

A fáradási jelenség vizsgálata, hatások, a fáradásra vonatkozó Eurocode szabvány ismertetése

Tartalomjegyzék:

- Bevezetés
- Ismétlődő terhelés jellemzői
- Wöhler-kísérlet, Wöhler-görbe
- Fáradást befolyásoló tényezők
- A törés kialakulása
- Fáradási diagramok
- Üzemi feszültség
- Leszámlálási módszerek
- Károsodási hipotézis
- Üzemi feszültségek vizsgálata az Eurocode 3 szerint

Bevezetés

- Olyan szerkezeti részek, elemek, amelyeknek az igénybevétele sokszor és nagymértékben változik, bizonyos idejű használat után eltörnek még akkor is, ha az üzemük közben előforduló legmagasabb átlagfeszültség értéke jóval a statikus törőszilárdság alatt marad.
- Lágycél huzal hajtogató kísérlete => Minél nagyobb a maradó alakváltozás mértéke, annál előbb törik el a huzal. Ha az anyag csak rugalmas alakváltozásokat szenved, a törés elmarad. Levonható következtetések:
 - A szilárd anyag eltöréséhez az anyagszerkezet helyi megváltoztatására, a belső kötőerők megszüntetésére van szükség, ami munkavégzést igényel.
 - Ha a külső erők csak rugalmas alakváltozást tudnak létrehozni, amelyek az erőhatás megszűnése után megszűnnek, s ezáltal a befektetett munka teljes egészében megtérül, nem jön létre törés!
 - Tehát az abszolút rugalmas anyag nem „fáradhat”, azaz fáradt törés az anyagban csak maradó alakváltozások halmozása (energia befektetés) útján hozható létre.
- A jól tervezett építőmérnöki szerkezeteknél ritka, hogy az átlagfeszültség túllépje az arányossági határt. Ha ez mégis előfordul, a fáradás viszonylag gyorsan, kevés ismétlődési szám mellett (LCF= kisciklusú) jön létre.
Fáradt törések ott tudnak kialakulni, ahol a lokálisan meginduló képlékeny alakváltozások ezt lehetővé teszik => hegesztések (sajátfeszültség), egyéb feszültségcsúcsok, bemetsződések.
- Fáradt törés ott jön létre, ahol az anyagban már kezdettől fogva hibák, repedések, bemetsződések voltak, vagy ahol az anyag, külső mechanikai hatások következtében károsodott, s ugyanakkor feszültségcsúcsok is fellépnek.
A feszültséggyűjtő helyeket kerülni kell: varrathalmozás, csavarozott (szegecselt) szerkezetnél a lyuk széle a feszültségcsúcs helye.
- A fáradást kiváltó igénybevételek dinamikus terhekből származnak pl. vasúti hidak vonatterhe, darupályatartó daruterhe. => Wöhler, vasúti tengelyek vizsgálata 1858.
- Ismétlés számok
 - kutatások azt mutatják, hogy acél próbatesteknél a 10^7 szerez ismétlési számhoz tartozó tartamszilárdság jó közelítéssel azonos a fáradási szilárdsággal
 - $2 \cdot 10^6$ tartamszilárdság a hidak fáradási vizsgálataihoz használt határérték
 - magasépítési szerkezetekre 10^5 ismétlésszám => jól tervezett építőmérnöki szerkezetnél 10^4 -nél nagyobb számú feszültségingadozás okozhat csak törést

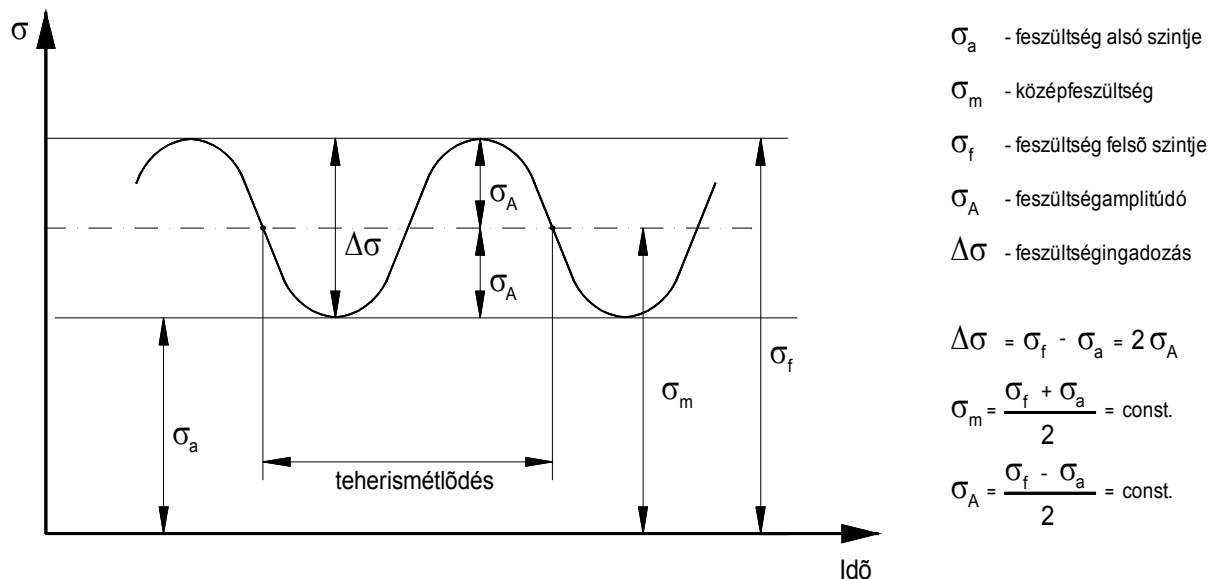
A következőkben leírtak a DIN 15018, DIN 4132 szabványokon alapulnak.

Általános

Köztudott, hogy állandó teherváltozásoknak kitett szerkezeti elemek már alacsonyabb igénybevételek mellett tönkremennek, mint azok, melyek az adott teherszinten csak egyszer terheltek. Az ismételt terhelések következtében az anyagban olyan változások következnek be, melyek az anyag „kifáradásához” vezetnek. Egy erre utaló vizsgálat általában csak azoknál a szerkezeteknél szükséges, melyek terhelése eltér a kvázistatikus terheléstől, jellemzően pl. vasúti híd, darupályatartó.

A Wöhler-kísérlet

A legfontosabb élettartamra vonatkozó vizsgálat a Wöhler-kísérlet. (A fáradásra vonatkozó első összefüggéseket 1858-ban Wöhler fogalmazta meg.) A leginkább – leggyakrabban - szinuszos terhelésű kísérlet során egy konstans közép feszültség (σ_m) körül a feszültség egy szintén konstans amplitúdóval (σ_A) váltakozik. A Wöhler-kísérletet nevezik egylépcsős kísérletnek is, mert a vizsgált próbatest a törésig egy állandó közép feszültség-szinten (σ_m) terhelte. A szinuszos terhelésű kísérletben általánosan használt jelöléseket az 1. ábra mutatja.



1. ábra Periodikus terhelés

Feszültségarány κ és az igénybevétel módja

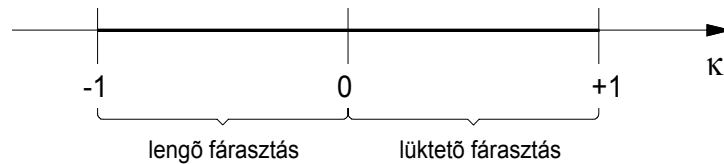
A Wöhler-kísérlet alapját képező arányokat a σ_m , σ_A és $\Delta\sigma$ kívül a κ , σ_a , σ_f feszültségarányokkal is kifejezhetjük. Ahol κ feszültségarány definíciója:

$$\kappa = \pm \sigma_{\min} / \pm \sigma_{\max}$$

ahol σ_{\min} = abszolút értékben a legkisebb feszültség

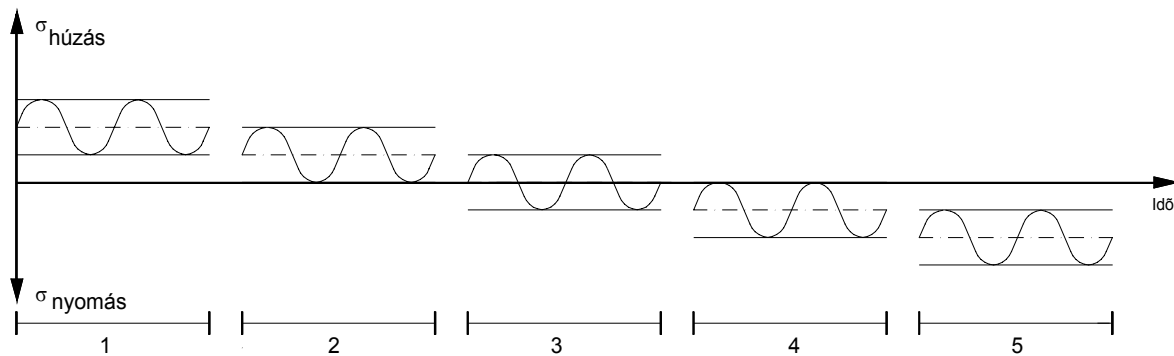
σ_{\max} = abszolút értékben a legnagyobb feszültség

Mindkét értéknél figyelembe kell azonban venni az előjelet, azaz hogy az adott feszültség húzó, vagy nyomó. A feszültségarány (κ) az igénybevétel módjától függően -1 és 1 közötti értékeket vehet fel. Pozitív κ érték mellett lüktető fárasztás, negatív mellett - váltakozó előjelű terhelés - lengő fárasztás lép fel.



2 ábra A feszültségarány definíciója

Az ismétlődő terhekből adódó lehetséges igénybevételi módokat a 3 ábra mutatja.



3 ábra Különböző igénybevételi fajták

1. húzó-lökhető igénybevétel	$\sigma_f > 0$	$\sigma_a > 0$	$0 < \kappa \leq +1$
2. húzó-lökhető igénybevétel	$\sigma_f > 0$	$\sigma_a = 0$	$0 = \kappa$
3. tisztán lengő igénybevétel	$\sigma_f = -\sigma_a$		$\kappa = -1$
4. nyomó-lökhető igénybevétel	$\sigma_a = 0$	$\sigma_f < 0$	$\kappa = 0$
5. nyomó-lökhető igénybevétel	$\sigma_f < 0$	$\sigma_a < 0$	$0 < \kappa \leq +1$

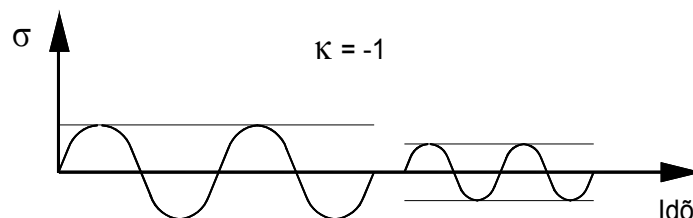
A Wöhler-görbe

Általános

Több egylépcsős kísérlet kiértékeléseként megkapható a Wöhler-görbe. A Wöhler-görbét csoportokba sorolhatjuk.

a.) Állandó feszültségarányú Wöhler-görbe

Egy választott feszültségarány (κ) kerül betartásra az összes kísérletnél – lásd példaként 4 ábra. Az adott feszültségarány mellett a kísérletek során a próbatestek különböző feszültségamplitúdóval (σ_A) terheltek a törésig.

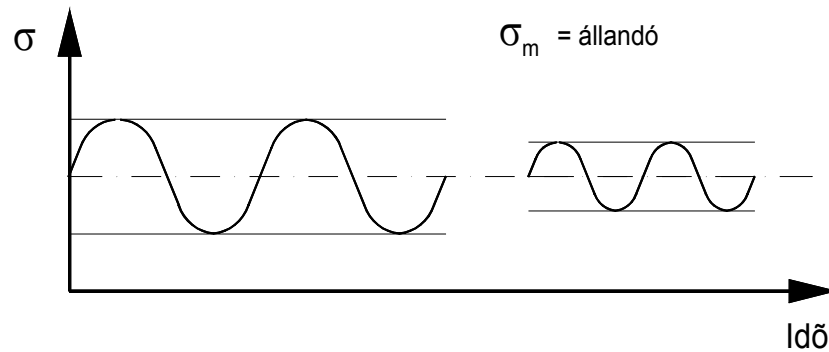


4 ábra Lengő igénybevétel

A töréshez tartozó ismétlődési számhoz (N) - kritikus teherismétlési szám - a feszültségamplitúdó (σ_A) kerül hozzárendelésre.

b.) Állandó közép feszültségű Wöhler-görbe

Állandó közép feszültség (σ_m) mellett – minden kísérletben azonos – a próbatestek különböző feszültségamplitúdóval (σ_A) terheltek a törésig. A kísérlet során a feszültségváltozásokat az 5. ábra szemlélteti.



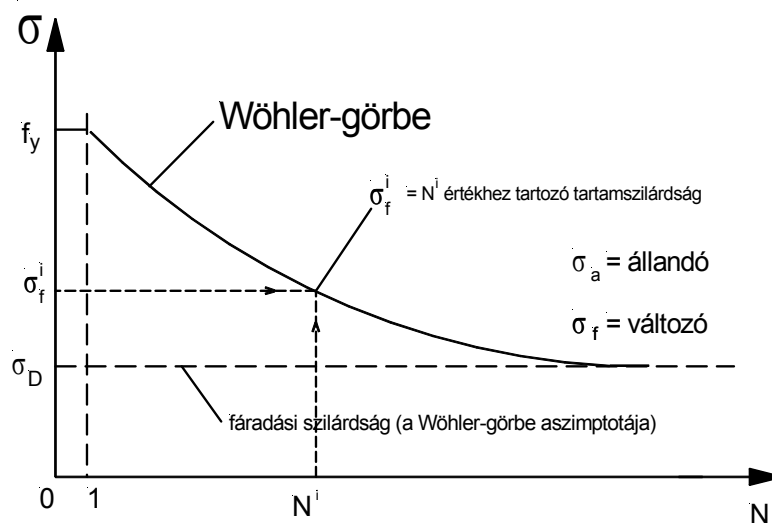
5. ábra Lükettő igénybevétel

c.) Állandó alsó feszültség szintű Wöhler-görbe

Állandó alsó feszültség (σ_a) mellett a próbatestek különböző felső feszültségi szinten (σ_f) terheltek a törésig. Egy ilyen jellegű kísérletsorozat Wöhler-görbéjét a 6. ábra szemlélteti.

A Wöhler-görbe ábrázolása

A Wöhler-görbét szokás szerint az egyik, vagy mindkét tengelyen logaritmus koordináta rendszerben ábrázolják – lásd 8. ábra.

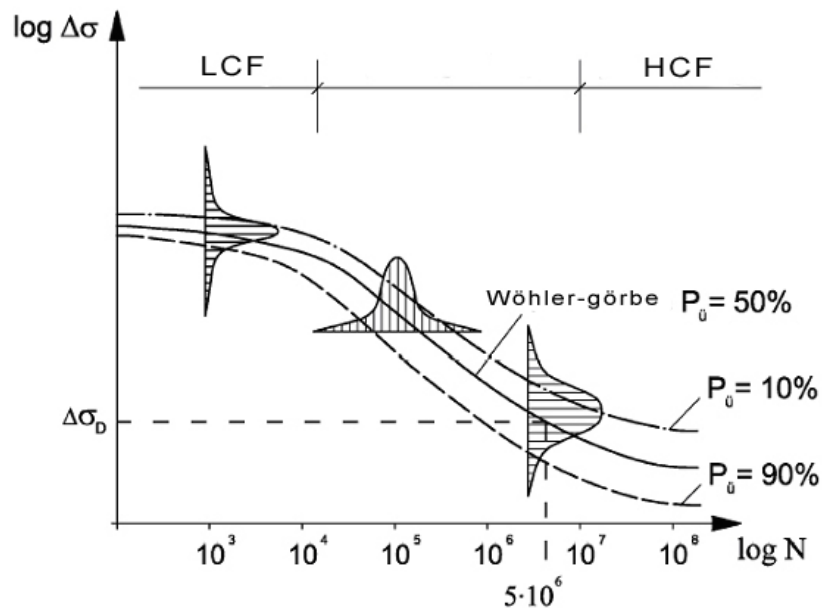


6. ábra Wöhler-görbe

Amennyiben egy szerkezet egy pontjában a lengő igénybevételekből ismételt képlékeny alakváltozások lépnek fel ($\Delta \varepsilon_{pl}$), akkor ezek N -szeres ismétlődés után a szerkezeti elem fáradttöréséhez vezetnek. A töréshez tartozó N ismétlődési szám annál kisebb, minél nagyobb a kialakuló alakváltozások „lengése” ($\Delta \varepsilon$).

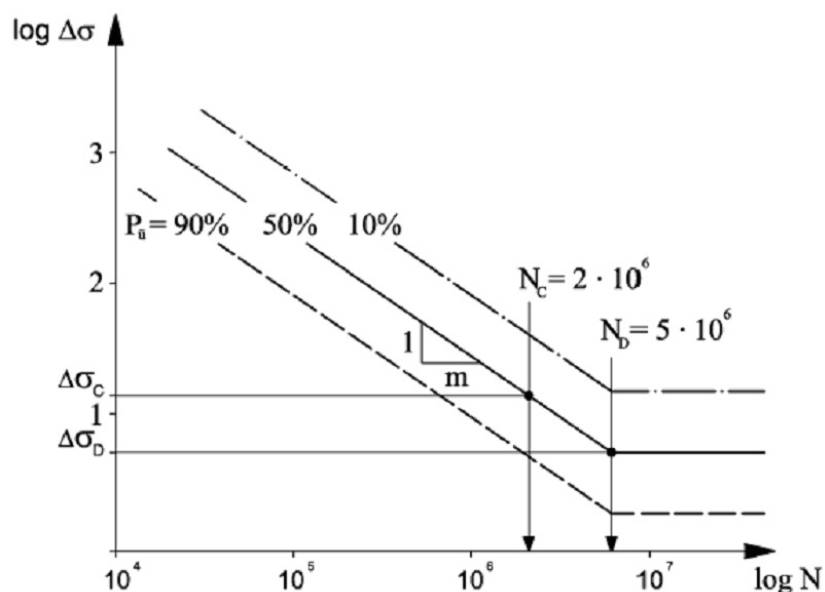
Ám létezik egy olyan „alakváltozási küszöb” $\Delta \varepsilon_D$ – és vele összetartozó $\Delta \sigma_D$ -, mely mellett tetszőlegesen sok ismétlődés után sem lép fel törés.

A Wöhler-görbék felvételéhez előre megadott igénybevételi módon (pl. $\kappa = \text{állandó}$) több azonosan kialakított próbatestet terhelnek törésig, illetve egy megadott ismétlődési számig, melynél már nem következik be törés. Ezekből az adatokból a Wöhler-görbéhez az ismétlési számot és feszültség szintet használjuk fel. A 7. ábra állandó feszültségarány ($\kappa = \text{állandó}$) mellett felvett Wöhler-görbét mutat.



7. ábra Wöhler-görbe

- LCF = low cycle fatigue, kisciklusú fáradási szilárdság, az ismétlésszám felső határa 10^4 , a törés képlékeny folyásként jelentkezik.
- $10^6 - 10^7$ ismétlésszám közötti tartomány, a Wöhler-görbe legerősebb mértékben eső szakasza,
- HCF = high cycle fatigue, nagyciklusú fáradási szilárdság, $10^6 - 10^7$ ismétlésszám felett, amely feszültség szinttől kezdődően nem következik be fáradt törés.



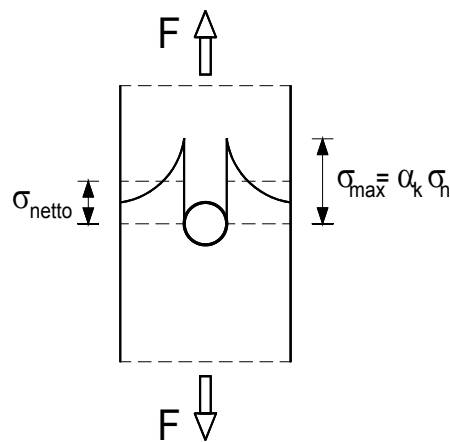
8. ábra A fáradási szilárdságok értelmezése az Eurocode 3 szerint

A fáradás, fáradttörés kialakulásában a feszültségcsúcsok szerepe jelentős.

Ismétlődő terhek vizsgálata kapcsán legtöbbször csak a használati terhek vizsgálata érdekes, hiszen a szerkezeti elem élettartama alatt csak ezeknek a terheknek az ismétlődési száma jelentős. A használati terhekből származó elméleti feszültségek - számításal meghatározható feszültségek - jellemzően még a rugalmas tartományban a folyáshatár (f_y), sőt gyakran az arányossági határ alatt maradnak. Anyaghibák, bemetsződések (bemetsződés alatt a helyi hibákat értjük), lyukak, hegesztési varratok környezetében azonban ez az elméleti feszültség túllépheti a folyáshatárt és helyi – az igénybevétel módjától függően – képlékeny alakváltozáshoz vezethet.

Amennyiben az alakváltozások ($\Delta\varepsilon$) kismértékűek és helyileg kötöttek, úgy azokat közelítésképpen rugalmas módszerekkel is meghatározhatjuk, hiszen az őket körülvevő rugalmas anyag terjedésüket meggátolja.

A feszültségek tényleges alakulását egy húzott lyukgyengített elemen a 9 ábra mutatja.

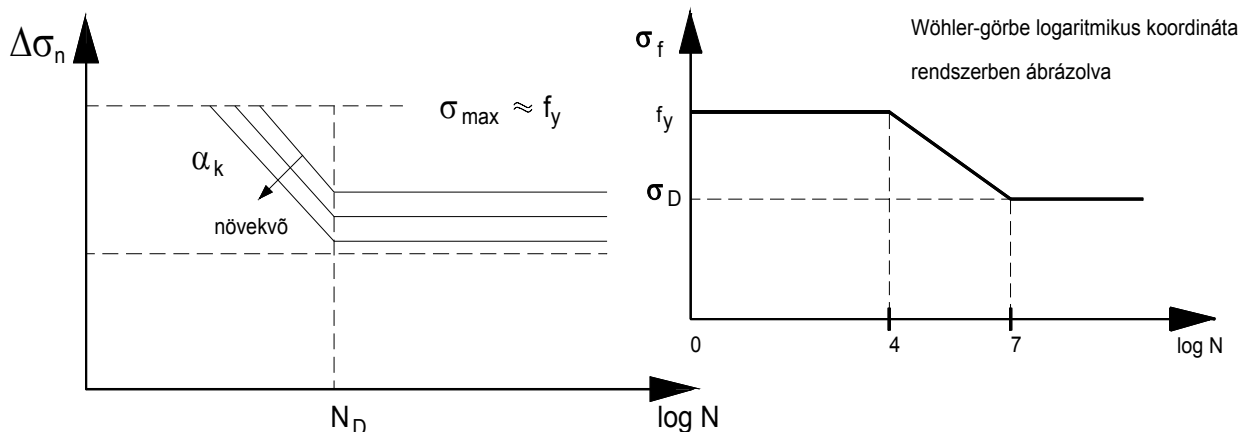


9 ábra Feszültségcsúcsok alakulása húzott, lyukgyengített próbatestben

Ha az alakváltozások szélső értékei ($\Delta\varepsilon$) rugalmas módszerekkel meghatározhatók, akkor ezekből szintén rugalmas módon meghatározható egy fiktív lengő feszültség $\Delta\sigma = E * \Delta\varepsilon$.

A fáradt törés repedésként ott lép fel, ahol a legnagyobb a fiktív lengő feszültség értéke. Ezt a számított feszültségek ingadozásából $\Delta\sigma_n$ - a bemetsződések figyelembevétele nélkül - és az α_k alaki tényezőtől kaphatjuk meg.

$$\Delta\sigma = \alpha_k * \Delta\sigma_n \implies \Delta\sigma_n = 1 / \alpha_k * f(N)$$



10 ábra Az alaki tényezők és a Wöhler-görbék közötti összefüggés

A fáradás tartósságra gyakorolt hatása

Általános

Egy próbatest fáradására a legnagyobb hatással a következő paraméterek vannak:

- A bemetsződések és hibák mértéke (a szerkezeti elem hibaosztályba sorolása)
- A feszültség-ingadozás mértéke $\Delta\sigma$
- A közép-feszültség értéke σ_m
- Saját-feszültségek

A próbatest fáradására hatással vannak még a következő paraméterek:

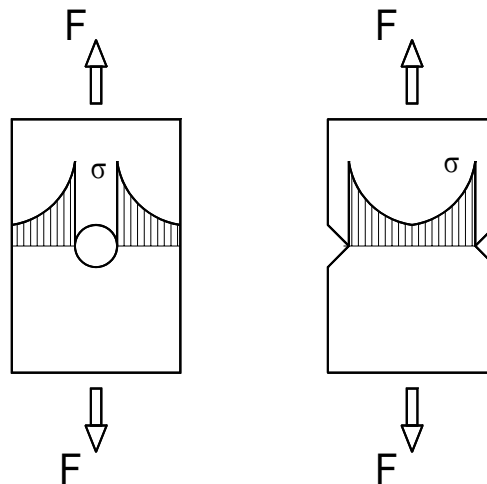
- Előterhelés (előidézheti a σ_D növekedését)
- Terhelési frekvencia (csekély hatású)
- Hőmérséklet (magasabb hőmérsékletnél csökken σ_D)
- A próbatest vastagsága
- A hegesztés módja

Bemetsződések és hibák hatása - hibaosztály

A feszültségek nagysága és eloszlása egy szerkezeti elemben nem csak a terheléstől, a szerkezeti elem keresztmetszeteitől függ. A feszültségek alakulása szempontjából sokkal inkább a keresztmetszet-változások és bemetsződések hatása jellemző. Ezek a bevágások jelölik ki a legveszélyeztetettebb – kritikus – keresztmetszeteket. Hatásukra erős helyi feszültségcsúcsok alakulnak ki, nemritkán térbeli feszültségállapottal.

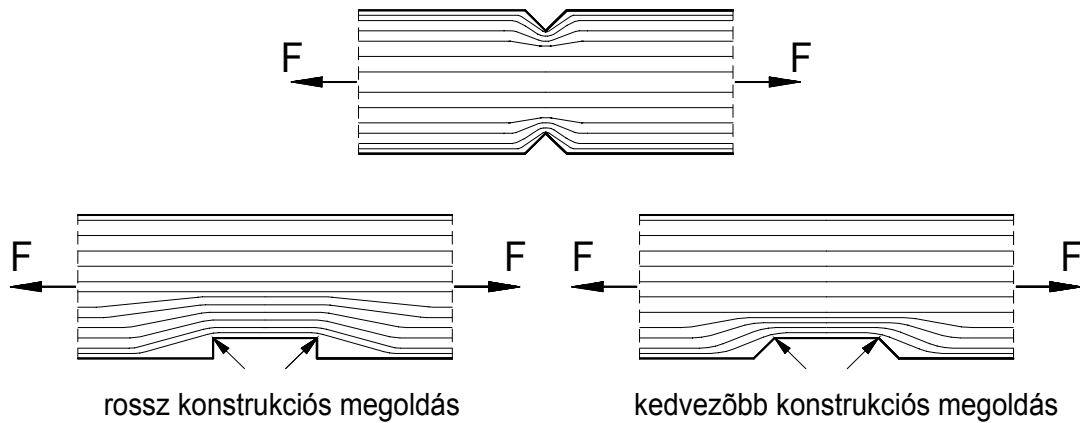
Tulajdonképpen minden keresztmetszetváltás, valamint a hegesztési varratok és csavarkapcsolatok is bemetsződéseknek – fáradás szempontjából a feszültségcsúcsok kialakulása miatt különösen veszélyes helynek - tekinthetők.

A legnagyobb feszültségek a bemetsződések mellett alakulnak ki, erre mutat példákat a 11 ábra.



11 ábra Feszültségek bemetsződések környezetében

Minél erősebb a feszültségfolyam „megzavarása” a bemetsződés által, annál magasabbak a várható feszültségcsúcsok. A feszültségfolyam megzavarására a 12 ábra mutat példákat.

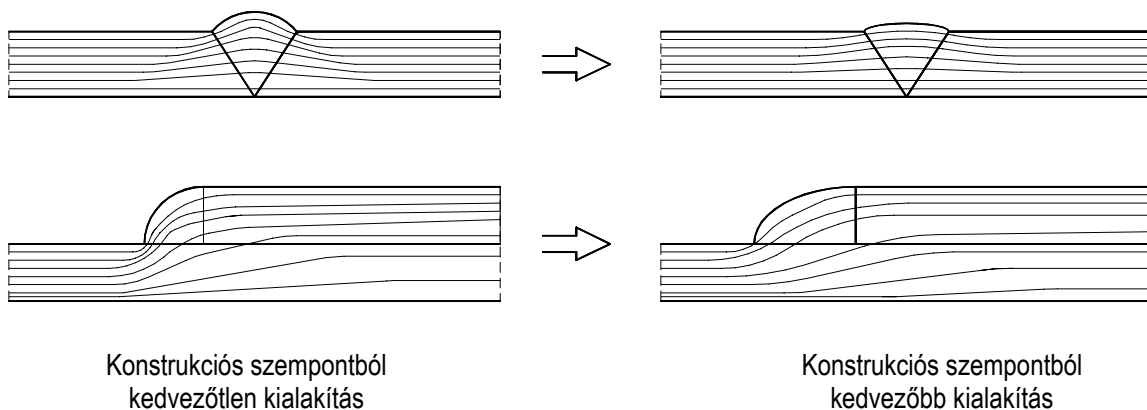


12 ábra Trajektóriavonalak alakulása húzott elemekben

Feszültségcsúcsok kialakulhatnak rossz felületi kialakítás mellett is. Ebben az esetben az egyenetlenségek, vagy kisebb lyukak (hegesztési maradékból, rozsdá hatására) kis bemetsződéseként viselkednek.

Hegesztett kapcsolatoknál megkülönböztetünk külső és belső hatásokat, melyek a feszültségek lefolyását megváltoztatják.

- Belső befolyásoló tényezők pl. a varrathiba, zsugorodási repedés a varratban, vagy az alapanyagban, felkeményedés, stb.
- Külső tényezők pl. a konstrukciós megoldás a varratkialakításra, a varrat és az alapanyag felületi kialakítása – varrat megindítása, varratátmenetek, beégési kráterek.

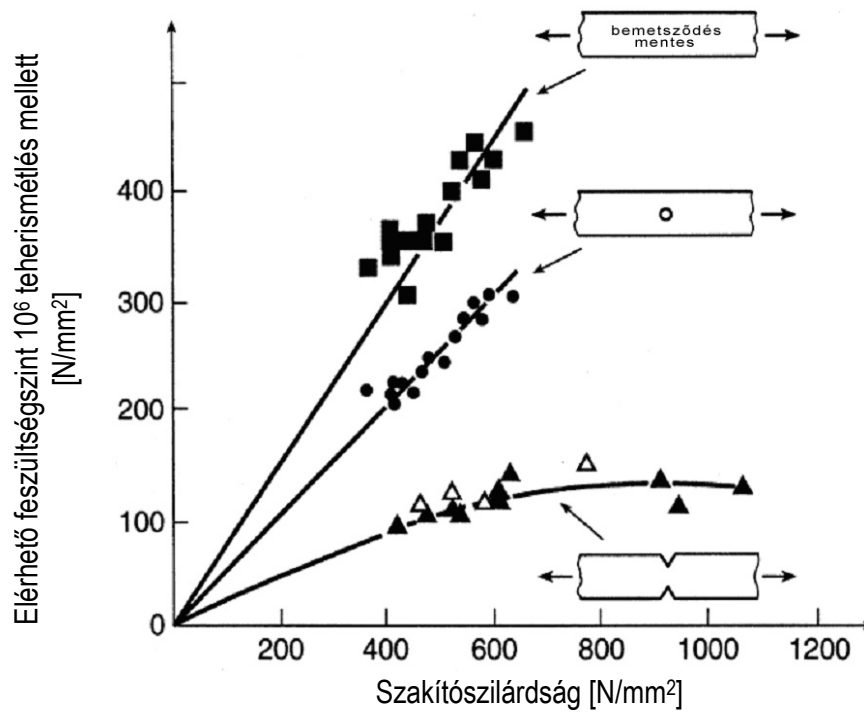


13 ábra Hegesztési varratok kialakításai

A 13 ábra a hegesztési varrat kialakításának a feszültségfolyam alakulására gyakorolt hatását szemlélteti.

A 14 ábra a bemetsződések hatását mutatja be a lengő szilárdságra az anyagminőség függvényében. Jól látható, hogy míg hibamentes (bemetsződés és hegesztési varrat mentes) próbatestnél a fáradási szilárdság a szakítószilárdsággal arányosan nő, addig az anyagminőség javulása bemetsződések tartalmazó próbatest esetén a fáradási szilárdságot nem növeli, amely a magasabb anyagminőségű anyagok nagyobb bemetsződés-érzékenységgel magyarázható.

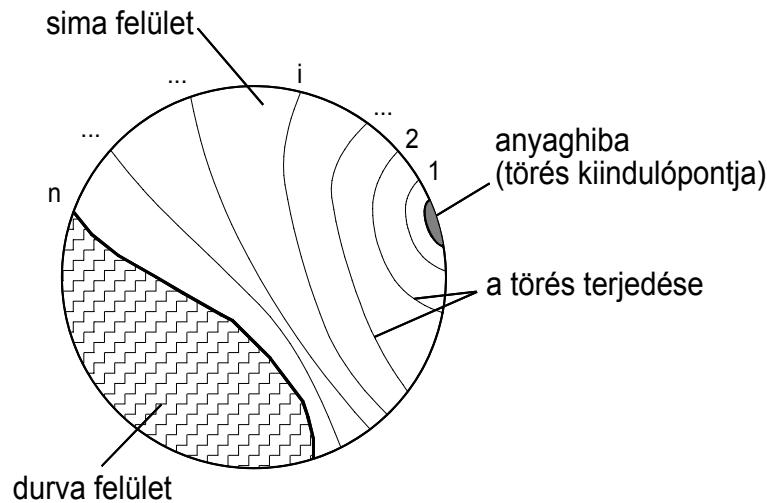
A modernebb szabványok éppen a fentebb említettek miatt a fáradásvizsgálatot az anyagminőség figyelembevétele nélkül végzik. Magasabb minőségű anyagok alkalmazása magas közép feszültség és nagy telítettségű teherspektrum mellett lehet előnyös.



14 ábra Bemetszések hatása a lengő szilárdságra a szakítószilárdság függvényében

A törés kialakulása

Bemetsződésből vagy hibából kiindulva repedések keletkeznek, melyek tovaterjednek (15 ábra). A megmaradt keresztmetszet törése hirtelen, deformációmentesen és előjelzések nélkül következik be. A repedések kialakulásának kezdete általában idejében észlelhető.



15 ábra Kör keresztmetszetű próbatest törési felülete

Egy fáradttörés általában felismerhető a törési felületről, amely két egymástól erősen eltérő tartományt mutat.

- Egy sima, finom felületű, néha teljesen sík tartományt, a tulajdonképpeni fáradttörést (lásd 15 ábra), ahol a törés fokozatosan alakul ki. Ez a tartomány sokszor a fák évgyűrűjéhez hasonló mintázatot mutat. Ezek a fásasztó igénybevétel pillanatnyi csökkenését-növekedését mutatják (az ábrán a feszültségcsúcsokat számok jelölik). A zónában általában jól látható a kezdeti hiba is, ahonnan a tönkremenetel megindult.
- Miután kialakult a kritikus keresztmetszet, amiben a feszültség már eléri a töréshez szükséges értéket, bekövetkezik a tönkremenetel. Ez a felület durvaszemcsés, ami a hirtelen bekövetkezett szakadást mutatja.

A fáradt törés szempontjából a legveszélyesebb igénybevételi típus a lengő igénybevétel (4 ábra). Mivel ebben az esetben az ismételt igénybevételek előjele ellentétes, így a kialakult maradó alakváltozásokat ismételten le kell „győzni” és ez egy felerősített képlékenyedéshez vezet.

Fáradási diagramok

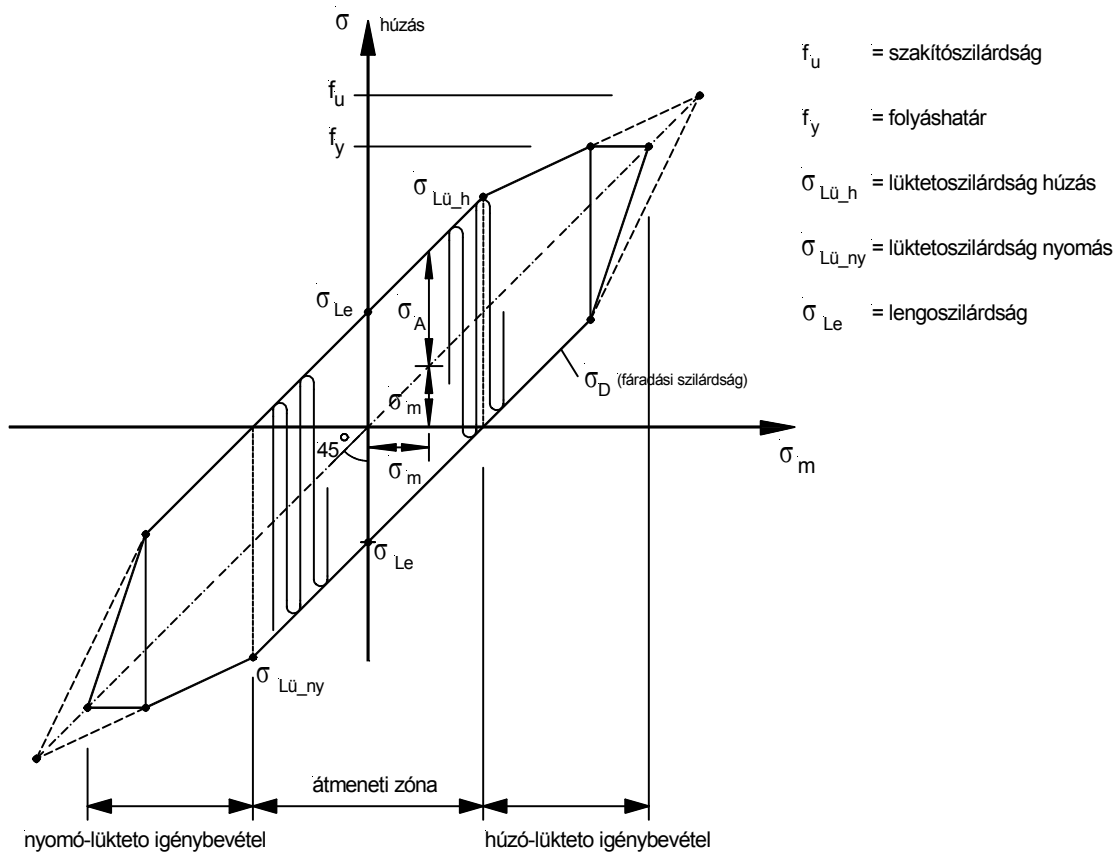
Általános

Míg a Wöhler-görbe a fáradási szilárdságot csak egy adott közép-feszültséghez (σ_m), vagy alsó feszültséghez (σ_a) adja meg, addig egy fáradási diagram egy adott anyaghoz adja meg a fáradási szilárdságokat (σ_D) adott hibaosztály mellett az összes igénybevételhez.

Az ábrázolásnak az igényektől függően több módja lehet.

Smith-diagram

Németországban a fáradási diagramok közül a legelterjedtebb a *Smith-diagram* használata. A diagram - 16 ábra - a közép-feszültség (σ_m) függvényében a fáradási szilárdsághoz tartozó felső- és alsó feszültséget ábrázolja.



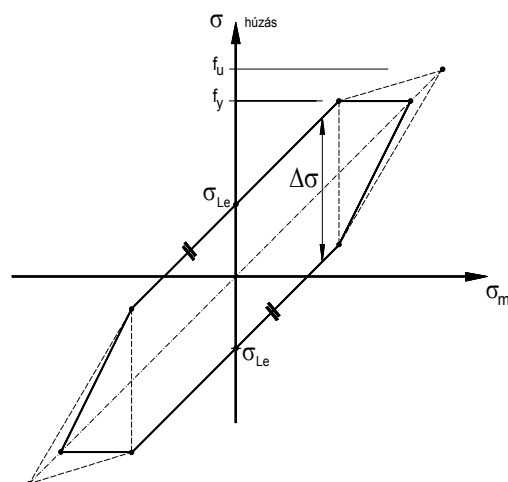
16 ábra Smith-diagram

Mivel az igénybevételek hatására a folyáshatáron túl megengedhetetlenül nagy alakváltozások lépnek fel, elfogadott a fáradási diagramokat a folyáshatárnál levágni.

A Smith-diagram előnye, hogy egy 5 pontra illesztett poligonvonallal megrajzolható. Ezek a két statikus értéken kívül – folyáshatár (f_y) és szakítószilárdság (f_u) – a lengőszilárdság (σ_{Le}), a húzó-lüktetőszilárdság ($\sigma_{Lü_h}$) és a nyomó-lüktetőszilárdság ($\sigma_{Lü_{ny}}$).

(Ahol a DIN szabvány előírásai a darukra és darupályákra a következőkből indul ki:

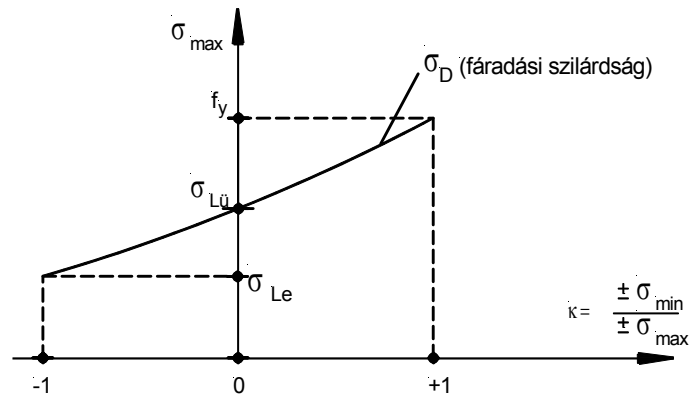
$$\sigma_{Lü_h} = 5/3 \sigma_{Le}, \sigma_{Lü_{ny}} = 2 \sigma_{Le}.)$$



17 ábra A Smith-diagram nagy hibaosztály mellett

Minél erősebb a hibák és a sajátfeszültségek hatása a szerkezetben, annál jobban közelíthető a Smith-diagram két párhuzamos egyenessel.

Gyakori, hogy a fáradási szilárdságot a feszültségarány függvényében ($\kappa = \pm \sigma_{\min} / \pm \sigma_{\max}$) adják meg. Ezt az ábrázolást *Jasper-diagramnak* hívjuk.



18 ábra Jasper-diagram

Fáradási diagramként használatosak még a *Goodman-diagramok* (a fáradási szilárdságot az alsó feszültségek függvényében ábrázolja) és a *Haigh-diagramok* (a közép feszültség függvényében adja meg a fáradást létrehozó kritikus feszültséglengést) is. A fáradási szilárdságok ábrázolásáról a Halász Ottó, Platthy Pál: Acélszerkezetek c. jegyzet ad jó áttekintést.

Üzemi feszültség

Általános

Az eddigi tárgyalás során egy szerkezeti elem, vagy próbadarab egyenletes – állandó – igénybevételű fáradási viselkedéséről volt szó. Ennek eredményeként egy speciális igénybevételhez tartozó fáradási szilárdságot kaphatunk meg.

A valóságban, ilyen egyenletes, lengő vagy lüktető igénybevétel nem lép fel.

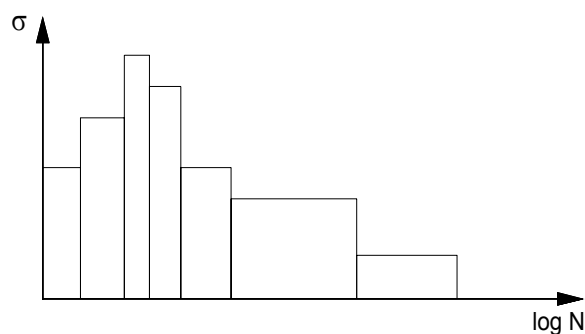
Lehetséges lenne egy szerkezeti elem a vizsgálati időtartam alatt fellépő szélsőértékeket mérni és azokat, mint állandóan hatókat feltételezni, ám ezzel a közelítéssel egy gazdaságos méretezés nem elképzelhető. Pontosabb eredményt ad, ha a különböző nagyságú igénybevételek hatását is figyelembe vesszük.

Üzemi feszültség alatt a szerkezeti elemnek a valóságközeli igénybevételekből adódó lengő szilárdságát értjük. Ennek jellemzői:

- Olyan többé-kevésbé rendszertelen igénybevételek egymásutánja – sztochasztikus terhelés -, melyeknek mind nagysága, mind gyakorisága, mind ismétlődése (spektruma) változó.
- A szélsőértékek – melyek a fáradási szilárdságot magasan túllépik – ritkán lépnek fel.

Felmerül a kérdés, hogyan lehet felvenni és kiértékelni egy ilyen véletlenszerű teherismétlésekből álló spektrumot a szerkezeti elem élettartama szempontjából. Az élettartam meghatározása alapján három megközelítési mód lehetséges:

- 1.) Egzakt szimuláció, ami azt jelenti, hogy a terhelő berendezés egy korábban mért erő-idő-diagramot állít elő. Ez a fajta a szimulációnak az autó- és repülőgépgyártásban elterjedt, mivel ott a véletlenszerű erő-idő-diagramok nagyszámú kísérlet kiértékelésével egységesítésre kerültek. Egy ilyen egzakt szimulációs kísérlet nagy technikai felkészültséget igényel, mindemellett drága és hosszú ideig tart.
- 2.) Blokk-kísérlet, ami azt jelenti, hogy korábban mért véletlenszerű erő-idő-diagramokból meghatározott szabályok alapján teherblokkokat állítunk elő. A terhelőberendezés különböző teher-szinteken - a meghatározott szabályok alapján - leszámolt teherismétlést hajt végre. Ez a fajta szimuláció pontatlanabb, hiszen a tényleges teherismétlődéseket időben nem követi, ugyanakkor nagy előnye, hogy technikailag egyszerűbb. Időigénye hasonló az egzakt szimulációéhoz és szintén költséges.



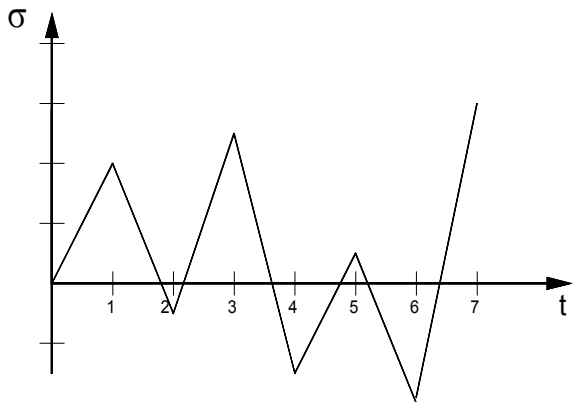
19 ábra Blokk-kísérlet

- 3.) Erő-idő-diagramok kiértékeléséből és leszámolásából kialakíthatunk osztályokat, ahol az osztályba sorolás alapja az azonos feszültségamplitúdó ($\sigma_A = \text{const}$). Az osztályok kiértékelése a megfelelő Wöhler-görbékkel és károsodási hipotézisekkel történik.

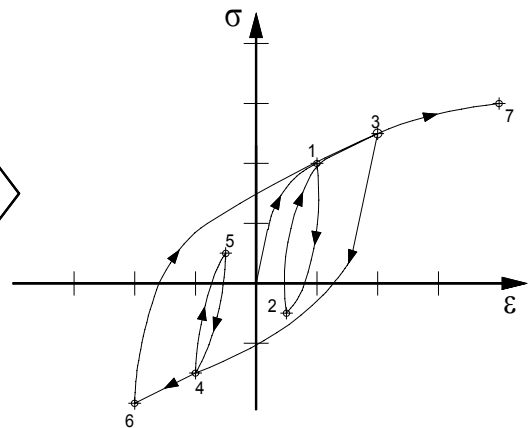
Az élettartam becslésére, előrejelzésre mindhárom felsorolt módszer csak közelítésként használható. A 2. és 3. módszernél fokozott bizonytalanságot okoz a terhelések módja, a megszámlálásuk és az alkalmazott károsodási hipotézis.

Leszámlálási módszerek

A szerkezeten (daru, darupálya) üzemi állapotban végzett nyúlásmérésekből előállítható egy feszültség-idő-diagram (20 ábra).



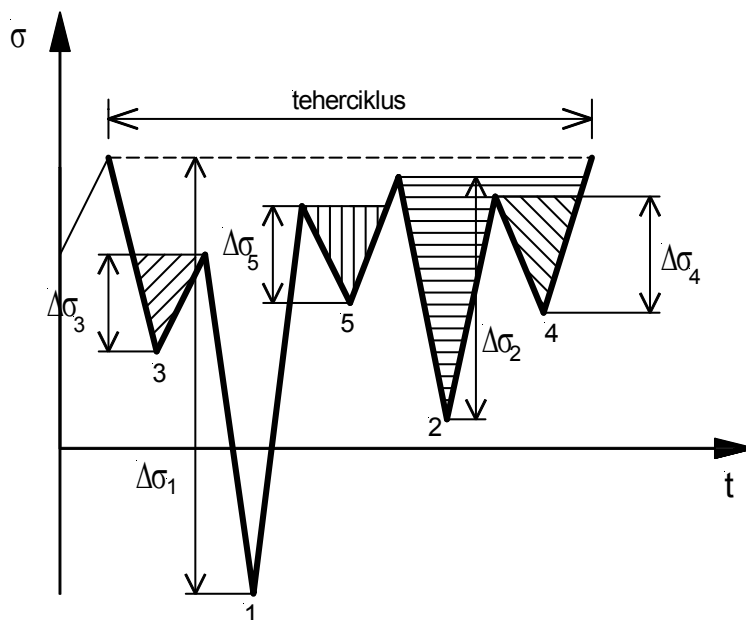
20 ábra Feszültség-idő-diagram



21 ábra Feszültség-alakváltozás-diagram

A 21 ábra a feszültség-idő-diagramból levezethető feszültség-alakváltozás-diagramot mutatja. Az ábrán megfigyelhetők a histerézis hurkok, melyekről tapasztalati tények bizonyítják, hogy számuk növekedésével a fáradt törés veszélye növekszik. Ennek magyarázata a kialakuló képlékenyedésekben keresendő.

A feladat tehát, olyan jellemzőt keresni, amely egy időben lezajló igénybevételi sorozatot az adott idő alatt fellépő összes histerézissel a lehető legteljesebben leír. Erre alkalmasak pl. a *Rainflow* és a *Reservoir-módszerek*, melyek közül itt a „Reservoir” azaz a tározó-módszer (22 ábra) kerül ismertetésre.



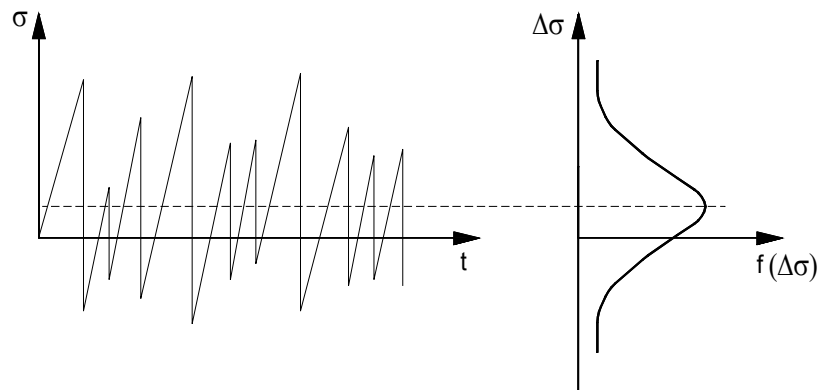
22 ábra A tározó-módszer

A tározó-módszer „működése”:

- A feszültség-idő-diagramot - egy tározóhoz hasonló módon, képzeletben – vízzel töltjük fel.
- A kialakult „tározó” legmélyebb pontján kieresztjük a vizet és az ott mért teljes „vízmagasságot” megfeleltetjük egy teljes feszültségingadozásnak $\Delta\sigma_1$ (22 ábra).
- Ezzel a módszerrel haladva leeresztjük az összes – még vizet tartalmazó – tározót és meghatározzuk a feszültségingadozásokat $\Delta\sigma_2, \dots, \Delta\sigma_i, \dots, \Delta\sigma_n$.

Látható, hogy ez a leszámolási metódus csak a $\Delta\sigma$ nagyságára érzékeny, így csak a „relatív” feszültségingadozásokat detektálja. Nem kerül figyelembe vételre sem az alsó, sem a felső, sem a közép-feszültség szintje ($\sigma_a, \sigma_f, \sigma_m$).

Darukon végzett kísérletek adataira támaszkodva - pl. tározó módszerrel kiértékelve - megállapították, hogy a $\Delta\sigma_i$ feszültségingadozás eloszlása közelítőleg a normáeloszlását követi (23 ábra).

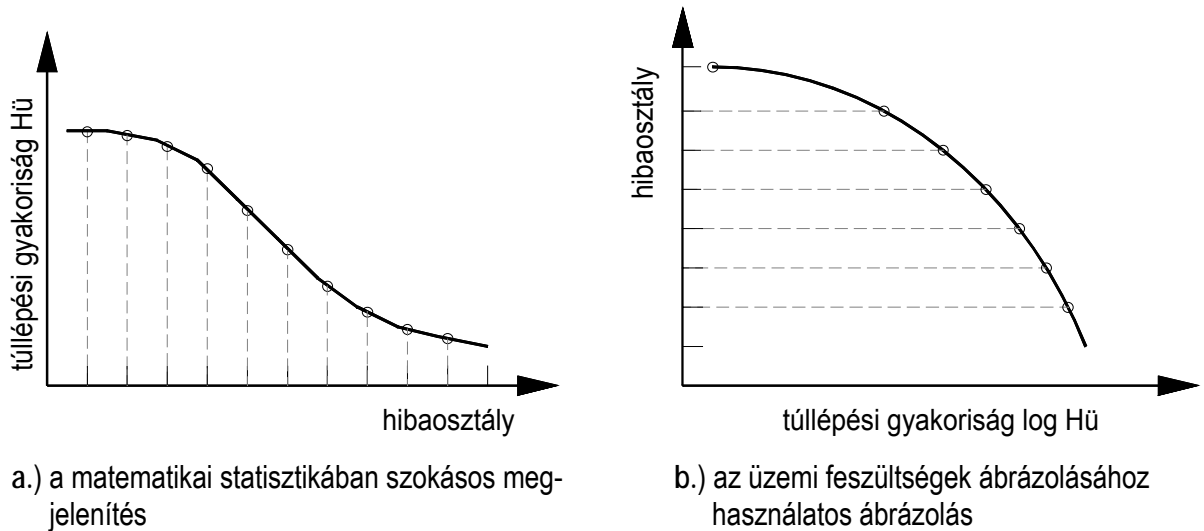


23 ábra A $\Delta\sigma_i$ feszültségingadozás előfordulási gyakorisága

Az ábrából jól látszik, hogy egy bizonyos $\Delta\sigma_i$ előfordulásának a gyakorisága a legnagyobb, míg ennél kisebb és nagyobb ingadozások kevesebbszer alakulnak ki.

A feszültség spektrum, definíciója szerint, egy határérték túllépési gyakoriságának eloszlását jelenti, azaz annak valószínűségét, hogy egy bizonyos érték elérésre, vagy túllépésre kerül-e.

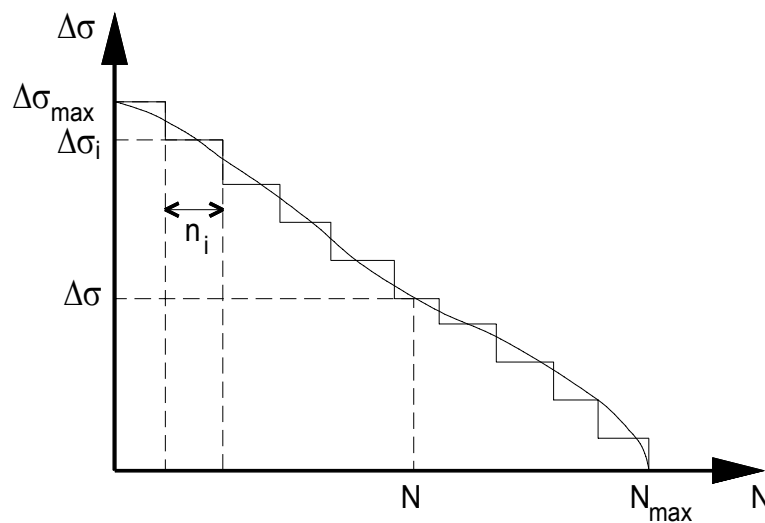
A matematikában megszokottól eltérően az ábrázolás felcserélt koordinátatengelyeken történik, valamint a túllépések logaritmikusan ábrázoltak (24 ábra).



24 ábra Túllépési gyakoriságok ábrázolása

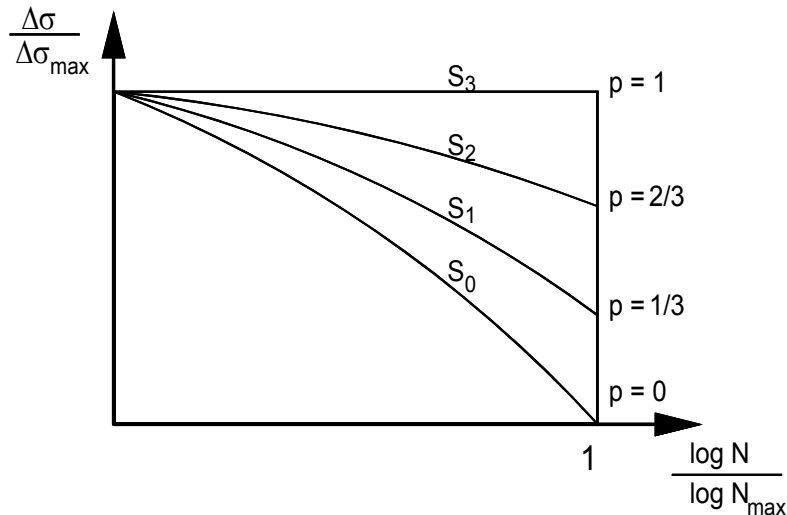
A fentebb vázolt megfontolások alapján a feszültségspektrum a feszültség-idő-diagramból levezethető.

Amennyiben az egyes feszültség-ingadozásokat ($\Delta\sigma$) feszültségi lépcsőkbe gyűjtjük és azokat nagyság szerint sorba rendezzük, akkor N azoknak a feszültség-ingadozásoknak a számát adja meg, melyeknél $\Delta\sigma$ -t meghaladó, vagy vele éppen megegyező feszültség-ingadozások léptek fel (túllépési gyakoriság).



25 ábra Túllépési gyakoriság

Normáleloszlást feltételezve és N logaritmusát ábrázolva a 26 ábrának megfelelő görbéket kapunk. A DIN 4132 előre megfogalmaz üzemi csoportokat, melyek az egylépcsős és a Gauss-eloszlást követő feszültség-ingadozásokból vezethetők le. A 26 ábra S_3 üzemi csoport az egylépcsős, az S_0 pedig a Gauss-eloszlást követő feszültség-ingadozásnak megfelelő csoportot mutatja be, míg az S_1 és S_2 a két előbb említett csoport valamilyen összegzéséből vezethető le.



26 ábra Spektrumot leíró érték (p) és üzemi csoport (S)

Egy üzemi feszültség meghatározásához feszültség-spektrumok szükségesek. A terhelések leírására teherspektrumok szolgálnak. Egy feszültség-spektrum a teherspektrum ismeretében, abból számítható.

Egy spektrumot jelentősen befolyásoló paraméterek:

- a spektrum lefutása, telítettsége (a spektrumot leíró érték p)
- a spektrum nagysága (a teherismétlések száma N_{\max})
- a spektrum legnagyobb és legkisebb értéke (pl. $\Delta\sigma_{\max}$, $\Delta\sigma_{\min}$)

A spektrumot leíró érték $p = 1$ tehát egy daru esetén azt jelenti, hogy a daru csak a teljes teherbírásán terhelt. Ez megfelelne egy Wöhler-görbének.

A spektrumok egy időbeni diagramhoz képest nem szolgáltatnak adatot:

- a feszültségek tényleges amplitúdójáról és időbeni egymásutánosságáról,
- az egyes feszültség-ingadozások középértékéről,
- a frekvenciáról.

Károsodási hipotézis

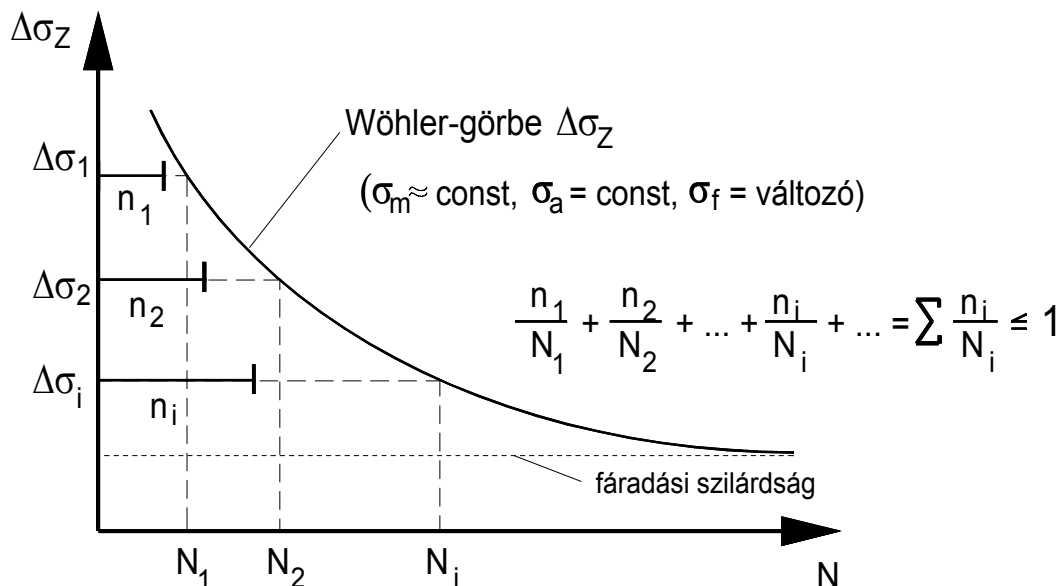
Egy károsodási hipotézis segítségével lehetséges állandó feszültség-ingadozás ($\Delta\sigma$) ill. amplitúdó (σ_A) mellett meghatározott feszültség-adatokból (Wöhler-görbe) élettartambecslést adni váltakozó feszültség-amplitúdójú esetben is.

A ma ismert károsodási hipotézisek többsége igen bonyolult. Emellett kijelenthető, hogy egyetlen olyan károsodási hipotézis sem ismert, amely kísérletileg jól igazolt volna. Ezért a gyakorlatban általában a legegyszerűbben használható hipotézis alkalmazása terjedt el.

Egy egyszerű - lineáris - károsodás feltételezése adja a legegyszerűbb károsodási hipotézist a lineáris károsodási hipotézist (Palmgren-Miner-féle károsodási hipotézis). E szerint a károsodások és a teherciklusok között egy lineáris összefüggés tételezhető fel, azaz a károsodás mértéke egyenes arányban

növekszik a teherismétlések számával. Többlépcsős terhelésnél az egyes amplitúdókhoz különböző mértékű részkárosodások tartoznak, melyek lineárisan összegezhethetők.

A károsodás, amit egy teherciklus okoz $1 / N_i$, ahol N_i a $\Delta\sigma_i$ feszültség-ingadozáshoz tartozó kritikus ciklusszám egy egylépcsős (Wöhler) vizsgálatban. A részkárosodás tehát egy adott feszültség szinten n_i / N_i , ahol n_i az adott feszültség szinten ténylegesen végrehajtott terhelési ciklusok száma. Definíció szerint a törés (teljes károsodás) akkor lép fel, ha a különböző feszültség szinteken meghatározott részkárosodások összege eléri az 1-et.



27 ábra Lineáris károsodási hipotézis

A hipotézis alkalmazási határai a következők:

- nem léphetnek fel felkeményedések,
- a repedés kialakulását a károsodás kialakulásának tekintjük,
- az igénybevételeknek a fáradási szilárdságot meghaladóknak kell lenniük,
- a közép-feszültség legyen a lehetőségek szerint konstans.

Sokszor a lineáris károsodási hipotézis - egyszerűsége miatt - olyan esetekben is alkalmazásra kerül, amikor a fentebb felsorolt követelmények nem teljesülnek. Ilyen esetekben a szolgáltatott eredmények pontossága nem kielégítő.

Látható, hogy a lineáris károsodási hipotézis nem veszi figyelembe a feszültség-ingadozások időbeli lefolyását. Így abban az esetben, ha egy, vagy több nagyobb feszültség-ingadozást követően a kisebb feszültség-ingadozások már egy helyi károsodásokkal terhelt – esetlegesen mikrorepedéseket is tartalmazó – területen hatnak, a kisebb feszültség-ingadozások már töréshez vezethetnek. Azonban ugyan-ezen feszültség-ingadozások az előbb feltételezettel ellentétes időbeli lefolyása esetén a károsodás mértéke lényegesen kisebbre adódik.

Mindezen túlmenően például, ha a közép-feszültség nem állandó ($\sigma_m \neq \text{const}$), a lineáris károsodási hipotézis olyan nagymértékben tér el a biztonságostól, hogy alkalmazásával még egy közelítő élettartambecslés sem megengedhető.

A teljes élettartambebecslés végrehajtását lineáris károsodási hipotézissel a 28 ábra mutatja be.

<p>1.) Teherisméltóság Tipikus terhek, melyek a vizsgált időtartamon belül n-szer fordulnak elő.</p>	
<p>2.) Feszültség-idő-diagramm (összegzett)</p>	
<p>3.) Leszámlálás pl. tározó módszerrel</p>	
<p>4.) Feszültség-ingadozási spektrumok</p>	
<p>5.) A feszültség-ingadozások száma a törésig</p>	
<p>6.) Lineáris károsodási hipotézis</p>	$\sum \frac{n_i}{N_i} = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \frac{n_4}{N_4} \leq D_L$

28 ábra Károsodások számítása lineáris hipotézissel

Megengedett feszültségek meghatározása a daru és darupálya szabványokban

Általános

A korábban leírtak szerint St37-es (S235) és St52-es (S355) anyagú acélszerkezetek feszültségeit, ellenállását ismétlődő üzemi igénybevételekkel szemben ábrázolhatjuk:

- a szerkezetre jellemző hibaosztály besorolása szerint,
- a feszültségarány ($\kappa = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$) szerint,
- a kritikus teherismétlődési szám (N) szerint és
- a teherspektrum formája alapján.

Az üzemi feszültség tehát felírható:

$$\sigma_{\bar{u}} = f(\text{hibaosztály}, \kappa, \max N, p)$$

Az üzemi teher értékét befolyásoló paramétereket a következőképpen csoportosíthatjuk:

$$\sigma_{\bar{u}} = f_1(\text{hibaosztály}, \kappa) * f_2(\max N, p)$$

Ahol f_1 a fáradási szilárdság értékét adja meg $N = 2 \cdot 10^6$, $p = 1$ mellett, a hibák és a feszültségarány figyelembevételével. Az f_2 az átmenetet adja meg a fáradási szilárdság ($\max N$ függvényében) és az üzemi feszültséghez (p függvényében).

Hibaosztály szerinti besorolás

A DIN 15018 (Daruk), és a DIN 4132 (Darupályatartók) szabványok széleskörűen tartalmazzák a szerkezeti elemeket és azok besorolását hibák és bemetsződések szerint. A hibák és bemetsződések hatását két csoportra oszthatjuk.

Az első csoport a hegesztési varratok hatásától mentes elemeket tartalmazza:

- szerkezeti elemek, melyek hengerelt széllel rendelkeznek W0
- lyukasztott elemek W1
- szerkezeti elemek, melyek szegecseltek, vagy illesztőcsavarral kapcsoltak W2

A második csoportba tartozik minden olyan szerkezeti elem, amelynél a feszültségfolyamot a hegesztési varrat, vagy varratok hatása megzavarja.

Igénybevételi csoportokba sorolás

A DIN 15018 a darukat 6 igénybevételi csoportba sorolja be B1-től B6-ig.

A feszültségspektrumba (p) történő besorolást követően – amely az igénybevételek intenzitását adja meg a vizsgált időszakban – lehetséges az 1 táblázat szerint az igénybevételi csoportba sorolás.

Feszültségtartomány	N1	N2	N3	N4
A teljesíteni kívánt teherciklusok száma	$2 \cdot 10^4 - 2 \cdot 10^5$ ritka, rendszertelen használat, hosszú kihagyásokkal	$2 \cdot 10^5 - 6 \cdot 10^5$ rendszeres használat szünetekkel	$6 \cdot 10^5 - 2 \cdot 10^6$ rendszeres, folyamatos használat	$< 2 \cdot 10^6$ rendszeres, folyamatos, erőteljes használat
Feszültségspektrum	Igénybevételi csoport			
S0 nagyon könnyű	B1	B2	B3	B4
S1 könnyű	B2	B3	B4	B5
S2 közepes	B3	B4	B5	B6
S3 nehéz	B4	B5	B6	B6

1 táblázat Igénybevételi csoportok

A fáradásra vonatkozó Eurocode szabvány érvényességi- és alkalmazási feltételei

Az Eurocode 3 szabvány eljárásai a következőkben térnek el a korábbi szabványoktól (pl. DIN 15018 és a DIN 4132):

- A feszültség felső értéke (σ_f, τ_f) helyett a feszültségingadozást ($\Delta\sigma, \Delta\tau$) veszi figyelembe.
- Állandó feszültségingadozást tételez fel függetlenül a közép-feszültségtől (σ_m), ill. feszültségáránytól (κ).
- Nem tesz különbséget az alkalmazott anyagminőségek között (S235, S355).

Az 1993-1-9 (Fatigue) szabványnak a következők az alkalmazási határai:

- A kisciklusú fáradási szilárdság (LCF) bekövetkeztével szembeni követelmények:

$\Delta\sigma \leq 1.5 f_y$	hosszirányú feszültségingadozás gyakori teherből
$\Delta\tau \leq 1.5 f_y / 3^{0.5}$	nyírási feszültségek ingadozás gyakori teherre
$N \geq 10^4$	a teherismétlések száma
- Felhasználás normál hőmérsékleti viszonyok között $T \leq +150^\circ\text{C}$.
- A korrózió hatása megfelelő korrózióvédelemmel és karbantartással korlátozott.
- A kivitelezés megfelel az EN 1090-ben írottaknak.
- A felhasznált anyagok minősége megfelel az előírásoknak pl. ENV 1993-1-1.

Üzemi feszültségek vizsgálata az Eurocode 3 szerint

Az Eurocode 3 (a továbbiakban EC3) szerinti vizsgálat célja, hogy az élettartam alatt, egy elfogadható biztonsági szint mellett, a szerkezeti elem tönkremenetelét fáradásból kifolyólag kizárja.

Az EC3 abból indul ki, hogy általában fáradásból kialakuló törés nem lép fel, csak az alább felsorolt esetekben:

- szerkezeti elemek, melyeket emelő és süllyesztő terhek, vagy mozgó terhek terhelnek (pl. daruteher)
- szerkezeti elemek, melyeket változó igénybevételek terhelnek (pl. rezgő gépek üzemből)
- szerkezeti elemek, melyeket erőhatások rezgésbe hoznak (pl. szél, vagy emberi terhek)

Amennyiben a fentebb felsorolt szerkezeti elemek a következőkben megadott követelmények valamelyikének megfelelnek, úgy a fáradásvizsgálatot nem szükséges elvégezni:

- a feszültségingadozás mértéke ($\Delta\sigma$) a mértékadó teherre kisebb egy meghatározott határértéknél, vagy
- a teherismétlések száma (N) kisebb egy határértéknél, vagy
- állandó feszültségingadozás mellett $\Delta\sigma$ kisebb a szerkezeti elemre mértékadó Wöhler-görbe fáradási szilárdságnál σ_D .

Ha azonban a szerkezeti elemre a fentebb felsorolt követelmények egyike sem igaz, úgy egy üzemi feszültség vizsgálatot kell elvégezni.

Ehhez az EC3 a névleges feszültségek elméletét használja. Az elmélet alapján az igazolni kívánt pontban (pl. hegesztési varrat környezetében) teljesen rugalmas módszerekkel kiszámításra kerülnek a feszültségek egy „y” szoros teherrel. Az EC3 aktuális verziójában ez az érték $y = 1.0$, azaz a névleges feszültség a használati terhekből kerül kiszámításra. A névleges feszültség, mint fogalom, továbbra is azt jelenti, hogy a feszültségcsúcsok nincsenek figyelembe véve - pl. a lyukgyengítés, vagy hegesztés környezetében. Ez nem is szükséges, mert a feszültségcsúcsok hatását már a Wöhler-görbék - a hibaosztályokon keresztül - tartalmazzák.

A szabálytalan ismétlődésű terhelésekből származó névleges feszültségek meghatározása után egy alkalmas leszámítási módszerrel (pl. tározó-módszer segítségével) meg kell számolni a meghatározott

névleges feszültség-ingadozások számosságát. Egy alkalmas károsodási hipotézis (pl. lineáris károsodási hipotézis) segítségével a megfelelő Wöhler-görbével a vizsgálat elvégezhető.

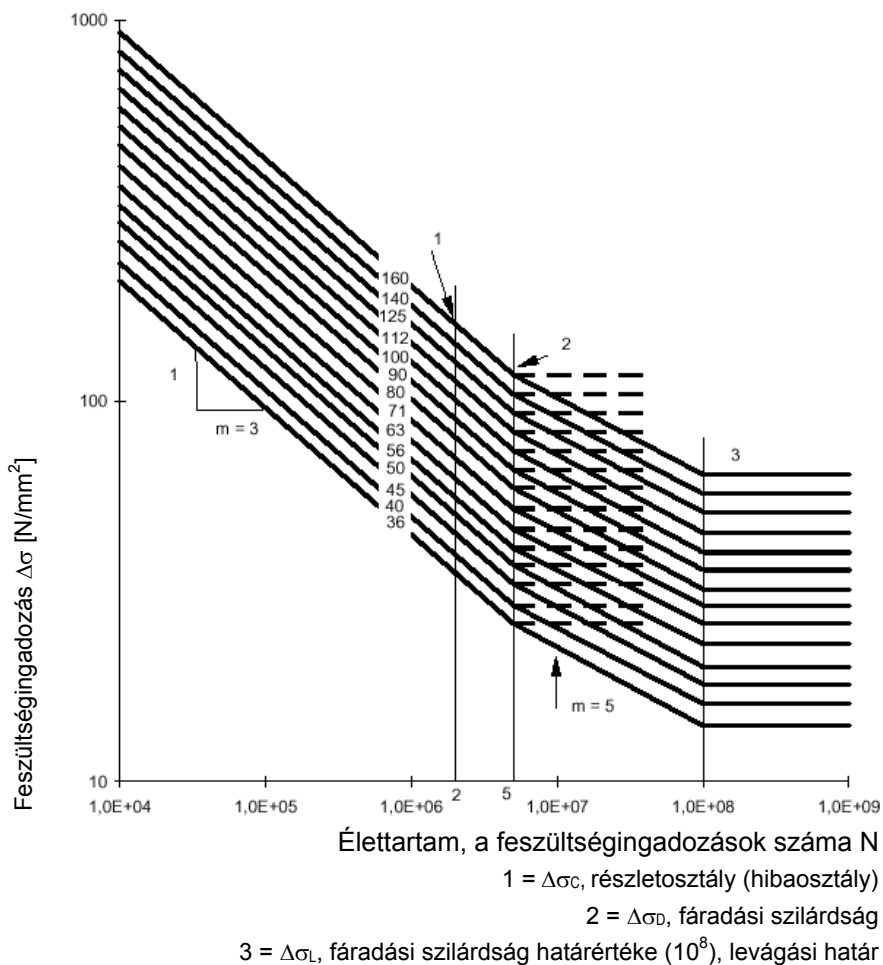
A lényegét tekintve az EC3 méretezési módszere megegyezik a DIN 15018 és DIN 4132 szabványokéval.

Alternatívaként a vizsgálatot egy állandó $\Delta\sigma$ mellett is el lehet végezni, amelyik N teherismétlés után azonos károsodáshoz vezet, mint a szabálytalan teherismétlődések, amennyiben ez az ekvivalens feszültség-ingadozás ($\Delta\sigma$) ismert.

A fáradási szilárdság – hasonlóan a DIN 15018-hoz – különböző hibaosztályhoz tartozó Wöhler-görbék által meghatározott. A hibaosztályokat az EC3 részletosztálynak hívja. Ilyen részletosztályok adóttak normál- és nyíróigénybevételekre, valamint hegesztett és csavarozott részszerkezetekre.

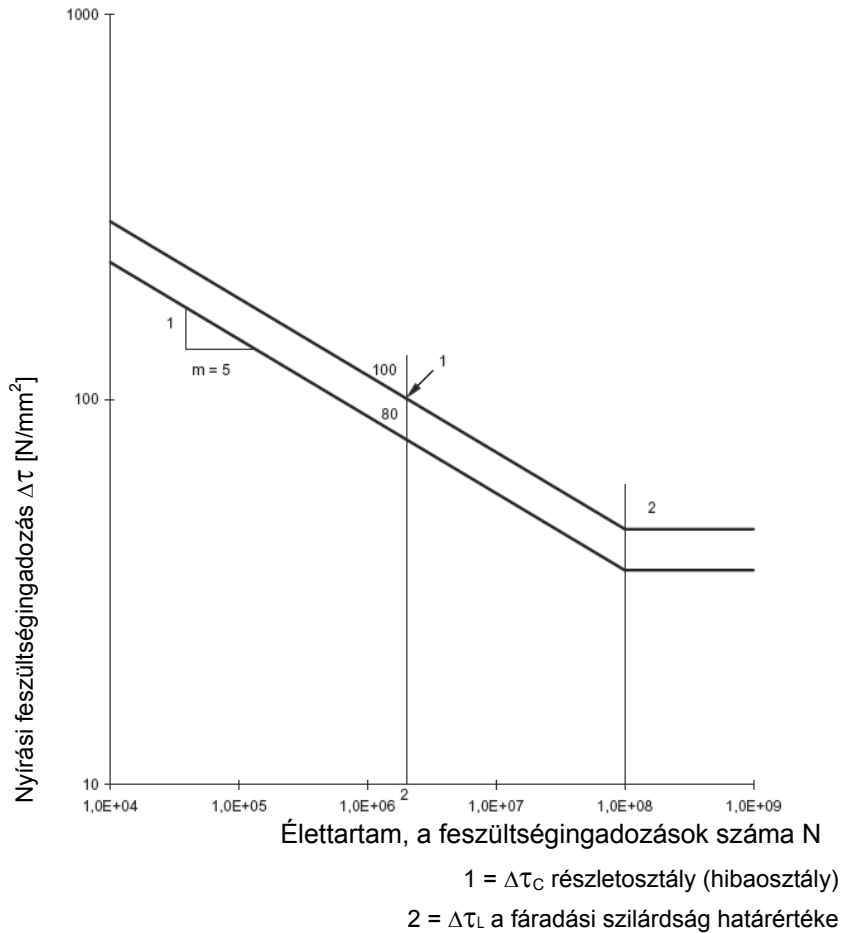
A hibaosztályhoz tartozó Wöhler-görbéket reprezentatív kísérletek sorával állapították meg a következő paraméterek vizsgálata mellett:

- a konstrukcióból adódó a hibaosztályhoz (részletosztály) tartozó feszültségkoncentráció,
- a hegesztés miatti lokális feszültségkoncentráció,
- hegesztési imperfekciók,
- a feszültségek és lehetséges repedési helyek iránya,
- hegesztési sajátfeszültségek és hegesztőeljárás,
- anyagszerkezeti adottságok.



29 ábra Különböző részletosztályú Wöhler-görbék az EC3 szerint normál-feszültségekre

Az egyes részletosztályok 36-tól 160-ig vannak számozva az EC3-ban. Ez a számozás a $2 \cdot 10^6$ teherismétléshez tartozó $\Delta\sigma$ feszültség-ingadozás N/mm^2 -ben kifejezett értékével egyezik meg. Vagyis például a 71 részletosztály jelentése $\Delta\sigma(2 \cdot 10^6) = 71 \text{ N/mm}^2$.



30 ábra Különböző részletosztályú Wöhler-görbék az EC3 szerint nyírófeszültségekre

A következő táblázatok a szabványban közölt részletosztályok közül mutatnak példákat. A táblázatok (2-6 táblázat) első oszlopa a részletosztályhoz tartozó $\Delta\sigma$ feszültségingadozást adja meg, a második oszlop sematikus ábrája bemutatja a részletosztályra jellemző szerkezeti kialakítást, a harmadik oszlop megadja a részletosztály leírását, míg a negyedik a követelményeket.

Tabelle 8.1: Ungeschweißte Bauteile und Anschlüsse mit mechanischen Verbindungsmitteln

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderungen
160		<p>Gewalzte und geprefte Erzeugnisse:</p> <p>hengerelt km.-ek</p> <p>1) Bleche und Flachstähle; 2) Walzprofile; 3) Nahtlose rechteckige oder runde Hohlprofile.</p>	<p>Kerbfälle 1) bis 3):</p> <p>Scharfe Kanten, Oberflächen- und Walzfehler sind durch Schleifen zu beseitigen und ein nahtloser Übergang herzustellen.</p>
140	<p>ollóval, v. lánggal vágott lemezek</p>	<p>Gescherte oder brenngeschnittene Bleche:</p> <p>4) Maschinell brenngeschnittener Werkstoff mit nachträglicher mechanischer Bearbeitung</p> <p>5) Maschinell brenngeschnittener Werkstoff mit seichten und regelmäßigen Brennriefen oder von Hand brenngeschnittener Werkstoff mit nachträglicher mechanischer Bearbeitung. Maschinell brenngeschnittener Werkstoff der Schnittqualität entspr. EN 1090.</p>	<p>4) Alle sichtbaren Randkerben sind zu beseitigen, Schnittflächen zu überschleifen und Kanten zu brechen. Riefen infolge mechanischer Bearbeitung (z.B. Schleifen) müssen parallel zu den Spannungen verlaufen.</p> <p>Kerbfälle 4) und 5):</p> <ul style="list-style-type: none"> - Einspringende Ecken sind durch Schleifen (Neigung $\leq 1/4$) zu bearbeiten oder durch einen entsprechenden Spannungskonzentrationsfaktor zu berücksichtigen - keine Ausbesserungen durch Verfüllen mit Schweißgut
125	<p>mint előbbi, de beéggésekkel</p>	<p>6) and 7) Gewalzte und geprefte Erzeugnisse entspr. Kerbdetails 1), 2), 3)</p>	<p>Kerbfälle 6) und 7):</p> <p>$\Delta\sigma$ berechnet nach: $\tau = \frac{V S(t)}{I t}$</p>
Für Kerbfall 1 – 5 ist bei Einsatz von wetterfestem Stahl der nächst tiefere Kerbfall zu verwenden.			
112	<p>kétszrenyirt, nagyszilárdságú, feszített csavarral</p>	<p>8) Symmetrische zweischnittige Verbindung mit hochfesten vorgespannten Schrauben</p> <p>8) Symmetrische zweischnittige Verbindung mit vorgespannten Injektionsschrauben</p>	<p>8) $\Delta\sigma$ ist am Bruttoquerschnitt zu ermitteln.</p> <p>8) ... Bruttoquerschnitt ...</p>
90	<p>kétszrenyirt, illesztőcsavarral</p>	<p>9) Zweischnittige Verbindung mit Paßschrauben.</p> <p>9) Zweischnittige Verbindung mit nicht vorgespannten Injektionsschrauben.</p>	<p>9) ... Nettoquerschnitt ...</p> <p>9) ... Nettoquerschnitt ...</p>
	<p>egyszrenyirt, nagyszilárdságú, feszített csavarral</p>	<p>10) Einschnittige Verbindung mit hochfesten vorgespannten Schrauben.</p> <p>10) Einschnittige Verbindung mit vorgespannten Injektionsschrauben.</p>	<p>10) ... Bruttoquerschnitt ...</p> <p>10) ... Bruttoquerschnitt ...</p>
		<p>11) Verbindungselemente mit Löchern unter Biegung und Normalkraft.</p>	<p>11) ... Nettoquerschnitt ...</p>
80	<p>egyszrenyirt, illesztőcsavarral</p>	<p>12) Einschnittige Verbindung mit Paßschrauben.</p> <p>12) Einschnittige Verbindung mit nicht vorgespannten Injektionsschrauben.</p>	<p>12) ... Nettoquerschnitt ...</p> <p>12) ... Nettoquerschnitt ...</p>
50		<p>13) Einschnittige oder symmetrische zweischnittige Verbindung mit Lochspiel und nicht vorgespannten Schrauben. Keine Lastumkehr.</p>	<p>13) ... Nettoquerschnitt ...</p>
50		<p>14) Schrauben und Gewindestangen mit gerolltem oder geschnittenen Gewinde unter Zug. Bei großen Durchmessern (Ankerschrauben) muß der Größeneffekt mit k_s berücksichtigt werden.</p>	<p>14) $\Delta\sigma$ ist am Spannungsquerschnitt der Schraube zu ermitteln. Biegung und Zug infolge Abstützkraften sowie weitere Biegespannungen (z.B. sekundäre Biegespannungen) sind zu berücksichtigen. Bei vorgespannten Schrauben darf die reduzierte Spannungsbreite berücksichtigt werden.</p>

2 táblázat Hengerelt keresztmetszetek és azok csavaros kapcsolatai

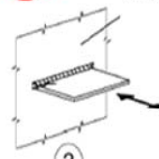

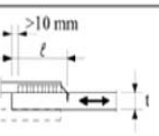

Tabelle 8.2: Geschweißte zusammengesetzte Querschnitte

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderungen
125	<p>mindkét oldalon automatával hegesztve</p>	<p>Durchgehende Längsnähte:</p> <p>1) Mit Automaten beidseitig durchgeschweißte Nähte.</p> <p>2) Automatingeschweißte Kehlnähte. Die Enden von aufgeschweißten Gurtplatten sind gem. Kerbfall 6) oder 7) in Tabelle 8.5 nachzuweisen.</p>	<p>Kerbfälle 1) und 2):</p> <p>Es dürfen keine Schweißansatzstellen vorhanden sein, ausgenommen bei Durchführung einer Reparatur mit anschließender Überprüfung der Reparaturschweißung.</p>
112	<p>mint előbb, de indítási gyökökkel</p>	<p>3) Automatingeschweißte Doppelkehlnähte oder beidseitig durchgeschweißte Nähte beide mit Ansatzstellen.</p> <p>4) Mit Automaten einseitig durchgeschweißte Naht mit nicht unterbrochener Schweißbadsicherung, aber ohne Ansatzstellen.</p>	<p>4) Weist dieser Kerbfall Ansatzstellen auf, ist er der Kerbgruppe 100 zuzuordnen.</p>
100	<p>kézi hegesztésű varratok</p>	<p>5) Handgeschweißte Kehlnähte oder HV-Nähte oder DHV-Nähte.</p> <p>6) Von Hand oder mit Automaten einseitig durchgeschweißte Nähte, speziell bei Hohlkästen.</p>	<p>5) und 6) Zwischen Flansch und Stegblech ist eine sehr gute Paßgenauigkeit erforderlich. Dabei ist bei HV-Nähten das Stegblech so anzuschragen, daß die Wurzel ausreichend und ohne Herausfließen von Schweißgut erfaßt werden kann.</p>
100	<p>varratjavítások</p>	<p>7) Ausgebesserte automaten- oder handgeschweißte Kehlnähte oder Stumpfnähte gemäß Kerbfall 1) bis 6).</p>	<p>7) Durch Nachschleifen aller sichtbaren Fehlstellen durch einen Spezialisten sowie einer entsprechenden Überprüfung kann die ursprüngliche Kerbgruppe wiederhergestellt werden.</p>
100		<p>7) Ausgebesserte automaten- oder handgeschweißte Kehlnähte oder Stumpfnähte gemäß Kerbfall 1) bis 6).</p>	<p>7) Durch Nachschleifen aller sichtbaren Fehlstellen durch einen Spezialisten sowie einer entsprechenden Überprüfung kann die ursprüngliche Kerbgruppe wiederhergestellt werden.</p>
80	<p>szakaszos varratok</p> <p>$g/h \leq 2,5$</p>	<p>8) Unterbrochene Längsnähte.</p>	<p>8) $\Delta\sigma$ wird mit der Längsspannung im Flansch berechnet.</p>
71		<p>9) Längsnähte, Kehlnähte oder unterbrochene Nähte mit Freischnitten (kleiner 60mm). Bei > 60 mm gilt Kerbfall 1) in Tabelle 8.4.</p>	<p>9) $\Delta\sigma$ wird mit der Längsspannung im Flansch berechnet.</p>
125	<p>hosszirányban terhelt tompavarratok</p>	<p>10) Längsbeanspruchte Stumpfnäht, beidseitig in Lastrichtung blecheben geschliffen, 100 % ZFP.</p>	
112		<p>10) Ohne Schleifen und ohne Ansatzstellen.</p>	
90		<p>10) Mit Ansatzstellen.</p>	
140	<p>automatával készített hosszirányú varrat zártszelvényhez</p>	<p>11) Automatingeschweißte Längsnaht in Hohlprofilen ohne Ansatzstellen.</p>	<p>11) Ohne Schweißnahtfehler entspr. EN 1090. Wandstärke $t > 12,5$ mm</p>
125		<p>11) Automatingeschweißte Längsnaht in Hohlprofilen ohne Ansatzstellen.</p>	<p>11) Wandstärke $t > 12,5$ mm</p>
90		<p>11) Mit Ansatzstellen.</p>	

Werden die Kerbfälle 1 bis 11 mit voll mechanisierter Schweißung ausgeführt, gelten die Kerbfallkategorien für Automatingeschweißung.

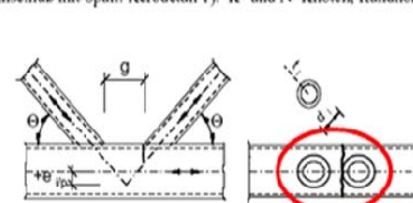
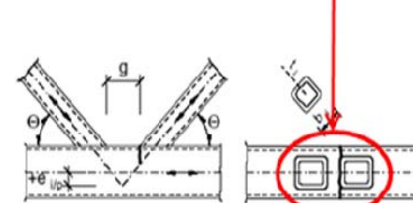
3 táblázat Hegesztett keresztmetszetek

Tabelle 8.5: Geschweißte Stöße

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderungen
80	$t < 50$ all t	Kreuz- und T-Stöße: 1) Riß am Schweißnahtübergang in voll durchgeschweißten Stumpfnähten und allen nicht durchgeschweißten Nähten. 2) Riß am Schweißnahtübergang, ausgehend von der Kante des Anschlußbleches, mit Spannungskonzentrationen an den Schweißnahtenden infolge Blechverformungen. 3) Wurzelriß bei nicht voll durchgeschweißten T-Stößen oder Kehlnahtanschlüssen und voll durchgeschweißten T-Stößen.	1) Nach Prüfung frei von Diskontinuitäten und Exzentrizitäten außerhalb der Toleranzen nach EN 1090. 2) $\Delta\sigma$ ist mit modifizierten Nennspannungsschwingbreiten zu ermitteln. 3) Es sind 2 Ermüdungsnachweise erforderlich: zum einen der Nachweis gegen Riß der Schweißnahtwurzel mit Spannungen nach Kapitel 5 mit Kerbgruppe 36° für σ_w und Kerbgruppe 80 für τ_w , zum anderen der Nachweis des Nahtüberganges mit Bestimmung von $\Delta\sigma$ in den belasteten Blechen.
71	$50 < t \leq 80$ all t		
63	$80 < t \leq 100$ all t		
56	$100 < t \leq 120$ all t		
56	$t > 120$ $t \leq 20$		
50	$120 < t \leq 200$ $t > 20$		
45	$t > 200$ $20 < t \leq 30$		
45	$200 < t \leq 300$ $t > 30$	2) Riß am Schweißnahtübergang, ausgehend von der Kante des Anschlußbleches, mit Spannungskonzentrationen an den Schweißnahtenden infolge Blechverformungen.	4) Berechnung von $\Delta\sigma$ im Hauptblech mit der in der Skizze gezeigten Fläche. 5) Berechnung von $\Delta\sigma$ in den Laschen. Kerbfälle 4) und 5): - Die Schweißnahtenden müssen $\geq 10\text{mm}$ vom Blechende entfernt sein. - Ein Schubnarß in der Schweißnaht ist mit Kerbfall 8) zu überprüfen.
40	$t > 300$ $30 < t \leq 50$		
wie Kerbfall 1 in Tabelle 8.5	verformbares Anschlußblech 	4) Mit Kehlnähten geschweißte Laschenverbindung.	Kerbfälle 1) bis 3): Die Ausmittigkeit der belasteten Bleche muß $\leq 1\%$ der Dicke des Zwischenblechs sein.
36°	gyökszakadás nem teljes beégésű varratnál 	5) Mit Kehlnähten geschweißte Laschenverbindung.	
wie Kerbfall 1 in Tabelle 8.5	 Spannungsfäche im Hauptblech: Neigung = 1/2 rálapolt sarokvarrat	4) Mit Kehlnähten geschweißte Laschenverbindung.	
45°		5) Mit Kehlnähten geschweißte Laschenverbindung.	4) Berechnung von $\Delta\sigma$ im Hauptblech mit der in der Skizze gezeigten Fläche. 5) Berechnung von $\Delta\sigma$ in den Laschen. Kerbfälle 4) und 5): - Die Schweißnahtenden müssen $\geq 10\text{mm}$ vom Blechende entfernt sein. - Ein Schubnarß in der Schweißnaht ist mit Kerbfall 8) zu überprüfen.

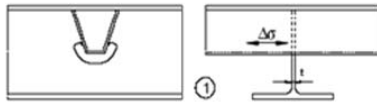
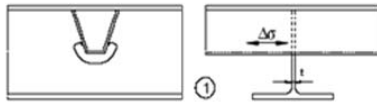
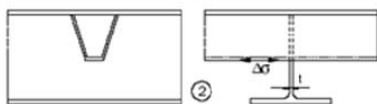
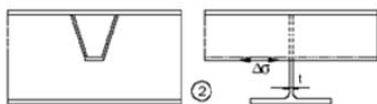
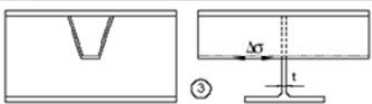
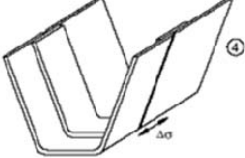
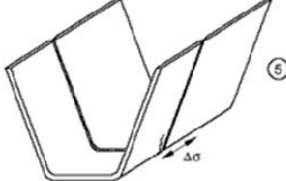
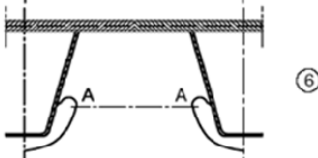
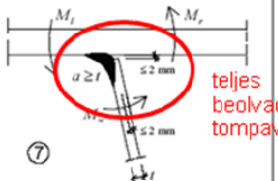
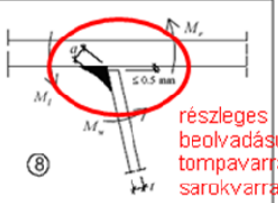
4 táblázat Hegesztett bekötések

Tabelle 8.7: geschweißte Knoten von Fachwerkträgern

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Anforderungen
90	Anschluß mit Spalt: Kerbdetail 1): K- und N- Knoten, Rundhohlprofile: 	Kerbfälle 1) und 2): - Es sind getrennte Nachweise für Gurte und Diagonalen zu führen. - Bei Zwischenwerten von t_0/t_1 ist zwischen den Kerbgruppen linear zu interpolieren. - Bei Diagonalen mit $t \leq 8\text{mm}$ sind Kehlnähte erlaubt. - t_0 und $t_1 \leq 8\text{mm}$ - $35^\circ \leq \theta \leq 50^\circ$ - $b_0/t_0 t_1 \leq 25$ - $d_0/t_0 t_1 \leq 25$ - $0,4 \leq b_0/b_1 \leq 1,0$ - $0,25 \leq d_0/d_1 \leq 1,0$ - $b_0 \leq 200\text{mm}$ - $d_0 \leq 300\text{mm}$ - $-0,5h_0 \leq e_{ip} \leq 0,25h_0$ - $-0,5d_0 \leq e_{ip} \leq 0,25d_0$ - $e_{op} \leq 0,02b_0$ oder $\leq 0,02d_0$
m=5		
45	Anschluß mit Spalt: Kerbdetail 2): K- und N- Knoten, Rechteckprofile: 	[e _{op} : Ausmittigkeit rechtwinklig zur Verbandsene] Kerbfall 2): $0,5(b_0 - b_1) \leq g \leq 1,1(b_0 - b_1)$ und $g \geq 2t_0$
m=5		
71	$\frac{t_0}{t_1} \geq 2,0$	
36	$\frac{t_0}{t_1} = 1,0$	

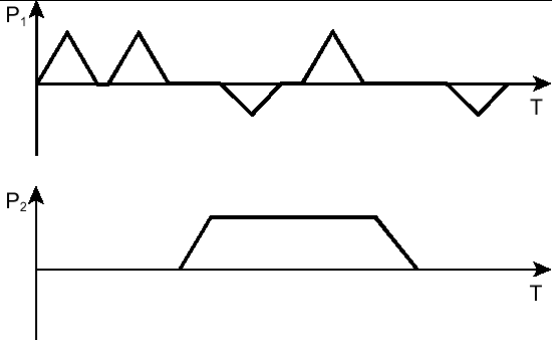

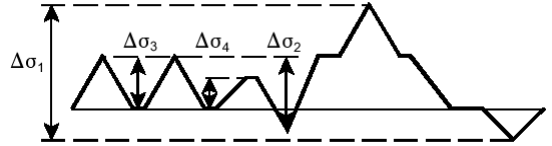
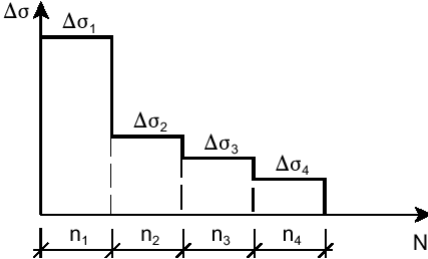
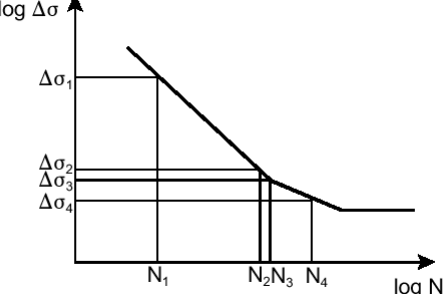
5 táblázat Rácsostartók hegesztett kapcsolatai

Tabelle 8.8: Orthotrope Platten mit Hohlrippen

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderungen
80		1) Durchgehende Längsrippe mit Ausschnitt im Querträger. folytatólagos hosszborða	1) Der Nachweis mit der Längsspannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ in der Rippe zu führen.
71			
80		2) Durchgehende Längsrippe ohne Ausschnitt im Querträger.	2) Der Nachweis mit der Längsspannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ in der Rippe zu führen.
71			
36		3) Längsrippen am Querträger stoßen. a hosszborða illesztése a keresztartónál	3) Der Nachweis ist mit der Längsspannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ in der Rippe zu führen.
71		4) Rippenstoß, voll durchgeschweißte Stumpfnah mit Badsicherung. bordaillesztés hizláló lemezzel	4) Der Nachweis ist mit der Längsspannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ in der Rippe zu führen.
112		5) Von beiden Seiten voll durchgeschweißte Stumpfnah ohne Badsicherung. bordaillesztés kétoldali tompavarrattal hizláló lemez nélkül	5) Der Nachweis ist mit der Längsspannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ in der Rippe zu führen. Die Haftung der Badsicherung ist nur innerhalb der späteren Stumpfnah zulässig.
90			
80			
71		6) Kritischer Schnitt im Querträgersteg mit Ausschnitten.	6) Der Nachweis ist mit der Spannungsschwingbreite im kritischen Schnitt unter Berücksichtigung von Vierendeel Effekten zu führen. ANMERKUNG Wird die Spannungsschwingbreite nach EN 1993-2, 9.4.2.2(3) ermittelt, darf Kerbfall 112 verwendet werden.
71		7) Versenkte Naht mit $a \geq t$ teljes beolvadású tompavarrat	7) Der Nachweis ist mit der Spannungsschwingbreite infolge Blechbiegung zu führen. W_w ist mit t zu berechnen.
50		8) Kehlnaht oder nicht voll durchgeschweißte Naht, wenn nicht durch Kerbfall 7) abgedeckt. részleges beolvadású tompavarrat, v sarokvarrat	8) Der Nachweis ist mit der Spannungsschwingbreite infolge Biegung in der Schweißnaht oder im Blech zu führen. W_w ist mit a zu berechnen.

6 táblázat Zártbordás ortotróp lemezek

Fáradásvizsgálat az EC Part 1.9: Fatigue, prEN 1993-1-9:2003 17. May 2003 szerint

<p>Teherismétlődés Tipikus terhek, melyek a vizsgált időtartamon belül n-szer fordulnak elő. Lehetőség van a tényleges erő-idő lefolyás közelítésére tapasztalatok alapján felvett terhelési szituációkkal mindaddig, amíg ezek minden teherciklusban és a teljes használati időtartam alatt egy konzervatív közelítést adnak.</p>	
<p>A részletes tájra vonatkozó összegzett feszültség-idő-diagramm.</p>	
<p>A feszültség-ingadozások leszámítása pl. tározó módszerrel.</p>	
<p>A meghatározott/leszámlált feszültség-ingadozásokból előállítható a feszültség-spektrum.</p>	
<p>A feszültség-ingadozások száma a törésig</p>	
<p>Lineáris károsodási hipotézis</p>	$\sum \frac{n_i}{N_i} = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \frac{n_4}{N_4} \leq D_L$

31 ábra Fáradásvizsgálat az EC3 Part 1.9 szerint

A károsodási hipotézis képlete:

$$D_d = \sum n_{Ei} / N_{Ri}$$

Ahol

$$n_{Ei} = \Delta\sigma_i \cdot \gamma_{Ff} \quad \Delta\sigma_i = \text{a „mért”, tényleges feszültségingadozás (üzemi feszültség)}$$

$$\gamma_{Ff} = \text{az ekvivalens károsodáshoz tartozó biztonsági tényező}$$

$$N_{Ri} = \Delta\sigma_D / \gamma_{Mf} \quad \Delta\sigma_D = \text{a fáradási szilárdság értéke } 2 \cdot 10^6 \text{ teherismétlődési számhoz}$$

$$\gamma_{Mf} = \text{a fáradási szilárdsághoz } (\Delta\sigma_D) \text{ tartozó biztonsági tényező}$$

A fáradásvizsgálat szempontjából a szerkezet megfelel, ha

$$D_d \leq 1.0$$

EN 1993-1-9 ajánlott értékei γ_{Ff} -re

méretezési eljárás	a károsodás következményei	
	alacsony	magas
károsodást megengedő	1,00	1,15
biztonságot megkövetelő az előjelek nélkül bekövetkező károsodásokkal szemben	1,15	1,35

A D_d -vel megegyező károsodást előidéző ún. „ekvivalens” feszültség spektrum alkalmazása is megengedett. Ez az ekvivalens spektrum tartozhat egy konstans feszültségingadozáshoz, melyet egy állandó fárasztó teher (Q_e) okoz. További egyszerűsítést jelent, ha a választott állandó fárasztó teher ($Q_{E,2}$) teherismétlési száma pontosan $2 \cdot 10^6$.

Ebben az esetben a következőket kell kimutatni:

$$\Delta\sigma_{E,2} \cdot \gamma_{Ff} \leq (D_d)^{1/m} \cdot \Delta\sigma_D / \gamma_{Mf}$$

$$n_{E2} \leq (D_d)^{1/m} \cdot N_{Ri}$$

Ahol

$$\gamma_{Ff} = \text{az ekvivalens károsodáshoz tartozó biztonsági tényező}$$

$$\Delta\sigma_{E,2} = 2 \cdot 10^6 \text{ ismétlődési számú ekvivalens károsodást okozó feszültségingadozás}$$

$$m = \text{a fáradási görbe meredeksége}$$

$$\Delta\sigma_D = \text{a fáradási szilárdság értéke } 2 \cdot 10^6 \text{ teherismétlődési számhoz}$$

$$\gamma_{Mf} = \text{a fáradási szilárdsághoz } (\Delta\sigma_D) \text{ tartozó biztonsági tényező}$$