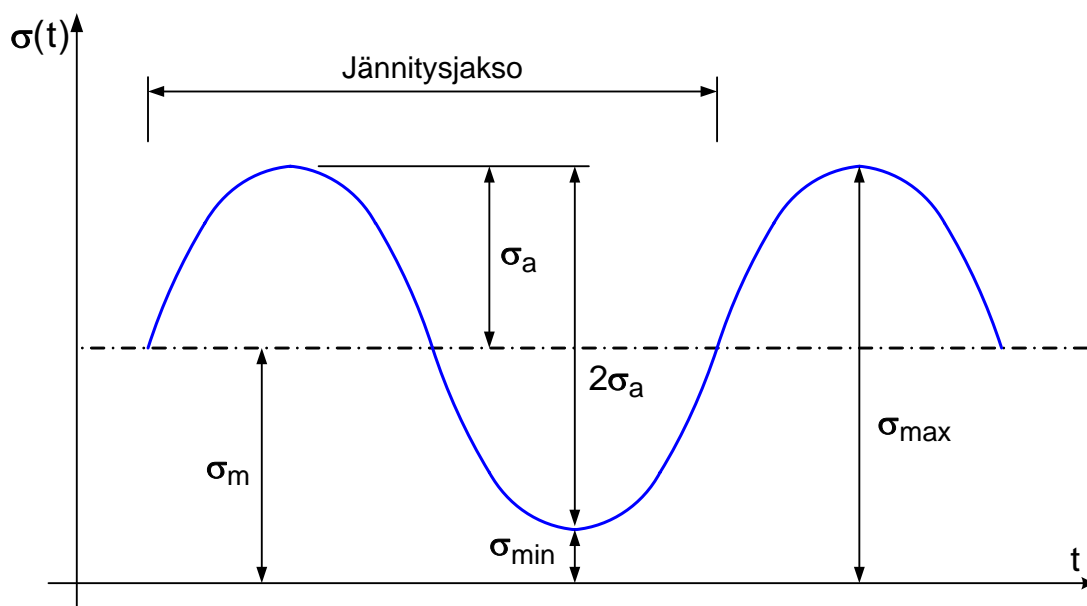
Ylempi rajajännitys σ_{\max} on jännitysjakson suurimman jännityksen arvo.

Alempi rajajännitys σ_{\min} on jännitysjakson pienimmän jännityksen arvo.

Keskijännitys $\sigma_m = \frac{1}{2}(\sigma_{\max} + \sigma_{\min})$ on jännityksen staattinen osuus.

Jännitysamplitudi $\sigma_a = \frac{1}{2}(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})$ on jännityksen dynaamisen osuuden maksimiarvo.

Jännityksen vaihteluväli on $2\sigma_a$ ja **jännityssuhde** $R_s = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$.

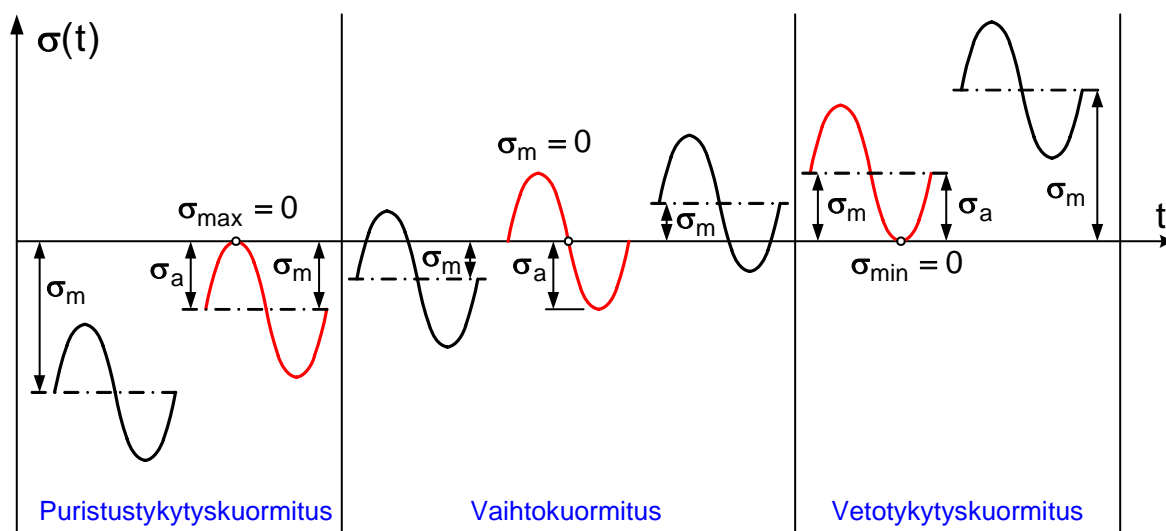


Yllä olevat käsitteet σ_m ja σ_a määritellään harmonisen kuormitusvaihtelun avulla, mutta ne ovat käytettävissä yleisestikin **jaksollisille kuormituksille**. Jaksottomiin ja satunnaisiin kuormituksiin eivät nämä käsitteet sovellu, tällöin on käytettävä esimerkiksi ns. **Minerin kumulatiivista vaurioteoriaa**.

Keskijännityksen ja jännitysamplitudin vaihdellessa syntyy ääretön määrä erilaisia jännitysyhdistelmiä. Tyypilliset tapaukset ovat **vaihtokuormitus** ja **tykytyskuormitus**.

Vaihtokuormitus tarkoittaa kuormitusvaihtelua, jossa jännitys vaihtaa suuntaansa jakson aikana. Normaalijännityksen tapauksessa esiintyy siis sekä veto että puristusjännityksiä. Usein vaihtokuormitus ymmärretään ahtaammin tapaukseksi, jossa keskijännitys $\sigma_m = 0$.

Tykytyskuormitus tarkoittaa kuormitusvaihtelua, jossa jännitys vaikuttaa koko jakson ajan samaan suuntaan. Jos esimerkiksi normaalijännitys on koko jakson ajan vetoa, on kyseessä vetotykytyskuormitus. Usein tykytyskuormitus ymmärretään ahtaammin tapaukseksi, jossa toinen rajajännityksistä σ_{\min} tai σ_{\max} on nolla.



Vaihtolujuus σ_W tarkoittaa suurinta mahdollista jännitysamplitudia σ_a , jonka materiaali kestää väsymättä, kun keskijännitys $\sigma_m = 0$.

Tykytyslujuus σ_T tarkoittaa suurinta mahdollista ylemmää rajajännitystä σ_{\max} , jonka materiaali kestää väsymättä, kun alempi rajajännitys $\sigma_{\min} = 0$.

WÖHLER-KÄYRÄ

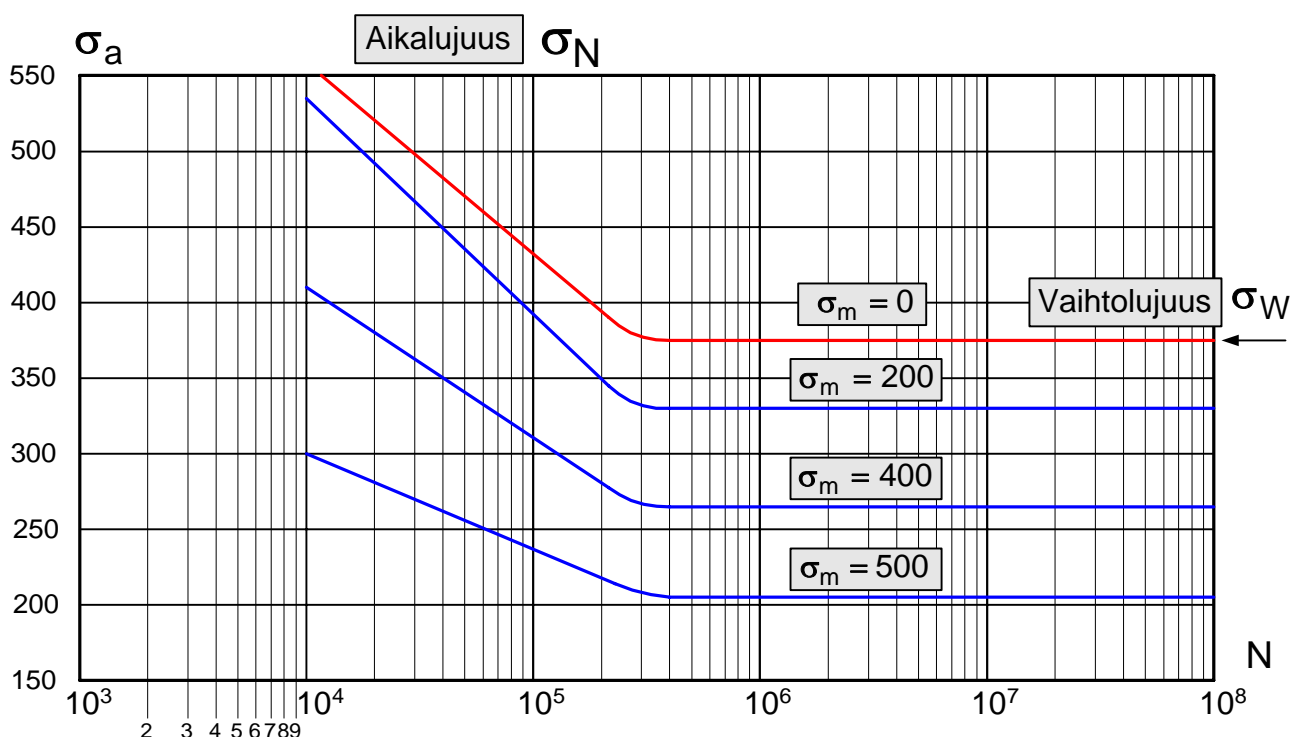
Kestoluku N on jännitysyhdistelmää (σ_m, σ_a) vastaava väsymismurtumaan vaadittava kuormitusjaksojen lukumäärä. Vastaavaa jännitysamplitudia sanotaan **kestorajaksi** tai **aikalujuudeksi** ja merkitään σ_N .

Wöhler-käyrä esittää väsytyскоesarjan tulokset koordinaatistossa, jonka akselina ovat kestopuku N ja jännitysamplitudi σ_a . Kukin käyrä liittyy keskijännityksen σ_m tiettyyn arvoon.

Kestoluvulle käytetään yleensä logaritmista asteikkoa, jolloin metalleilla käyrän kalteva alkuosa eli **aikalujuusalue** on yleensä lähes suora.

Kun amplitudi σ_a on riittävän pieni, ei monilla materiaaleilla (esim. rautamallit) synny väsymismurtumaa, vaikka $N = \infty$ (teoriassa, standardissa $N = 10^7$ tai 10^8 materiaalista riippuen). Wöhler-käyrä on tällöin vaakasuora tietystä jännitysamplitudista alkaen (kuva). Useilla materiaaleilla (esim. alumiini) ei vaakasuoraa osaa kuitenkaan ole, vaan käyrä laskee koko ajan.

Kun keskijännitys $\sigma_m = 0$, sanotaan vaakasuoraa osaa vastaavaa amplitudia **vaihtolujuudeksi** ja merkitään σ_W .

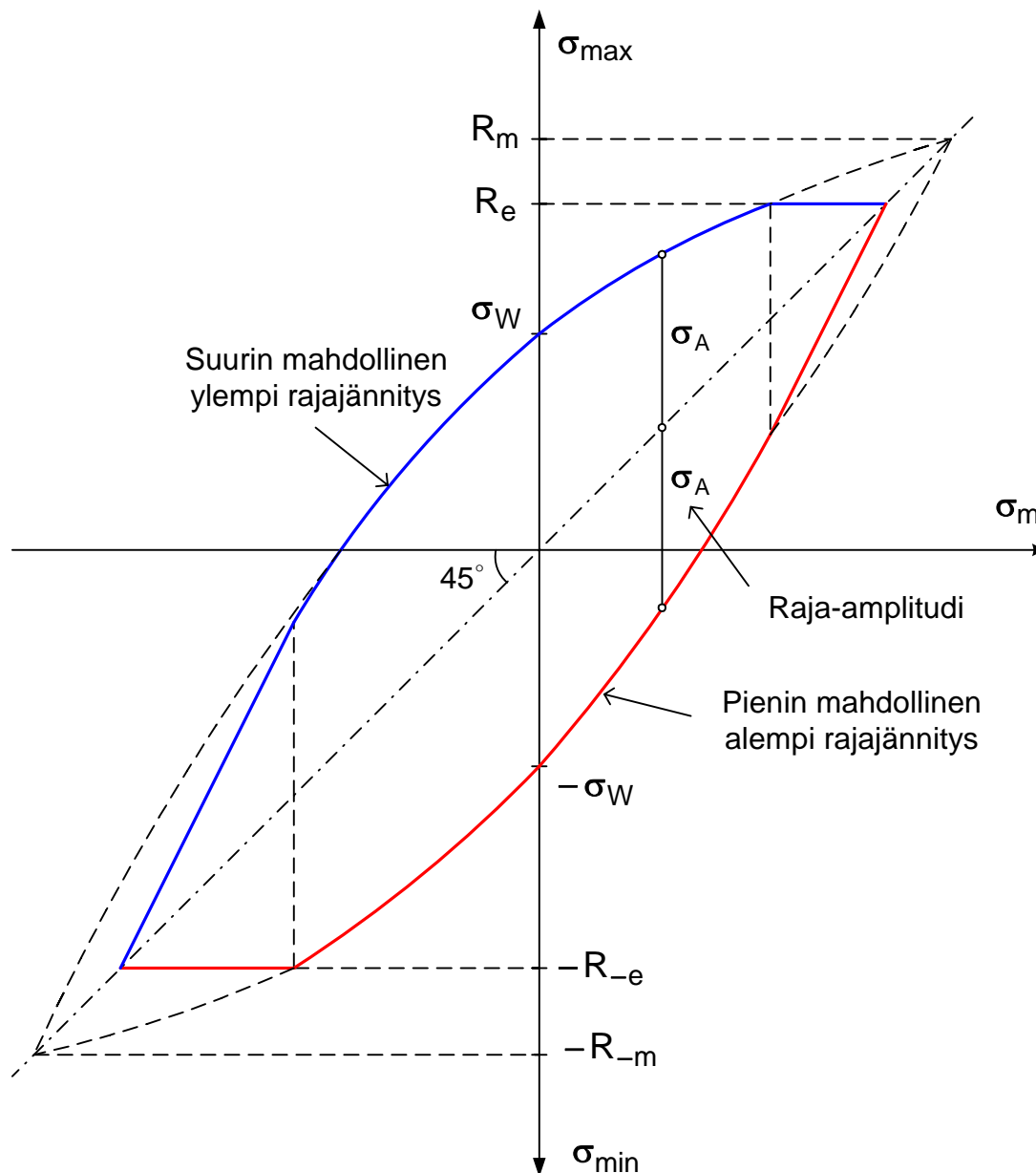


Wöhler-käyrä eli S/N-käyrä (MPa)

SMITHIN PIIRROS

Smithin piirros kuvaa tiettyyn kestopukuun N liittyvää **väsymisrajaa** eli niiden jännitysyhdistelmien (σ_m, σ_a) joukkoa, jotka koekappale korkeintaan kestää murtumatta. Piirroksessa esitetään suurin mahdollinen ylempi rajajännitys sekä pienin mahdollinen alempi rajajännitys keskijännityksen funktiona.

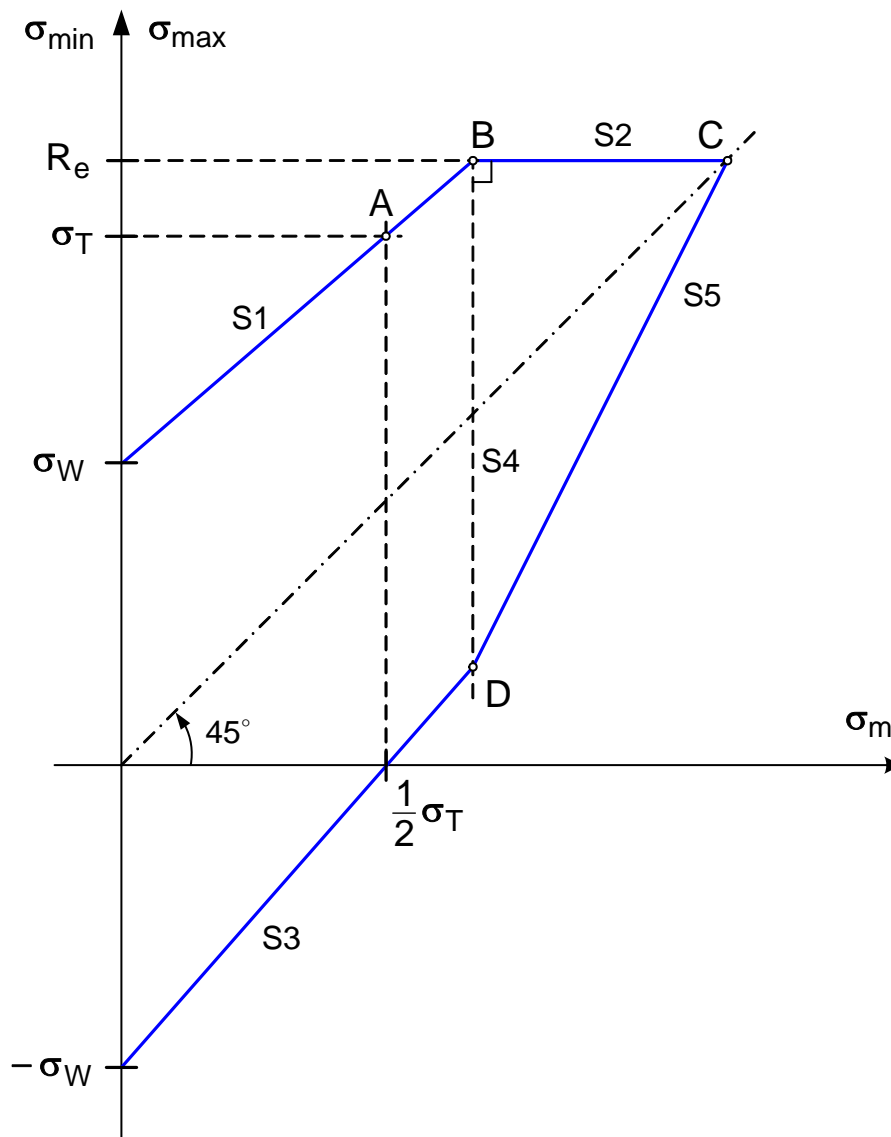
Kyseessä on **väsymislujuspiirros**, jos $N = \infty$ ja kestopukua N vastaava **kestopujuspiirros**, jos $N < \infty$. Kuvassa on koetuloksista saatu Smithin väsymislujuspiirros (vaatii laajan koesarjan).



Raja-amplitudi σ_A on jännitysamplitudi väsymisrajalla. Kun $\sigma_m = 0$ ja kyseessä on väsymislujuspiirros, on voimassa $\sigma_A = \sigma_W$.

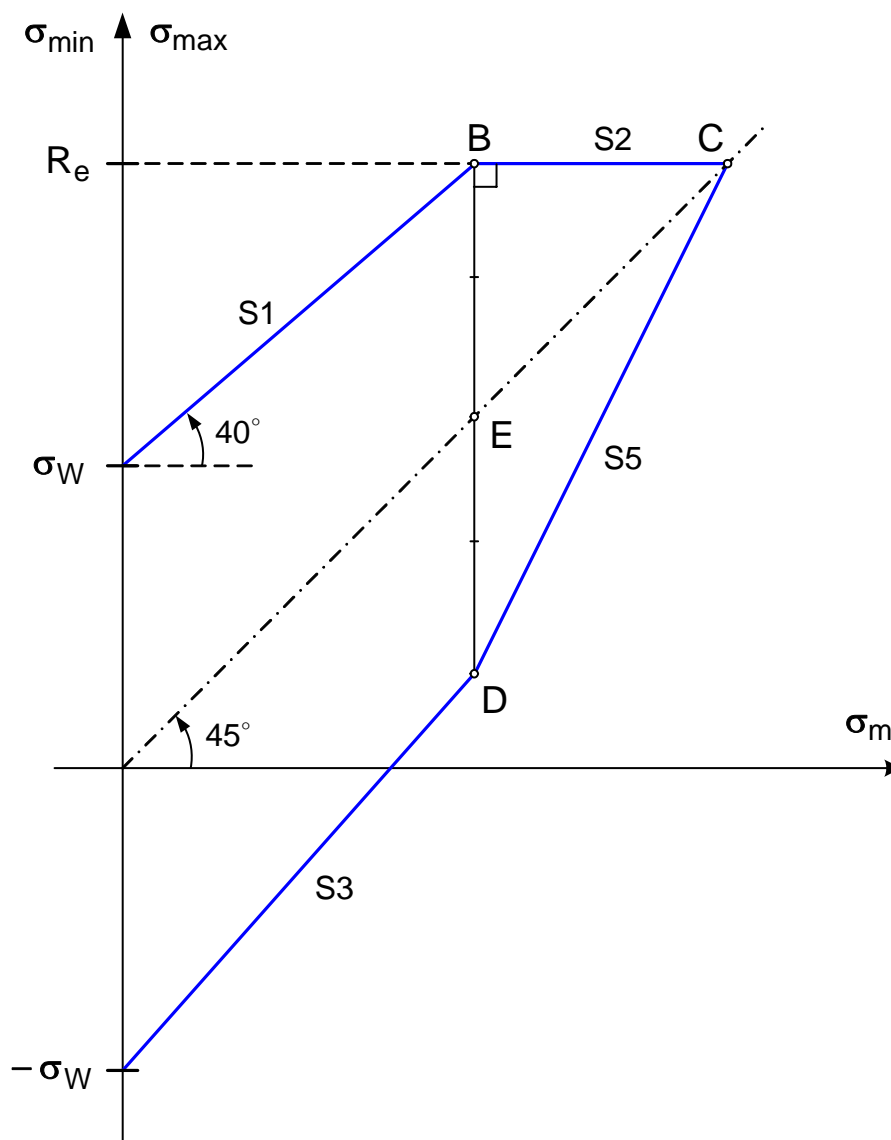
Sitkeän metallin Smithin piirros, tunnetaan σ_W , σ_T ja R_e

1. Piirrä koordinaatisto ja 45° kulmassa oleva suora.
2. Merkitse pystyakselille arvot R_e , σ_T , σ_W ja $-\sigma_W$ sekä vaaka-akselille arvo $\sigma_T/2$. Etsi tykytystä vastaava yläreunan piste A.
3. Piirrä myötörajan R_e kohdalta suora S2, jolloin löytyy piste C. Piirrä vaihtolujuuden σ_W kohdalta tykytystä vastaavan pisteen A kautta suora S1, jolloin löytyy piste B. Piirroksen yläreuna on nyt valmis.
4. Piirrä vaihtolujuuden $-\sigma_W$ kohdalta tykytystä vastaavan kohdan $\sigma_T/2$ kautta suora S3 ja nurkasta B pystysuora S4, joiden leikkauspisteestä löytyy nurkka D. Täydennä alareuna valmiiksi piirtämällä pisteiden D ja C kautta suora S5.



Sitkeän metallin Smithin piirros, tunnetaan σ_W ja R_e

1. Piirrä koordinaatisto ja 45° kulmassa oleva suora.
2. Merkitse pystyakselille arvot R_e , σ_W ja $-\sigma_W$.
3. Piirrä myötörajan R_e kohdalta suora S2, jolloin löytyy piste C. Piirrä vaihtolujuuden σ_W kohdalta suora S1 40° kulmassa, jolloin löytyy piste B. Piirroksen yläreuna on nyt valmis.
4. Piirrä nurkasta B pystysuora ja mittaa etäisyys BE. Sijoita nurkka D siten, että $ED = BE$. Piirrä vaihtolujuuden $-\sigma_W$ kohdalta suora S3 pisteen D kautta ja täydennä alareuna valmiiksi piirtämällä pisteiden C ja D kautta suora S5.

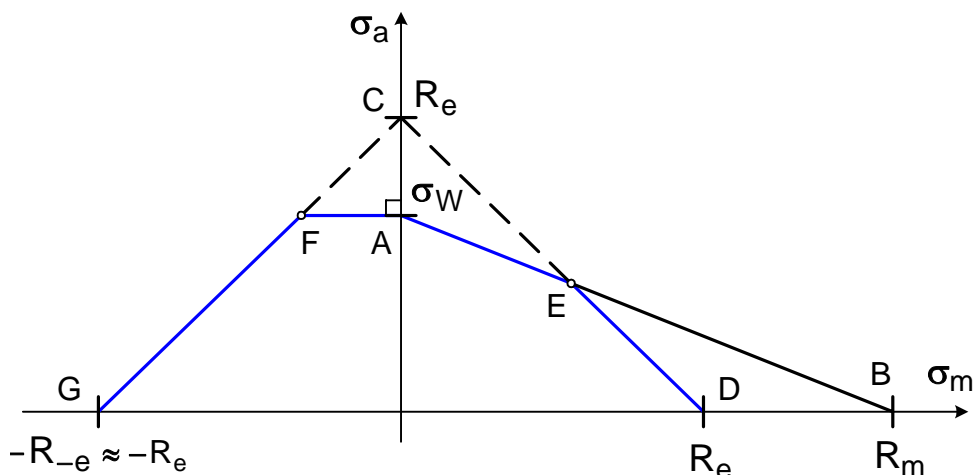


GOODMANIN (HAIGHIN) PIIRROS

Goodmanin piirros on vaihtoehtoinen tapa väsymisrajan kuvaamiseen. Siinä esitetään suurin mahdollinen jännitysamplitudi keskijännityksen funktiona.

Goodmanin piirros on yleisemmin käytettyä Smithin piirrosta yksinkertaisempi ja johtaa suunnilleen samoihin varmuuslaskuihin.

Kuvassa on sitkeän metallin Goodmanin piirros, jonka laatimiseksi on tunnettava vaihtolujuus σ_W , myötöraja R_e ja murtolujuus R_m . Murtoviiva GFAED esittää raja-amplitudeja σ_A .



Sitkeän metallin Goodmanin piirroksen laatiminen (SFS3099)

1. Piirrä σ_m - σ_a -koordinaatisto ja merkitse pystyakselille σ_W ja R_e sekä vaaka-akselille $-R_{-e}$, R_e ja R_m .
2. Piirrä myötämisen kieltävät viivat CD ja CG. Piirrä väsymisen kieltävät viivat AB ja AF. AF on vaihtolujuuden kohdalta piirretty vaakasuora viiva.

Standardin mukaisesti piirretty Goodmanin piirros suhtautuu vetokeskijännityksiin hieman varovaisemmin kuin puristuskeskijännityksiin. Tässä on pieni ero verrattuna vastaavaan Smithin piirrokseen, jossa ei tarkastella erikseen veto- ja puristuskeskijännityksiä, vaan oletetaan piirros symmetriseksi.

PINNAN LAADUN JA KAPPALEEN KOON VAIKUTUS

Raja-amplitudeja pienennetään väsymislujuspiirroksissa kokemusperäisillä **pinnan laadun kertoimella** κ ja **mittakertoimella** m .

Smithin piirros:

Lasketaan ensin **redusoitu vaihtolujuus**

$$\sigma_{Wred} = \kappa \cdot m \cdot \sigma_W$$

Mitataan sitten jana BD ja lasketaan **redusoitu jännityksen vaihteluväli**

$$B'D' = \kappa \cdot m \cdot BD$$

Kavennetaan piirrosta kuvan mukaisesti ($B'E = ED'$). Kavennus voidaan tehdä myös **tykytyslujuuden** σ_T kohdalta, jos se tunnetaan.

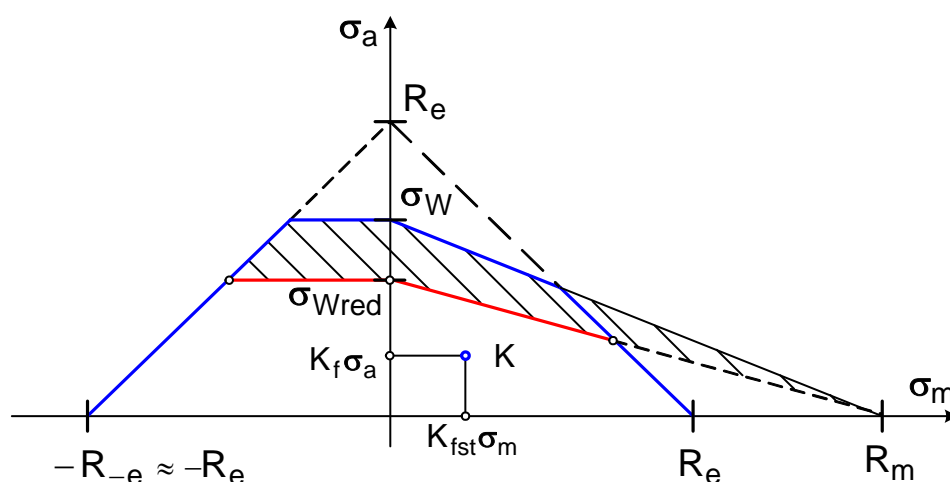
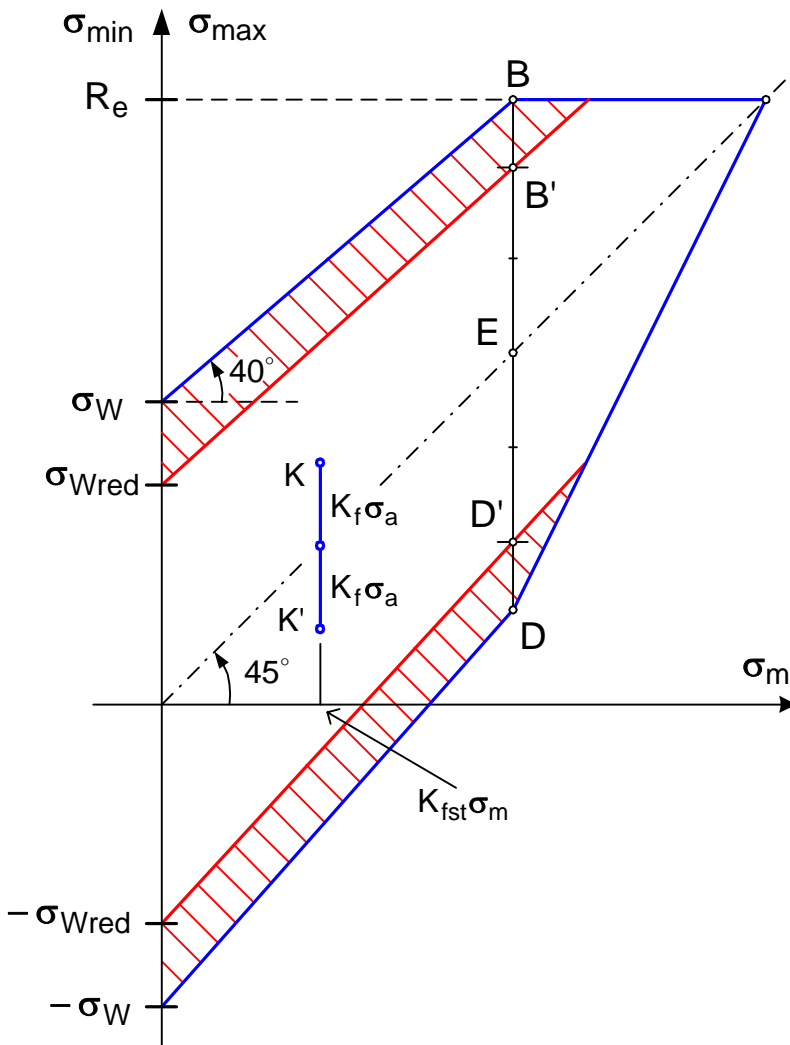
KK' on tarkasteltavaa yhdistelmää kuvaava **toimintajana**. Luvallisen toimintajan tulee sijaita kavennetun piirroksen sisäpuolella.

Goodmanin piirros:

Lasketaan **redusoitu vaihtolujuus**

$$\sigma_{Wred} = \kappa \cdot m \cdot \sigma_W$$

ja alennetaan raja-amplitudeja kuvan mukaisesti.



K on tarkasteltavaa yhdistelmää kuvaava **toimintapiste**. Luvallisen toimintapisteen tulee sijaita redusoidun rajan alapuolella.

JÄNNITYSHUIPPUJEN VAIKUTUS

Loven muotoluku

$$K_t$$

$$K_t = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\text{nim}}}$$

tai

$$K_t = \frac{\tau_{\max}}{\tau_{\text{nim}}}$$

Riippuu loven **geometriasta** ja **kuormitustavasta**.
Tavalliset tapaukset löytyvät **alan kirjallisuudesta**.

Loviherkkyysluku

$$q$$

Riippuu mm. loven **pohjan pyöristyssäteestä** ja materiaalin **raekoosta**.

$$0 \leq q \leq 1$$

Rakenneteräs $q \approx 0,6 \dots 0,8$

Valurauta $q \approx 0 \dots 0,2$

Loven vaikutusluku

$$K_{\text{fst}}$$

ja

$$K_f$$

a) **Staattinen vaikutusluku** $K_{\text{fst}} = \frac{R_{m,\text{sileä}}}{R_{m,\text{lovi}}}$.

Hauras aine: $K_{\text{fst}} \approx K_t$ (poikkeus: valurauta $K_{\text{fst}} \approx 1$).

Sitkeä aine: $K_{\text{fst}} \approx 1$.

b) **Dynaaminen vaikutusluku** $K_f = \frac{\sigma_{W,\text{sileä}}}{\sigma_{W,\text{lovi}}}$.

Riippuu loven geometriasta, kuormitustavasta ja materiaalista.
Yleensä dynaaminen vaikutusluku lasketaan kaavasta:

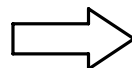
$$K_f = 1 + q(K_t - 1)$$

Lovivaikutuksen huomioonottaminen

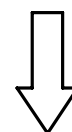
1. Lasketaan nimellisjännitykset.

Keskijännitys	$\sigma_{m,\text{nim}}$
Jännitysamplitudi	$\sigma_{a,\text{nim}}$

2. Korotetaan jännityksiä loven vaikutusluvulla.



$K_{\text{fst}} \cdot \sigma_{m,\text{nim}}$
$K_f \cdot \sigma_{a,\text{nim}}$



3. Määritetään varmuusluku väsymislujuuspiirrokselta.

VARMUUSLUVUN MÄÄRITYS

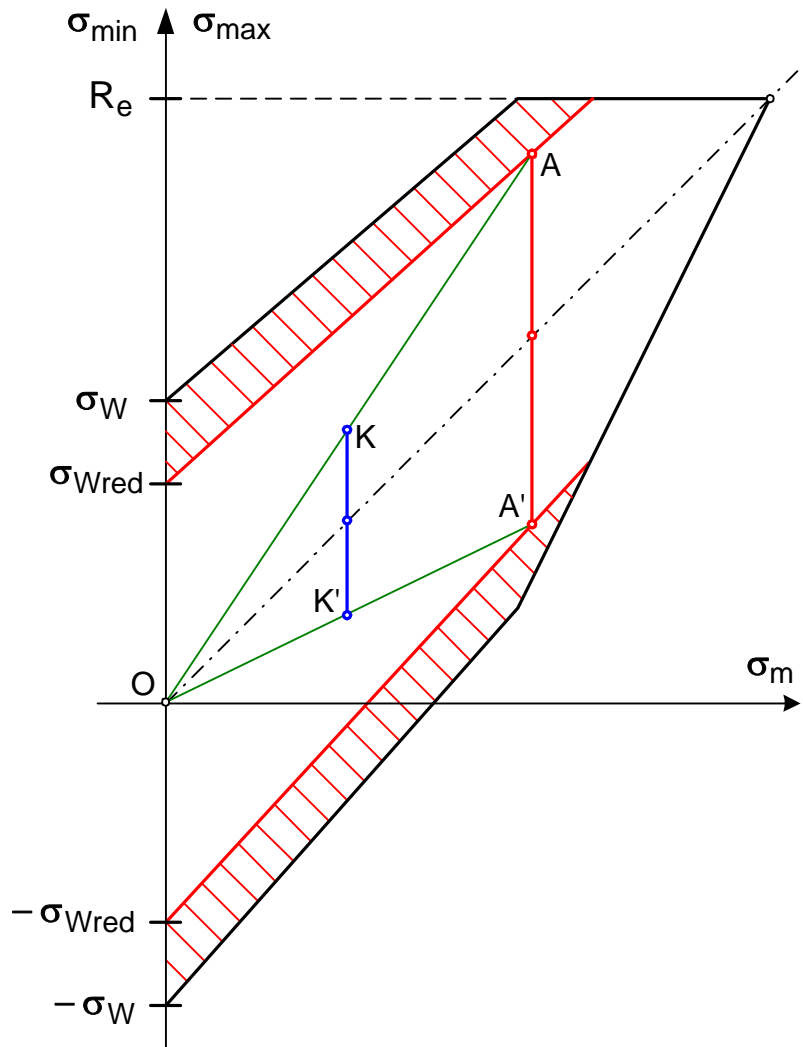
1. σ_m ja σ_a kasvavat samassa suhteessa

1.1 Smithin piirros

KK' on tarkasteltava toimintajana.

AA' on toimintajana, joka vastaa suurinta mahdollista keskijännitystä ja jännitysamplitudia.

$$\text{Varmuusluku } n = \frac{OA}{OK}$$



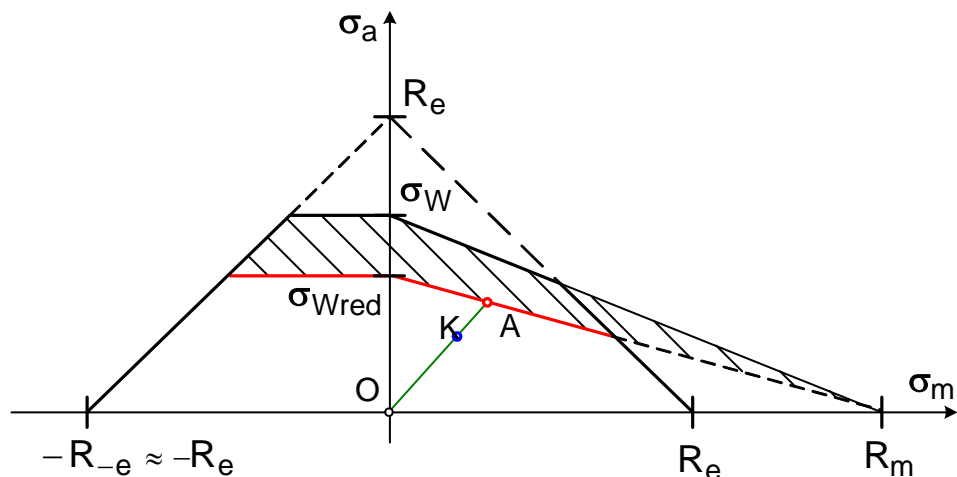
1.2 Goodmanin piirros

K on toimintapiste.

A on toimintapiste, joka vastaa suurinta mahdollista keskijännitystä ja jännitysamplitudia.

Varmuusluku

$$n = \frac{OA}{OK}$$



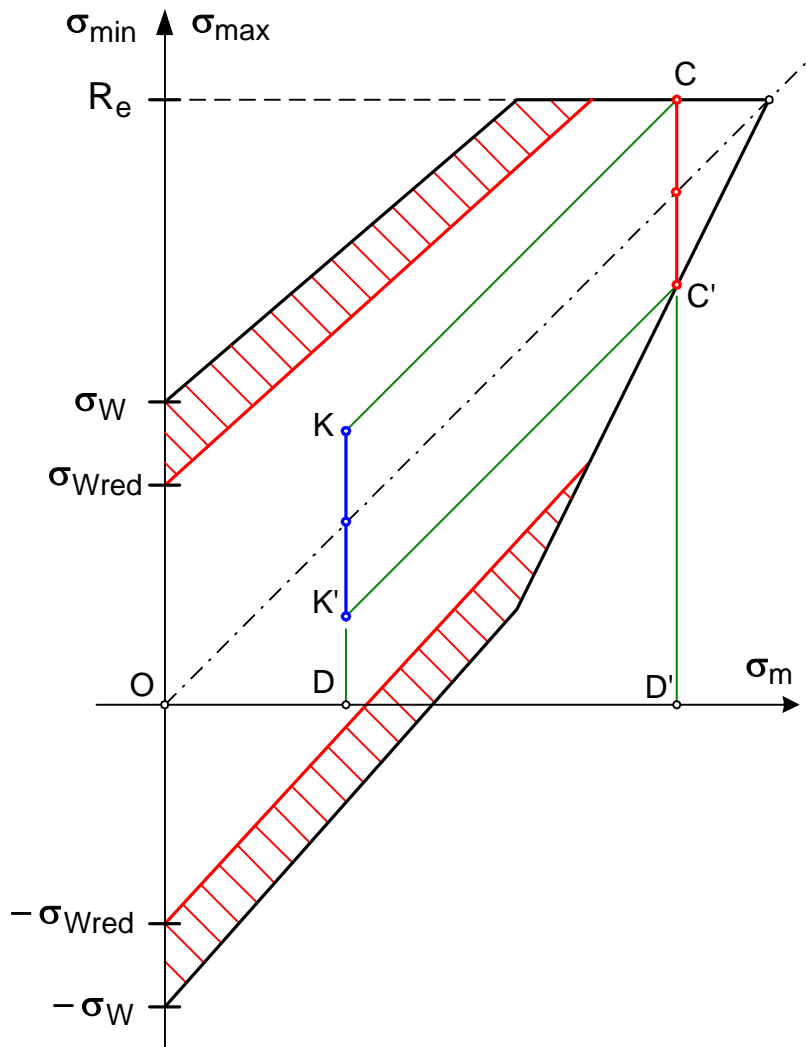
2. Vain σ_m kasvaa

2.1 Smithin piirros

KK' on tarkasteltava toimintajana.

CC' on toimintajana, joka vastaa suurinta mahdollista keskijännitystä.

$$\text{Varmuusluku } n = \frac{OD'}{OD}$$

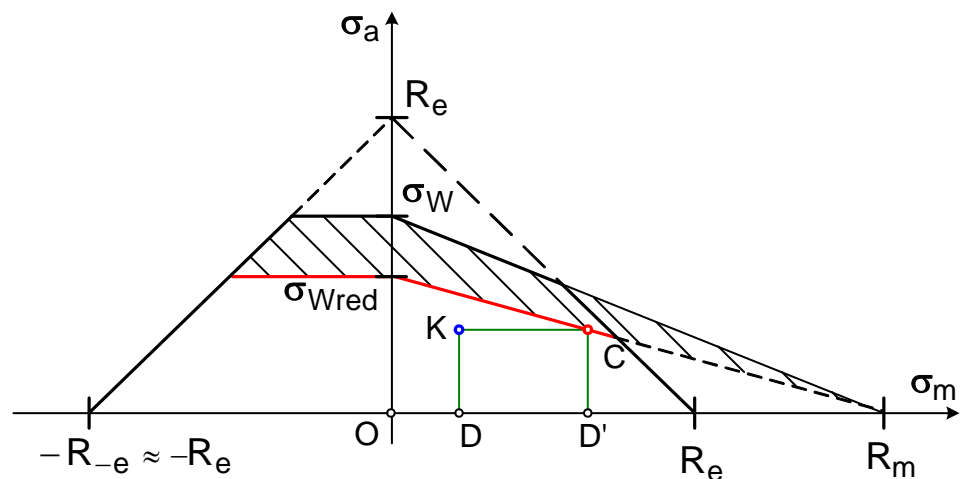


2.2 Goodmanin piirros

K on toimintapiste.

C on toimintapiste, joka vastaa suurinta mahdollista keskijännitystä.

$$\text{Varmuusluku } n = \frac{OD'}{OD}$$



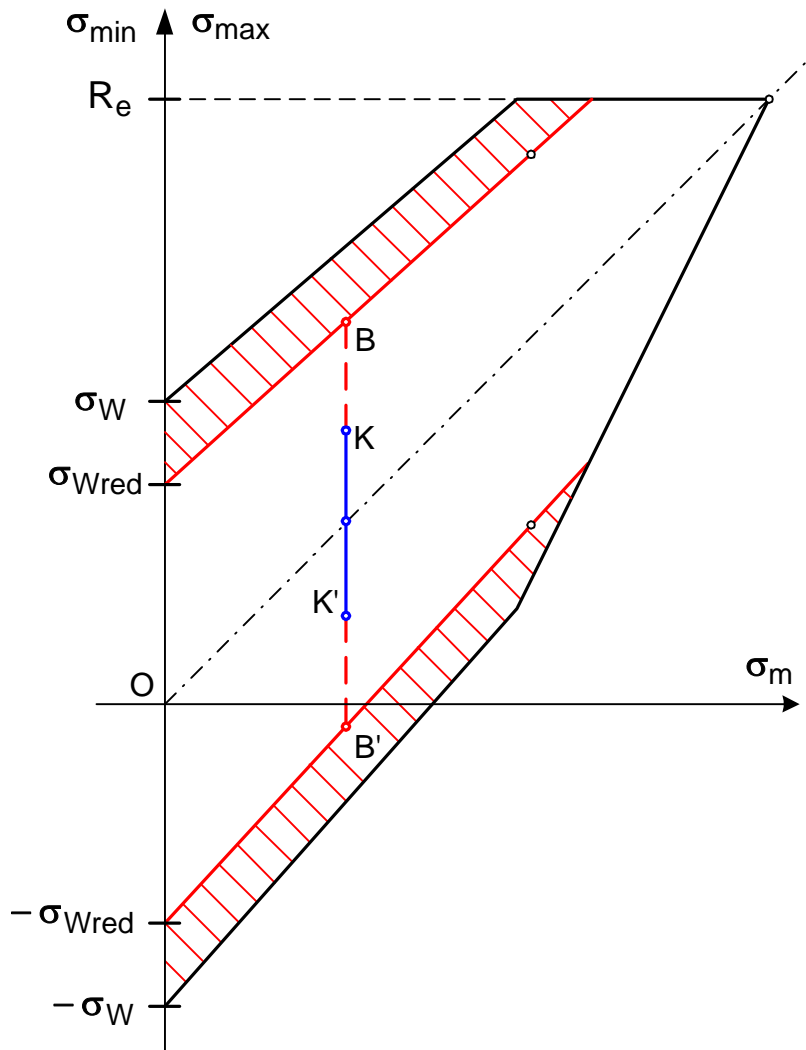
3. Vain σ_a kasvaa

3.1 Smithin piirros

KK' on tarkasteltava toimintajana.

BB' on toimintajana, joka vastaa suurinta mahdollista jännitysamplitudia.

$$\text{Varmuusluku } n = \frac{BB'}{KK'}$$



3.2 Goodmanin piirros

K on toimintapiste.

B on toimintapiste, joka vastaa suurinta mahdollista jännitysamplitudia.

Varmuusluku

$$n = \frac{OE'}{OE}$$

