

Értékünk AZ **EMBER**

Humán erőforrás-fejlesztési Operatív Program



Dr. Németh György

TARTÓSZERKEZETEK III.

Acélszerkezetek méretezésének alapjai

Készült a HEFOP 3.3.1-P.-2004-09-0102/1.0 pályázat támogatásával.

Szerző: Dr. Németh György

Lektor: Dr. Dunai László
egyetemi tanár

© Dr. Németh György, 2006

A dokumentum használata

Mozgás a dokumentumban

A dokumentumban való mozgáshoz a Windows és az Adobe Reader megszokott elemeit és módszereit használhatjuk.

Minden lap tetején és alján egy navigációs sor található, itt a megfelelő hivatkozásra kattintva ugorhatunk a használati útmutatóra, a tartalomjegyzékre, valamint a tárgymutatóra. A ◀ és a ▶ nyilakkal az előző és a következő oldalra léphetünk át, míg a Vissza mező az utoljára megnézett oldalra visz vissza bennünket.

Pozicionálás a könyvjelzőablak segítségével

A bal oldali könyvjelző ablakban tartalomjegyzékfa található, amelynek bejegyzéseire kattintva az adott fejezet/alfejezet első oldalára jutunk. Az aktuális pozícionkat a tartalomjegyzékfában kiemelt bejegyzés mutatja.

A tartalomjegyzék és a tárgymutató használata

Ugrás megadott helyre a tartalomjegyzék segítségével

Kattintsunk a tartalomjegyzék megfelelő pontjára, ezzel az adott fejezet első oldalára jutunk.

Keresés a szövegben

A dokumentumban való kereséshez használjuk megszokott módon a Szerkesztés menü Keresés parancsát. Az Adobe Reader az adott pozíciótól kezdve keres a szövegben.

Tartalomjegyzék

Előszó	5
1. A szerkezeti acélok általános jellemzése	6
1.1. Az acél fogalma	7
1.2. Ötvözők és szennyezők	8
1.3. Ötvöztelen és ötvözött acélok, mikroötvözés	9
1.4. Acélszerkezetek anyagai	10
1.5. A megmunkálás hatása az acélok szerkezetére	15
1.6. Hengerelt termékek	16
2. Az acélszerkezetek méretezésének elvi alapjai	18
2.1. Az anyagmodellek	18
2.2. A szerkezetek statikai modellje	22
2.3. Első-, másod- és harmadrendű elméletek	22
2.4. A képzetes állapotjellemzők	24
2.5. A sajátfeszültségek	25
2.6. Az acélszerkezetek határállapotai	26
3. Acélszerkezetek méretezése	53
3.1. Szabványok és előírások	53
3.2. Tervezési állapotok, figyelembe veendő hatások	55
3.3. Általános méretezési elvek	56
3.4. Keresztmetszetek osztályozása	60
3.5. Keresztmetszetek ellenállása	70
3.6. Rudak stabilitási ellenállása	80
3.7. Kapcsolatok méretezése	109
Mellékletek	160

Előszó

A Széchenyi István Egyetemen minden BSc képzésben részt vevő építő- és építészmérnök számára kötelező tananyag a Tartószerkezetek c. tantárgysorozat. Ez a jegyzet e tárgykörnek harmadik részét, az acélszerkezetek méretezésének alapjait foglalja össze egy szemeszter alatt (remélhetőleg) megtanulható terjedelemben. A jegyzet anyagának elsajátításához – mint más tárgyak esetében is – előtanulmányok szükségesek. Az Építőanyagok és elsősorban a Mechanika (szilárdságtan) c. tárgyakban tanultak ismerete elengedhetetlen.

Az acélszerkezetek témakörében ez az első tantárgy, amivel a hallgatók találkozhatnak, ezért oktatásának elsődleges célja az alapfogalmak és az alapvető összefüggések megismertetése. Ez a jegyzet az előbbi célok mellett – és terjedelmi korlátok között – a gyakorlati számításokhoz szükséges ismereteket is igyekszik nyújtani. A jegyzet első fejezetének témája az acélszerkezetek általános jellemzése és az anyagtani ismeretek bővítése, a második fejezet tárgyalja a méretezés elvi alapjait, a gyakorlati számításokra alkalmas anyagmodelleket és az acélszerkezetek határállapotait, a harmadik pedig a gyakorlati méretezés első lépéseire szándékozik segítséget nyújtani.

Hazánkban jelenleg bevezetés alatt áll az európai összefogással készülő (magyar nyelven még csak részben elkészült) tartószerkezetekre vonatkozó szabványsorozat, az *Eurocode*. Ennek része az acélszerkezetek tervezése témakört felölelő *Eurocode 3*, amelyre e jegyzet harmadik fejezetében, a szerkezeti elemek és kapcsolatok gyakorlati méretezésével kapcsolatban gyakran hivatkozunk. Az *Eurocode 3* terminológiája és jelölésrendszere sok esetben eltér az eddig megszokottól, ezért a Mellékletben a jelölésrendszert közöljük, a magától nem értetődő „Eurocode-ízű” szakkifejezéseket pedig előfordulásukkor igyekszünk megmagyarázni.

Ez a jegyzet (egyelőre) csak elektronikus formában jelenik meg, így az esetleges hibák javítása könnyen megoldható. Az ilyen irányú észrevételeket és javaslatokat a nemethy@sze.hu e-mail címen köszönettel veszi

a Szerző

1. A szerkezeti acélok általános jellemzése

Az acél a ma ismert legkiválóbb tartószerkezeti építőanyag, mely önállóan (acélszerkezetként) vagy más anyagokkal kombinálva (pl. vasbeton szerkezetként) a legtöbb gyakorlati esetben alkalmas az építmények tartószerkezeténél adódó műszaki követelmények kielégítésére. Az acél a technika más területein is a legfontosabb alapanyagok egyike, mi itt csak a szerkezetépítésben használt acélféleségekkel, a *szerkezeti acélok*kal foglalkozunk.

Az építőiparban használt acélok előnyös tulajdonságai a nagy szilárdság és szívósság, a rugalmasság és a nagy rugalmassági tényező (1. táblázat), a szakadást megelőző képlékenység, az egyenletes minőség, a szilárdsági és alakváltozási tulajdonságok tág határok közötti szabályozhatósága (ötvözés és hőkezelés), a könnyű alakíthatóság (kovácsolható, hengerelhető, sajtolható, húzható, önthető), a könnyű megmunkálhatóság (fűrhető, vágható, fűrészelhető, forgácsolható, hegeszthető, pácolható), az ütésekkel és ismételt igénybevételekkel szembeni nagy ellenállóképesség.

A szerkezeti acélok néhány jellemzője	
Szakítószilárdság	340 – 600 N/mm ²
Folyáshatár	220 – 350 N/mm ²
Rugalmassági modulus	210 000 N/mm ²
Szakadási nyúlás	18 – 30 %
Fajlagos ütőmunka (+ 20 C°)	30 – 100 J/cm ²
Brinell-keménység	1000 – 2000 N/mm ²
Hőtágulási együttható	1,2 · 10 ⁻⁵ 1/C°
Sűrűség	7850 kg/m ³

1.1. táblázat

Nagy szilárdsága miatt az acél viszonylag a legkönnyebb tipikusan alkalmazott építőanyag, vagyis az ugyanakkora teherre méretezett tartók közül az acéltartó a legkisebb tömegű. Ezért kizárólag acélszerkezet alkalmazása jöhet szóba, ha a saját tömeg csökkentése fontos (nagy nyílású hidak, nagy fesztávolságú terek lefedése, mozgó szerkezetek: daruk, hidak, vízépítési acélszerkezetek). Az acélváz képlékeny tartaléka miatt jól bírja a rendkívüli terheket (pl. földrengés).

Minden acélszerkezet előregyártott, az előregyártás minden előnyével könnyen, gyorsan szerelhető. Az acélszerkezetek könnyen átalakíthatók, bővíthetők, az ideiglenes szerkezetek áthelyezhetők.

Ha a terhek megnövekedése, vagy az építmény rendeltetésének megváltozása úgy kívánja, az acélszerkezetek viszonylag könnyen megerősíthetők. A lebontott acélszerkezetek anyaga – ócskavasként az acélgyártásban – újra felhasználható.

Hátrányként említendő, hogy az acél rozsdásodik, a korrózióvédelem az acélszerkezet fenntartási költségeinek fontos tényezője. Bár az acél nem tartozik az éghető anyagok közé, az acélszerkezetek mégsem tűzállóak, mert magas hőmérsékleten (600 – 700 C°) szilárdsága elvész. Az acél viszonylag drága építőanyag, ezért a mérnököknek kis anyagfelhasználással járó megoldásra kell törekedniük.

1.1. Az acél fogalma

Az acél vasból, szénből és egyéb anyagokból (ötvözők, szennyezők) álló kohászati termék, igen sok fajtája létezik. Az acélok felhasználás szempontjából fontos tulajdonságai a vegyi összetételtől és a készítés módjától függően igen széles skálán változhatnak. Az acélok csoportosítása több szempontból is lehetséges, az építőmérnöki felhasználás szempontjából legfontosabb csoport a szerkezeti acélok csoportja.

A szén minden vasötvözetben megtalálható ötvöző elem. A széntartalom kismértékű megváltoztatása lényegesen befolyásolja az anyag tulajdonságait. A nagy széntartalmú (3 – 6 %) vasötvözetek – mint például a nyersvasak és öntöttvasak – általában ridegen viselkednek, ütésre könnyen törnek. A melegen hengerelhető, kovácsolható ipari vasötvözeteket a műszaki nyelv acéloknak nevezi. Rendszerint az 1,7 %-nál kisebb széntartalmú, gyengén ötvözött anyagok megfelelően magas hőmérsékleten kovácsolhatók, azaz acélnak tekinthetők. Ezt az 1,7 %-os határt azonban nem szabad abszolút kritériumnak tekinteni, mert egyes ötvözők vagy szennyezők jelenléte kisebb széntartalom mellett is ridegséget okozhat. Egyébként a szerkezeti acélok széntartalma általában a 0,3 %-ot sem éri el.

Az „acél” tehát egy pontosan nem körülhatárolható gyűjtőfogalom, lényegében megállapodás (szabványosítás) kérdése, hogy egy adott vasötvözetet acélnak tekintünk, vagy sem.

1.2. Ötvözők és szennyezők

A fémötvözetek látszatra egynemű fémes anyagok, amelyeket legalább egy fém és egy vagy több kémiai anyag összeolvasztásával lehet előállítani. Az acéloknak tekintett vasötvözeteknél a vegyi összetétel az ötvözet tulajdonságait jelentősen befolyásolja. Ha az összetétel valamely eleme – az általa kiváltott tulajdonságok miatt – nemkívánatos, akkor szennyezőről beszélünk, ha pedig a tulajdonságok javítása céljából tudatosan bevitt (vagy bent hagyott) elemekről van szó, akkor ötvözőket említünk. Egyes kémiai elemek az ötvözetnek egyszerre többféle tulajdonságát is megváltoztathatják, ezért lehetséges, hogy különböző szempontokból ötvözőnek és szennyezőnek is minősíthetők. Bizonyos esetekben egyes ötvözők azért szükségesek, hogy más elemek által kiváltott kedvezőtlen tulajdonságokat közömbösítsék.

Az ötvözéshez gyakran csak igen kis mennyiségű, néhány század százaléknyi ötvöző elemet használnak. Az ilyen eljárás a *mikroötvözés*.

Szennyezőként leggyakrabban előforduló kémiai elemek az oxigén, a nitrogén, a hidrogén, a kén, a foszfor és a réz.

Az oxigén főleg vegyületek formájában fordul elő. Csökkenti a szilárdságot, a nyúlóképességet, a szívósságot és a kovácsolhatóságot. Növeli az ötvözet izzó állapotban előforduló törékenységi hajlamát (vöröstörékenység) és a ridegtörési hajlamot.

A nitrogén felkeményíti az acélt a képlékenység és a szívósság rovására. Fokozza az öregedési hajlamot és növeli az acél 300 C° körüli hőmérsékleten előálló törékenységét (kéktörékenység). Mikroötvözésnél mint ötvöző szerepel.

A hidrogén az egyik legkárosabb szennyező. Ötvözött acéloknak gyakran repedést okoz, általában rideggé és porózussá teszi az acélt.

A kén a képlékenységet és a korrózióval szembeni ellenállást csökkenti, hegesztett szerkezeteknél gyakran repedéseket idéz elő, a forgácsolhatóságot viszont javítja.

A foszfor növeli a szilárdságot, az önthetőséget, a korrózióval szembeni ellenállást, de erősen növeli a ridegséget, a ridegtörési hajlamot és a kéktörékenységet. Különösen kellemetlen a foszfor és a hidrogén, valamint a foszfor és a kén együttes jelenléte, mivel hegesztett szerkezeteken repedéseket idéznek elő.

A réz növeli az acél szilárdságát és a korrózióval szembeni ellenállást, de csökkenti a képlékenységet. Előfordul, hogy a rézet a korrózióval szembeni védelem céljából tudatosan viszik be a gyártás során (ötvözés).

Az acél leggyakoribb ötvözőelemei – a szénen kívül – a mangán, a szilícium, a nikkel, a króm, a wolfram, a molibdén, a vanádium és a titán.

A szén az acélok legfontosabb ötvöző eleme. A széntartalom növekedésével nő az acél szilárdsága, keménysége, kopásállósága és edzhetősége, de csökken a képlékenysége, a hideg- és melegalakíthatósága, a hegeszthetősége, a forgácsolhatósága és a korrózióval szembeni ellenállása.

A mangán az acél szilárdságát, kopásállóságát és korrózióval szembeni ellenállását úgy növeli, hogy közben nem változik a képlékenység. A mangánötvözés csökkenti a kén okozta vöröstörékenységi hajlamot, rontja viszont a forgácsolhatóságot.

A szilícium növeli az acél keménységét, kopásállóságát, rozsd- és savállóságát, valamint tűzállóságát. A szilíciumtartalom növelésével csökken a képlékenység, az alakíthatóság, a forgácsolhatóság és a hegeszthetőség.

1.3. Ötvöztelen és ötvözött acélok, mikroötvözés

Ötvöztelen acélnak nevezik a szénen kívül legfeljebb 1,65 % ötvözött tartalmú acélokat. (Az ilyen acélokat szokás szénacéloknak is nevezni. Ezzel szemben az ötvözött acél kifejezés pedig arra utal, hogy nem szén a fő ötvöző elem.) Közepesen ötvözöttek az 1,65 – 5,0 %, erősen ötvözöttek az 5,0 %-nál több ötvözött tartalmú acélok.

Az olcsó, tömeges felhasználásra kerülő szerkezeti acéloknál a szilárdságot régen főleg a széntartalom biztosította. Később – a hegeszthetőség érdekében – a széntartalmat igyekeztek 0,2 % alatt tartani, és az anyagokat szén helyett mangánötvözéssel állították elő. Ezzel el lehetett érni, hogy az alacsony széntartalom esetében szokásos 220 – 260 N/mm² folyáshatár 350 N/mm²-re emelkedjen. A hegesztett szerkezetek céljára készülő, az ötvöztelen karbonacéloknál magasabb szilárdságú acélokat mikroötvözéssel gyártják. A mikroötvözött acélok a mangán mellett csak néhány század százalékban tartalmaznak különleges ötvözőket, amelyek – csekély mennyiségük miatt – a hegeszthetőséget és a szívósságot nem rontják, de a szilárdságot mégis emelik.

A mikroötvözés egyik fajtája azáltal javítja az acél tulajdonságait, hogy elősegíti a nitridképződést, ami finomszemcsés, nagy szilárdságú szövet szerkezetet eredményez. Ehhez természetesen az szükséges, hogy az anyagban a kívánt nitrogéntartalom mellett megfelelő mennyiségű nitridképző fém, elsősorban alumínium, titán, vanádium és nóbium legyen.

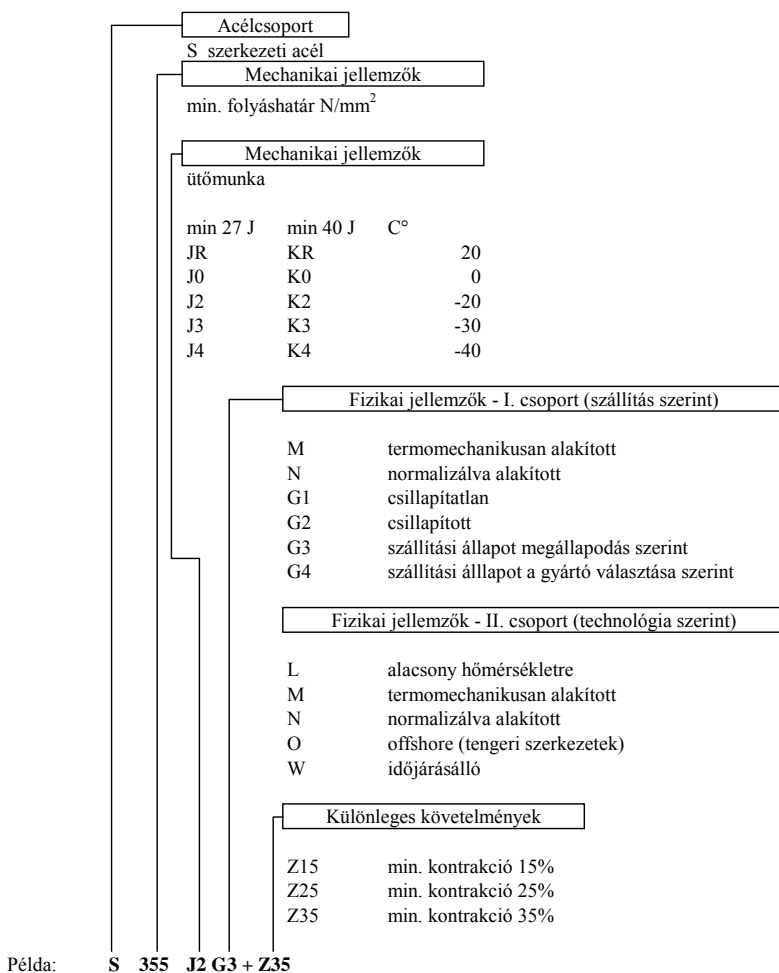
A mikroötvözés másik fajtája a bórral való ötvözés. Ennél a kis karbontartalmú mangánacélhoz a már említett nitridképzők és kis mennyiségű króm, nikkel és molibdén mellett 0,002 – 0,006 % bórt adagolnak. Az ilyen eljárással készült acélok folyáshatára 500 és 700 N/mm² között van. A bórral mikroötvözött acélok szilárdsága nemesítéssel tovább növelhető, 800 – 1000 N/mm² folyáshatárral is gyárthatók. A nemesítés egy speciális hőkezelés, az edzésnek és a megeresztésnek olyan kombinációja, amely finom szövetű, egyenletes szemcsészetű, szilárd, de nem rideg anyagot eredményez.

1.4. Acélszerkezetek anyagai

Acélszerkezetek gyártásához megfelelő tulajdonságokkal rendelkező ún. félkésztermékek (lemezek, idomacélok) és segédanyagok (csavarok, elektrodák) szükségesek. A megfelelő tulajdonság azt jelenti, hogy az anyagoknak ki kell elégíteniük a különféle előírásokban, szabványokban rögzített követelményeket. A követelményeket (pl: mechanikai jellemzők, vegyi összetétel, geometriai tűrése stb.) a felhasználási terület kritériumaival összhangban határozzák meg. A felhasználási terület széles körének megfelelően sokféle acélminőség létezik, ezeket szabványos jelölésük alapján lehet megkülönböztetni egymástól. Az EN 10027:1992, EN 10025:1993 és EN 10113:1993 szabványok szerinti szerkezeti acélok jelölésrendszerét az 1.1. ábra mutatja. Az 1.2. és 1.3. táblázat a szerkezeti acélok mechanikai tulajdonságaira és vegyi összetételére vonatkozó előírásokat foglalja össze.

Mint az a táblázatokból kitűnik, a szerkezeti acélok – folyáshatárjuk alapján – szilárdsági csoportokba sorolhatók. A leggyakrabban használt acélok névleges folyáshatára 235, 275, ill. 355 N/mm², így most ezek a számok jelentik a szilárdsági kategóriákat.

Régebben a csoportba sorolás a szakítószilárdság alapján történt, ugyan-ezek az anyagok régi jelöléssel a 37-es, a 45-ös, ill. az 52-es szilárdsági csoportba tartoznak. (A számok tízszeresei N/mm²-ben jelentik a szakítószilárdságot.)



1.1. ábra. Szerkezeti acélminőségek jelölése

Szerkezeti acélok mechanikai tulajdonságai															
Szabvány	Anyagok	f_y min. folyáshatár N/mm ²						f_u szakító szilárdság N/mm ²		Min. szakadási nyúlás %				Ütő-munka	
		névleges vastagság (mm)						névleges vastagság (mm)		névleges vastagság (mm)				Hőmér- skála	Energia
		≤1 6	>1 6	>4 0	>6 3	>8 0	>10 0	>3 0	>10 0	>3 0	>4 0	>6 0	>10 0	C°	J
EN 10025: 1993	S235 JRG2														
	S235 J0	235	225	215			195	340 - 470		26	25	24	22	+2 0 0	27 27
	S275 JR														
	S275 J0	275	265	255	245	235	225	410- 550	400- 540	22	21	20	18	+2 0 0	27 27
	S355 JR S355 J0													+2 0 0	27 27
	S355 J2G3/G4 S355 K2G3/G4	355	345	335	325	315	295	490-630	470-630	22	21	20	18	-20 -20	27 40
EN 10113-3: 1993	S 355 M													-20	40
	S 355 ML	355	345	335				450-610		22				-50	27
	S 420 M													-20	40
	S 420 ML	420	400	390				500-660		19				-50	27
	S 460 M													-20	40
	S 460 ML	460	440	430				530-720		17				-50	27

1.2. táblázat.

Szerkezeti acélok vegyi összetétele																	
Szabvány		C max % névleges vastagság (mm)			Mn max %	Si max %	P max %	S max %	N max %	Al ¹⁾ max %	Nb max %	V max %	CEV ⁷⁾ max %				
		≤16	>16 ≤40	>40									≤16	>16 ≤40	>40 ≤63	>63 ≤150	
		EN 10025: 1993 ⁶⁾	S235 JRG2	0,17									0,17	0,20	1,4	-	0,045
S235 J0	0,17		0,17	0,17	1,4	-	0,040	0,040	0,009 <small>4) 5)</small>				0,35	0,35	0,38	0,38	
S275 JR	0,21		0,21	0,22	1,5	-	0,045	0,045	0,009 <small>4) 5)</small>				0,40	0,40	0,42	0,42	
S275 J0	0,18		0,18	0,18	1,5	-	0,040	0,040	0,009 <small>4) 5)</small>								
S355 JR	0,24		0,24	0,24	1,6	0,55	0,045	0,045	0,009 <small>4) 5)</small>				0,45	0,45	0,47	0,47	
S355 J0	0,20		0,20	0,22	1,6	0,55	0,040	0,040	0,009 <small>4) 5)</small>				0,45	0,45	0,47	0,47	
S355 J2G3/G4 S355 K2G3/G4	0,20		0,20	0,22	1,6	0,55	0,035	0,035	-				0,45	0,45	0,47	0,47	
EN 10113-3: 1993 ²⁾	S 355 M	0,16	0,16	0,16	1,6	0,50	0,035	0,030	0,015	0,02	0,05	0,010	0,39	0,39	0,40	0,45	
	S 355 ML	0,16	0,16	0,16	1,6	0,50	0,030	0,025	0,015	0,02	0,05	0,010	0,39	0,39	0,40	0,45	
	S 420 M	0,18	0,18	0,18	1,7	0,50	0,035	0,030	0,020	0,02	0,05	0,012	0,43	0,45	-	-	
	S 420 ML	0,18	0,18	0,18	1,7	0,50	0,030	0,025	0,020	0,02	0,05	0,012	0,43	0,45	-	-	
	S 460 M	0,18	0,18	0,18	1,7	0,60	0,035	0,030	0,025	0,02	0,05	0,012	0,45	0,46	-	-	
	S 460 ML	0,18	0,18	0,18	1,7	0,60	0,030	0,025	0,025	0,02	0,05	0,012	0,45	0,46	-	-	

1.3. táblázat.

¹⁾ Megfelelő mennyiségű N-lekötő elem jelenléte esetén a minimális Al-tartalom előírást nem kell alkalmazni.

²⁾ A CR-, Cu- és Mo-tartalom összege ne legyen nagyobb 0,60 %-nál.

³⁾ 30 mm-nél nagyobb névleges vastagság felett a C-tartalom legfeljebb 0,22 %.

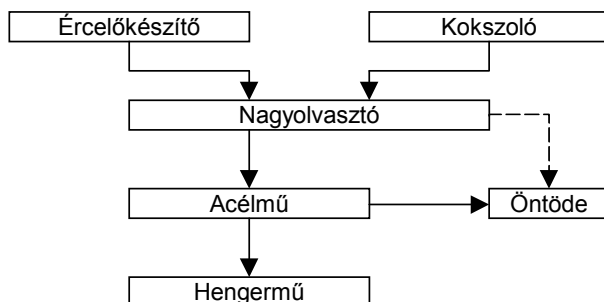
⁴⁾ A megadott értékek túlléphetők, amennyiben minden egyes 0,001 % N-növekedés mellett az acél foszfortartalma a megengedett legnagyobb értékhez képest 0,005 %-kal csökken. A nitrogéntartalom az adagelemzésben azonban nem haladhatja meg a 0,012 %-ot.

⁵⁾ Az acél N-tartalmára vonatkozó előírás nem érvényes, ha az acél legalább 0,020 % Al-ot vagy elegendő más N-lekötő elemet tartalmaz.

⁶⁾ 100 mm-nél nagyobb névleges vastagság esetén a karbon-tartalomban meg kell egyezni.

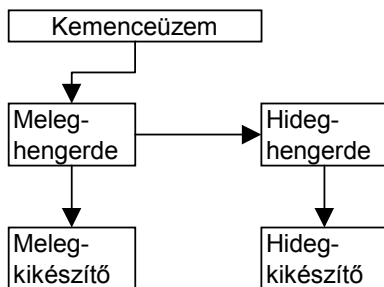
⁷⁾ $CEV = Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Cu + Ni)/15$ (szénegyenérték)

A hengerelt félkésztermékeket hengerművek állítják elő, amelyek legtöbbször kohászati vertikumok üzemegységei. A kohászati vertikum üze-
meit és azok kapcsolatát az 1.2. ábra szemlélteti.



1.2. ábra. Kohászati vertikum üze-
mei

A hengerművek öt fő üzemegységből állnak. (1.3. ábra)



1.3. ábra. A hengermű üzemegységei

A kemenceüzemben az anyagot hengerlési hőfokra (1000 – 1200 C°) hevítik, majd a meleg-hengerdébe továbbítják. A hengerlés forgó hengerpárok között végzett folyamatos nyújtóalakítás. Alakos szelvények (idomacélok, sínek) hengerlésekor a végleges szelvény csak több lépcsőben alakítható ki. A gyors kihűlés miatt a melegen hengerelhető lemezvastagság alsó határa 2 – 3 mm. További feldolgozás (hideghengerlés) céljára a meleg-hengerdék feltekercselt szalagokat is előállítanak.

A meleg kikészítő üzemben a hengerelt darabokat hűtik, a selejtes deformálódott részeket eltávolítják. Ezután következik az egyengetés, a mé-

retre vágás és a laboratóriumi vizsgálatokhoz szükséges mintavétel. A kikészítő üzemben végzik az esetleg szükséges hőkezeléseket (pl. lágítás, normalizálás, stb.), a darabok jelölését és a csomagolást (kötözés) is. A jelölés az adagszám beütéséből, a méret, a rendelő, a rendelési szám és a gyártó cég jelének felfestéséből áll.

Hideghengerléssel igen vékony lemezek, fóliák is előállíthatók. Hideghengerléshez általában kis szénttartalmú, jól alakítható acélokat használnak. Ennek ellenére az anyag fokozatosan felkeményedik, és repedékennyé válik, ezért hengerlés közben és annak befejezése után lágító hőkezelésre van szükség.

A hidegen hengerelt síklemezek és szalagok kikészítése dresszírozásból, zsírtalanításból, méretre vágásból, hőkezelésből, mintavételből és csomagolásból áll. A vékony lemezek nagy része a korrózió elleni védelem céljából horganybevonattal készül.

Vékonyfalú profilos szelvényeket szalagokból görgős hajlító gépsorokon hideghengerléssel, vagy élhajlító sajtókon lehet előállítani. Élhajlítással egyedi szelvények is készíthetők, de a gyártási hossz korlátozott. Görgős gépsorokon zárt szelvények is gyárthatók, ha a gépsor végére egy hosszvarratkészítő automatát iktatnak be.

1.5. A megmunkálás hatása az acélok szerkezetére

Az acélszerkezeti elemek hideg- és melegalakításon mennek keresztül, ami általában kihatással van az anyagszerkezetre, és ezáltal a tulajdonságokra. A 800 C° feletti hőmérsékleten történő megmunkálást tekintjük melegmegmunkálásnak, az összes többi eset hidegmegmunkálás.

A melegalakításoknál a kezdeti és a végső hőmérséklet hatása igen jelentős. A túl meleg hőmérséklet a felület oxidációjához (fokozott reveképződéshez) vezet, míg az alacsony hőfokon végzett melegmegmunkálás belső szakadásokat okozhat. A szabályozott véghőmérsékletű hengerlés biztosítja, hogy az alakítás 850 – 900 C° hőmérsékleten fejeződjön be.

A melegen hengerelt anyagok kellemetlen tulajdonsága lehet a rostosréteges szerkezet, amelyet a zárványok és szennyeződésdúsulások hengerlés közbeni rendeződése idéz elő. Emiatt az anyag szilárdsági és alakváltozási tulajdonságai mások a hengerlés irányában és arra merőlegesen. A keresztmetszet vastagsága mentén is változnak a tulajdonságok, mert a megmunkálás hatása a felületek közelében erőteljesebben jelentkezik. Általában megfigyelhető, hogy a vastagság növekedésével a mechanikai tulajdonságok romlanak, és a mechanikai jellemzők szórása növekszik. A jelen-

séget vastagsághatásnak nevezik. A vastagsághatás normalizálással (felhevítés és lassú lehűtés) jelentősen csökkenthető.

A hidegalakításokat – a jelentős sűrűdással és felmelegedéssel járó hideghengerlést kivéve – általában szobahőmérsékleten, vagy csak annál valamivel magasabb hőmérsékleten végzik. Ennek az a célja, hogy elkerüljék a 200 – 300 C° hőmérsékleten bekövetkező kéktörékenységet. (Az elnevezés onnan adódik, hogy ilyen hőmérsékleten az acél kék oxidhártyát kap, amit egyébként futtatási színnek neveznek.)

A hidegalakítás hatására az anyagok fokozatosan elvesztik képlékeny alakíthatóságukat (nyúlóképességük kimerül), felkeményednek, elridegednek és szilárdságuk megnő. Ha a hengerlés az elridegedés után is folytatódik, szakadások léphetnek fel. A hidegalakítások kedvezőtlen hatása megfelelő hőkezeléssel jelentős mértékben csökkenthető.

1.6. Hengerelt termékek

A hengerművek által előállított termékek a következőképpen csoportosíthatók:

- rúdacélok,
- idomacélok,
- hengerhuzalok,
- síklemezek és szalagok,
- egyéb hengerelt termékek.

Legfontosabb rúdacélok a kör-, a négyzet- és a laposacél. A rúdacélok többsége betonacél vagy gépészeti nyersanyag, de jelentős mennyiségű rúdacélt dolgoznak fel a csavar- és a huzalgyárak is.

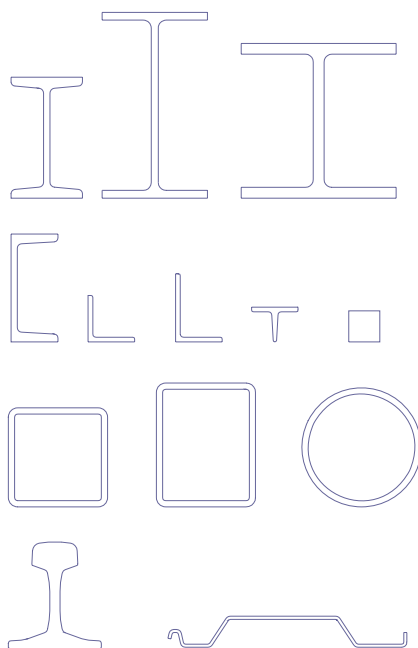
Az idomacélok az acélszerkezeteknél igen széles körben használatosak. A hagyományos keresztmetszettípusok (L, U, I, T, Z szelvények) a szegecselt szerkezetek igényeihez igazodtak, a hegesztés elterjedésével veszítettek jelentőségükből. A lejtős övű keresztmetszetekben a csavarok elhelyezése problémás, ezért a csavarozott kapcsolatú szerkezetekben inkább a párhuzamos övű szelvények használatosak (1.4. ábra).

A hengerhuzalok (hengerelt huzalok) kis keresztmetszettel készülnek főleg betonacélként, szög, huzal és kábelalapanyagként kerülnek felhasználásra. A hengerhuzalokat felcsévélve, tekercsben szállítják.

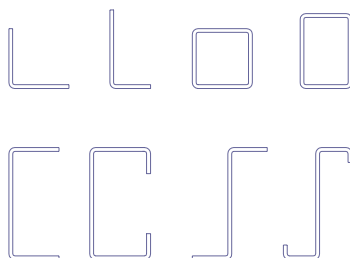
A lemezek és a szalagok a hengerművek legfontosabb termékei. A kető között főleg az a különbség, hogy a lemezeket sík elemként, a szalago-

kat pedig felcsévélvt állapotban szállítják. A lemezek vastagsága 3 és 60 mm között, szélessége pedig 500 és 2500 mm között változhat.

Az egyéb hengerelt termékek nagy része sín, de ebbe a csoportba sorolhatók a bordás lemezek (recés lemezek), a hullám- és trapézlemezek, valamint a hengerelt csövek is.



1.4. ábra. Melegen hengerelt termékek



1.5. ábra. Hidegen hengerelt szelvények

2. Az acélszerkezetek méretezésének elvi alapjai

2.1. Az anyagmodellek

A tartószerkezetek anyagának viselkedését az erőtani számításokban idealizált anyagmodellekkel írjuk le. Ezek mindig valamilyen közelítést jelentenek, és azért van rájuk szükség, hogy számítási módszereink viszonylag egyszerűek maradhassanak. A klasszikus feszültség-számítási módszereink a *Mechanika* c. tárgyból ismert a HOOKE-törvényen ($\sigma = E \cdot \varepsilon$) alapulnak, amely nyilvánvalóan nem lehet feltételek nélkül alkalmazni, mivel valóságos anyag esetén sem a feszültségek, sem pedig a nyúlások nem növekedhetnek korlátlanul.

Az acélszerkezetek anyagai háromféle anyagmodellel jellemezhetők. Ezek:

- a korlátlanul lineárisan rugalmas;
- az ideális rugalmas-képlékeny és
- a rugalmas-képlékeny-felkeményedő modellek.

2.1.1. A korlátlanul rugalmas anyagmodell

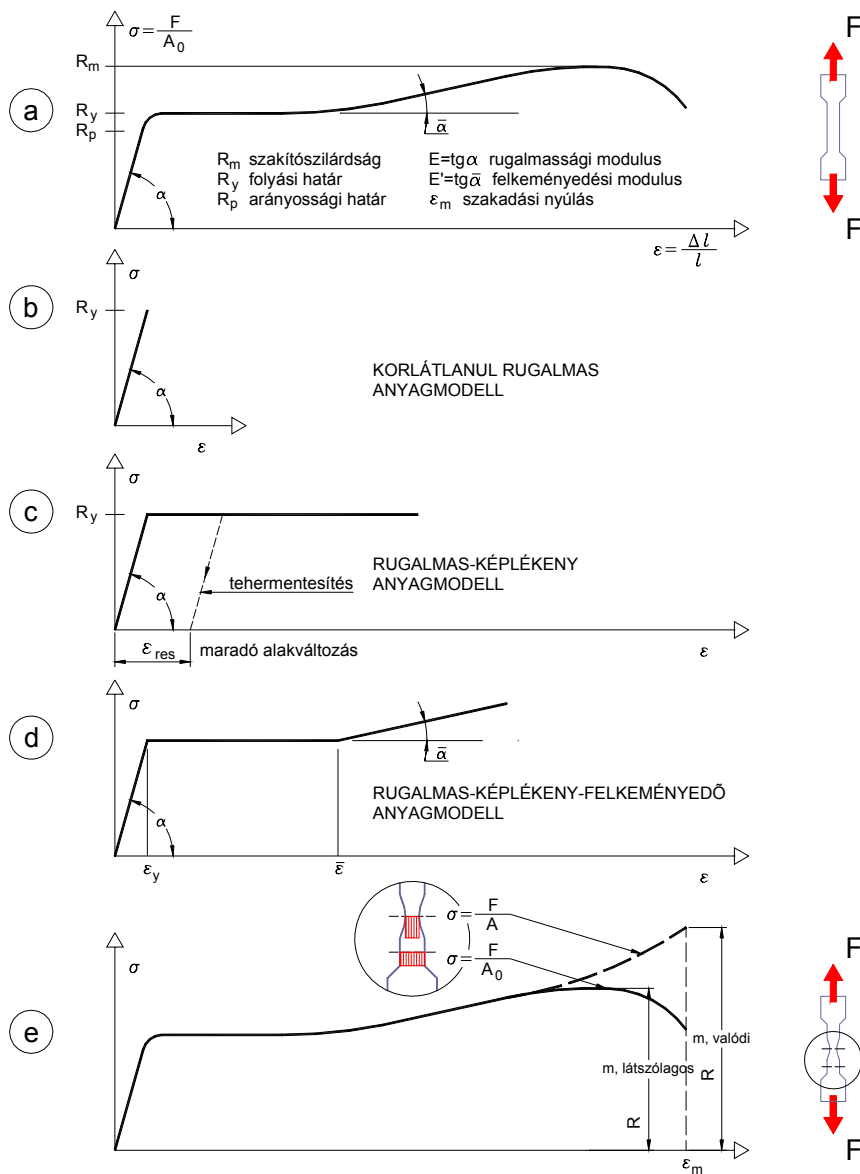
A szerkezeti acél jellegzetes $\sigma - \varepsilon$ diagramjának (2.1. ábra: „a”) tanúsága szerint a korlátlanul rugalmas anyagmodell (2.1. ábra: „b”) elvileg csak addig alkalmazható, amíg a feszültség az arányossági határt el nem éri. A gyakorlatban azonban a rugalmas viselkedés felső határának az R_y folyáshatárt szoktuk tekinteni.

Többtengelyű feszültségi állapotban rugalmas viselkedésre csak addig számíthatunk, amíg az ún. HUBER-MISES-HENCKY-féle (alaktorzulási energia-) elmélet szerint számított *redukált* feszültség a folyási határt el nem éri:

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_2\sigma_3 - \sigma_1\sigma_3} \leq R_y.$$

Síkbeli feszültségi állapotban a redukált feszültség

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2}, \text{ illetve a } \sigma_x, \sigma_y \text{ és } \tau_{xy} \text{ feszültségkomponensekkel } \sigma_{red} = \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x\sigma_y + 3\tau_{xy}^2} \text{ alakban adható meg.}$$



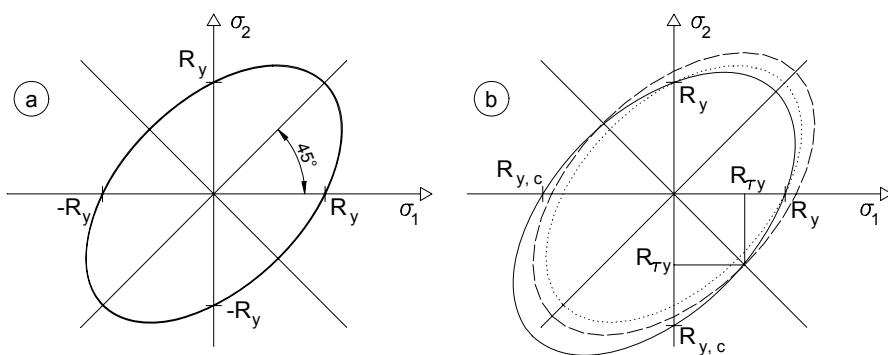
2.1. ábra. A szerkezeti acél $\sigma - \epsilon$ diagramja és az idealizált anyagmodellek

Megjegyezzük, hogy a fenti képletek helyessége kísérletekkel nem teljesen igazolható (azaz az elmélet nem teljesen hibátlan). Síkbeli feszültségi álla-

potban a folyási feltétel (a rugalmas viselkedés határa) egy origó közép-pontú, 45° -kal elforgatott ellipszissel ábrázolható, amely a tengelyeket $\pm R_y$ értéknél metszi. (2.2. ábra: „a”) Ez a húzó és nyomó folyáshatár azonos abszolút értékét jelentené. A legtöbb vasötvözet esetében azonban a folyáshatár abszolút értéke nyomás esetében nagyobb, mint húzás esetében.

Tiszta nyírás ($\sigma_1 = -\sigma_2$) esetére $R_{\tau y} = \frac{R_y}{\sqrt{3}}$ folyási feszültség számítható, ami kisebb, mint a kísérletekkel meghatározható folyási nyírófeszültség.

A hibák kijavítása céljából születtek javaslatok a centrális ellipszis megfelelő nagyítására és eltolására (2.2. ábra: „b”), de ezek – mivel az amúgy sem teljesen pontos mérnöki számításokat feleslegesen nehezítenék – a gyakorlatban nem terjedtek el.



2.2. ábra. A folyási feltétel síkbeli feszültségi állapotban: „a” a HUBER-MISES-HENCKY-féle elmélet szerint – „b” korrekciós javaslatok

2.1.2. Az ideális rugalmas-képlékeny anyagmodell

A szerkezeti acél $\sigma - \varepsilon$ diagramjának leegyszerűsítéséből adódik az ideális rugalmas-képlékeny anyagmodell (2.1. ábra: „c”), amely a folyási feszültség elérése után „ideális” képlékenységet, azaz feszültségnövekedés nélküli korlátlan alakváltozást tételez fel. Tehermentesítés esetén – és újratelheléskor a folyáshatárig – viszont ismét rugalmas a viselkedés. Ezen anyagmodell alkalmazásakor a számításokban tekintettel kell lenni a *maradó alakváltozásokra*.

Számítógépes statikai alkalmazásokban – számítástechnikai problémák elkerülése végett – megengedett a az idealizált $\sigma - \varepsilon$ diagram vízszintes szakaszát kis meredekségű egyenessel helyettesíteni.

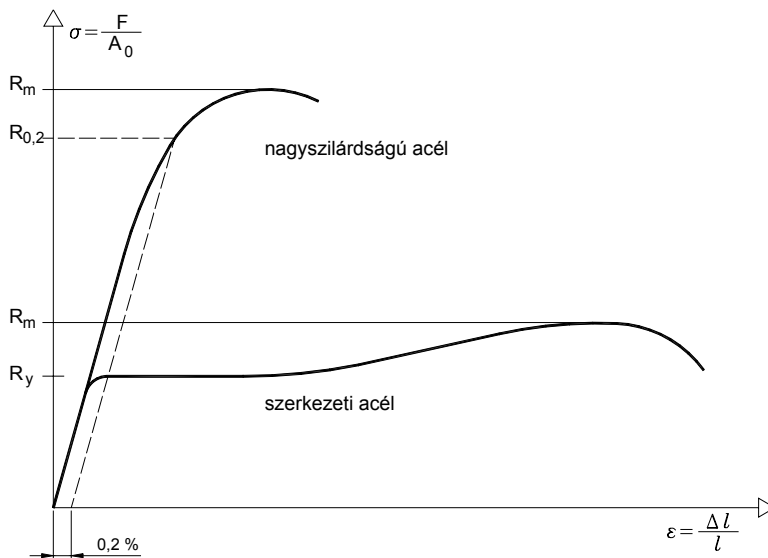
2.1.3. A felkeményedés és a szakadás

A rugalmas-képlékeny-felkeményedő anyagmodellt gyakorlati számításokban csak ritkán alkalmazzuk. A modell segítségével figyelembe lehet venni, hogy egy bizonyos mértékű képlékeny alakváltozás (ε) után további nyúlás csak feszültségnövekedéssel együtt jöhet létre. Az idealizált $\sigma - \varepsilon$ diagram harmadik egyenes szakaszára jellemző az $E' = \overline{tg \alpha}$ felkeményedési modulus. (2.1. ábra: „a”)

A húzott próbapálca keresztmetszete már a szakadás előtti állapotban jelentősen beszűkül. Eltérő $\sigma - \varepsilon$ diagramot kapunk attól függően, hogy a feszültséget az eredeti, vagy a *kontrabált* (beszűkült) keresztmetszetre vonatkoztatjuk. (2.1. ábra: „e”.) Fontos tudni, hogy a kontrakció figyelembe vételével számított $R_{m, valodi}$ szakítószilárdság sem tekinthető pontos értéknek, mert a kontrakciós szakaszon már nem egytengelyű a feszültségi állapot. Megjegyezzük, hogy a különböző anyagminőségekre megadott vagy előírt szakítószilárdság mindig a próbapálca eredeti keresztmetszete alapján számított, tehát tulajdonképpen látszólagos érték.

2.1.4. A nagyszilárdságú acélok anyagmodellje

A nagyszilárdságú acélok képlékeny tulajdonságai mások, nincs kifejezett folyáshatáruk és szakadási nyúlásuk is korlátozottabb. A folyáshatárt – megállapodásszerűen – a 0,2% maradó alakváltozáshoz tartozó $R_{0,2}$ feszültség helyettesíti. Az ilyen acélféleségek általában a korlátlanul rugalmas anyagmodellel jellemezhetők.



2.3. ábra. Szerkezeti acél és nagyszilárdságú acél $\sigma - \varepsilon$ diagramja

2.2. A szerkezetek statikai modellje

Annak érdekében, hogy a térbeli kiterjedésű valóságos szerkezetek viselkedése számított mennyiségekkel jellemezhető legyen, egyszerűsítéseket kell alkalmaznunk. Geometriai egyszerűsítést jelent, hogy a térbeli kiterjedés helyett az adott szerkezet jellegének megfelelően vonalas vagy felületi modellt veszünk figyelembe a statikai számításokban. A szerkezet valóságos anyagát is egy idealizált tulajdonságokkal jellemzett anyagmodellel helyettesítjük.

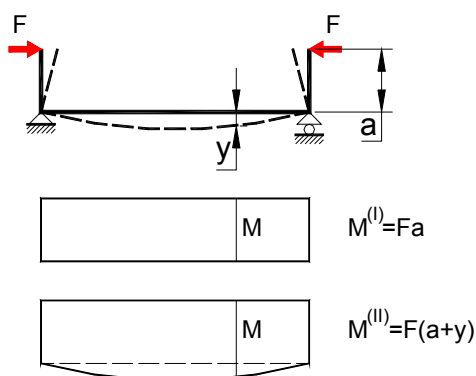
2.3. Első-, másod- és harmadrendű elméletek

A szerkezetek erőjátékának vizsgálatánál a gyakorlati számítások egyszerűsítése érdekében matematikai közelítésekkel élünk, ha ezekkel a szerkezet valóságos viselkedése még megfelelő pontossággal írható le. Aszerint, hogy milyen közelítéseket alkalmazunk, első-, másod- és harmadrendű elméletről beszélhetünk.

Az elsőrendű elemélet szerinti (a legegyszerűbb) számításokban nem vesszük figyelembe a szerkezet alakváltozásainak az igénybevételekre gy-

korolt hatását. A legtöbb gerendatartó esetében ez a szokásos, megfelelő pontosságot eredményező eljárás.

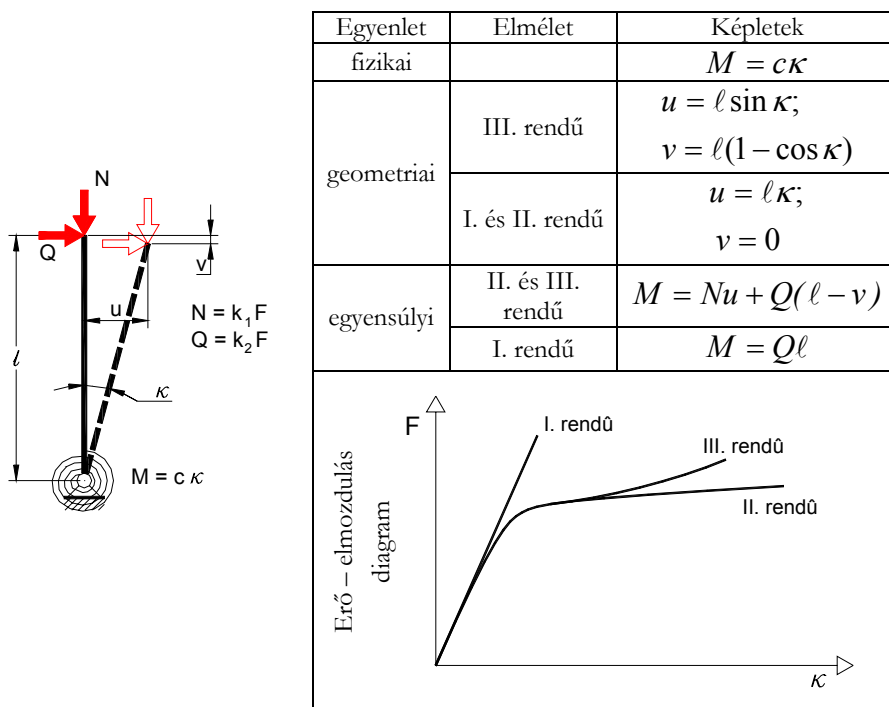
A másodrendű elmélet szerint az előbbi közelítés már nem tehető meg, azaz az elmozdulásoknak az igénybevételekre gyakorolt hatását figyelembe kell venni. Kis elmozdulások és kis alakváltozások esetén (a szerkezetek többségénél csak ilyenek vannak) az elfordulások és az eltolódások közötti összefüggések (az ún. geometriai egyenletek) linearizálhatók a kis szögekre érvényes $\sin \alpha \approx \alpha$, ill. a $\cos \alpha \approx 1$ közelítés alkalmazásával. Külpontosan nyomott elemek vizsgálatánál a másodrendű elmélet pontossága szükséges. (2.4. ábra)



2.4. ábra. Külpontosan nyomott elem első- és másodrendű elmélet szerint számított nyomatékai

A harmadrendű elmélet szerinti számítás általában csak a nagy elmozdulásokra és alakváltozásokra képes szerkezeteknél (pl. kábelhidak) szükséges. Itt már a geometriai egyenletek linearizálása sem megengedett.

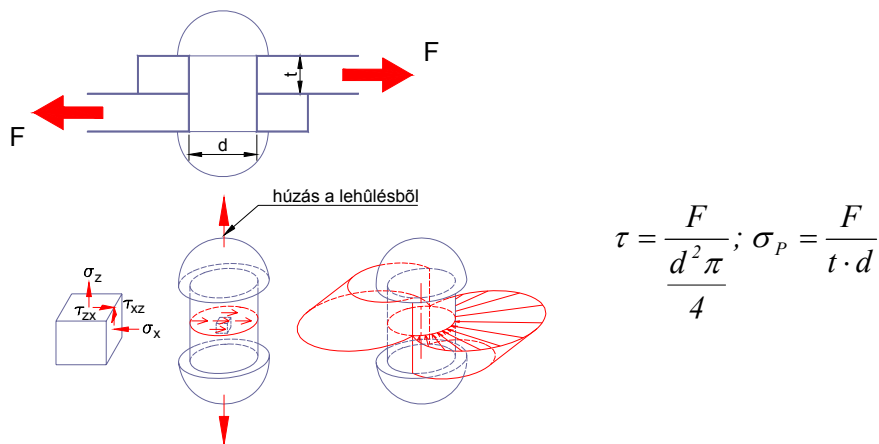
A három elmélet alkalmazását mutatja be a 2.5. ábra egy igen egyszerű modellen.



2.5. ábra. Első-, másod- és harmadrendű elmélet alkalmazása

2.4. A képzetes állapotjellemzők

A szilárdságtan klasszikus állapotjellemzői a feszültségek. A szilárdságtanban tanult feszültségszámítási módszerek a statikai- és az anyagmodell alkalmazása révén egyszerűsítő közelítéseken alapulnak és általában csak egyszerű alapesetekre vonatkoznak. Egy-egy szerkezeti részlet. – elsősorban a kapcsolatok – vizsgálatakor a feszültségek „pontos” számítása lehetetlen, különösen akkor, ha a gyártási sajátfeszültségekre is gondolunk. Egy olyan egyszerű esetben is, mint például egy szegecs nyírt felületén uralkodó feszültségállapot meghatározása, gondot okozna a szegecs lehűléséből adódó húzófeszültség nagyságának bizonytalansága. Még bonyolultabb lenne a szegecsszár palástján fellépő nyomófeszültségek eloszlásának meghatározása. Ilyen esetekben a „valódi” feszültségek helyett egyszerűsített módszerekkel *képzetes állapotjellemzőket* számítunk. Így a tényleges feszültségek helyett „átlagos” feszültségeket számítunk nyírásra is és palástnyomásra is az alábbi képletekkel.



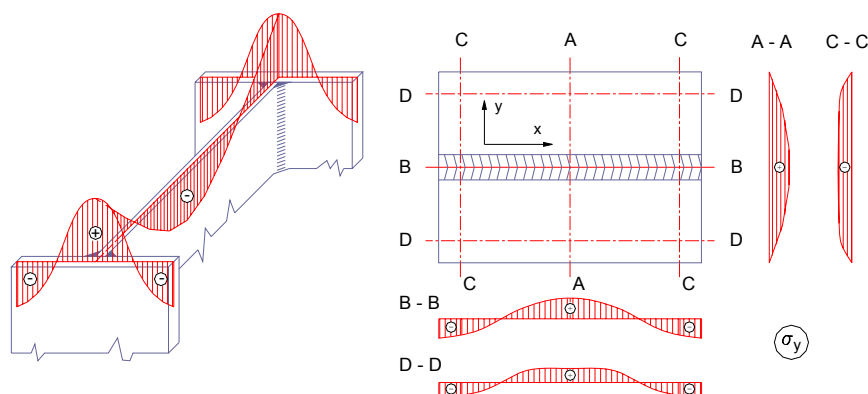
2.6. ábra. Képzetes állapotjellemzők

A képzetes állapotjellemzőknek a határállapothoz tartozó korlátjai azonban csak kísérleti úton határozhatók meg. Fontos, hogy e korlátokat az előbbivel azonos képletekből határozzuk meg. Így tehát:

$$\tau_{korlát} = \frac{F_{törő}}{d^2 \pi} \cdot \frac{1}{4}; \sigma_{P korlát} = \frac{F_{törő}}{t \cdot d}$$

2.5. A sajátfeszültségek

Az acél szerkezeti elemek gyártásakor fellépő nagy hőhatások miatt az elemek terheletlen állapotban sem feszültségmentesek. Ennek az az oka, hogy a lehülés egyenetlen, ezáltal a később lehülő részek zsugorodását akadályozzák a korábban lehült és már megszilárdult részek. A később kihülő részeken húzó-, míg a korábban kihülő részeken nyomófeszültségek maradnak. Egy-egy keresztmetszet mentén ezek a feszültségek önmagában egyensúlyban lévő feszültségrendszert alkotnak. (2.7. ábra) A gyártás után maradó feszültségek (más néven sajátfeszültségek) nagysága megközelítheti a folyási feszültséget. A sajátfeszültségek összegződnek a terhelési feszültségekkel, ezért hatásuk – különösen stabilitási és fáradási jelenségeknél – veszélyes lehet.



2.7. ábra. Gyártási sajátfeszültségek hegesztett elemekben

2.6. Az acélszerkezetek határállapotai

Tartószerkezetek méretezésénél *határállapotoknak* azok az állapotokat tekintjük, amelyeken túl a szerkezet már nem elégíti ki az előírásokban rögzített követelményeket. A tartószerkezetek méretezésének az a célja, hogy igazoljuk, hogy a szerkezetre ható terhek és hatások még nem idézik elő a határállapotokat, azokat *biztonsággal* elkerüljük. (A biztonság kérdésével később foglalkozunk.) A határállapotok teherbírasi és használhatósági határállapotokba csoportosíthatók.

A *teherbírasi határállapotok* azok az állapotok, amelyek a szerkezet összeomlásához, vagy más olyan tönkremeneteli formához vezetnek, melynél a szerkezet egészének vagy egy részének egyensúlya megszűnik. Acélszerkezetek esetén teherbírasi határállapotnak tekinthető:

- a helyzeti állékonyság elvesztése (felborulás, elcsúszás stb.),
- a képlékeny törés (elsősorban a kapcsolatokban),
- a rideg törés,
- a fáradt törés,
- a korlátatlan folyás,
- a maradó alakváltozások halmozódása,
- az anyag (első) megfolyása, maradó alakváltozás létrejötte, kapcsolatok elmozdulása, ha ezek a szerkezet rendeltetésszerű használatát akadályozzák,
- az alaki állékonyság (stabilitás) elvesztése, ha az a teherbírás megszűnéséhez vagy a szerkezet alakjának minőségi megváltozásához vezet.

A teherbírási határállapotok közül kettőt – a helyzeti állékonyság elvesztését és a fáradt törést – elkülönítetten szokás kezelni. A helyzeti állékonyság vizsgálata ugyanis a szerkezetek anyagától függetlenül minden esetben ugyanúgy hajtandó végre. Egyszerű statikai módszerekkel igazolni kell, hogy a destabilizálást okozó (felborító, elcsúsztató) hatások nem nagyobbak, mint a stabilizáló hatások:

$$E_{d,dst} \leq E_{d,stab}$$

ahol

$E_{d,dst}$ a destabilizáló hatások tervezési értéke,

$E_{d,stab}$ a stabilizáló hatások tervezési értéke.

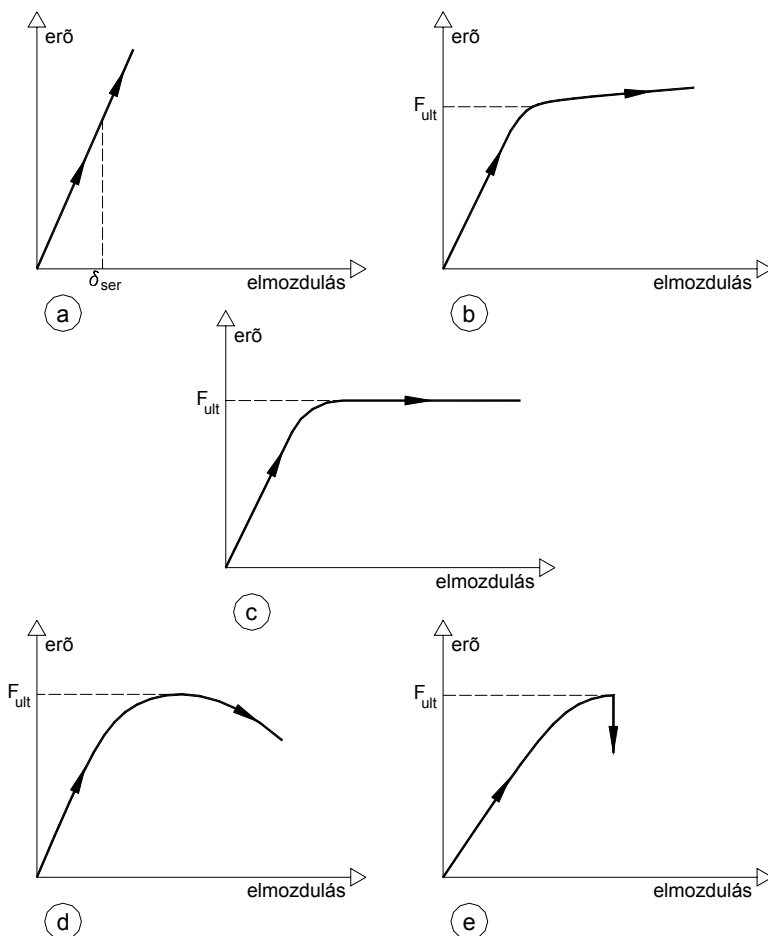
Az *Eurocode* terminológiájából átvett „tervezési érték” a gyakorlati tervezési és ellenőrzési feladatoknál az előírt biztonság figyelembevételével megállapított érték.

A fáradt törés határállapotának vizsgálatát pedig azért célszerű külön kezelni, mert a többi teherbírási határállapottól eltérően azt nem a szélsőségesen nagy intenzitású terhelés, hanem az üzem közbeni, különböző intenzitású terhek okozta kifáradás hozza létre.

A *használhatósági határállapotok* olyan állapotok, amelyen túl meghatározott használati feltételek már nem teljesülnek. Ilyenek lehetnek az olyan mértékű alakváltozások, amelyek károsan befolyásolják a szerkezet külső megjelenését vagy tényleges használhatóságát (pl. gépek, berendezések működését), továbbá a rezgések, amelyek rongálódást vagy kellemetlen komfortérzést okoznak, korlátozzák az építmény rendeltetésszerű működését. Ide sorolható az alaki állékonyság helyi elvesztése (horpadás) is, ha az nem vezet a szerkezet teherbírásának kimerüléséhez vagy alakjának lényeges megváltozásához és a korróziós károsodás is.

2.6.1. A határállapotok veszélyessége

Az egyes határállapotok veszélyességének elbírálására statikus terhelés esetében az erő – elmozdulás diagram a legalkalmasabb, amely a teher nagysága és az adott határállapotra jellemző elmozdulás közötti kapcsolatot tünteti fel. Ilyen diagramok láthatók a 13. ábrán.



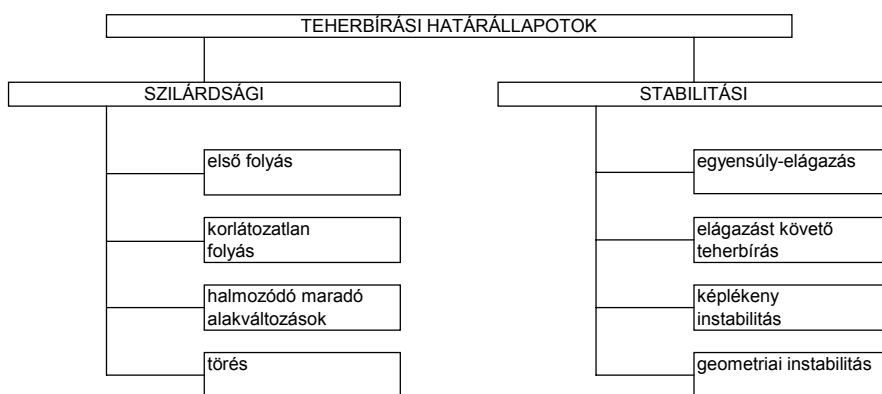
2.8. ábra. Jellemző erő – elmozdulás diagramok

A 2.8. ábra szerinti „a” esetben a határállapotot egy határértékként szabott elmozdulás elérése jelenti, ez egy, a használati határállapotok csoportjába sorolható alakváltozási határállapot, mely elérése után még jelentős teherbírási tartalék van. A „b” esetben a folyáshatár elérésekor az alakváltozások hirtelen megnőnek, de a felkeményedés miatt a teher még növelhető. Ez az első folyás határállapota, mely jellemző lehet egy hajlított tartó viselkedésére. Ha az előbbi esetet a felkeményedést elhanyagoló rugalmas-képlékeny anyagmodellel vizsgáljuk, a korlátatlan folyás határállapotához jutunk. (2.8. „c” ábra) Ebben az állapotban – igaz, hogy nagy

alakváltozások mellett – a szerkezet még tudja tartani a terhet. Sokkal veszélyesebb az instabilitási jelenségekre jellemző határállapot (2.8. „d” ábra), melynél egy viszonylag kicsi elmozdulás elérésekor a teherbírás hirtelen lecsökken. Különösen veszélyesnek kell minősíteni a legutolsó diagramhoz tartozó határállapotot, amelynek bekövetkeztek a teherbírás – törés miatt – azonnal megszűnik.

2.6.2. Teherbírási határállapotok

A teherbírási határállapotok *szilárdsági és stabilitási határállapotok*ba csoportosíthatók aszerint, hogy a határállapot elérését (elsődlegesen) mi okozza. A szilárdsági határállapotokban a terhelés hatására keletkező feszültségek kimerítik az anyag ellenállóképességét, a stabilitási határállapotok pedig a szerkezeti elemek merevségének elégtelenségére vezethetők vissza.



2.9. ábra. Teherbírási határállapotok csoportosítása

2.6.3. Szilárdsági határállapotok

Az első folyás határállapota

A szerkezeti elem akkor kerül az első folyás határállapotába, ha valamely keresztmetszetének valamely pontjában megindul a folyás. Egytengelyű feszültségi állapot esetén ez a határállapot a $\sigma \leq R_y$ feltétellel kerülhető el. (A biztonság kérdéséről később lesz szó.) Az első folyás határállapota *valójában nem tisztán teherbírási határállapot*, hiszen a képlékeny alakváltozások megjelenése az esetek túlnyomó többségében még nem jelenti a teherbírás kimerülését. A határállapot elkerülésével egy olyan követelményt elégítünk ki, amely nem engedi, hogy a szerkezetben maradó alakváltozások jöjjenek

létre. Az alakváltozásokra vonatkozó határállapotok pedig *használhatósági* határállapotok.

A $\sigma \leq R_y$ feltétellel a szerkezet rugalmas állapotban marad, ebből adódnak az ún. *rugalmas méretezés* klasszikus képletei:

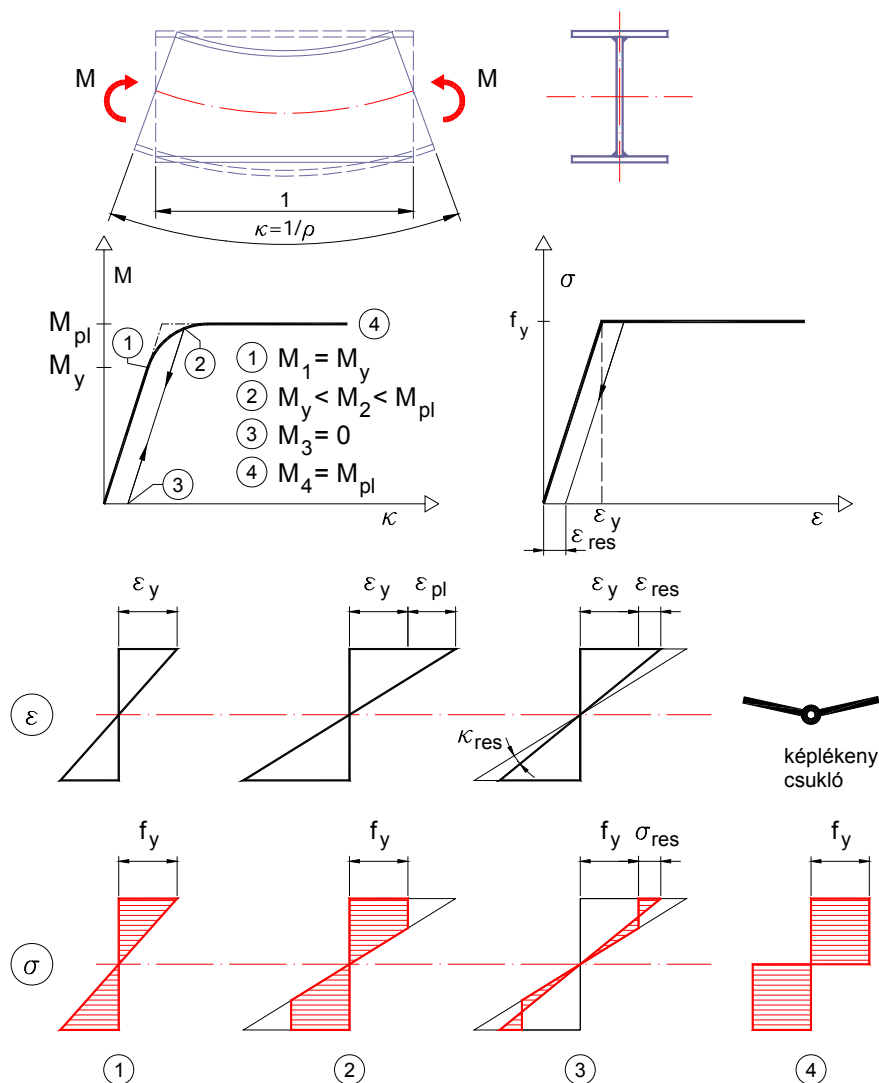
húzott rúdnál:
$$\frac{N}{A} \leq R_y,$$

hajlított és nyírt tartónál:
$$\frac{M}{W} \leq R_y; \quad \frac{T \cdot S}{I \cdot t} \leq \frac{R_y}{\sqrt{3}},$$

síkbeli feszültségi állapotban:
$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_z^2 - \sigma_x \cdot \sigma_z + 3\tau_{xz}^2} \leq R_y$$

A korlátatlan folyás határállapota

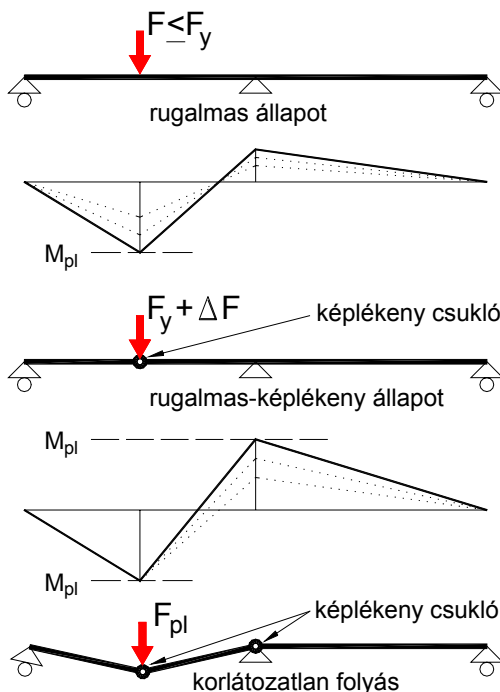
A 15. ábrán egy tisztán hajlításra igénybevett keresztmetszet feszültségeit és alakváltozásait elemezhetjük. A folyási feszültség először a keresztmetszet szélső szálaiban alakul ki. Az első folyáshoz tartozó teher nagyság elérése után az $M - \kappa$ diagram nemlineárisra válik még az idealizált rugalmas – képlékeny anyagmodell esetén is. Ennek az az oka, hogy a keresztmetszet teljes képlékenysége folyamatosan alakul ki, az M_{pl} nyomaték eléréséig a keresztmetszet semleges tengelyhez közeli részei még rugalmasan, más részei pedig már képlékenyen viselkednek. A gyakorlatban – a feleslegesen bonyolult számítások elkerülése céljából – az $M - \kappa$ diagram nemlineáris szakaszát az érintő egyenesekkel szokás helyettesíteni. Az M_{pl} nyomaték elérése egyben a teherbírás kimerülését jelenti, a keresztmetszetben viszont *képlékeny csukló* alakul ki az anyag szakadó nyúlásától illetve horpadásától függő elfordulási képességgel.



2.10. ábra. Hajlított keresztmetszetben keletkező nyúlások és feszültségek

Statikailag határozatlan gerendatartókon vagy keretszerkezeteken a képlékeny csukló(k) kialakulása az igénybevételek átrendeződéséhez vezet. Az első képlékeny csukló megjelenése utáni tehernövekményekre az új (csuklós) statikai váz érvényes, amelyen a tehernövekmény hatására újabb képlékeny csukló jöhet létre. A képlékeny csuklók kialakulása azonban csak addig folytatódhat, amíg a szerkezet (vagy annak egy része) labilis alakzat-

tá, ún. *folyási mechanizmussá* nem válik, melynél a szerkezet már tehernövelés nélkül végez egyre növekvő elmozdulásokat. A teherbírás kimerülésének ezt a formáját a korlátolatlan folyás határállapotának, az ezt előidéző teher nagyságot pedig *képlékeny határteher*nek nevezzük. A korlátolatlan folyás kialakulását mutatja a 2.11. ábra egy statikailag egyszerűen határozatlan szerkezeten.



2.11. ábra. A korlátolatlan folyás határállapotának kialakulása

Vizsgáljuk meg, hogy egy hajlított keresztmetszetben mekkora nyomaték szükséges a különböző határállapotok eléréséhez.

Az első folyás határállapotában $\sigma = R_y$, ez még éppen a rugalmas viselkedés határa, az ismert rugalmasságtani összefüggés még alkalmazható. Tehát:

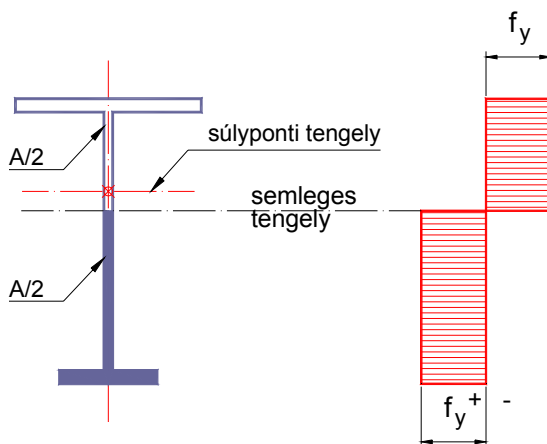
$$M_y = W \cdot R_y,$$

ahol W a rugalmas keresztmetszeti tényező, melyet –, hogy megkülönböztessük egy hasonló keresztmetszeti jellemzőtől – a későbbiekben W_{el} - lal jelölünk.

A korlátolatlan folyás határállapotában már a teljes keresztmetszetben a folyási feszültség alakul ki, és a keresztmetszet egyensúlyából következik, hogy a húzó- és nyomóerők vetületösszege zérus. Mivel R_y abszolút értéke a gyakorlati számításokban húzásra és nyomásra azonos, a semleges tengely a keresztmetszet területét éppen felezi. (2.12. ábra) Ebből adódik, hogy a húzófeszültségek nyomatéka a keresztmetszet vízszintes tengelyére: $M = S \cdot R_y$, ahol S a fél keresztmetszeti terület statikai nyomatéka a súlyponti tengelyre. Könnyű belátni, hogy a nyomófeszültségekkel terhelt keresztmetszeti terület statikai nyomatéka pedig $-S$, tehát a húzó- és nyomófeszültségek súlyponti tengelyre nyomatéka előjel és abszolút érték szerint is megegyezik egymással. Ezek után felírható, hogy:

$$M_{pl} = 2S \cdot R_y = W_{pl} \cdot R_y$$

A képlékeny keresztmetszeti tényező (W_{pl}) tehát a fél keresztmetszeti terület kétszeres statikai nyomatékával egyenlő.

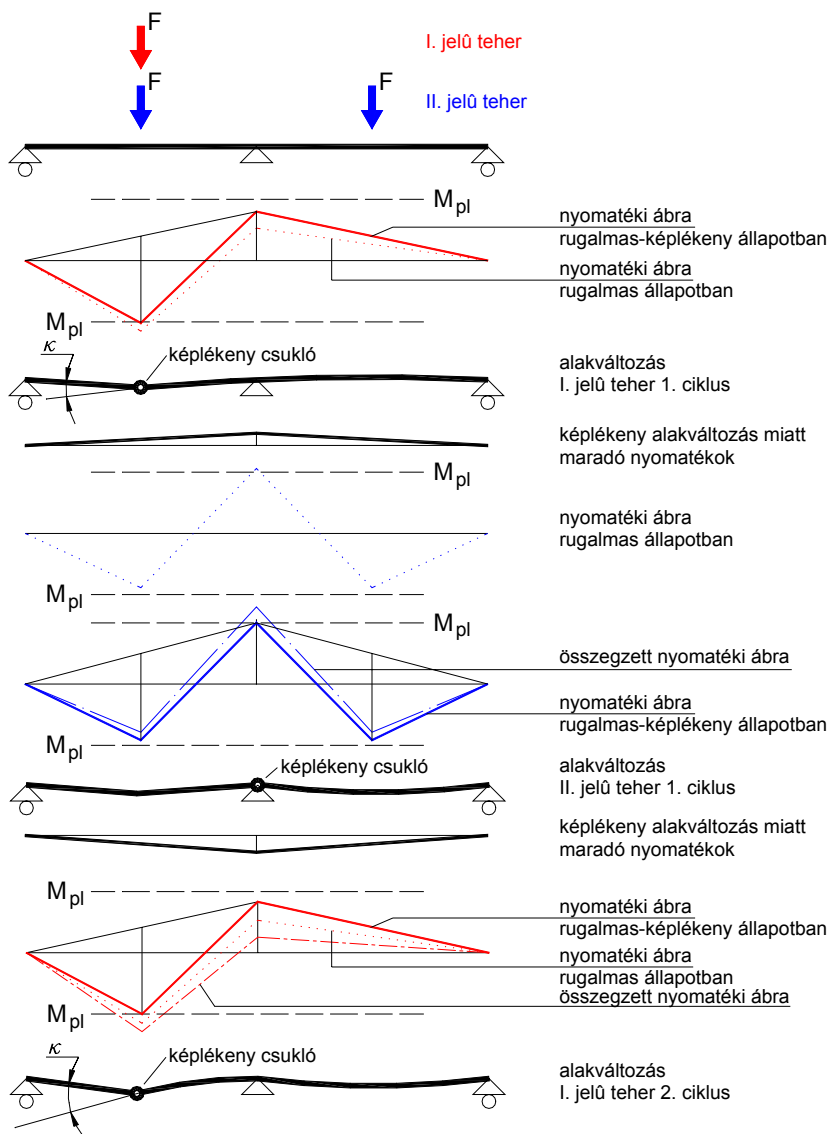


2.12. ábra. A képlékeny nyomatéki teherbírás számítása

A halmozódó maradó alakváltozások határállapota (beállási határállapot)

Veszélyes jelenség, ha képlékeny csuklók a szerkezet különböző keresztmetszeteiben váltakozva, de mindig ugyanott jelennek meg, és egyre nagyobb maradó alakváltozásokat hoznak létre. Az alakváltozások halmozódása – az anyag nyúlóképességének kimerülése révén – töréshez is vezethet.

A maradó alakváltozások halmozódására akkor kell számítanunk, ha egy tartóra különböző terhek váltakozva hatnak, és az egyes terhelési esetekből a tartó különböző keresztmetszeteiben alakulnak ki képlékeny csuklók. Ehhez természetesen olyan nagy terhek kellenek, amelyek egyenként is képlékeny alakváltozást hoznak létre. A jelenséget egy egyszerű szerkezeten szemlélteti a 2.13. ábra. Könnyen belátható, hogy a képlékeny alakváltozást szenvedett (meggörbült) szerkezeten tehermentesítés után igénybevételek maradnak, melyek összegződnek a következő terhelési ciklus igénybevételeivel. Ha az összegzett igénybevételekből a képlékeny csukló nem alakul ki újra, akkor azt mondjuk, hogy a szerkezet beállt, azaz nem léptük túl a beállási határállapotot. Ellenkező esetben – tehát ha a képlékeny csukló újra létrejön – a maradó alakváltozás növekszik.



2.13. ábra. A maradó alakváltozások halmozódása

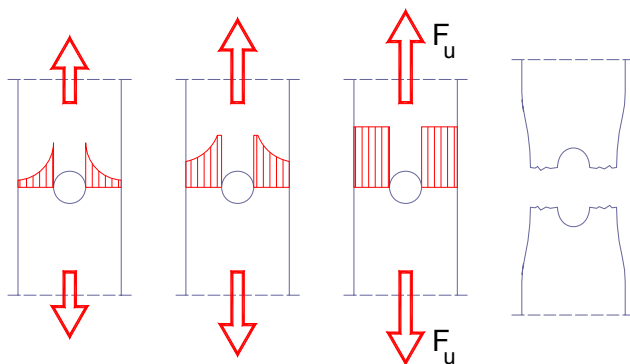
Az ábrát elemezve megállapíthatjuk, hogy a maradó alakváltozások halmozódása csak akkor léphet fel, ha a képlékeny teherbírás (M_{pl}) viszonylag kicsi. A képlékeny teherbírásnak az alakváltozások halmozódásának

elkerüléséhez szükséges minimális értéke az ún. beállítás-vizsgálattal határozható meg.

A maradó alakváltozások halmozódása szóba sem jöhet, ha a szerkezet igénybevételeinek számításánál (az *Eurocode* szóhasználatával a globális analízisnél) a rugalmasságtani elveket követjük, azaz nem engedjük meg az igénybevételek képlékeny átrendeződését, és a keresztmetszeteket a rugalmasságtani módszerekkel számított igénybevételekre méretezzük. Így biztosítható, hogy a szerkezeten csak rugalmas alakváltozások lépnek fel. Ehhez viszont erősebb keresztmetszet szükséges, azaz le kell mondanunk a képlékeny igénybevétel-átrendeződéssel járó (esetleges) anyagmegtakarításról.

A képlékeny törés határállapota

A képlékeny törés határállapota a statikus terhelés hatására bekövetkező törést vagy szakadást jelenti. A törést általában jelentős alakváltozás és a feszültségek kiegyenlítődése előzi meg. (2.14. ábra) Helyesen méretezett szerkezeti elemekben ez a határállapot nem fordulhat elő, mert a méretezéssel az ezt megelőző határállapotot – a korlátozatlan folyást – feltétlenül elkerüljük.



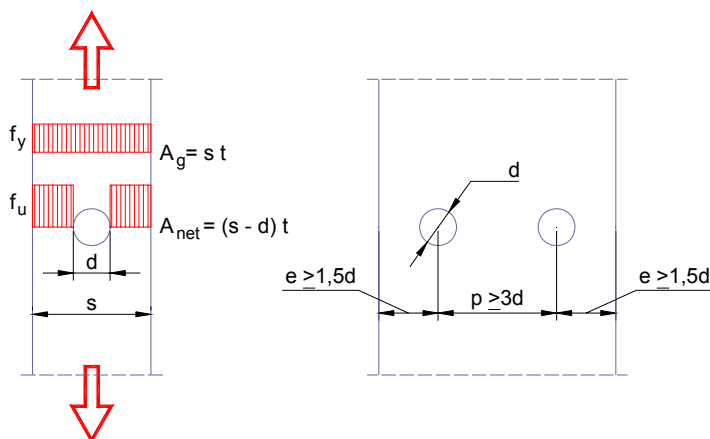
2.14. ábra. Feszültségátrendeződés képlékeny törés előtt

Egyes esetekben azonban mégis a képlékeny törés jelenti a méretezéssel elkerülendő határállapotot. Nagyszilárdságú anyagoknál (pl. kábelek) a szakadást csak kismértékű képlékeny alakváltozás előzi meg. A tönkreme-

netel katasztrofális következménye miatt azonban a szakadással szemben nagyobb biztonságot követelünk meg, mint egyéb – kevésbé veszélyes – határállapotok esetén.

Szintén a képlékeny törés az elkerülendő határállapot a statikusan terhelt kapcsolatok esetén. A varratokban, csavarokban és szegecsekben, valamint ezek környezetében ugyanis térbeli feszültségi állapot keletkezik. A térbeli feszültségi állapot összetevői számítással gyakorlatilag nem követhetők, különösen akkor, ha a sajátfeszültségeket is szeretnénk számításba venni. Kísérletekkel is csak a képlékeny törés figyelhető meg, a tényleges feszültségeloszlásról csak becsléseket tehetünk. Kísérleti adatokra támaszkodva azonban meghatározhatunk bizonyos képzetes állapotjellemzőkre vonatkozó határértékeket, melyeket – a törésre vonatkozó biztonsági tényező figyelembevételével – már a gyakorlati méretezésnél is használhatunk.

A gyakorlati számítások egyszerűsítése céljából az acélszerkezetek méretezésére vonatkozó szabványok ún. *szervezési szabályokat* tartalmaznak, melyek betartása mellett bizonyos vizsgálatok elvégzése szükségtelen. Egy ilyen például a kötőelemek furatainak kiosztására (egymástól mért legkisebb távolságára) vonatkozó előírás, amely a képlékeny töréssel kapcsolatos. Ha el szeretnénk érni, hogy a szerkezet nagy alakváltozásokkal még a kapcsolatok törése előtt „jelezze” a túlterhelést, akkor azt kell előírnunk, hogy a teljes keresztmetszet folyással szembeni ellenállása ne legyen nagyobb, mint a hasznos (furatokkal gyengített) keresztmetszet töréssel szembeni ellenállása. Azaz: $R_{y,g} \leq R_{u,net}$. A 2.15. ábra szerinti t vastagságú lyukasztott lemezcsíkon vizsgáljuk meg, hogy milyen s szélesség esetén teljesül az előbbi feltétel.



$$R_{y,g} = s \cdot t \cdot f_y$$

$$R_{u,net} = (s - d) \cdot t \cdot f_u$$

$$s \cdot t \cdot f_y \leq (s - d) \cdot t \cdot f_u$$

$$s \geq \frac{d}{1 - \frac{f_y}{f_u}}$$

2.15. ábra. Kötőelemek kiosztására vonatkozó szerkesztési szabályok magyarázata

Szerkezeti acélok esetében a folyáshatár és a szakítószilárdság hányadosa $(f_y / f_u) = 1/2 \dots 2/3$. Az ábrán szereplő $p \geq 3d$ furattávolság az $f_y / f_u = 2/3$ értékből adódik.

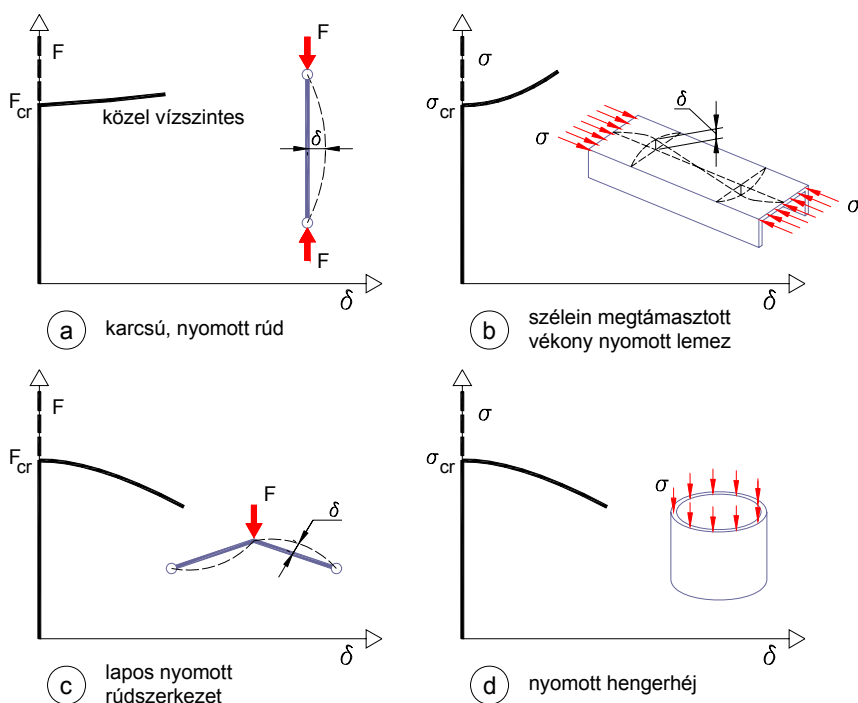
2.6.4. Stabilitási határállapotok

Az egyensúly-elágazási határállapot

Egy tengelyirányú központos nyomóerővel terhelt, tökéletesen egyenes rúd nem végez a tengelyirányra merőleges elmozdulást, amíg a nyomóerő viszonylag kicsi. A teher növelésével azonban elérkezünk egy olyan állapothoz, amelynél az egyensúlyi állapot bármilyen kismértékű megzavarása a rúd addig egyenes alakjának megváltozásához, a rúd kihajlásához vezet. Ennél a tehernagyságnál tehát létezik egy másik egyensúlyi alak is, ami az erő-elmozdulás diagramon elágazás formájában mutatkozik meg. (2.16.

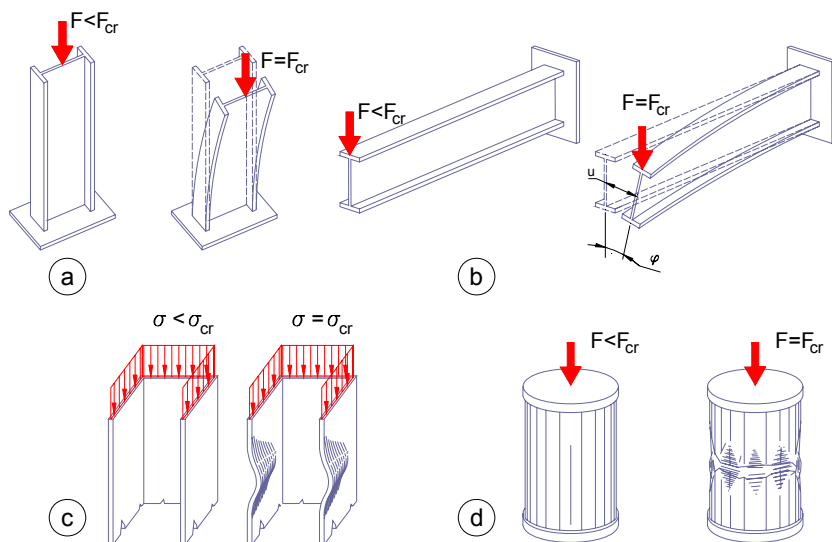
ábra) E tehernagyságon túl a kihajlás nélküli alak elméletileg létezik ugyan, de – mivel kismértékű zavarások mindig vannak – gyakorlatilag nem valósulhat meg.

Azt a tehernagyságot, amelynél az egyensúly-elágazás bekövetkezik, *kritikus tehernek* nevezzük. A kritikus teher nagysága a rúd merevségének és megtámasztási viszonyainak függvényében határozható meg. A vizsgálathoz (legalább) a másodrendű elmélet pontossága szükséges, azaz figyelembe kell venni az alakváltozásoknak az igénybevételekre gyakorolt hatását.



2.16. ábra. Az egyensúly-elágazás utáni viselkedés típusai

A kihajláshoz hasonló egyensúly-elágazási jelenségek láthatók a 2.17. ábrán.



2.17. ábra. Egyensúly-elágazási jelenségek

- a) nyomott rúd kihajlása, b) hajlított tartó kifordulása,
c) nyomott lemez horpadása, d) vékonyfalú cső (héj) horpadása

Az egyensúly-elágazás utáni teherbírás határállapota

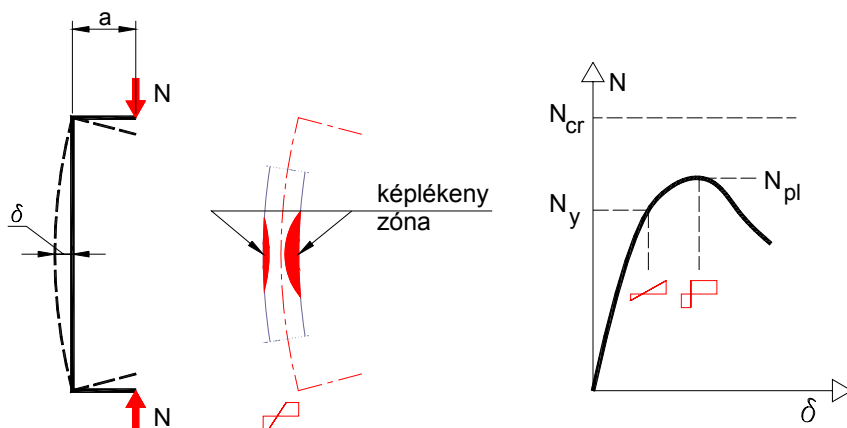
Az egyensúly-elágazási jelenségek veszélyességét aszerint lehet megítélni, hogy milyen viselkedés várható az elágazás után. A lehetséges eseteket a 21. ábrán látható diagramok tüntetik fel. Karcsú, nyomott rudak esetében az elágazás után az erő – elmozdulás diagram közel vízszintes, számottevő teherbírás-növekedésre kihajlás után már nem számíthatunk. Hasonló a helyzet a hajlított tartók kifordulásának, a rúdszerkezetek kihajlásának és a héjszerkezetek horpadásának esetében is.

A megtámasztott szegélyű lemezek horpadása esetében azonban egyensúly-elágazás utáni (posztkritikus) teherbírási tartalékot tapasztalhatunk, amely a méretezés során még hasznosítható. A megtámasztott szélű lemez behorpadt része kikapcsolódik az erőjátékból, de a megtámasztott élekhez közeli részek még további terhek felvételére képesek.

A képlékeny instabilitás határállapota

Képlékeny instabilitásról akkor beszélünk, amikor a stabilitásvesztésben már a képlékeny alakváltozások is szerepet játszanak. Az ilyen típusú stabi-

lításvesztés a külpontosan nyomott szerkezeti elemekre lehet jellemző. A jelenséget a 2.18. ábra szemlélteti. Látható, hogy a terhelés kezdeti szakaszán a teher növelésével az alakváltozások is folyamatosan növekszenek, azonban nem lineáris összefüggés szerint, mert a külpontosság növekménye is növeli a nyomatékot. A folyási feszültség és vele együtt a képlékeny alakváltozás először a nyomott oldalon jelenik meg, a teher növelésével a húzott oldal is képlékeny állapotba kerül. A teherbírás maximumához akkor érünk, amikor a teljes keresztmetszet képlékeny állapotba kerül.



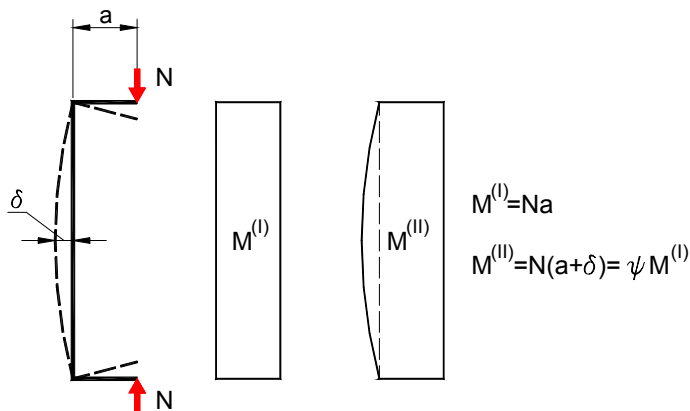
2.18. ábra. Külpontosan nyomott rúd viselkedése

A gyakorlati számításokban a határállapothoz tartozó terhet – a biztonság javára tett közelítéssel – az első folyáshoz tartozó teherrel szokás közelíteni. $N_{pl} \approx N_y$. A külpontosság-növekményből származó nyomatékot azonban figyelembe kell venni. Igazolható, hogy az elsőrendű elméletből számított nyomatékból (melynél a külpontosság-növekményt még nem vettük figyelembe) a másodrendű elmélet szerinti (pontos) nyomaték egy

$$\psi = \frac{1}{1 - \frac{N}{N_{cr}}} > 1$$

szorzótényezővel számítható. Ezt alkalmazva a külpontosan nyomott rudak stabilitásvizsgálata szilárdsági vizsgálatra vezethető vissza. (2.19. ábra)

Megjegyezzük, hogy a szabványokban ψ képlete bonyolultabb, mert benne más hatásokat (pl. kezdeti görbeség) is figyelembe vesznek.

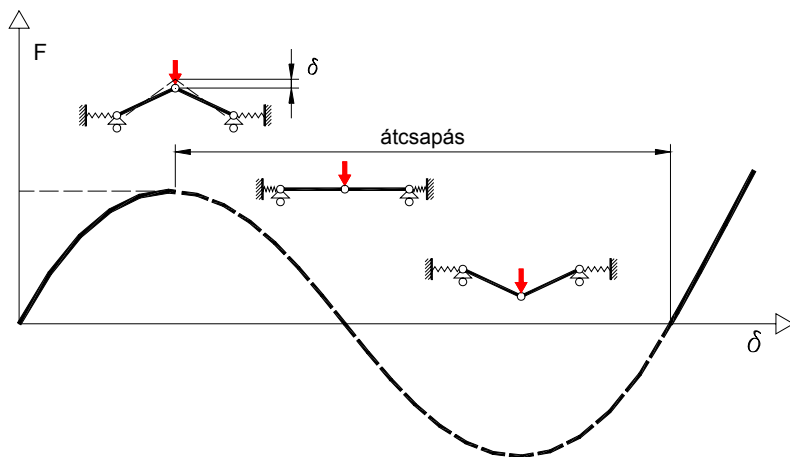


2.19. ábra. A külpontosság-növekmény figyelembevétele

A geometriai instabilitás határállapota

Lapos ívek és héjak esetében lehetséges, hogy a szerkezet nagymértékű deformációk kialakulása mellett úgy veszti el stabilitását, hogy nem jön létre képlékeny állapot. A határállapot ahhoz a teherhez tartozik, amelynél a teherbírásnak maximuma van. A határállapotot elérve a szerkezet geometriája változik meg, a domború alakzat hirtelen homorúvá válik. A jelenséget geometriai instabilitásnak, vagy átcsapásnak nevezzük.

A geometriai instabilitás kialakulásának elvét szemlélteti a 2.20. ábra. Az erő – elmozdulás diagramnak szaggatott vonallal jelölt szakasza nem valós, csak akkor lenne az, ha a teher a határállapot elérése után csökkenni tudna. Megszerkesztése csak azért szükséges, hogy az átcsapás pillanatában létrejövő elmozdulást érzékeltessük.



2.20. ábra. A geometriai instabilitás határállapotának bemutatása

2.6.5. A rideg törés

A gyakorlatban az acélműanyagokat két csoportba, a rideg (rugalmas) illetve a szívós (rugalmas-képlékeny) anyagok csoportjába szokás sorolni. Ez a felosztás azonban nem általános érvényű, mert pl. ütősszerű igénybevétel esetén az egyébként szívós anyagok is viselkedhetnek ridegen, és magas hőmérsékleten a rideg anyagok is rendszerint képlékenyek. Így azt a következtetést vonhatjuk le, hogy a ridegség illetve a szívósság egy-egy acél-fajtára csak meghatározott körülmények között jellemző.

A rideg törés igen veszélyes, sok esetben katasztrofális következményekkel járó jelenség, folyamata hasonló az üvegtáblák ütés hatására bekövetkező töréséhez. A repedést illetve törést nem előzi meg sem maradó nyúlás, sem pedig harántkontrakció. A törési felület durva szemcsészerű és fémes csillogású. A jelenséget rendszerint dörrenésszerű hanghatás kíséri.

A rideg törés elsősorban a hegesztett acélszerkezeteket, azokon belül is a vastag lemezekből készülő és alacsony hőmérsékleten is üzemelő szerkezeteket veszélyezteti. Ilyen építőmérnöki szerkezetek a hidak, a daruk, a tartályok és a vízépítési acélszerkezetek.

A rideg törés létrejöttét befolyásoló tényezők

A rideg törés mindig valamilyen folytonossági hibából (anyaghiba, repedés, bemetszés, korróziós károsodás stb.) indul ki, ha fennállnak a repedés megindulásának és gyors tovaterjedésének feltételei. Ezek pedig a követ-

kezők: az adott körülmények között ridegen viselkedő anyag és megfelelően nagy húzó- vagy nyírófeszültség. Az anyagok elridegedését a térbeli feszültségi állapot, a nagy terhelési sebesség, az alacsony hőmérséklet, illetve a felsoroltak együttes előfordulása okozza.

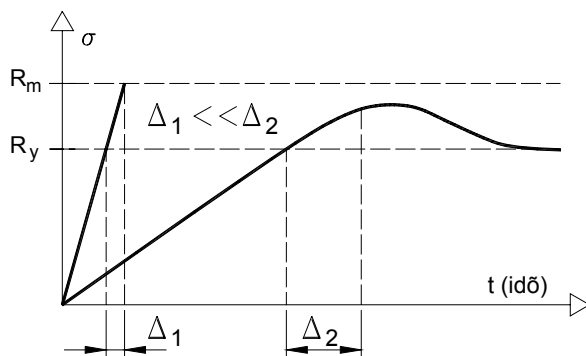
A folytonossági hibák eredete tulajdonképpen közömbös, a gyártás sajátosságai olyanok, hogy hibátlan anyagú szerkezetet sohasem tételezhetünk fel.

A térbeli feszültségi állapot elridegítő hatását a HUBER-MISES-HENCKY-féle folyási feltétel alapján is könnyen beláthatjuk, ha feltételt kifejező

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_2\sigma_3 - \sigma_1\sigma_3} = R_y$$

egyenletbe a $\sigma_1 = \sigma_2 = R_y$ helyettesítést elvégezzük. A behelyettesítésből ugyanis $\sigma_3 = 2 \cdot R_y$ eredmény adódik, ami egy elérhetetlen feszültség. Ez azt jelenti, hogy $\sigma_1 = \sigma_2 = R_y$ (illetve hasonló) feszültségek esetén folyás nem jöhet létre, azaz az anyag ridegen törik. Hasonló megállapításra jutunk abban az esetben is, ha közel azonos nagyságú és előjelű főfeszültségekre gondolunk.

Az igénybevételek nagy sebessége a rideg viselkedést azáltal idézi elő, hogy a képlékeny alakváltozás kialakulásához szükséges időt nem biztosítja. A folyás megindulásához ugyanis – az arányossági határ körüli feszültségtartományban – egy ún. inkubációs (lappangási) időnek kell eltelnie, és a folyásnak is van egy legkisebb szükséges időtartama. Ha a terhelés sebessége olyan nagy, hogy a feszültség a folyási határról a szakítószilárdságra hamarabb nő fel, mint az anyag inkubációs ideje, az acél folyás nélkül, ridegen törik. A jelenség megértését segíti a 2.21. ábra, amely egy gyors és egy lassúbb terhelési folyamatot mutat be. A gyorsabb terhelés esetén rideg törés jön létre, míg a lassúbbnál lehetőség van a feszültségcsúcs képlékeny leépülésére, a feszültségek átrendeződésére.



2.21. ábra. Rideg törés gyors terhelés esetén

A kísérletek tanúsága szerint az acélok ridegségét a hőmérséklet is befolyásolja, mégpedig úgy, hogy hűtés hatására a ridegség nő. A teljes elridegedés csak igen alacsony (-200 C° körüli) hőmérsékleten következik be. Ha az anyag azonban hibákat, repedéseket tartalmaz, vagy a terhelés sebessége számottevő, a hűtés hatása okozta elridegedés lényegesen hamarabb következik be.

A rideg törést befolyásoló három tényezőt – a feszültségállapot minőségét, a terhelés sebességét és a hőmérsékletet – állapot tényezőkné nevezzük. Kedvezőtlen állapot tényezők mellett is természetesen csak akkor jön létre rideg törés, ha az anyagban jelentős húzófeszültség van. Feszültségcsúcsok a folytonossági hiányok (anyaghibák, bemetszések stb.) mellett alakulhatnak ki, ezek a nagyobb hibák mellett nagyobbak. A rideg törés szempontjából tehát a hibák (relatív, lemezzvastagsághoz viszonyított) nagysága is fontos tényező.

Védekezés a rideg törés ellen

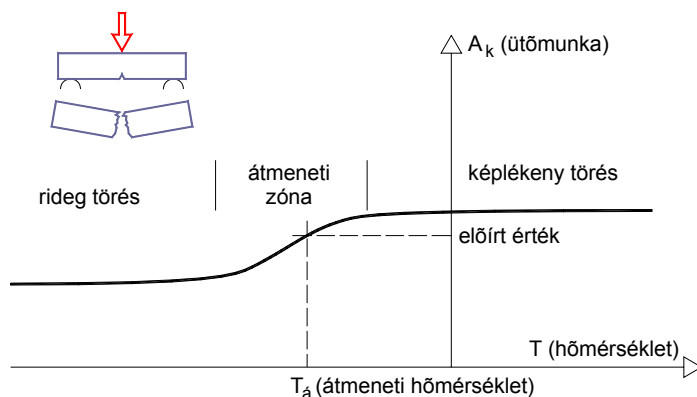
Acélszerkezetek tervezésekor az előzőekben megismert állapot tényezőket – nyilvánvalóan – nem tudjuk befolyásolni. A rideg törést csak úgy tudjuk elkerülni, hogy megfelelően szívós, az adott szerkezet legkedvezőtlenebb körülményei között sem ridegedő anyagokat használunk. Az eljárásnak az az alapja, hogy a különféle szerkezeti acélok megfelelő vizsgálatokkal ridegtörési hajlam szerint rangsorba állíthatók, és a rangsorból – az állapot tényezőket és egyéb körülményeket is figyelembe véve – a megfelelő anyagminőség kiválasztható.

Erre a célra táblázatok készültek, melyek a következő paramétereket veszik figyelembe: üzemi hőmérséklet, a szerkezeti elem jelentősége (= a

törés következményének jelentősége az egész szerkezet szempontjából), a feszültségi állapot jellege (lineáris, síkbeli, térbeli), anyagvastagság (vastagsághatás) és az esetleges hidegalakítás mértéke.

Az is lehetséges, hogy megfelelő számítási eljárással egy adott anyagminőségre – az előbb felsorolt, vagy azokhoz hasonló paraméterek figyelembevételével – meghatározzuk azt a legalacsonyabb hőmérsékletet (T_{min}), amely ridegtörés szempontjából még nem jelent veszélyt. A választott anyagminőség megfelelő, ha $T_{min} \leq T_{üzemi}$. A korábbi (de még ma is érvényes) gyakorlat a táblázatos kiválasztást követte. Az *Eurocode 3* a leggyakoribb esetekre szintén tartalmaz táblázatot (EN 1993-1-10, 2.1 táblázat), amely az egyes anyagminőségekhez megadja a különböző körülmények között alkalmazható legnagyobb vastagságot (t_{max}). A szerkezeti elemek vastagsága ezt az értéket nem haladhatja meg. Az *Eurocode 3* a T_{min} kiszámításához is ad irányelveket.

Az acélok ridegtörési hajlamát ütve-hajlító kísérlettel – a CHARPY-féle próbával – lehet vizsgálni. Az Építőanyagok c. tárgyból is ismert vizsgálatl bemetszéssel ellátott szabványos próbatesteken különböző hőmérsékleteken mérik a próbatest ütve-hajlító eltörésével elnyelt energiát. Ha az elnyelt energiát a vizsgálati hőmérséklet függvényében ábrázoljuk (2.22. ábra), megállapítható az átmeneti hőmérséklet. Átmeneti hőmérsékletnek azt a hőmérsékletet tekintjük, amelyen az ütőmunka éppen azonos az acélfajtára előírt értékkel. Az átmeneti hőmérséklet az a paraméter, amely alapján a különböző anyagminőségek rangsorba állíthatók. Fontos tudni, hogy a CHARPY-féle próba csak az azonos fajtájú (azonos szilárdsági csoportba tartozó és hasonló vegyi összetételű) acélok ridegtörési hajlam szerinti rangsorolására alkalmas, azaz az eredményekből csak arra lehet következtetni, hogy két azonos fajtájú acél közül melyik a jobb.



2.22. ábra. Az ütőmunka alapján megállapítható átmeneti hőmérséklet értelmezése

A szerkezeti acélok mechanikai tulajdonságaira vonatkozó szabványok a különböző anyagminőségekhez előírják a vizsgálattal igazolandó ütőmunka legkisebb értékét, és azt is, hogy a vizsgálatot milyen hőmérsékleten kell elvégezni. A vizsgálati hőmérséklet (a biztonság javára tett közelítéssel) átmeneti hőmérsékletnek tekinthető. Különböző (régebbi és újabb) szabványok szerinti acélminőségek ridegtörési hajlamának összehasonlítása (vagy az azonosság megállapítása) az előírt ütőmunka és a hozzá tartozó vizsgálati hőmérséklet alapján lehetséges.

Ha a megfelelő minőségű anyag kiválasztása valamilyen oknál fogva akadályba ütközik (pl. csak egy anyagminőség áll rendelkezésre), a ridegtörést a feszültségek nagyságának korlátozásával (a keresztmetszeti méretek növelésével) is el lehet kerülni. Általában igaz, hogy $0,2 R_y$ -nál kisebb feszültséggel a legkedvezőtlenebb üzemi körülmények között sem lehet létrehozni ridegtörést.

2.6.6. A fáradás

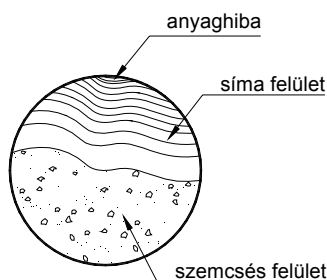
Közismert jelenség, hogy ismétlődő terhelésnek kitétt szerkezeti elemek – viszonylag nagyszámú teherismétlés után – akkor is eltörhetnek, ha a bennük számítható feszültség jóval az anyagra jellemző statikus szakítószilárdság értéke alatt marad. A törés oka az anyag kifáradása. Főleg azok az elemek veszélyeztetettek, amelyekben az igénybevétel gyorsan és tág határok között változik. Hegesztett szerkezetek esetében a sajátfeszültségek jelen-

léte további kedvezőtlen körülmény lehet, mert azok terheletlen állapotban is léteznek, a terhelésből számítható feszültség azokhoz hozzáadódik.

A fáradt törés azért különösen veszélyes, mert a tönkremenetel általában váratlanul, jelentősebb előzetes alakváltozások nélkül következik be.

Nem tévesztendő össze a fáradt törés a kis ciklusszámú fáradt töréssel, amelyet pl. egy lágyacélból készült huzaldarab hajtogatásával hozhatunk létre. Ilyenkor a halmozódó képlékeny alakváltozások miatt az anyag nyúlási képességének kimerülése okozza a törést. Helyesen méretezett építőmérnöki szerkezeteken ilyen tönkremenetel nem fordulhat elő.

A megfigyelések szerint fáradt törés majdnem minden esetben valamilyen kezdeti jelenlévő folytonossági hiányból (anyaghiba, bemetszés), vagy később kialakult károsodásból (mechanikai vagy korróziós) indul ki olyan helyen, ahol jelentős húzófeszültségek (feszültségcsúcsok) is fellépnek. A feszültségcsúcsnál a feszültségingadozás hatására kiskiterjedésű halmozódó képlékeny alakváltozások révén az anyag nyúlóképessége kimerül, repedés jön létre és a feszültségcsúcs a következő terhelési ciklusban már a repedés szélénél jelenik meg. A repedés megnyílásának folyamata addig tart, amíg a megmaradt keresztmetszet teherbírása már nem lesz elegendő egy következő terhelési ciklus igénybevételeinek felvételére. Ekkor következik be a törés.

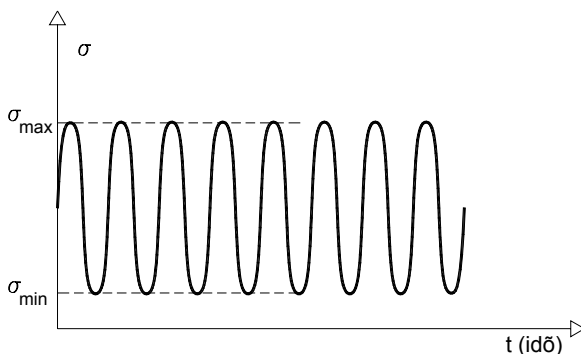


2.23. ábra. Fárasztással eltört próbatest törési felülete

A 2.23. ábrán egy fárasztással eltört kör keresztmetszetű próbatest törési felülete látható. A törési felület egy része sima, kagylószerű mintázat mutatja a repedés fokozatos terjedését. A felület másik része szemcsézett felületű, ami a hirtelen bekövetkezett szakadásra utal.

A Wöhler-görbe

A fáradással kapcsolatos vizsgálatainak eredményét a német vasútmérnök AUGUST WÖHLER 1858-ban tette közzé. Vasúti tengelyeken végzett kísérletsorozatot periodikusan ismétlődő terheléssel (2.24. ábra), mégpedig úgy, hogy a terhelési ciklusonként fellépő feszültség alsó értéke állandó volt ($\sigma_{min} = const$), a felső (σ_{max}) pedig kísérletenként változott. A terhelés minden próbatestnél törésig folytatódott, és mérték a töréshez tartozó teherismétlődési számot (N). Egy-egy kísérlet eredménye az $N - \sigma_{max}$ koordinátarendszerben egy-egy pontként ábrázolható. Megfelelően nagyszámú kísérlet elvégzése után, a pontokat összekötve kapjuk a WÖHLER-görbét.

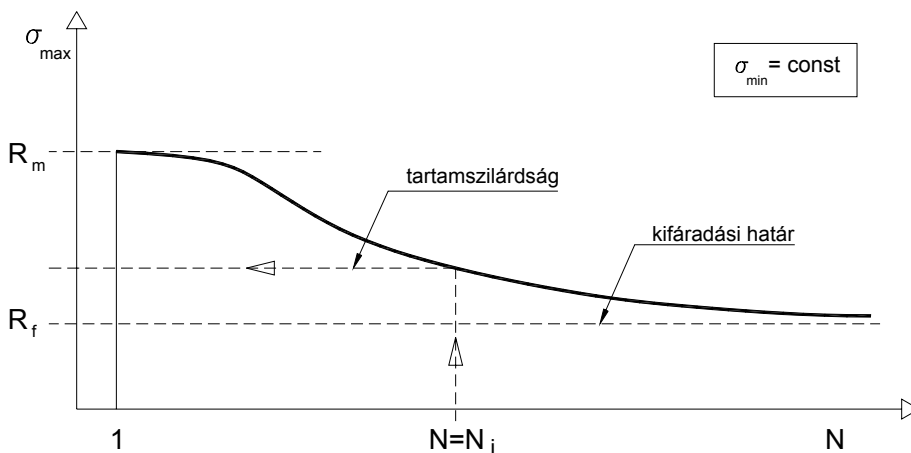


2.24. ábra. Periodikus terhelés

A WÖHLER-görbe az $N = I$ ismétlődési számnál a σ_B statikus törőszilárdsággal indul, majd az N értékének növekedéséhez egyre csökkenő σ_{max} tartozik. Igen nagyszámú teherismétlődésnél a σ_{max} értékek aszimptotikusan tartanak egy határértékhez, melyet *kifáradási határ*nak, vagy *fáradási szilárdságnak* nevezek el. Abból, hogy ez a határérték létezik, azt a következtetést lehet levonni, hogy egy meghatározható feszültség szint alatt nem jön létre fáradt törés. A görbének egy tetszőleges N_i ismétlődési számnál leolvasott abszcisszája az N_i -széres teherismétléshez tartozó tartamszilárdság.

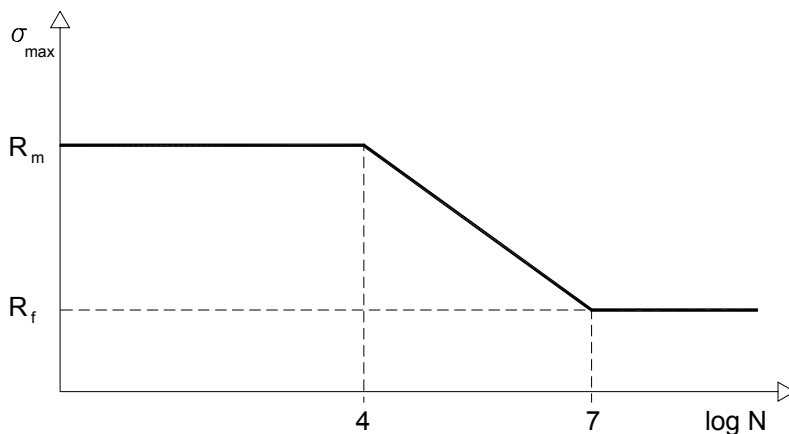
A gyakorlatban az acélszerkezetek fáradásvizsgálatánál nem a kifáradási határnak, hanem a tartamszilárdságoknak van jelentősége. Magasépítési szerkezeteknél a mértékadó ismétlődési szám általában 10^5 nagyságrendű, de hidaknál ez a szám $5 \cdot 10^6$ is lehet. Egy adott szerkezeti elem vizsgálatánál

meg kell fontolni, hogy milyen hatást tekintünk egy terhelési ciklusnak. Vasúti hidak főtartóinál egy vonat áthaladása jelent egy teherismétlődést, de ugyanitt egy sínlekötés szempontjából már egy tengely áthaladása is egy terhelési ciklus.



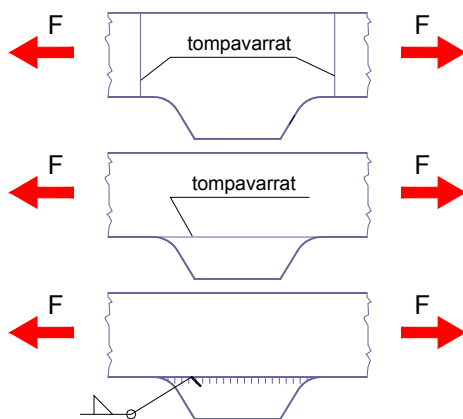
2.25. ábra. A Wöhler-görbe

Ha a WÖHLER-görbe felrajzolásánál az ismétlődési számot logaritmi-kus léptékben tüntetjük fel, megfigyelhető, hogy a tartamszilárdság érdemi változása az $N = 10^4 \dots 10^7$ tartományban van. Ilyen ábrázolásmódban a WÖHLER-görbe egyenesekkel közelíthető. (2.26. ábra)



2.26. ábra. A Wöhler-görbe közelítése egyenesekkel

Egy adott WÖHLER-görbe csak egy adott anyagminőségű és kialakítású próbatestre érvényes. Az azonos anyagminőségű, de különböző kialakítású vagy méretű próbatestek különböző fáradási eredményeket szolgáltatnak, azaz a *fáradási szilárdság nem anyagállandó*. Fáradás szempontjából különös jelentősége lehet egyes szerkezeti részleteknek, nem mindegy, hogy egyes kapcsolatokat milyen szerkezeti kialakítással tervezünk meg. A 32. ábrán bemutatott szerkezeti részletek statikus teherbírás szempontjából egyenértékűek, fáradási szilárdságuk azonban különböző.



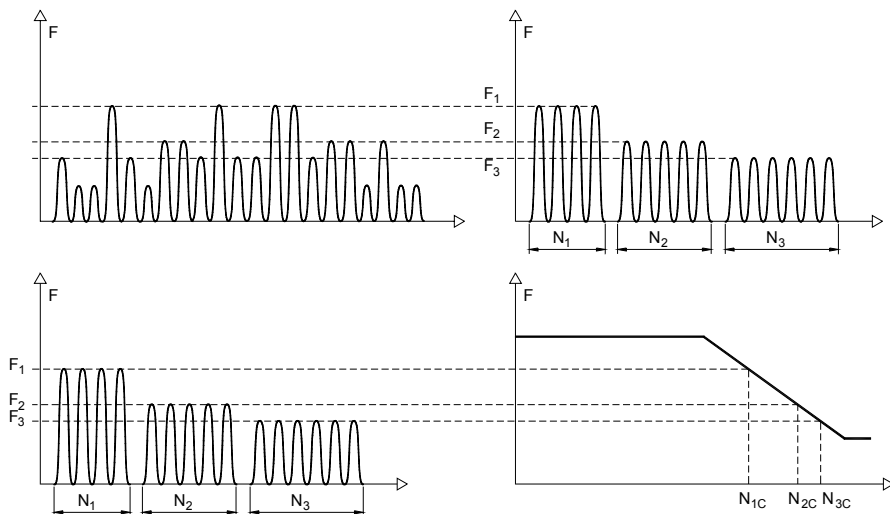
2.27. ábra. Különböző fáradási szilárdságú szerkezeti kialakítások

Meg kell említenünk még, hogy a fáradási kísérletek eredményeinél igen nagy a szórás, emiatt csak nagyszámú kísérletek statisztikus értékelése szolgáltatathat megbízható eredményt.

A lineáris károsodás-halmozódási hipotézis

A WÖHLER-görbe próbatesteken végzett állandó amplitúdójú periodikus terhelésre vonatkozik, szemben a valóságos szerkezetekkel, amelyeken a terhelés rendszerint szabálytalan feszültségingadozást okoz. Becsléssel azonban (többé-kevésbé) meg tudjuk határozni azt a terhelési spektrumot (diszkrét tehernagyságok és hozzájuk tartozó ismétlődési számok), amely a szerkezet várható élettartama alatt a szerkezetet éri. A terhelési spektrum felvételénél elhanyagolhatók azok a terhek, amelyek csak a kifáradási határ alatti feszültségingadozást okoznak. A PALMGREN és MINER által javasolt lineáris károsodás-halmozódási hipotézist alkalmazva ez a terhelési spektrum egy állandó amplitúdójú periodikus terheléssel helyettesíthető úgy,

hogy még a helyettesítő teherhez tartozó teherismétlődési szám önkényes felvételére is lehetőségünk nyílik. Az így meghatározott terhet *üzemi teher*-nek szokás nevezni.



2.28. ábra. A terhelési spektrum és az N_q ismétlődési számok meghatározása

A PALMGREN-MINER-féle lineáris károsodás-halmozódási hipotézis szerint egy i jelű teher N_i teherismétléssel a teljes tönkremenetelhez szükséges károsodásnak a $D_i = N_i / N_{cr}$ hányadát hozza létre, ahol N_{cr} az a kritikus teherismétlődési szám, amely az i jelű teher nagysággal törést okoz. N_{cr} meghatározható, ha a WÖHLER-görbét valamilyen, matematikailag (könnyen) kezelhető függvénnyel közelítjük. A fáradt törés elkerülésének feltétele, hogy:

$$\sum D_i = \sum \frac{N_i}{N_{ci}} \leq 1.$$

Az egyenértékű állandó amplitúdójú terhelés (az üzemi teher) pedig abból a feltételből határozható meg, hogy az általa okozott károsodás a terhelési spektrum által okozottal egyezzen meg. Mint láttuk, a károsodás a teher nagyságának és az ismétlődési számnak egyaránt függvénye, tehát ugyanakkora károsodás sokféleképpen létrejöhethet, így a teher nagyság és az ismétlődési szám közül az egyik szabadon felvehető. A megoldáshoz itt is szükséges a WÖHLER-görbét matematikai függvénnyel közelíteni.

3. Acélszerkezetek méretezése

Tervezés és ellenőrzés

A méretezési feladatok két csoportra oszthatók, tervezésre és ellenőrzésre. A tervezés mindig új szerkezetre vonatkozik, melynek statikai rendszerét, keresztmetszeti méreteit és kapcsolatait a tervezőnek kell meghatároznia. A tervező feladata a megrendelő érdekeinek – műszaki, gazdasági és esztétikai szempontból – leginkább megfelelő szerkezet kiválasztása. Az ellenőrzés meglévő vagy megtervezett építményre vonatkozik, a feladat annak igazolása, hogy az építmény szerkezeti elemei és kapcsolatai megfelelnek a rájuk ható igénybevételeknek. A tervezési és ellenőrzési feladatok végrehajtása azonban legtöbbször azonos módszerrel történik, tulajdonképpen tervezéskor is ellenőrzést hajtunk végre előzetesen felvett keresztmetszeti és egyéb méretekkel. A számítógépes programok is az ellenőrzés jellegű feladatokat támogatják, a tervezés ezek segítségével lényegében próbálgatás jellegű, a keresztmetszetek változtatásával illetve a statikai vázon végrehajtott módosításokkal tudjuk a leginkább megfelelő megoldást kiválasztani.

A szerkezet részekre bontása

Az építőmérnöki szerkezetek térbeli kiterjedésű összetett szerkezetek, sokszor igen bonyolult erőjátékkal. A szerkezetek azonban legtöbbször statikailag elkülöníthető kisebb egységekre bonthatók, melyek vizsgálata már egyszerűbb. Az ilyen felbontást célszerű az erőátadódás sorrendjében megtenni (pl. csarnokoknál: héjazat, szelemenek, szaruzat, vagy hidaknál: pályaszerkezet, főtartók), és a méretezést is ebben a sorrendben elvégezni. A részekre bontással végül ismert igénybevételű szerkezeti elemekhez és kapcsolatokhoz jutunk, a méretezésnél ezek megfelelőségét kell igazolnunk.

3.1. Szabványok és előírások

A gyakorlatban a szerkezeti elemek méretezését mindig valamilyen, az adott építményre vonatkozó és érvényes szabvány vagy műszaki előírás alapján kell végrehajtani. Tartószerkezetek vonatkozásában sok szabvány létezik, ezek rendszerében való tájékozódás nem egyszerű feladat, mert mindegyikükben más szabványokra való hivatkozást is találunk.

A tartószerkezetek méretezésére vonatkozó szabványok tárgykörük szerint az alábbiak szerint csoportosíthatók:

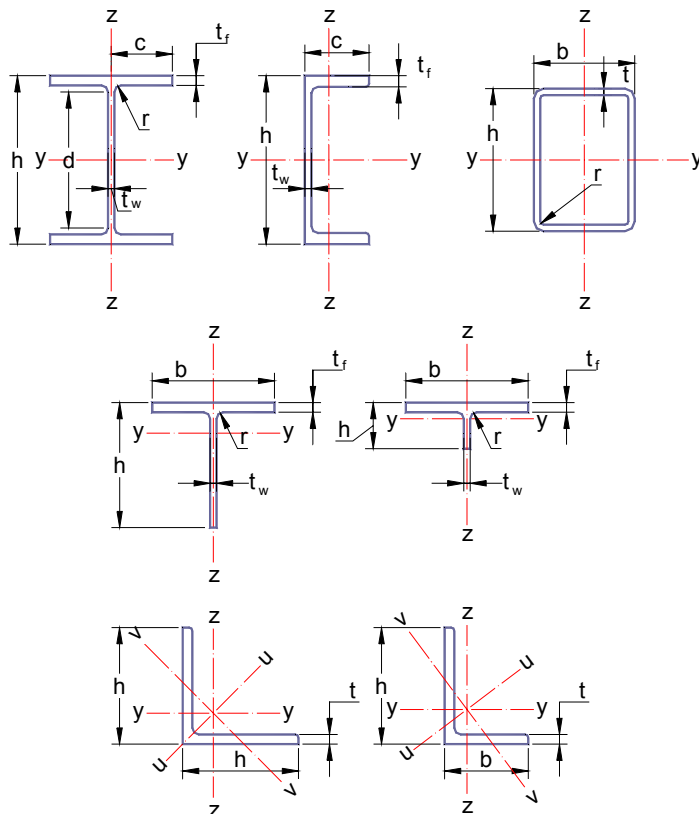
- általános érvényű szabványok, melyek tervezési alapelveket fogalmaznak meg és előírják a méretezésnél figyelembe veendő terheket és hatásokat;
- adott anyagú tartószerkezetek (pl. acélszerkezetek) tervezésére vonatkozó szabványok;
- adott szerkezetcsaládra (pl. hidak) vonatkozó szabványok;
- szerkezeti anyagokra (pl. szerkezeti acélok) vonatkozó szabványok.

A szabványok a különböző szerkezetek, illetve szerkezeti elemek vizsgálatához számítási eljárásokat írnak elő, melyekkel igazolható, hogy a nem kívánt határállapotok nem lépnek fel. Egyes esetekben alternatív számítási módokat is megengednek. A szabványok szerkesztési szabályokat is tartalmaznak, melyeknek az a céljuk, hogy betartásuk esetén egyes vizsgálatok elvégzését feleslegessé tegyék.

Hazánkban jelenleg bevezetés alatt áll az európai összefogással készülő (magyar nyelven még csak részben elkészült) tartószerkezetekre vonatkozó szabványsorozat, az *Eurocode*. Ennek része az acélszerkezetek tervezése témakört felölelő *Eurocode 3*, amelyre az előzőekben már többször hivatkoztunk. A jegyzet írásának időpontjában még érvényes az azonos tárgykörű magyar szabvány, az *MSZ 15024/1 Építmények teherbordó szerkezeteinek erőtanai tervezése – Acélszerkezetek*. A szabvány visszavonásának szándékát a Magyar Szabványügyi Testület azonban már bejelentette, ezért a gyakorlati méretezéssel kapcsolatban a továbbiakban is az *Eurocode 3* előírásaira fogunk hivatkozni. Az *Eurocode 3* terminológiája és jelölésrendszere sok esetben eltér az eddig használt magyar szabványokétól, ezért a jelölésrendszert a Mellékletben közöljük, a magától nem értetődő Eurocode-ízű szakkifejezéseket pedig előfordulásukkor igyekszünk megmagyarázni.

A keresztmetszetek tengelyeinek és méreteinek az *Eurocode 3*-ban alkalmazott jelölését a 3.1. ábra mutatja.

A jelölésekre vonatkozólag megjegyezzük, hogy az x mindig az elemek hossztengelyét jelenti, gerinclemezes tartóknál pedig y a gerinclemezre merőleges tengely jele. A főtengelyekkel kapcsolatban szokás az erős (u) és a gyenge (v) tengely megnevezés is, amelyekkel a legnagyobb és a legkisebb tehetetlenségi nyomatékhoz tartozó súlyponti tengelyeket jelöljük.



3.1. ábra. Szelvények méreteinek és tengelyeinek jelölése

3.2. Tervezési állapotok, figyelembe veendő hatások

A szerkezet, illetve a szerkezeti elemek megfelelőségét (azt a tényt, hogy a határállapotokat nem lépjük túl) a következő állapotcsoportokra kell igazolni:

- *tartós állapotok*, amelyek a szerkezet rendeltetésszerű használata során fellépő hatások együttesét jelentik;
- ideiglenes állapotok az építés, karbantartás, javítás során fellépő hatások;
- *rendkívüli állapotok*, amelyek rendkívüli hatások (robbanás, ütközés) következményei.

A méretezésnél figyelembe veendő hatások (F) lehetnek:

- a szerkezetre ható közvetlen erőhatások, például önsúly vagy esetleges teher, és
- terhelő alakváltozások, például hőmérsékleti hatás vagy támaszsüllyedés.

Időbeni változás szerint megkülönböztetünk állandó (G), változó (Q) illetve rendkívüli (A) hatásokat. Állandó hatások például az önsúly, a földnyomás és a feszítőerő. Változó hatások a meteorológiai és az esetleges terhek. Rendkívüli hatások a rendkívüli eseménykor (pl. járműütközés) fellépő terhek.

Térbeni változás szerint is lehetnek a hatások állandóak (pl. önsúly) és változóak (pl. mozgó esetleges teher, szélteher).

3.3. Általános méretezési elvek

Minden tartószerkezetet érintő alapkövetelmény, hogy azokat úgy kell megtervezni és megépíteni, hogy:

- elfogadható valószínűséggel megtartsák a megkívánt használhatósági állapotukat, figyelembe véve a tervezett élettartamot és a költségeket;
- megfelelő megbízhatósággal ellenálljanak minden olyan erőnek és hatásnak, amely építésük és használatuk során érhetik, valamint a fenntartási költségekhez viszonyítva megfelelően tartósak legyenek;
- olyan rendkívüli események miatt, mint pl. robbanás, járműütközés vagy emberi mulasztás, a kiváltó okhoz képest aránytalanul ne rongálódjanak meg.

3.3.1. A biztonság

Az erőteni méretezés során legfontosabb feladat annak igazolása, hogy az építménynek – terv szerinti üzemeltetés és fenntartás esetén – *a határállapotok kialakulásával szemben kellő, azaz a veszélyesség fokával arányos biztonsága van (lesz) az építés és a tervezett élettartam egész idejére.* Az erőteni méretezésnek emellett figyelmet kell fordítani a gazdaságosságra is, nem kö-

zömbös, hogy az erőtani igények kielégítése milyen áron valósul meg. *A túlzott biztonságot lehetőleg kerülni kell.*

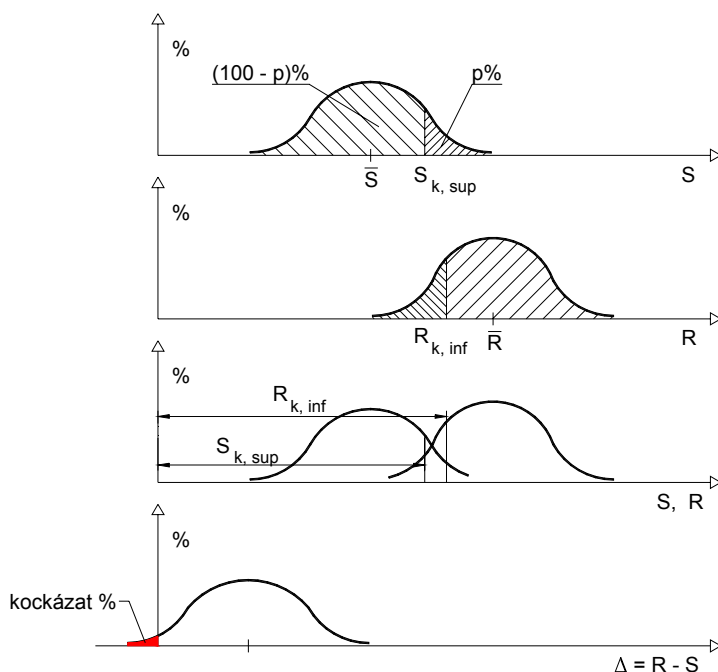
Az Eurocode szabványsorozat az építmények biztonságának kérdésében a valószínűség-elméleti alapon nyugvó módszereket követi. A vizsgálatokban valószínűségi változónak tekinti a terhelő erőket és hatásokat, az anyagjellemzőket és a geometriai méreteket is.

Egy szerkezeti elem keresztmetszetének egy adott határállapotra való megfelelése az alábbi egyenlőtlenség fennállásával igazolható:

$$E_d \leq R_d,$$

ahol E_d a keresztmetszet igénybevételének a hatásokból számított tervezési értéke az adott határállapotban, R_d pedig a keresztmetszet ellenállásának tervezési értéke. A tervezési értékek a valószínűségi változók karakterisztikus értékéből számíthatók. A karakterisztikus érték általában a valószínűségi változó egy adott kvantiliséhez tartozó értékét jelenti. (A valószínűségi változó p valószínűségű kvantilise a valószínűségi változó azon értéke, amelynél kisebb érték előfordulásának valószínűsége éppen p .) Elvileg minden változónak van egy alsó és egy felső karakterisztikus értéke, melyek közül általában csak az egyiket használatára van szükségünk. Bizonyos esetekben (pl. geometriai méreteknél) a karakterisztikus érték az átlagértékkel egyezik meg. Terhek esetén általában a felső, az ellenállások (teherbírás) esetében az alsó értéket használjuk. A *tervezési érték* az igénybevétel oldalán az igénybevétel felső karakterisztikus értéknek egy parciális biztonsági tényezővel való szorzásával kapható, míg az ellenállás tervezési értékét az ellenállás alsó karakterisztikus értékének egy (másik) parciális biztonsági tényezővel való osztásával számítjuk.

Egy keresztmetszetet érő hatás (S) és a keresztmetszet hatással szembeni ellenállása (R) sűrűségfüggvénnyel is ábrázolható (3.2. ábra). A sűrűségfüggvény egy ordinátája az abszcisszához tartozó érték előfordulásának a valószínűségét adja meg. A görbe alatti terület nagysága mindig 1. A *várható érték* a legnagyobb valószínűséghez tartozó érték (\bar{S} ill. \bar{R}), ezek hányadosát (\bar{R}/\bar{S}) szokás centrális biztonságnak nevezni. Ennek értéke azonban önmagában még nem sokat mond a tényleges biztonságról, mert belátható, hogy ha a hatás és az ellenállás sűrűségfüggvénye fedi egymást, akkor előfordulhat, hogy a hatás nagyobb, mint az ellenállás, ez pedig a szerkezet károsodásához vezet.



3.2. ábra. Hatás és ellenállás, mint valószínűségi változó

A károsodás kockázatát is ábrázolhatjuk, ha megszerkesztjük az ellenállás és a hatás különbségének ($\Delta = R - S$) sűrűségfüggvényét. E függvény negatív oldala alatti terület jelenti kockázatot. Építőmérnöki szerkezetek esetén a károsodás kockázata általában 10^{-4} nagyságrendű.

3.3.2. Hatások tervezési értéke

Valamely hatás F_d tervezési értéke a következő általános képlet szerint vehető figyelembe:

$$F_d = \gamma_F \cdot F_k,$$

ahol γ_F a hatás parciális biztonsági tényezője.

3.3.3. Anyagjellemzők tervezési értéke

Egy anyagjellemző X_d tervezési értéke általában a következő:

$$X_d = X_k / \gamma_M,$$

ahol γ_M az anyagjellemző parciális biztonsági tényezője.

3.3.4. A geometriai adatok tervezési értéke

Acélszerkezetek méretezésénél a geometriai adatok tervezési értéke általában a névleges mérettel számítható, nem kell figyelembe venni a mérettűréseket és egyéb esetleges pontatlanságokat:

$$a_d = a_{nom}.$$

3.3.5. A tervezési ellenállás

A tervezési ellenállás a szerkezeti elemeknek, ill. keresztmetszeteknek a teherbírását jelenti, ez egy számított igénybevétel-határ, amely valamely tönkremeneteli móddal szemben még megengedhető. Acélszerkezetek esetén az R_d tervezési ellenállás általában a geometriai adatok és az anyagjellemzők karakterisztikus értékéből közvetlenül meghatározható:

$$R_d = R(X_k, a_k) / \gamma_M.$$

Az *Eurocode 3* a folyáshatárral kapcsolatos ellenállások, illetve a szakítószilárdsággal kapcsolatos ellenállások számításához különböző γ_M biztonsági tényezőt rendel. A biztonsági tényező használatához az alábbi táblázat ad útmutatást.

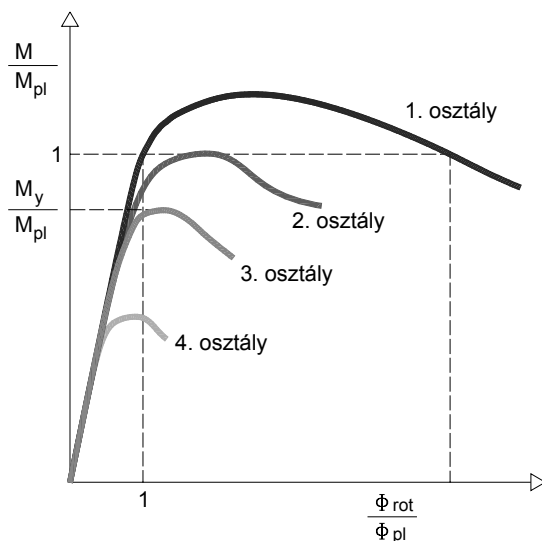
A tényező használata	Jelölés	Érték
Szilárdsági vizsgálatok – keresztmetszeti ellenállások első folyás és korlátolatlan folyás esetén.	γ_{M0}	1,00
Stabilitási vizsgálatok – szerkezeti elem kihajlás, kifordulás, alkotóelem nyírási horpadás.	γ_{M1}	1,00
Szilárdsági vizsgálatok – keresztmetszeti ellenállás lyukkal gyengített lemez képlékeny törése esetén; kapcsolati ellenállás: csavarok, szegecsek, csapok, hegesztési varratok, palástnyomásra működő lemezek ellenállása képlékeny törés esetén.	γ_{M2}	1,25

3.1. táblázat.

3.4. Keresztmetszetek osztályozása

Az *Eurocode 3* a keresztmetszetek szilárdsági vizsgálatát együttesen kezeli a keresztmetszetek alkotóelemeinek a hosszirányú feszültségek okozta horpadásának vizsgálatával. Négy keresztmetszeti osztály különböztethető meg annak alapján, hogy az alkotóelemekben a horpadás és a folyás egymáshoz képest mikor jelentkezik.

- Az 1. keresztmetszeti osztályba sorolhatók azok a keresztmetszetek, amelyeknél a lemezhorpadás bekövetkezése előtt nagy alakváltozások alakulhatnak ki.
- A 2. keresztmetszeti osztályban a horpadás a keresztmetszet teljes képlékenyedése után alakul ki, de az elfordulási képesség korlátozott.
- A 3. keresztmetszeti osztályban a szélsőszál-feszültség a folyási szilárdságot elérheti, de a helyi horpadás megakadályozza a képlékeny nyomatéki ellenállás kifejlődését.
- A 4. keresztmetszeti osztályba azok a keresztmetszetek sorolandók, amelyben a horpadás már a folyási feszültség elérése előtt kialakul.

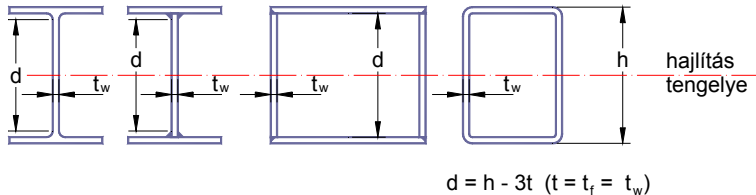
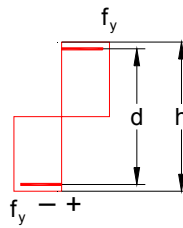
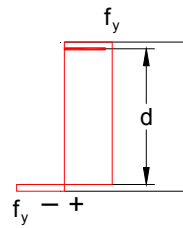
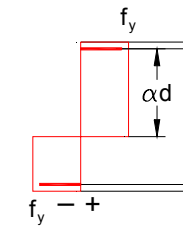
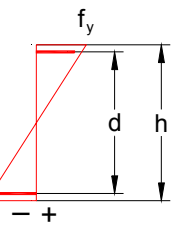
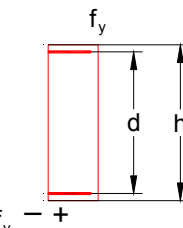
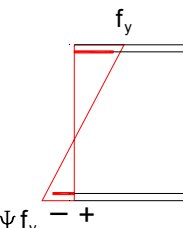


3.3. ábra. Hajlított keresztmetszet viselkedése különböző keresztmetszeti osztályok esetén

A 3.3. ábra a különböző keresztmetszeti osztályú hajlított keresztmetszetek terhelés alatti viselkedését mutatja. Az ábrán M a terhelő nyomatékot, M_{pl} a keresztmetszet teljes képlékenyedése esetén fellépő nyomatékot, M_y pedig a szélső szál megfolyását előidéző nyomatékot jelenti. A fajlagos elfordulást a teljes képlékenyedés elérésekor fellépő elforduláshoz viszonyítottan szemléltetjük.

Az osztályba soroláshoz az alkotólemezek osztályát kell először megállapítanunk, a keresztmetszet osztályát pedig a legmagasabb osztályú (a legkedvezőtlenebb) alkotólemez osztálya adja. Az alkotólemezek osztályát az anyagminőség, a geometriai adatok, a feszültségeloszlás és a megtámasztási viszonyok függvényében az *Eurocode 3*-ban közölt táblázatok segítségével lehet meghatározni.

3.4.1. Maximális szélesség-vastagság arány nyomott lemezelemekre

Gerincek: 			
Osztály	Hajlított gerinc	Nyomott gerinc	Hajlított-nyomott gerinc
Elemek feszültség-eloszlása (nyomás pozitív)			
1	$d/t_w \leq 72 \varepsilon$	$d/t_w \leq 33 \varepsilon$	$ha a > 0,5:$ $d/t_w \leq 396 \varepsilon / (13 a - 1)$ $ha a < 0,5:$ $d/t_w \leq 36 \varepsilon / a$
2	$d/t_w \leq 83 \varepsilon$	$d/t_w \leq 38 \varepsilon$	$ha a > 0,5:$ $d/t_w \leq 456 \varepsilon / (13 a - 1)$ $ha a < 0,5:$ $d/t_w \leq 41,5 \varepsilon / a$
Elemek feszültség-eloszlása (nyomás pozitív)			
3	$d/t_w \leq 124 \varepsilon$	$d/t_w \leq 42 \varepsilon$	$ha \Psi > -1:$ $d/t_w \leq 42 \varepsilon / (0,67 + 0,33 \Psi)$ $ha \Psi \leq -1:$ $d/t_w \leq 62 (1 - \Psi) (-\Psi)^{1/2}$

3.2. táblázat.

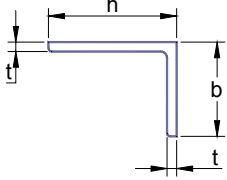
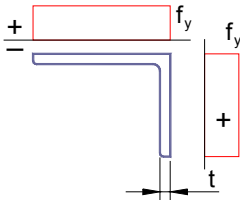
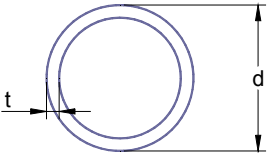
Zárt szelvények belső övlemez elemei:

Osztály	Típus	Hajlított keresztmetszet	Nyomott keresztmetszet
Elem és a keresztmetszet feszültségeloszlása (nyomás pozitív)			
1	Hengerelt zárt szelvény Egyéb	$(b - 3 t_f) / t_f \leq 33 \varepsilon$ $b / t_f \leq 33 \varepsilon$	$(b - 3 t_f) / t_f \leq 42 \varepsilon$ $b / t_f \leq 42 \varepsilon$
2	Hengerelt zárt szelvény Egyéb	$(b - 3 t_f) / t_f \leq 38 \varepsilon$ $b / t_f \leq 38 \varepsilon$	$(b - 3 t_f) / t_f \leq 42 \varepsilon$ $b / t_f \leq 42 \varepsilon$
Elem és a keresztmetszet feszültségeloszlása (nyomás pozitív)			
3	Hengerelt zárt szelvény Egyéb	$(b - 3 t_f) / t_f \leq 42 \varepsilon$ $b / t_f \leq 42 \varepsilon$	$(b - 3 t_f) / t_f \leq 42 \varepsilon$ $b / t_f \leq 42 \varepsilon$

3.3. táblázat.

Szabadperemű övlemez elemek:				
Osz- tály	Szelvény típus	Nyomott öv	Nyomott hajlított öv	
			a szabad szél nyo- mott	a szabad szél húzott
<p style="text-align: center;">hengerelt szelvény hegesztett szelvény</p>				
Az elem feszültség- eloszlása (nyomás pozitív)				
1	Hengerelt Hegesztett	$c / t_f \leq 10 \varepsilon$ $c / t_f \leq 9 \varepsilon$	$c / t_f \leq 10 \varepsilon$ $c / t_f \leq 9 \varepsilon$	$c / t_f \leq 10 \varepsilon / a^{3/2}$ $c / t_f \leq 9 \varepsilon / a^{3/2}$
2	Hengerelt Hegesztett	$c / t_f \leq 11 \varepsilon$ $c / t_f \leq 10 \varepsilon$	$c / t_f \leq 11 \varepsilon$ $c / t_f \leq 10 \varepsilon$	$c / t_f \leq 11 \varepsilon / a^{3/2}$ $c / t_f \leq 10 \varepsilon / a^{3/2}$
Osz- tály	Szelvény típus	Nyomott öv	Nyomott hajlított öv	
			a szabad szél nyo- mott	a szabad szél húzott
Az elem feszültség- eloszlása (nyomás pozitív)				
3	Hengerelt Hegesztett	$c / t_f \leq 15 \varepsilon$ $c / t_f \leq 14 \varepsilon$	$c / t_f \leq 23 \varepsilon \sqrt{k_\sigma}$ $c / t_f \leq 10 \varepsilon \sqrt{k_\sigma}$	

3.4. táblázat.

Szögacélok: Lásd még szabadperemű övlemez elemek		Nem vonatkozik olyan szögacélra, amely más elemekkel folyamatos kapcsolatban van.
Osztály	Nyomott szelvény	
Feszültségeloszlás a szelvényben (nyomás pozitív)		
3	$b/t \leq 15 \varepsilon$; $(b + b)/(2t) \leq 11,5 \varepsilon$	
Csőszelvények: 		
Osztály	Hajlított és/vagy nyomott szelvény	
1	$d/t \leq 50 \varepsilon^2$	
2	$d/t \leq 70 \varepsilon^2$	
3	$d/t \leq 90 \varepsilon^2$	

3.5. táblázat.

3.4.2. 4. osztályú keresztmetszetek hatékony (együttdolgozó) keresztmetszeti jellemzői

A 4. keresztmetszeti osztályban a helyi horpadásnak a keresztmetszet ellenállását csökkentő hatása az együttdolgozó szélesség meghatározásával vehető figyelembe. Ez tehát egy posztkritikus állapot vizsgálata, amelynél a behorpadt részek kikapcsolódnak az igénybevétel felvételéből. A keresztmetszetet úgy kell tekinteni, mintha az csak a hatékony (együttdolgozó) részekből állna. A nyomott elemek együttdolgozó szélességei belső (mindkét szélén folyamatosan megtámasztott) és szabadszélű (csak az egyik szélén folyamatosan megtámasztott) lemezekre általánosságban a

$b_{eff} = \rho \cdot \bar{b}$ képlet alapján számítható, ahol $\rho \leq 1$, \bar{b} pedig az ún. jellemző szélességi méret. A jellemző szélességi méret a különböző keresztmetszeti elemekre az alábbi táblázat szerint vehető fel:

keresztmetszeti elem	jellemző szélesség
gerinclemez	d
hegesztett zárt szelvények övlemez elemei	b
hengerelt vagy hajlított zárt szelvények övlemez elemei	$b - 3t$
szabad peremű öv	c
egyelő szárú szögacél	b
egyenlőtlen szárú szögacél	$(b + b) / 2$

3.6. táblázat.

Közelítésként a ρ csökkentő tényező a következő lehet:

$$\rho = 1, \text{ ha } \bar{\lambda}_p \leq 0,673;$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,22}{\bar{\lambda}_p^2}, \text{ ha } \bar{\lambda}_p > 0,673,$$

ahol

$\bar{\lambda}_p$ a lemez redukált karcsúsága:

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = \frac{\bar{b}/t}{28,4 \varepsilon \sqrt{k_\sigma}},$$

melyben t a vizsgált lemez vastagsága, σ_{cr} a lemezhorpadási kritikus feszültség, k_σ pedig a lemez élfeszültségeinek egymáshoz viszonyított arányától ($\psi = \sigma_2 / \sigma_1$) függő horpadási tényező.

3.4.3. Belső nyomott elemek együttdolgozó szélessége

feszültségeloszlás (nyomás pozitív)		b_{eff} hatékony szélesség				
		$\psi = 1$ $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = b_{e2} = b_{eff} / 2$				
		$1 > \psi \geq 0$ $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = 2 b_{eff} / 2 (5 - \psi)$ $b_{e2} = b_{eff} - b_{e1}$				
		$\psi < 1$ $b_{eff} = \rho b_c = \rho \bar{b} / (1 - \psi)$ $b_{e1} = 0,4 b_{eff}$ $b_{e2} = 0,6 b_{eff}$				
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1	$-1 > \psi > -2$
k_{σ}	4,0	$8,2 / (1,05 + \psi)$	7,81	$7,81 - 6,29 \psi + 9,78 \psi^2$	23,9	$5,98 (1 - \psi)^2$

3.7. táblázat.

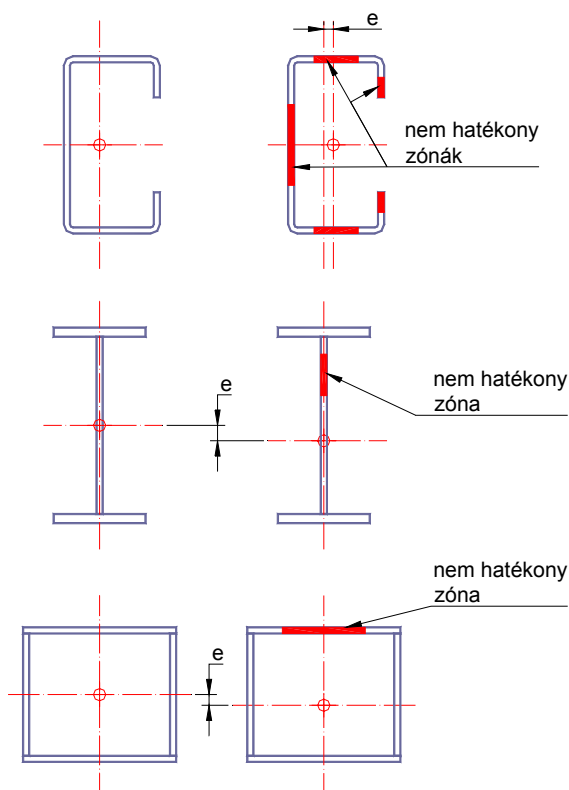
3.4.4. Szabadszélű nyomott elemek együttdolgozó szélessége

feszültségeloszlás (nyomás pozitív)		b_{eff} hatékony szélesség			
		$\frac{1 > \psi \geq 0}{b_{eff} = \rho c}$			
		$\frac{\psi < 1}{b_{eff} = \rho b_c = \rho c / (1 - \psi)}$			
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	0	-1	$1 \geq \psi \geq -1$	
k_{σ}	0,43	0,57	0,85	$0,57 - 0,21 \psi + 0,07 \psi^2$	
		$\frac{1 > \psi \geq 0}{b_{eff} = \rho c}$			
		$\frac{\psi < 1}{b_{eff} = \rho b_c = \rho c / (1 - \psi)}$			
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1
k_{σ}	0,43	$0,578 / (\psi + 0,34)$	1,70	$1,70 - 5 \psi + 17,1 \psi^2$	23,8

3.8. táblázat.

Az előbbi két táblázat feszültségi ábráin a nem sraffozott részek a horpdás miatt kikapcsolódnak az erőjátékból, ezért a keresztmetszetek ellenállásának számításakor azokat figyelmen kívül kell hagyni. A ψ tényező meghatározásához azonban a feszültségek még a teljes keresztmetszet alapján számíthatók, ha öv elemekről van szó. A gerinclemez együttdolgozó szélességének számításánál viszont az öveknek már csak az együttdolgozó szélességét szabad figyelembe venni, a gerinclemez teljes keresztmetszeti területtel számítandó.

Az együttdolgozó keresztmetszet súlypontja általában eltér a teljes keresztmetszet súlypontjától (3.4. ábra). Az eltérés miatt egy elméletileg központosan nyomott elemnél is fellép egy $AM = e \cdot N$ nyomaték, amelyet a hatások oldalán figyelembe kell venni. A hajlított keresztmetszetek ellenállásának számításánál csak a hatékony keresztmetszeti területet szabad számításba venni.



3.4. ábra. Az együttdolgozó keresztmetszet súlyponteltolódása

3.5. Keresztmetszetek ellenállása

A keresztmetszet ellenállása a keresztmetszet határteherbírását jelenti valamilyen igénybevétellel vagy igénybevétel-kombinációval szemben. A keresztmetszet ellenállását egy olyan (rugalmas vagy képlékeny) feszültségeloszlás figyelembevételével határozzuk meg, amely képes egyensúlyozni a keresztmetszet igénybevételeit és amelyben a feszültségek nem lépik túl a folyáshatárt. Az ellenállás meghatározása során a keresztmetszet alkotóelemeinek esetleges horpadására is tekintettel kell lenni.

3.5.1. Keresztmetszeti jellemzők

A teljes keresztmetszet jellemzői (A , I , W) a tervezett méretekből határozhatók meg. A furatgyengítéseket nem kell levonni, de a nagyobb nyílásokat figyelembe kell venni.

A hasznos keresztmetszet (A_{net}) úgy határozható meg, hogy a rúdtengelyre merőleges teljes keresztmetszetből levonjuk a furatok és egyéb nyílások okozta csökkentést.

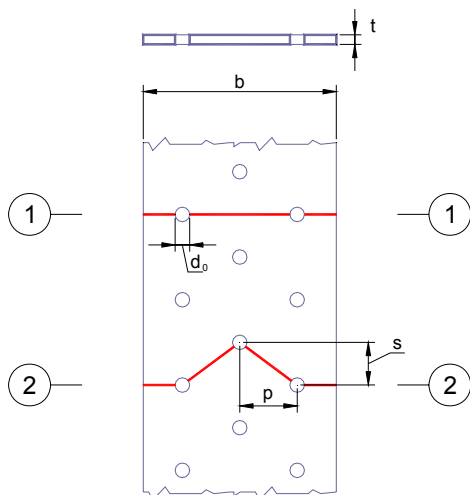
Eltolt furatosztás esetén a ferde és merőleges szakaszokból álló, törtvonalú töréskép kialakulását is meg kell vizsgálni. Ilyenkor a merőleges teljes keresztmetszetből a törtvonal menti összes furatgyengítést le kell vonni, de a ferde szakaszokon egyenként a gyengítés $s^2 \cdot t / 4 \cdot p$ értékkel csökkenthető. A képletben szereplő s , t és p jelentését a 3.5. ábra szemlélteti.

3.5.2. Biztonsági tényezők teherbírási határállapotokhoz

A teherbírasi határállapotokkal kapcsolatos általános elv, hogy az acélszerkezeteket úgy kell megtervezni, hogy a szerkezetek elemei az általános tervezési követelményeket minden tervezési állapotban biztonsággal kielégítsék.

Az Eurocode 3 a teherbírasi határállapotok vizsgálatához a következő biztonsági tényezőket (γ_M) rendelí:

- 1., 2. és 3. osztályú keresztmetszetek ellenállásához $\gamma_{M0} = 1,00$;
- 4. osztályú keresztmetszetek ellenállásához $\gamma_{M1} = 1,00$;
- kihajló, kiforduló elemek ellenállásához $\gamma_{M1} = 1,00$;
- a hasznos keresztmetszet ellenállásához csavarlyukaknál $\gamma_{M2} = 1,25$.

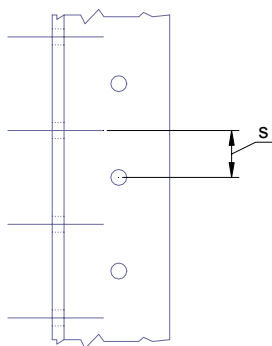
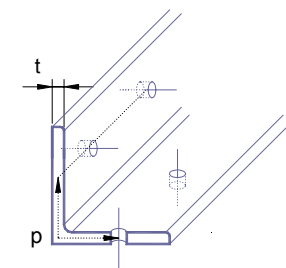


1–1 metszet:

$$A_{net} = (b - 2 \cdot d_0) \cdot t$$

2–2 metszet:

$$A_{net} = (b - 3 \cdot d_0) \cdot t + 2 \cdot \frac{s^2 \cdot t}{4 \cdot p}$$



A „p” értelmezés szögacélok esetén

3.5. ábra. A hasznos keresztmetszet számítása

3.5.3. Keresztmetszetek ellenállása egyszerű igénybevételekre

Húzás

Húzott elemekben az igénybevétel tervezési értéke (N_{Ed}) nem haladhatja meg a tervezési ellenállás (N_{Rd}) értékét, amely a teljes keresztmetszet képlékeny tervezési ellenállásának ($N_{pl,Rd}$) és a hasznos keresztmetszet törési ellenállásának ($N_{u,Rd}$) kisebbike. Rövidebben fogalmazva a teljes keresztmetszet nem folyhat meg, ill. a hasznos keresztmetszet nem szakadhat el.

$$N_{Ed} \leq N_{Rd};$$

$$N_{Rd} = \min \left\{ \begin{array}{l} N_{pl,Rd} \\ N_{u,Rd} \end{array} \right\},$$

ahol

$$N_{pl,Rd} = A \cdot f_y / \gamma_{M0};$$

$$N_{u,Rd} = 0,9 \cdot A_{net} \cdot f_u / \gamma_{M2}.$$

Egyik szárukon kapcsolt szögacélok esetében a bekötés külpontosságát is figyelembe kell venni $N_{u,Rd}$ meghatározásakor. Az alábbiak szerint kell eljárni:

Egy kötőelem esetén:

$$N_{u,Rd} = \frac{2 \cdot (e_2 - 0,5d_0) \cdot t \cdot f_u}{\gamma_{M2}}.$$

Két kötőelem esetén:

$$N_{u,Rd} = \frac{\beta_2 \cdot A_{net} \cdot f_u}{\gamma_{M2}}.$$

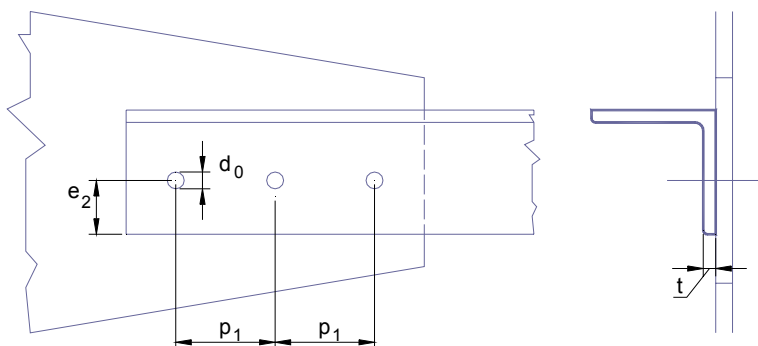
Három vagy több kötőelem esetén:

$$N_{u,Rd} = \frac{\beta_3 \cdot A_{net} \cdot f_u}{\gamma_{M2}}.$$

β_2 és β_3 a p_1 furattávolságtól függ (lásd 3.6. ábra), értékük az alábbi táblázatból vehető:

β_2 és β_3 csökkentő tényezők			
furattávolság	p_1	$\leq 2,5 d_0$	$\geq 5 d_0$
2 kötőelem	β_2	0,4	0,7
3 vagy több kötőelem	β_3	0,5	0,7

3.9. táblázat.



3.6. ábra. Egyik szárán kapcsolt szögacél

Nyomás

Nyomott elemekben az igénybevétel tervezési értéke (N_{Ed}) nem haladhatja meg a tervezési ellenállás ($N_{c,Rd}$) értékét, amely a teljes keresztmetszet képlékeny tervezési ellenállásának ($N_{pl,Rd}$) és a teljes keresztmetszet horpadási ellenállásának ($N_{o,Rd}$) kisebbike. Nyomott elemek teherbírás-vizsgálatánál a furatgyengítéseket nem kell figyelembe venni, kivéve a túlméretes és hasíték lyukakat.

$$N_{Ed} \leq N_{c,Rd};$$

$$N_{c,Rd} = \min \left\{ \begin{array}{l} N_{pl,Rd} \\ N_{o,Rd} \end{array} \right\},$$

ahol

$$N_{pl,Rd} = A \cdot f_y / \gamma_{M0};$$

$$N_{o,Rd} = A_{eff} \cdot f_y / \gamma_{M1}.$$

1, 2. és 3. osztályú keresztmetszetek esetén a tervezési ellenállás a képlékeny ellenállással, 4. osztályú keresztmetszet esetén pedig a horpadási ellenállással azonos.

Hajlítás

Hajlításnak kitett szerkezeti elemeknél a tervezési nyomatéki ellenállás ($M_{c,Rd}$) nem lehet kisebb, mint a hajlító igénybevétel tervezési értéke (M_{Ed}), egyik keresztmetszetben sem.

$$M_{Ed} \leq M_{c,Rd}.$$

Hajlított elemek esetében három teherbírési határállapot is szóba jöhet, attól függően, hogy milyen keresztmetszeti osztályba tartozó szerkezeti elemet vizsgálunk, ezért a hajlítási ellenállás számításának módja keresztmetszeti osztályonként eltérő. 1. és 2. osztályú keresztmetszeteknél a korlátatlan folyás, 3. osztályú keresztmetszeteknél az első folyás határállapotának elérése jelenti a teherbírás kimerülését. A 4. osztályú keresztmetszeteknél pedig a horpadás utáni teherbírési határállapot a hatékony keresztmetszet figyelembevételével számítható.

Az 1. és 2. osztályú keresztmetszetek esetében képlékeny feszültségeloszlást tételezünk fel a teljes keresztmetszetben, a hajlítási ellenállás a *képlékeny keresztmetszeti tényező* (W_{pl}) segítségével számítható. A 3. és 4. osztályú keresztmetszeteknél a teherbírás kimerülésekor nincs képlékeny feszültségátrendeződés, azoknál tehát a rugalmas keresztmetszeti tényezővel számolunk.

Tiszta (nyírásmentes) egyenes hajlítás esetén a nyomatéki tervezési ellenállás a következő összefüggésekkel határozható meg.

- 1. és 2. osztályú keresztmetszetekre: $M_{c,Rd} = W_{pl} \cdot f_y / \gamma_{M0}$
- 3. osztályú keresztmetszetekre: $M_{c,Rd} = W_{el} \cdot f_y / \gamma_{M0}$
- 4. osztályú keresztmetszetekre: $M_{c,Rd} = W_{eff} \cdot f_y / \gamma_{M1}$

A furatgyengítéseket a húzott övben nem kell figyelembe venni, ha a húzott övre igaz, hogy:

$$0,9 \cdot A_{f,net} \cdot \frac{f_u}{\gamma_{M2}} \geq A_f \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}}.$$

Ellenkező esetben csak akkora övlemezcst szabad számításba venni, amely az előbbi korlátot kielégíti. A gerinclemez húzott szakaszán sem kell a furatgyengítéseket számításba venni, ha az előbbi feltétel a teljes húzott zónára (beleértve a húzott övet is) teljesül.

A nyomott oldali gyengítéseket – a túlméretes és a hasíték lyukak kivételével – nem kell levonni a keresztmetszetből.

Nyírás

A nyíróerő tervezési értéke (V_{Ed}) egy keresztmetszetben sem haladhatja meg a tervezési képlékeny nyírási ellenállás ($V_{pl,Rd}$) értékét.

$$V_{Ed} \leq V_{pl,Rd} \cdot$$

$V_{pl,Rd}$ számításakor a nyírt keresztmetszeti területen (A_V) egyenletes feszültségeloszlást tételezünk fel, a keresztmetszet egyéb részei viszont nem vesznek részt a képlékeny nyírási teherbírásban:

$$V_{pl,Rd} = A_V \cdot (f_y / \sqrt{3}) / \gamma_{M0}$$

Az A_V nyírt keresztmetszeti terület a 3.10. táblázatban részletezett módon vehető fel.

hengerelt I és H szelvény, gerinccel párhuzamos teher	$A - 2 \cdot b \cdot t_f + (t_w + 2r) \cdot t_f$
hengerelt U szelvény, gerinccel párhuzamos teher	$A - 2 \cdot b \cdot t_f + (t_w + r) \cdot t_f$
hegesztett I, H és U szelvény, gerinccel párhuzamos teher	$\sum d \cdot t_w$
hegesztett I, H és U szelvény, övvel párhuzamos teher	$A - \sum d \cdot t_w$
állandó falvastagságú zárt szelvények	
magassággal párhuzamos teher	$A \cdot h / (b + h)$
szélességgel párhuzamos teher	$A \cdot b / (b + h)$
csövek	$2 \cdot A / \pi$
lemezek, tömör rudak	A

3.10. táblázat.

Az A_V nyírt terület hengerelt I, H és U szelvényeknél a gerinccel párhuzamos közelítőleg az $1,04 \cdot h \cdot t_w$ értékkel is számítható.

A keresztmetszet nyírási horpadási ellenállását nem kell ellenőrizni, ha a gerinclemez magasság / vastagság aránya (d/t_w) nem haladja meg az alábbi értékeket:


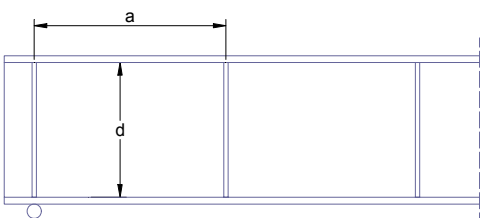
$$\text{merevítetlen gerinc esetén} \quad d/t_w \leq 69\varepsilon;$$

$$\text{merevített gerinc esetén} \quad d/t_w \leq 30\sqrt{k_\tau},$$

ahol

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}},$$

a k_τ nyírási horpadási tényező pedig a gerincmerevítések elhelyezésétől függően a 3.11. táblázatból vehető.

<p>Csak a támaszoknál merevített gerincre</p> 	$k_\tau = 5,34$
<p>Támaszok között is merevített gerincre</p> 	<p>ha $a/d < 1$, $k_\tau = 4 + 5,34/(a/d)^2$</p> <p>ha $a/d \geq 1$, $k_\tau = 5,34 + 4/(a/d)^2$</p>

3.11. táblázat.

3.5.4. Keresztmetszetek ellenállása összetett igénybevételekre

Hajlítás és nyírás

A keresztmetszetre ható nyíróerő az egyidejű képlékeny nyomatéki ellenállást csökkenti. Viszonylag kicsi nyíróerők esetén a csökkenést a felkeményedés ellensúlyozza, ezért a képlékeny nyomatéki ellenállást nem kell csökkenteni, ha a nyíróerő tervezési értéke (V_{Ed}) nem haladja meg a képlékeny nyírás ellenállás ($V_{pl,Rd}$) 50 %-át. Ellenkező esetben a nyomatéki ellenállást $M_{V,Rd}$ értékre kell csökkenteni az alábbiak szerint:

- azonos övlemező keresztmetszetek, hajlítás az erős tengely körül

$$M_{V,Rd} = \left(W_{pl} - \rho \frac{A_v^2}{4 \cdot t_w} \right) \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}}, \text{ de } M_{V,Rd} \leq M_{c,Rd},$$

ahol

$$\rho = \left(\frac{2 \cdot V_{Sd}}{V_{pl,Rd}} - 1 \right)^2;$$

- más esetekben $M_{V,Rd}$ számításánál a nyírt területre vonatkozóan $(1 - \rho)$ csökkentő tényezőt kell figyelembe venni.

Az előző eljárások mind a négy keresztmetszeti osztályra érvényesek.

Hajlítás és normálerő

A normálerő jelenléte csökkenti a keresztmetszet nyomatéki ellenállását. A csökkenést a keresztmetszeti osztálytól függően eltérő módon kell figyelembe venni.

1. és 2. osztályú keresztmetszetek

A keresztmetszet megfelelő, ha $M_{Ed} \leq M_{N,Rd}$, ahol $M_{N,Rd}$ a normálerő hatásával csökkentett képlékeny nyomatéki ellenállás.

Lyukak nélküli lemezre

$$M_{N,Rd} = M_{pl,Rd} \cdot \left[1 - \left(\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} \right)^2 \right]$$

és kielégítendő feltétel, hogy:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}} + \left(\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} \right)^2 \leq 1$$

Övlemezes keresztmetszeteknél kis normálerő esetén a felkeményedés ellensúlyozza a képlékeny nyomatéki ellenállás csökkenését, ezért ez elhanyagolható, ha:

az **y – y** (erős) tengely körüli hajlítás esetén a normálerő nem nagyobb, mint a gerinc húzási képlékeny ellenállásának fele, vagy a teljes szelvény húzási ellenállásának negyede;

a **z – z** (gyenge) tengely körüli hajlítás esetén a normálerő nem nagyobb, mint a gerinc húzási képlékeny ellenállása.

Ha az előbbi feltételek nem teljesülnek, akkor a a képlékeny nyomatéki ellenállás csökkenését az alábbiak szerint kell figyelembe venni.

I vagy H szelvények

y – y tengely körüli hajlításra:

$$M_{Ny,Rd} = M_{pl,y,Rd} \cdot \frac{1-n}{1-0,5 \cdot a}, \quad \text{de} \quad M_{Ny,Rd} \leq M_{pl,y,Rd};$$

z – z tengely körüli hajlításra:

$$\text{ha } n \leq a: \quad M_{Nz,Rd} = M_{pl,z,Rd};$$

$$\text{ha } n > a: \quad M_{Nz,Rd} = M_{pl,z,Rd} \cdot \left(1 - \frac{(n-a)^2}{(1-a)^2} \right),$$

ahol

$$n = \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} \quad \text{normálerő-kihasználtság} \quad \text{és}$$

$$a = \frac{A - 2 \cdot b \cdot t_f}{A} \quad \text{de} \quad a \leq 0,5.$$

Állandó falvastagságú zárt szelvények

y – y tengely körüli hajlításra:

$$M_{Ny,Rd} = M_{pl,y,Rd} \cdot \frac{l-n}{1-0,5 \cdot a_w}, \quad \text{de} \quad M_{Ny,Rd} \leq M_{pl,y,Rd};$$

$$a_w = \frac{A-2 \cdot b \cdot t}{A} \leq 0,5$$

z – z tengely körüli hajlításra:

$$M_{Nz,Rd} = M_{pl,z,Rd} \cdot \frac{l-n}{1-0,5 \cdot a_f}, \quad \text{de} \quad M_{Nz,Rd} \leq M_{pl,z,Rd},$$

$$a_f = \frac{A-2 \cdot h \cdot t}{A} \leq 0,5$$

Azonos övű és azonos gerincű hegesztett zárt szelvények

y – y tengely körüli hajlításra:

$$M_{Ny,Rd} = M_{pl,y,Rd} \cdot \frac{l-n}{1-0,5 \cdot a_w}, \quad \text{de} \quad M_{Ny,Rd} \leq M_{pl,y,Rd};$$

$$a_w = \frac{A-2 \cdot b \cdot t_f}{A} \leq 0,5$$

z – z tengely körüli hajlításra:

$$M_{Nz,Rd} = M_{pl,z,Rd} \cdot \frac{l-n}{1-0,5 \cdot a_f}, \quad \text{de} \quad M_{Nz,Rd} \leq M_{pl,z,Rd},$$

$$a_f = \frac{A-2 \cdot h \cdot t_w}{A} \leq 0,5$$

Csőszelvényekre:

$$M_{N,Rd} = 1,04 \cdot M_{pl,Rd} \cdot (1-n^{1,7})$$

Kéttengelyű hajlítás

1. és 2. osztályú keresztmetszetek esetén – a biztonság javára történő közelítéssel – a következő feltételt kell kielégíteni:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,y,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{pl,z,Rd}} \leq 1.$$

3. osztályú keresztmetszetek

A 3. osztályú keresztmetszeteknél képlékeny feszültségátrendeződést nem vehetünk figyelembe. A rugalmas állapotban összegzett hosszirányú normál feszültségek ki kell, hogy elégítsék a következő feltételt:

$$\sigma_{x,Ed} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0}}.$$

Kötőelemlyuk nélküli keresztmetszetre az előbbi feltétel az alábbi alakban is felírható:

$$\frac{N_{Ed}}{A \cdot f_y / \gamma_{M0}} + \frac{M_{y,Ed}}{W_{el,y} \cdot f_y / \gamma_{M0}} + \frac{M_{z,Ed}}{W_{el,z} \cdot f_y / \gamma_{M0}} \leq 1.$$

4. osztályú keresztmetszetek

A 4. osztályú keresztmetszetek esetében az a különbség a 3. osztályúakhoz képest, hogy csak a dolgozó keresztmetszettel számolhatunk, továbbá számításba kell venni a súlyponteltolódásból származó nyomaték-többletet is, valamint a parciális biztonsági tényező is a keresztmetszeti osztálynak megfelelően módosul. A következő feltételt kell kielégíteni:

$$\frac{N_{Ed}}{A \cdot f_y / \gamma_{M1}} + \frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} \cdot e_{N,z}}{W_{eff,y} \cdot f_y / \gamma_{M1}} + \frac{M_{z,Ed} + N_{Ed} \cdot e_{N,y}}{W_{eff,z} \cdot f_y / \gamma_{M1}} \leq 1.$$

A képletben e_{Ny} ill. e_{Nz} a dolgozó keresztmetszet súlypontjának x ill. y irányú eltolódása a teljes keresztmetszet súlypontjához képest. (Lásd 3.4. ábra. Az együttdolgozó keresztmetszet súlyponteltolódása)

3.6. Rudak stabilitási ellenállása

3.6.1. Központosan nyomott elemek

Az általánosan használt melegen hengerelt keresztmetszetek esetén központosan nyomott elemekben általában a síkbeli kihajlási mód a mértékadó. A központosan nyomott rúd tervezési ellenállását általában két egymásra merőleges síkban kell meghatározni az alábbiak szerint:

$$N_{b,Rd} = \chi \cdot \beta_A \cdot \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M1}}$$

ahol

$\beta_A = 1$, ha a keresztmetszet 1., 2. vagy 3. keresztmetszeti osztályú,

$\beta_A = A_{eff} / A$, ha a keresztmetszet 4. keresztmetszeti osztályú.

Állandó keresztmetszet és állandó nyomóerő esetén a χ csökkentő tényező $\bar{\lambda}$ redukált karcsúságtól függő értéke:

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}}, \quad \text{de} \quad \chi \leq 1,$$

ahol

$$\phi = \frac{1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2}{2},$$

α az alakhiba tényező,

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{\beta_A \cdot A \cdot f_y}{N_{cr}}} = \frac{\lambda}{\lambda_1} \sqrt{\beta_A} \quad \text{a redukált karcsúság,}$$

$\lambda = \frac{\ell}{i}$ a kihajlás síkjában számított karcsúság (ezt kell általában két síkban kiszámítani),

ℓ a rúd kihajlási hossza,

i a kihajlás síkjára merőleges keresztmetszeti főtengelyre számított inerciasugár,

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 93,9\varepsilon, \quad \text{annak a (képzeltbeli) rúdnek a karcsúsága,}$$

amelynek az EULER-féle kihajlási kritikus feszültsége a folyáshatárral megegyezik,

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad \text{és}$$

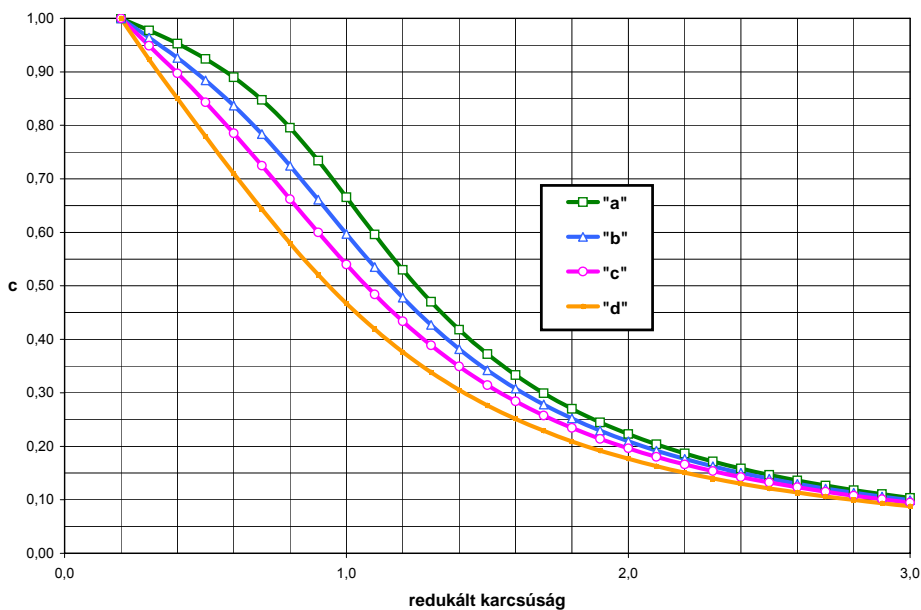
$$N_{cr} = A \cdot \sigma_{cr} = A \cdot \frac{\pi^2 \cdot E}{\lambda^2} \text{ az EULER-féle kritikus erő.}$$

Az egyes kihajlási görbékhez tartozó α alakhiba tényező az alábbi táblázatból veendő:

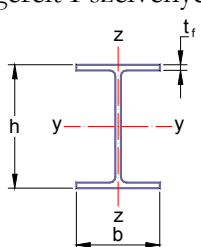
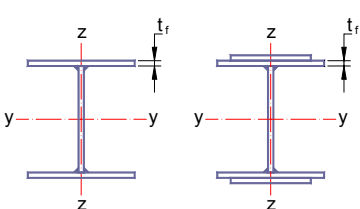

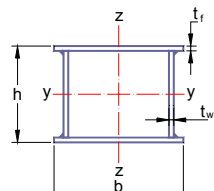

kihajlási görbe	„a”	„b”	„c”	„d”
α	0,21	0,34	0,49	0,76

3.12. táblázat.

A kihajlási görbék a 3.7. ábra szemlélteti. A gyakorlati számításokhoz a kihajlási görbét a keresztmetszet és a kihajlás síkjának függvényében a 3.13. táblázatból kell kiválasztani, χ értékei pedig a 3.15. táblázatból vehetők.



3.7. ábra. A kihajlási görbék

Keresztmetszet	Korlátozások	Kihajlási tengely	Kihajlási görbe
Hengerelt I szelvények 	$h / b > 1,2$ $t_f \leq 40 \text{ mm}$	y – y z – z	a b
	$40 \text{ mm} < t_f \leq 100 \text{ mm}$	y – y z – z	b c
	$h / b \leq 1,2$ $t_f \leq 100 \text{ mm}$	y – y z – z	b c
	$t_f > 100 \text{ mm}$	y – y z – z	d d
Hegesztett I szelvények 	$t_f \leq 40 \text{ mm}$	y – y z – z	b c
	$t_f > 40 \text{ mm}$	y – y z – z	c d
Zárt szelvények 	melegen hengerelt	bármelyik	a
	hidegen alakított f_y helyett f_{yb} *	bármelyik	b
	hidegen alakított f_y helyett f_{va} **	bármelyik	c
Hegesztett zárt szelvények 	általában	bármelyik	b
	kivétel: erős varratok és $b / t_f < 30$ $h / t_w < 30$	y – y z – z	c c
U, L és tömör szelvények 		bármelyik	c

3.13. táblázat.

* A számításban f_y helyett f_{yb} , a síklemez folyáshatára veendő figyelembe.

** A számításban f_y helyett f_{ya} átlagos folyáshatár veendő figyelembe.

Az átlagos folyáshatárral vesszük figyelembe azt a hatást, hogy hidegalakítás következtében az alapanyag a hajlított élek mentén felkeményedik. Az átlagos folyáshatár kísérletileg, vagy az alábbi módon határozható meg.

$$f_{ya} = f_{yb} + \frac{k \cdot n \cdot t^2}{A_g} \cdot (f_u - f_{yb}) \text{ de } f_{ya} \leq f_u \text{ ill. } f_{ya} \leq 1,2 \cdot f_{yb}$$

ahol

t a vastagság;

A_g a teljes keresztmetszeti terület;

k az alakítás módjától függő tényező:

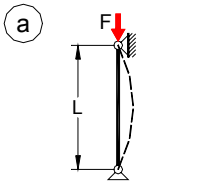
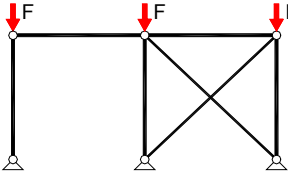
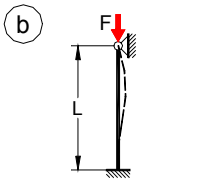
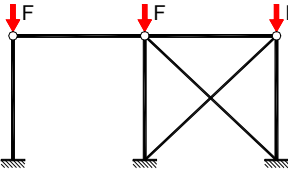
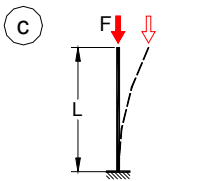
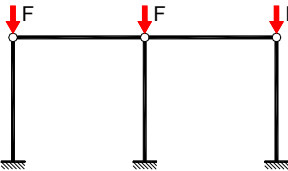
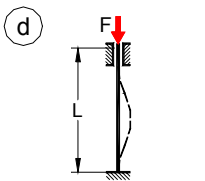
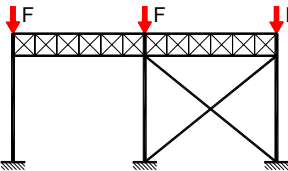
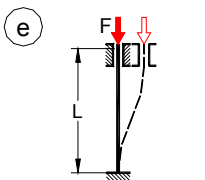
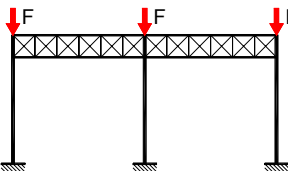
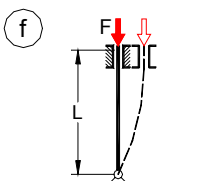
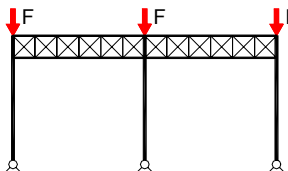
$k = 7$ görgősoros hidegalakításnál;

$k = 5$ egyéb hidegalakításnál.

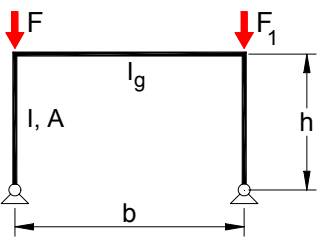
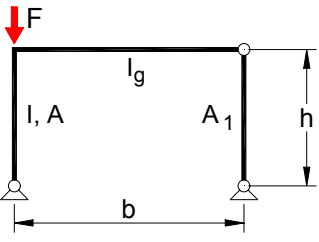
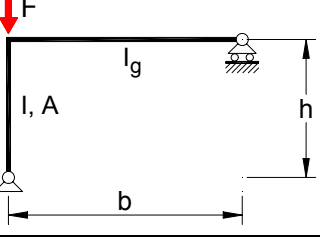
n a keresztmetszetben lévő, $5t$ -nél kisebb belső sugárral kialakított 90° -os hajlítások száma. A 90° -nál kisebb hajlításokat arányosan kell figyelembe venni.

3.6.2. A kihajlási hossz

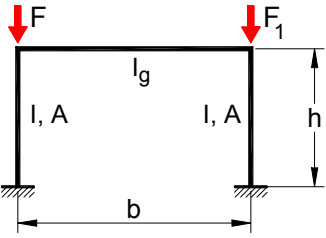
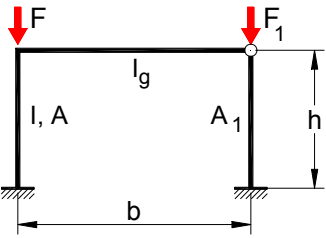
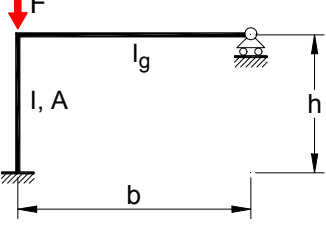
Az ℓ kihajlási hossz, a mindkét végükön csuklósan megtámasztott rudak esetében a szerkezeti hosszal (L) vehető azonosnak. Más esetekben ℓ -et a rúd megtámasztási viszonyainak figyelembevételével kell meghatározni az $\ell = k \cdot L$ összefüggés szerint, k itt a rúdvégek megtámasztási módjától függő tényező. Az alapeseteket a 3.8. ábra mutatja, a legegyszerűbb kerek kihajlási hosszai pedig a 3.9. ábra és a 3.10. ábra segítségével határozhatók meg.

Megtámasztás módja	k tényező értéke	Példa
	$k=1,0$	
	$k=0,7$	
	$k=2,0$	
	$k=0,5$	
	$k=1,0$	
	$k=2,0$	

3.8. ábra. A kihajlási hossz meghatározása alapesetekre

$\ell = k \cdot h \quad k = \sqrt{\frac{I+m}{2}} \sqrt{4 + 1,4(c + 6\alpha) + 0,02(c + 6\alpha)^2}$	
	$m = \frac{F_1}{F} \leq 1$ $c = \frac{I \cdot b}{I_g \cdot h}$ $\alpha = \frac{4I}{b^2 \cdot A} \leq 0,2$
	$m = 1$ $c = \frac{2 \cdot I \cdot b}{I_g \cdot h}$ $\alpha = \frac{I}{b^2} \left(\frac{1}{A} + \frac{1}{A_1} \right)$
	$m = 1$ $c = \frac{2 \cdot I \cdot b}{I_g \cdot h}$ $\alpha = \frac{I}{b^2 \cdot A}$

3.9. ábra. Egynyílású csuklós keretek kihajlási hossza

$\ell = k \cdot h \quad k = \sqrt{\frac{I+m}{2}} \sqrt{1+0,35(c+6\alpha)+0,017(c+6\alpha)^2}$	
	$m = \frac{F_1}{F} \leq 1$ $c = \frac{I \cdot b}{I_g \cdot h}$ $\alpha = \frac{4I}{b^2 \cdot A} \leq 0,2$
	$m = 1$ $c = \frac{2 \cdot I \cdot b}{I_g \cdot h}$ $\alpha = \frac{I}{b^2} \left(\frac{1}{A} + \frac{1}{A_1} \right)$
	$m = \frac{F_1}{F} \leq 1$ $c = \frac{I \cdot b}{I_g \cdot h}$ $\alpha = \frac{4I}{b^2 \cdot A} \leq 0,2$

3.10. ábra. Egynyílású befogott keretek kihajlási hossza

Kihajlási hossz rácsos tartókon

Rácsos tartók esetén az övrudak mindkét irányú és a rácsrudak a tartó síkjára merőleges kihajlásnál a kihajlási hossz a szerkezeti hosszal (L) azonos, de az I és H szelvényű övrudak kihajlási hosszát a tartó síkjában $0,9 \cdot L$ -re lehet felvenni. A szerkezeti hossz az oldalirányban megtámasztott csomópontok elméleti távolsága.

A rácsrudak tartósíkbeli kihajlásánál – ha az övek és a rúdvégi kapcsolatok megfelelő befogást biztosítanak (hegesztett kapcsolat, vagy csavarozott kapcsolathoz legalább két csavar) – $\ell = 0,9 \cdot L$ kihajlási hosszal lehet számolni.

Egy szögacélból kialakított nyomott rácsrudak kihajlásánál – ha az övek és a rúdvégi kapcsolatok megfelelő befogást biztosítanak (hegesztett kapcsolat, vagy csavározott kapcsolatnál legalább két csavar) – a bekötési külpontosság hatása elhanyagolható, a rúdvégek befogottsága pedig a következő táblázat szerinti $\bar{\lambda}_{eff}$ hatékony redukált karcsúsággal vehető számításba.

kihajlás síkja	$\bar{\lambda}_{eff}$
$v - v$ tengelyre merőleges	$\bar{\lambda}_{eff,v} = 0,35 + 0,7\bar{\lambda}_v$
$y - y$ tengelyre merőleges	$\bar{\lambda}_{eff,y} = 0,50 + 0,7\bar{\lambda}_y$
$z - z$ tengelyre merőleges	$\bar{\lambda}_{eff,z} = 0,50 + 0,7\bar{\lambda}_v$

3.14. táblázat.

Zárt szelvényű rúdak kihajlási hossza

Zárt szelvényű övrúd ℓ kihajlási hosszát mind a tartó síkjában, mind arra merőlegesen $0,9L$ -re kell felvenni. (Ettől el lehet térni abban az esetben, ha számításos módszerrel kisebb kihajlási hossz mutatható ki.)

Végein csavározott kapcsolatú, zárt szelvényű rácsrúd kihajlási hosszát mind a tartó síkjában, mind arra merőlegesen $1,0 \cdot L$ -re kell felvenni.

Kerülete mentén zárt szelvényű övrúdkhoz hegesztett, el nem lapított és fel nem hasított végű zárt szelvényű rácsrúd kihajlási hossza mind a tartó síkjában, mind arra merőlegesen általában $0,75 \cdot L$ -re vehető.

Ha a rácsrúd két végén különböző végkiképzést alkalmazunk, az ℓ kihajlási hosszát a két végkiképzéshez tartozó kihajlási hossz számtani középértékére kell felvenni.

A χ csökkentő tényező értékei				
redukált karcúság	kihajlási görbe			
$\bar{\lambda}$	„a”	„b”	„c”	„d”
0,2	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
0,3	0,9775	0,9641	0,9491	0,9235
0,4	0,9528	0,9261	0,8973	0,8504
0,5	0,9243	0,8842	0,8430	0,7793
0,6	0,8900	0,8371	0,7854	0,7100
0,7	0,8477	0,7837	0,7247	0,6431
0,8	0,7957	0,7245	0,6622	0,5797
0,9	0,7339	0,6612	0,5998	0,5208
1,0	0,6656	0,5970	0,5399	0,4671
1,1	0,5960	0,5352	0,4842	0,4189
1,2	0,5300	0,4781	0,4338	0,3762
1,3	0,4703	0,4269	0,3888	0,3385
1,4	0,4179	0,3817	0,3492	0,3055
1,5	0,3724	0,3422	0,3145	0,2766
1,6	0,3332	0,3079	0,2842	0,2512
1,7	0,2994	0,2781	0,2577	0,2289
1,8	0,2702	0,2521	0,2345	0,2093
1,9	0,2449	0,2294	0,2141	0,1920

2,0	0,2229	0,2095	0,1962	0,1766
2,1	0,2036	0,1920	0,1803	0,1630
2,2	0,1867	0,1765	0,1662	0,1508
2,3	0,1717	0,1628	0,1537	0,1399
2,4	0,1585	0,1506	0,1425	0,1302
2,5	0,1467	0,1397	0,1325	0,1214
2,6	0,1362	0,1299	0,1234	0,1134
2,7	0,1267	0,1211	0,1153	0,1062
2,8	0,1182	0,1132	0,1079	0,0997
2,9	0,1105	0,1060	0,1012	0,0937
3,0	0,1036	0,0994	0,0951	0,0882

3.15. táblázat.

Változó keresztmetszetű rudak kihajlási hossza

Megjegyzés: Az Eurocode 3 változó keresztmetszetű rudakra vonatkozó részletes módszert nem közöl, bármely eljárás alkalmazható, melynek biztonságossága igazolható. A következőkben bemutatott módszer azonos az MSZ 15024/1-ben találhatóval.

Alul befogott, egyszer változó keresztmetszetű oszlopok alsó és felső szakasza $L_2 < 0,6L_1$ és $N_1 > 3 \cdot N_2$ esetben különálló rúdként vizsgálható $k_1 \cdot L_1$, illetve $k_2 \cdot L_2$ kihajlási hosszal.

A k_1 , illetve k_2 tényező értékét az oszlopszakaszok merevségi arányának valamint a felső oszlopvég megtámasztási módjának függvényében a 3.16. táblázat tartalmazza.

	A felső oszlopvég megtámasztási módja	az alsó szakaszon		a felső szakaszon
		$0,3 > \frac{l_2}{l_1} > 0,1$	$0,1 > \frac{l_2}{l_1} > 0,05$	
	Oszlopvég eltolódhat és elfordulhat	$k_1 = 2,5$	$k_1 = 3,0$	$k_2 = 3,0$
	Eltolódás lehetséges, elfordulás ellen rögzített	$k_1 = 2,0$	$k_1 = 2,0$	$k_2 = 3,0$
	Elfordulás lehetséges (csuklós), eltolódás ellen rögzített	$k_1 = 1,6$	$k_1 = 2,0$	$k_2 = 2,5$
Mereven befogott, elfordulás és eltolódás ellen rögzített	$k_1 = 1,2$	$k_1 = 1,5$	$k_2 = 2,0$	

3.16. táblázat.

3.6.3. Osztott szelvényű nyomott rudak

Kialakítás

Osztott szelvényű nyomott rudakat kettő vagy több övelem hevederes vagy rácsos összekapcsolásával lehet kialakítani. (3.11. ábra) Az ilyen típusú oszlopok alkalmazása azért célszerű, mert lényegesen kisebb anyagfelhasználással lehet ugyanazt a teherbírást elérni, mint tömör keresztmetszetek esetében.

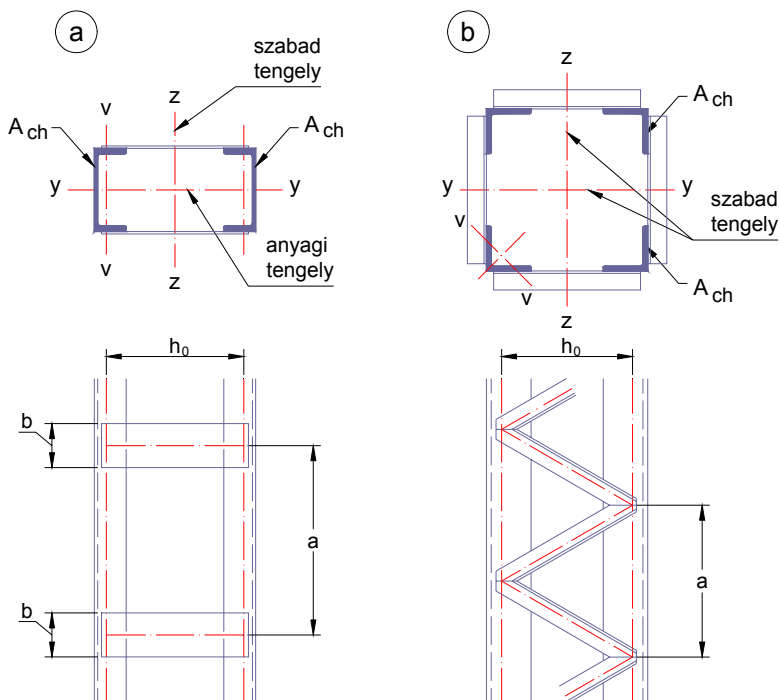
Hevederezés esetén a hevedereket úgy kell kialakítani, hogy azok a rúd teljes hosszát legalább három részre osszák. Ahol csak lehetséges a hevedereket ill. a rácozást egyenletesen kell kiosztani a rúd hossza mentén. A rudak végein és a más elemekkel való összekapcsolás helyein összekötő mezőket kell kialakítani. Az összekötő mezők lehetnek hevederek vagy keresztmervített mezők. A csavaró alakváltozás elkerülése céljából az övek ellentétes oldalán lévő rácozást lehetőleg úgy kell elhelyezni, hogy az egyik rácozás a másik takarásába essen.

Számítási alapelvek

Az osztott szelvényű nyomott rudak stabilitásvizsgálatát is két síkban kell elvégezni. Ha a kihajlást az anyagi tengelyre merőleges síkban vizsgáljuk, akkor ugyanúgy kell eljárni, mint a tömör szelvényű rudak esetén. (Az

anyag tengely az a főtehetetlenségi tengely, amely az övelemek keresztmetszetét metszi. Az összetett keresztmetszetek egy részének nincs anyagi tengelyük.)

A szabad tengely(ek)re merőleges síkú kihajlás vizsgálatánál egy (legalább) $l/500$ nagyságú geometriai alakhibát (kezdeti görbeséget) kell feltételezni. A görbeség figyelembevételével kell meghatározni az osztott szelvényű rúd övelemeinek és a hevedereknek, ill. a rácozásnak az igénybevételeit, valamint a kapcsolatokra ható erőket. Az övelemekben a legnagyobb igénybevételek rúdközépen számíthatók, a rácozásra, ill. a hevederekre a legnagyobb erők pedig a rúdvégek közelében hatnak.



3.11. ábra. Osztott szelvényű rúd kialakítása
„a”: hevederezéssel, „b”: rácozással

Rácsozott nyomott rudak

A rúdhossz közepén ható $N_{ch,Ed}$ rúderő két övelem esetén:

$$N_{ch,Ed} = \frac{N_{Ed}}{2} + \frac{M_{Ed}}{h_0},$$

ahol

$$M_{Ed} = \frac{N_{Ed} \cdot e_0}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr}} - \frac{N_{Ed}}{S_V}},$$

$$e_0 = \frac{\ell}{500},$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{eff}}{\ell^2},$$

$$I_{eff} = \frac{h_0^2 \cdot A_f}{2}$$

és S_V a rácskozás nyírési merevsége (egységnyi nyírési alakváltozást okozó nyíróerő), melynek meghatározásához a 3.17. táblázat nyújt segítséget.

Az övelem megfelelő, ha:

$$N_{ch,Ed} \leq N_{ch,Rd}$$

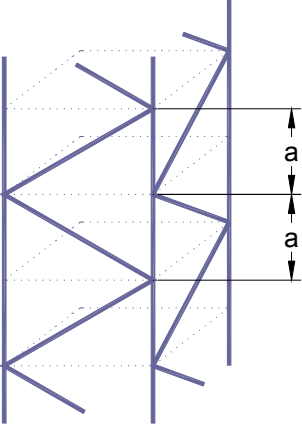
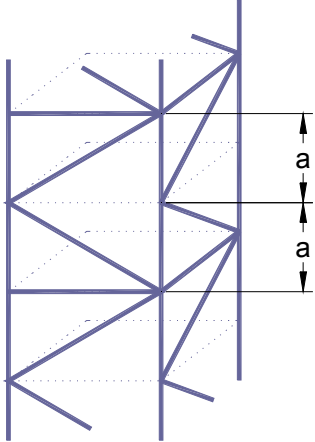
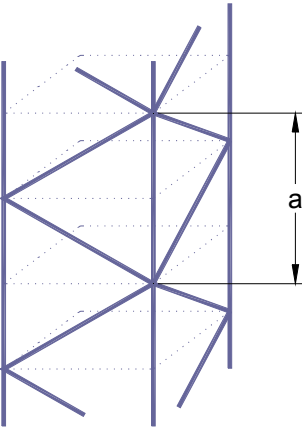
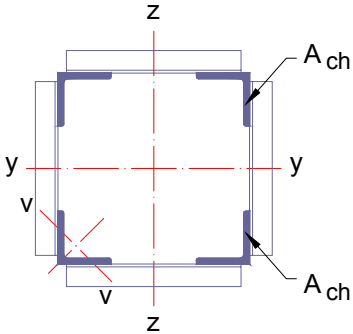
ahol $N_{ch,Rd}$ egy övelem ellenállásának tervezési értéke, amely a tömör rudakra érvényes módszerrel határozható meg. Az egy övelemre vonatkozó ℓ_{ch} kihajlási hosszát a rácskozás hálózati hosszának megfelelően kell felvenni.

Négy (vagy több) övelem esetén is hasonló módon kell eljárni, de az előbbi képleteket az övelemek számának megfelelően módosítani kell.

Négy egyenlő szárú szögacélból álló, mindkét irányban összerácsozott szelvénynél a kihajlási hossz a rácskozás elrendezésének függvénye, az alap esetekre vonatkozó értékek a 3.18. táblázatból vehetők.

	Rácsozás	S_y
		$\frac{n \cdot E \cdot A_d \cdot a \cdot h_0^2}{2 \cdot d^3}$
		$\frac{n \cdot E \cdot A_d \cdot a \cdot h_0^2}{d^3}$
		$\frac{n \cdot E \cdot A_d \cdot a \cdot h_0^2}{d^3 \cdot \left(1 + \frac{A_d \cdot h_0^3}{A_v \cdot d^3} \right)}$
	$e_0 = l / 500$	<p>n a rácsos síkok száma</p> <p>A_d és A_v egy rácssík-ra vonatkozik</p>

3.17. táblázat.

	
$\ell_{ch} = 1,52 \cdot a$	$\ell_{ch} = 1,28 \cdot a$
	
$\ell_{ch} = a$	

3.18. táblázat.

A rácszásban ébredő erők

A rúdvég közelében a rácszásban ébredő erők az alábbi nyíróerőből számíthatók:

$$V_{Ed} = \frac{\pi \cdot M_{Ed}}{\ell}.$$

A ferde rácsrudakat és azok bekötéseit az

$$N_d = \frac{V_{Ed}}{n} \cdot \frac{d}{h_0}$$

(nyomó)erőre kell megtervezni.

Hevederezett nyomott rudak

A rúdhossz közepén ható $N_{ch,Ed}$ rúderő két övelem esetén:

$$N_{ch,Ed} = \frac{N_{Ed} + M_{Ed} \cdot h_0 \cdot \frac{A_f}{I_{eff}}}{2},$$

ahol

$$M_{Ed} = \frac{N_{Ed} \cdot e_0}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr}} - \frac{N_{Ed}}{S_V}},$$

$$e_0 = \frac{\ell}{500},$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{eff}}{\ell^2},$$

az I_{eff} hatékony tehetetlenségi nyomaték pedig az alábbiak szerint számítható:

$$I_{eff} = \frac{h_0^2 \cdot A_{ch}}{2} + 2 \cdot \mu \cdot I_{ch}, \quad \text{amelyben } \mu \text{ a következők szerinti:}$$

$$\text{ha } \lambda \leq 75 \quad \mu = 1;$$

$$\text{ha } 75 < \lambda < 150 \quad \mu = 2 - \frac{\lambda}{75};$$

$$\text{ha } \lambda \geq 150 \quad \mu = 0,$$

ahol:

$$\lambda = \frac{\ell}{i_0};$$

$$i_0 = \sqrt{\frac{I_1}{2 \cdot A_{ch}}},$$

I_1 pedig a $\mu = I$ behelyettesítéssel számított I_{eff} .

Az M_{Ed} nyomaték képletében szereplő S_V nyírási merevség a hevedereket merevnek feltételezve számítható, ha:

$$\frac{n \cdot I_b}{h_0} \geq 10 \cdot \frac{I_{ch}}{a},$$

ahol:

n a hevederezett síkok száma,

I_b a hevederlemez keresztmetszetének inercianyomatéka,

a a hevederek tengelytávolsága.

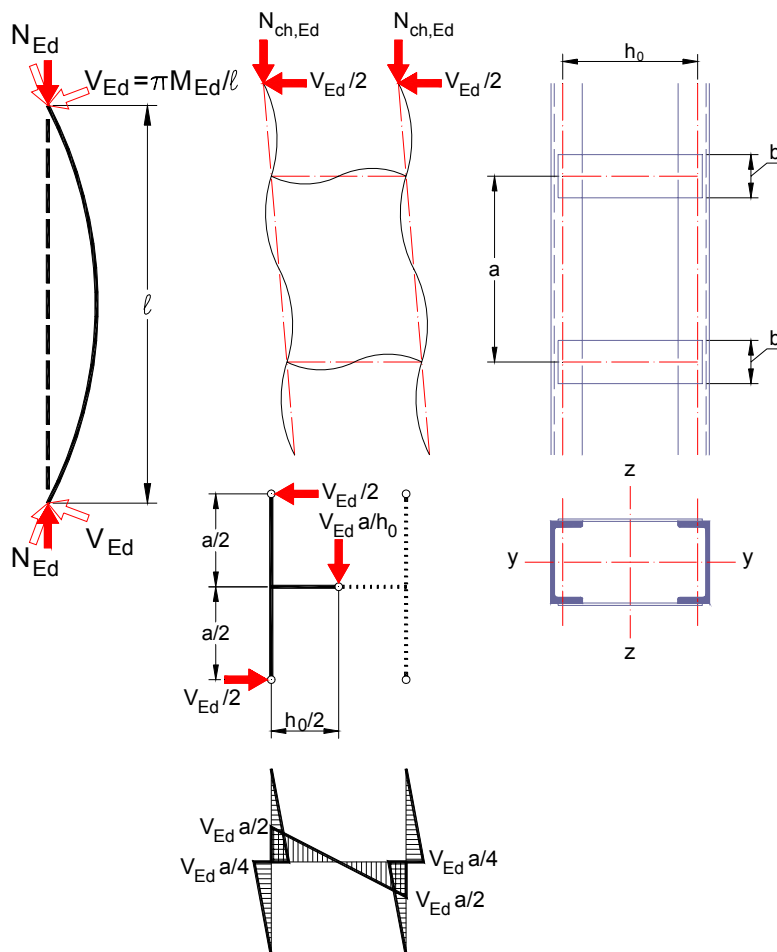
Ekkor:

$$S_V = \frac{2 \cdot \pi^2 \cdot E \cdot I_{ch}}{a^2}.$$

Ha az előbbi feltétel nem teljesül, akkor a hevederek hajlékonyságát is figyelembe kell venni a következők szerint:

$$S_V = \frac{24 \cdot E \cdot I_{ch}}{a^2 \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot I_{ch}}{n \cdot I_b} \cdot \frac{h_0}{a}\right)}, \quad \text{de} \quad S_V \leq \frac{2 \cdot \pi^2 \cdot E \cdot I_{ch}}{a^2}.$$

A hevederek és az övelemek közötti kapcsolatot a V_{Ed} nyírőerőből számított igénybevételekre kell megtervezni. A hevederekre ható nyomaték számítási módját a 3.12. ábra mutatja.



3.12. ábra. A heveder igénybevételeinek számítása

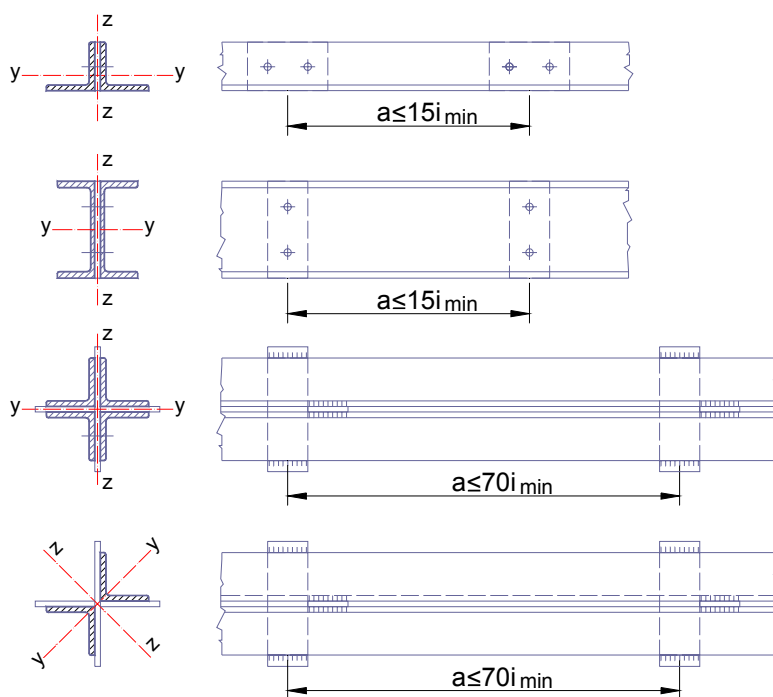
Kis hézagú összetett szelvényű rudak

Azokat az összetett szelvényű nyomott elemeket, amelyeknek elemei összeérnek, vagy egymás közelében helyezkednek el és lemezekkel vannak összekapcsolva (3.13. ábra), *tömör szelvényű rúdként* szabad méretezni, ha a kapcsolatok távolsága megfelel az alábbi követelményeknek:

- Egy síkban elhelyezett kapcsolólemezek esetén kisebb, mint $15 \cdot i_{\min}$;
- Két egymásra merőleges síkban párosával elhelyezett kapcsolólemezek esetén kisebb, mint $70 \cdot i_{\min}$,

ahol i_{\min} a szelvény egy alkotóelemének legkisebb tehetetlenségi sugara.

A kapcsolatokat – amelyek szegecselt, csavarozott vagy hegesztett kivitelben is készülhetnek – ugyanolyan elvek alapján kell méretezni, mint az egyéb összetett szelvények esetén (lásd 3.13. ábra).

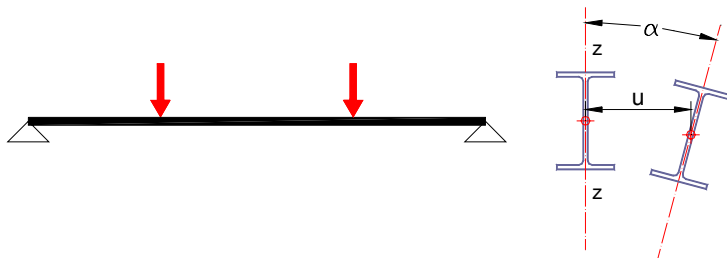


3.13. ábra. Kis hézagú összetett szelvényű nyomott rudak.

3.6.4. Gerendák kifordulása

A kifordulás a hajlított tartók jellegzetes stabilitásvesztési módja, melynél a tartó alakváltozása nem csak a terhelés síkjában történő meggörbülés, hanem elcsavarodás is egyben. Ez is egy egyensúly elágazási jelenség, amely

csak egy kritikus teher nagyságnál következnek be. A támaszoknál alkalmazott megtámasztási módok (lásd 2.11. ábra) a jelenséget lényegesen befolyásolják. Egy gerinclemezes tartó kifordulását szemlélteti a 3.14. ábra.



3.14. ábra. Hajlított tartó kifordulása

Általános módszer

Az *Eurocode 3* szerint a hajlított tartók kifordulásvizsgálatának általános módszere formailag hasonló a központosan nyomott rudak vizsgálatához. Először meg kell határozni a $\bar{\lambda}_{LT}$ redukált kifordulási karcsúságot, majd annak függvényében egy χ_{LT} csökkentő tényezőt. A χ_{LT} értéke $\chi_{LT} = \chi$ és $\bar{\lambda}_{LT} = \bar{\lambda}$ helyettesítéssel a központosan nyomott rudakra érvényes táblázatokból kapható. Hengerelt szelvények esetén az „a” görbét, hegesztettek esetén pedig a „c” görbét kell használni. A kifordulási ellenállás tervezési értéke az alábbi képlettel számítható:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot \beta_W \cdot W_{pl,y} \cdot f_y / \gamma_{M1}$$

ahol

$$\beta_W = 1, \quad \text{ha a keresztmetszet 1. vagy 2. osztályú;}$$

$$\beta_W = \frac{W_{el,y}}{W_{pl,y}}, \quad \text{ha a keresztmetszet 3. osztályú;}$$

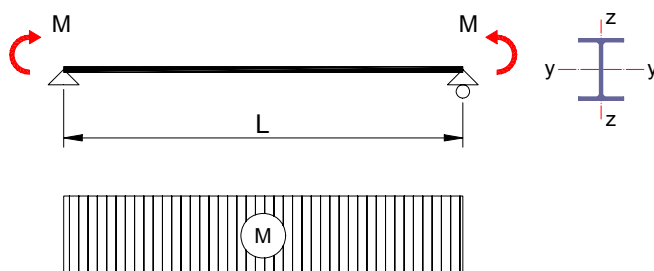
$$\beta_W = \frac{W_{eff,y}}{W_{pl,y}}, \quad \text{ha a keresztmetszet 4. osztályú.}$$

A χ_{LT} meghatározásához szükséges $\bar{\lambda}_{LT}$ értéke:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{\beta_W \cdot W_{pl,y} \cdot f_y}{M_{cr}}},$$

ahol M_{cr} a kifordulási kritikus nyomaték, amely a 3.15. ábra szerinti alapesetben a következő:

$$M_{cr} = \frac{\pi}{L} \sqrt{E \cdot I_z \cdot \left(G \cdot I_t + E \cdot I_w \cdot \frac{\pi^2}{L^2} \right)}.$$



3.15. ábra. A kifordulásvizsgálat alapesete

Mint látható, M_{cr} meghatározása az alapesetben sem egyszerű, más esetekre csak még bonyolultabb (ráadásul csak közelítő) képletek állnak rendelkezésre. A gyenge tengelyére (\bar{z} - \bar{z}) szimmetrikus és erős tengelye (y - y) körül hajlított keresztmetszetű gerenda kritikus kifordulási nyomatéka az alábbiak szerint számítható:

$$M_{cr} = C_1 \cdot \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{(k \cdot L)^2} \cdot \left(\sqrt{\left(\frac{k}{k_w} \right)^2 \cdot \frac{I_w}{I_z} + \frac{(k \cdot L)^2 \cdot G \cdot I_t}{\pi^2 \cdot E \cdot I_z} + (C_2 \cdot z_g - C_3 \cdot z_j)^2} - (C_2 \cdot z_g - C_3 \cdot z_j) \right)$$

ahol

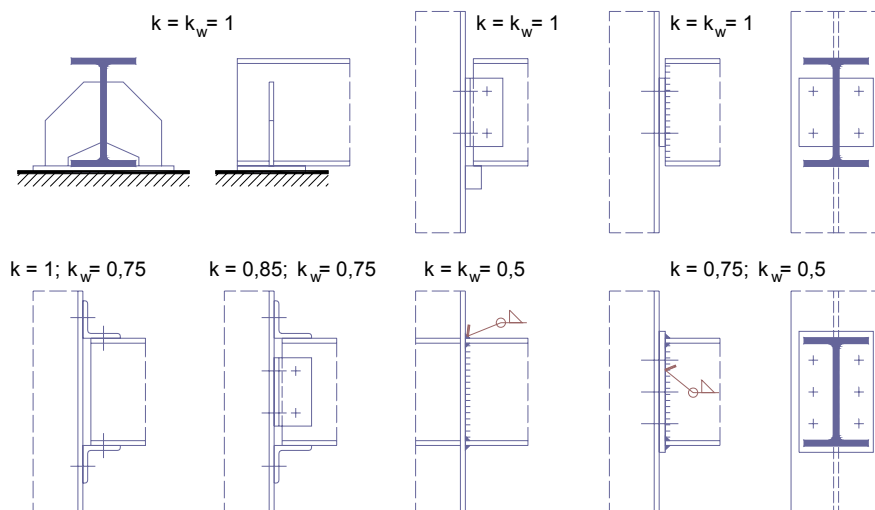
C_1 , C_2 , és C_3 tényezők a terhelés és a végmegtámasztás függvényei, értéküket csak végnymatékmal terhelt tartószakaszokra a 3.19. táblázat, a közvetlenül terhelt tartószakaszokra pedig a 3.20. táblázat tartalmazza.

L az oldalirányban megtámasztott pontok közötti gerendahossz,

I_z a gyenge tengelyre vonatkozó tehetetlenségi nyomaték,

k a vizsgált tartószakasz végkeresztmetszeteinek elfordulás elleni megfogására utal. Értéke mindkét vég teljes értékű megfogása esetén 0,5, szabad végek esetén pedig 1,0. (Hasonló a központosan nyomott rúd ℓ/L tényezőjéhez.) 0,7 érték vehető fel, ha az egyik vég szabad a másik pedig befogott.

k_w a vizsgált tartószakasz végkeresztmetszeteinek vetemedés (öblösődés) elleni megfogására jellemző szám. Értéke mindkét vég teljes értékű megfogása esetén 0,5, szabad végek esetén pedig 1,0. (k és k_w meghatározásához a 3.16. ábra nyújt segítséget)



3.16. ábra. Példák tartóvégek megtámasztására

$$I_i = \frac{I}{3} \cdot \sum b_i \cdot t_i^3$$
 a csavarási tehetetlenségi nyomaték (b_i : egy alkotólemez szélessége, t_i : egy alkotólemez vastagsága),

I_w a torzulási (öblösödési modulus), közelítőleg $I_w = \frac{I_z \cdot (h - t_f)^2}{4}$,

z_g közvetlenül terhelt gerendák esetén a teher támadáspontja és a csavarási középpont közötti távolság; akkor pozitív, ha a támadáspont a csavarási középpont felett van; ha nincs közvetlen teher (a gerendát csak a végeken ható nyomatékok terhelik), akkor értéke zérus;

z_j kétszeresen szimmetrikus keresztmetszet esetén zérus, egyszeresen szimmetrikus keresztmetszetekre pedig:

$$z_j = z_s - \frac{I}{2 \cdot I_y} \cdot \int (y^2 + z^2) \cdot z \, dA$$

(y és z súlyponti koordináta rendszerben értelmezett koordináták, z_s a nyírási középpont koordinátája);

aszimmetrikus I szelvényekre közelítőleg:

$$z_j = \beta_j \cdot h_s \cdot (2\beta_f - 1),$$

ahol

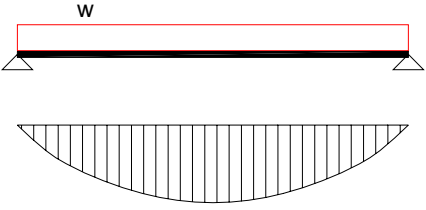
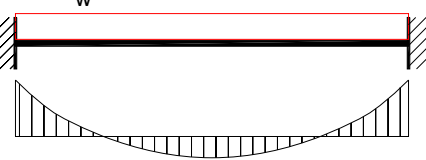
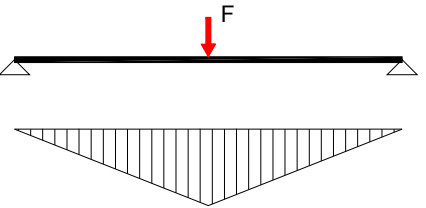
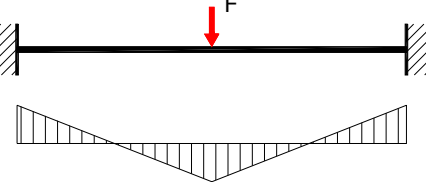
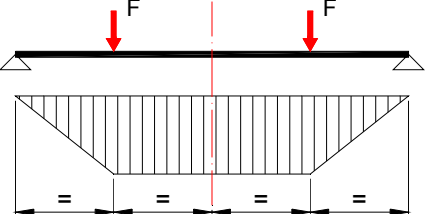
h_s az övlemezek nyírási középpontjának távolsága,

$$\beta_f = \frac{I_{fc}}{I_{fc} + I_{ft}} \quad (\text{itt } I_{fc} \text{ és } I_{ft} \text{ a szelvény nyomott és húzott övének a}$$

szelvény gyenge tengelyére vonatkozó inercianyomatéka), $\beta_j = 0,4$ ha $\beta_f > 0,5$ és $\beta_j = 0,5$ ha $\beta_f \leq 0,5$.

C tényezők értékei végnyomatékkal terhelt gerendákra					
Terhelés és nyomatéki ábra	ψ	k	C_1	C_2	C_3
<p>The diagram shows a beam of length l with a counter-clockwise moment M at the left end and a clockwise moment ψM at the right end. Below the beam are three diagrams illustrating the distribution of the C factor for different values of ψ:</p> <ul style="list-style-type: none"> $\psi = 1$: A uniform distribution of C factor across the entire length of the beam. $\psi = 0$: A linear distribution of C factor, starting at its maximum value at the left end and decreasing to zero at the right end. $\psi = -1$: A linear distribution of C factor, starting at its maximum value at the left end, decreasing to zero at the center of the beam, and then increasing to its maximum value at the right end. 	+1	1 0,7 0,5	1,000 1,000 1,000	-	1,000 1,113 1,144
	+0,75	1 0,7 0,5	1,141 1,270 1,305	-	0,098 1,565 2,283
	+0,50	1 0,7 0,5	1,323 1,473 1,514	-	0,992 1,566 2,271
	+0,25	1 0,7 0,5	1,563 1,793 1,788	-	0,977 1,531 2,235
	0	1 0,7 0,5	1,879 2,092 2,150	-	0,939 1,473 2,150
	-0,25	1 0,7 0,5	2,281 2,538 2,609	-	0,855 1,340 1,957
	-0,50	1 0,7 0,5	2,704 3,009 3,093	-	0,676 1,059 1,546
	-0,75	1 0,7 0,5	2,927 3,009 3,093	-	0,366 0,575 0,837
	-1	1 0,7 0,5	2,752 3,063 3,149	-	0,000 0,000 0,000

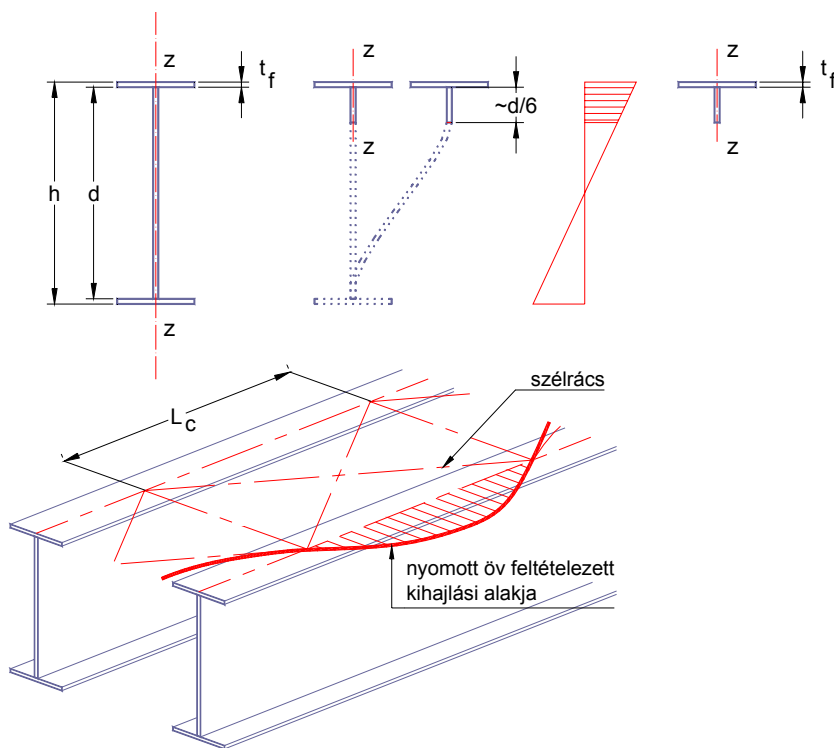
3.19. táblázat.

C tényezők értékei közvetlenül terhelte gerendákra				
Terhelés és nyomatéki ábra	k	C_1	C_2	C_3
	1,0 0,5	1,132 0,972	0,459 0,304	0,525 0,980
	1,0 0,5	1,285 0,712	1,562 0,652	0,753 1,070
	1,0 0,5	1,365 1,070	0,553 0,432	1,730 3,050
	1,0 0,5	1,565 0,938	1,267 0,715	2,640 4,800
	1,0 0,5	1,046 1,010	0,430 0,410	1,120 1,890

3.20. táblázat.

A kifordulásvizsgálat egyszerűsített módszere

Magasépítési tartószerkezetek esetén a kifordulásvizsgálat egyszerűsített módszerrel is végrehajtható. A módszer lényege egy helyettesítő nyomott rúd kihajlásvizsgálata – azon a közelítésen alapszik, hogy a magasgerincű gerendák nyomott övének oldalirányú elmozdulását a gerinclemez csak alig akadályozza. Ha a gerinclemez ilyen értelmű merevségét elhanyagoljuk, akkor a nyomott öv egy T-szelvényű nyomott rúdként vizsgálható. A helyettesítő T-szelvény öve a gerenda nyomott öve, gerinclemezének magasságát pedig a gerenda gerinclemez nyomott szakaszának harmadára kell felvenni. (Tisztán hajlított, kétszeresen szimmetrikus I szelvényeknél ez a gerincmagasság hatoda.)



3.17. ábra. Egyszerűsített kifordulásvizsgálat

A kifordulási nyomatéki ellenállás tervezési értéke:

$$M_{b,Rd} = k_{fl} \cdot \chi \cdot M_{c,Rd} \leq M_{c,Rd} ,$$

ahol

$k_{fl} = 1,10$ korrekciós tényező,

$M_{c,Rd}$ a keresztmetszet nyomatéki ellenállása, melynek számításánál γ_{M0} helyett γ_{M1} parciális biztonsági tényezővel kell számolni, lévén, hogy most nem szilárdsági, hanem stabilitásvesztési tönkremenetelről van szó;

χ a helyettesítő T-szelvény $\bar{\lambda}_f$ redukált karcsúságától függő csökkentő tényező.

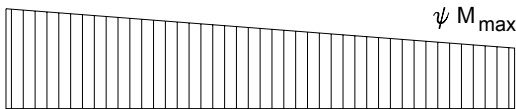
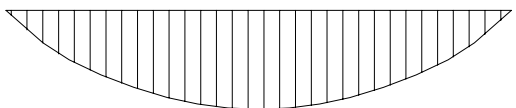
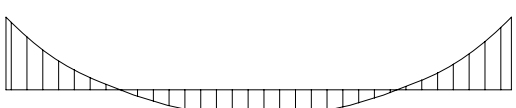
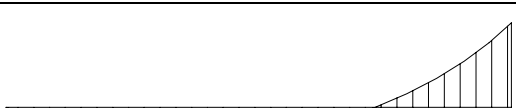
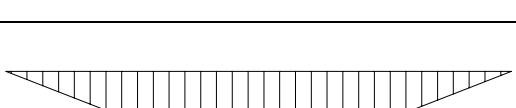
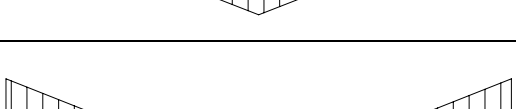
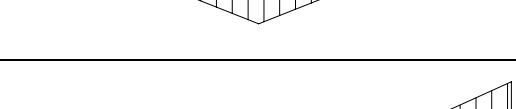
A χ csökkentő tényezőt általában a „c” görbének megfelelően kell megállapítani, de a „d” görbét kell használni, olyan hegesztett I keresztmetszetek esetén, melyeknél

$$h \leq 44 \cdot \varepsilon \cdot t_f.$$

A helyettesítő T-szelvény redukált karcsúsága:

$$\bar{\lambda}_f = \frac{k_c \cdot L_c}{i_{fz} \cdot \lambda_1},$$

ahol a k_c tényező a nyomatéki ábra alakjától függ, azt vesszük vele figyelembe, hogy a gerenda övében a nyomóerő a nyomatéki ábrának megfelelően változik. Értékeit, ill. számításának módját a 3.21. táblázat tartalmazza.

A nyomatéki ábra alakja	k_c tényező
	$\frac{I}{1,33 - 0,33 \cdot \psi}$
	0,94
	0,90
	0,91
	0,86
	0,77
	0,82

3.21. táblázat.

Nincs szükség további vizsgálatra, ha a nyomott öv redukált karcsúsága ($\bar{\lambda}_f$) kisebb, mint a $\bar{\lambda}_{c0} = 0,5$ határkarcsúság. Amennyiben a keresztmetszet nincs teljesen kihasználva, a határkarcsúság a keresztmetszet kihasználtságával ($M_{y,Ed} / M_{c,Rd}$) fordított arányban növelhető. Azaz a gerenda kifordulással szemben megfelel, ha:

$$\bar{\lambda}_f \leq \bar{\lambda}_{c0} \cdot \frac{M_{c,Rd}}{M_{y,Ed}}.$$

$M_{c,Rd}$ számításánál itt is γ_{M1} parciális biztonsági tényezővel kell számolni.

Az előbbi képletek alapján kiszámíthatunk egy, az L_c / i_{fz} karcsúságra (övmerevségre) vonatkozó határértéket, amely alatt a kifordulás veszélye biztosan nem áll fenn. A helyettesítő T-szelvény karcsúságának képletében szereplő k_c tényezőnek és a keresztmetszet kihasználtságának is 1 a maximuma, tehát ha az előbbiek helyére 1-et, az öv redukált karcsúsága helyére pedig a határkarcsúság értékét ($\bar{\lambda}_{f0} = 0,5$) helyettesítjük be, akkor:

$$\begin{aligned} \bar{\lambda}_f &= \frac{k_c \cdot L_c}{i_{fz} \cdot \lambda_1} \leq \bar{\lambda}_{f0}; \\ \frac{L_c}{i_{fz}} &\leq \frac{\bar{\lambda}_{f0}}{k_{c,max}} \cdot \lambda_1 = \frac{\bar{\lambda}_{f0}}{k_c} \cdot 93,9 \cdot \varepsilon = \frac{0,5}{1} \cdot 93,9 \cdot \varepsilon \approx 47 \cdot \varepsilon. \end{aligned}$$

Tehát az öv redukált karcsúságát sem kell kiszámítanunk, amennyiben a nyomott öv oldalirányú megtámasztásainak távolságára fennáll hogy:

$$L_c \leq 47 \cdot \varepsilon \cdot i_{fz}.$$

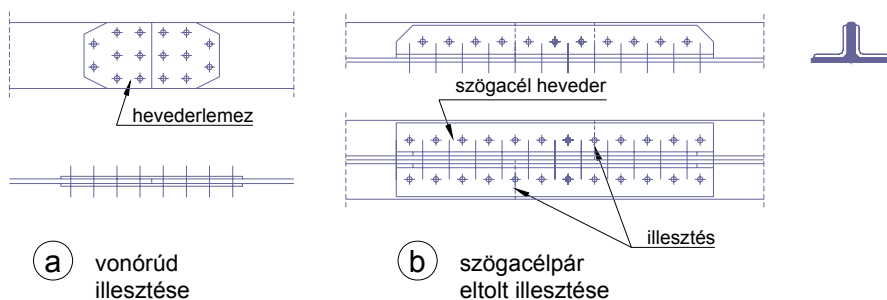
3.7. Kapcsolatok méretezése

A szerkezeti kapcsolatoknak az a feladata, hogy közvetítsék az igénybevételeket az egyik elemről a másikra. Az acélszerkezetek kapcsolatai *kialakítás szempontjából* három csoportba sorolhatók, ezek a szegecselt, a csavarozott és a hegesztett kapcsolatok. Szegecselt szerkezetek ma már nem készülnek, ilyenekkel csak felújítási és javítási feladatokkal kapcsolatban találkozhatunk.

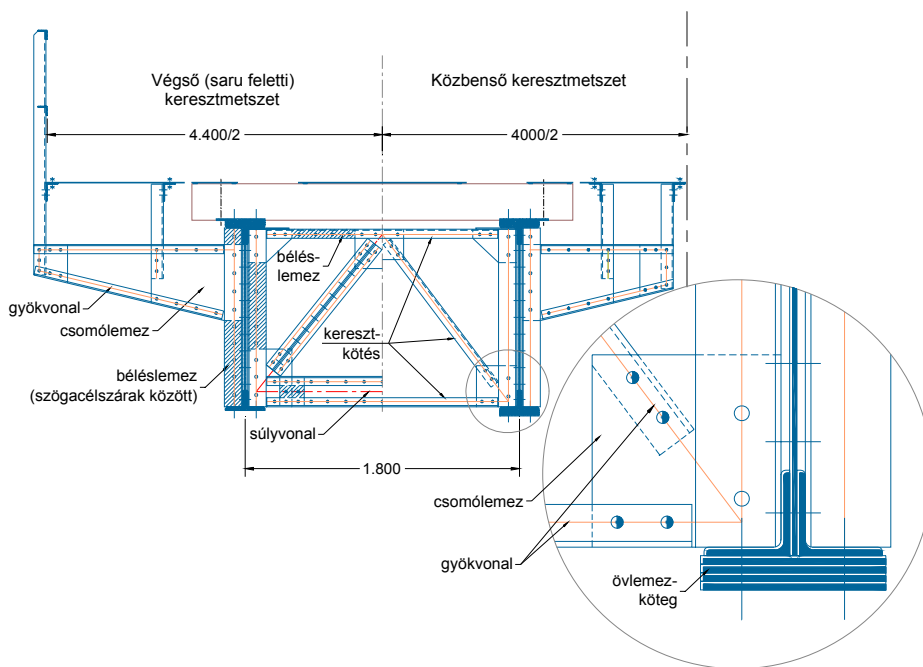
Különbséget szokás tenni a kapcsolatok között aszerint is, hogy azok a gyártó üzemben, vagy a végleges beépítés helyén készülnek-e. A legtöbb acélszerkezetnél az egyben szállítható, egyben emelhető méretű részegységek a gyártóműben hegesztett kivitelben készülnek, a részegységeket pedig a helyszínen csavarozott kapcsolatokkal kötik össze.

A csavarozott kapcsolat jelentős része nagyszilárdságú csavarral készül, és a csavarokat olyan erősen meghúzzák, hogy az összeszorított felületek közötti súrlódás alkalmas legyen az igénybevételek átadására. Ezek a *feszített csavaros kapcsolatok*, melyek a hegesztett kapcsolathoz hasonló merevséggel rendelkeznek és fáradási szilárdságuk is kiváló. A nagy merevség lehetőséget ad *hibrid kapcsolatok* készítésére is, amelyekben megoszlik a terhelés a csavarok és a hegesztett varratok között.

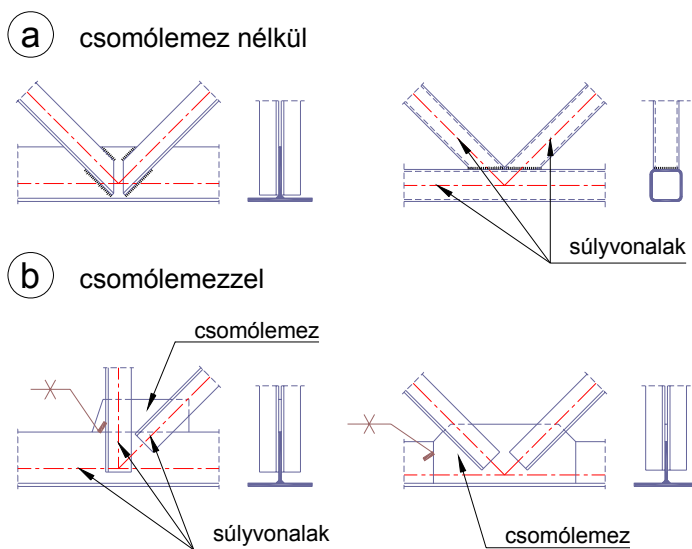
Szegecselt, csavarozott és hegesztett kapcsolatok kialakítására a következő ábrák mutatnak példákat. A kapcsolatok témakörbe tartoznak azok a szerkezeti részletek is, melyekkel az acélszerkezeti elemeknek a vasbeton szerkezetekhez (alapokhoz, falakhoz) való rögzítését oldjuk meg.



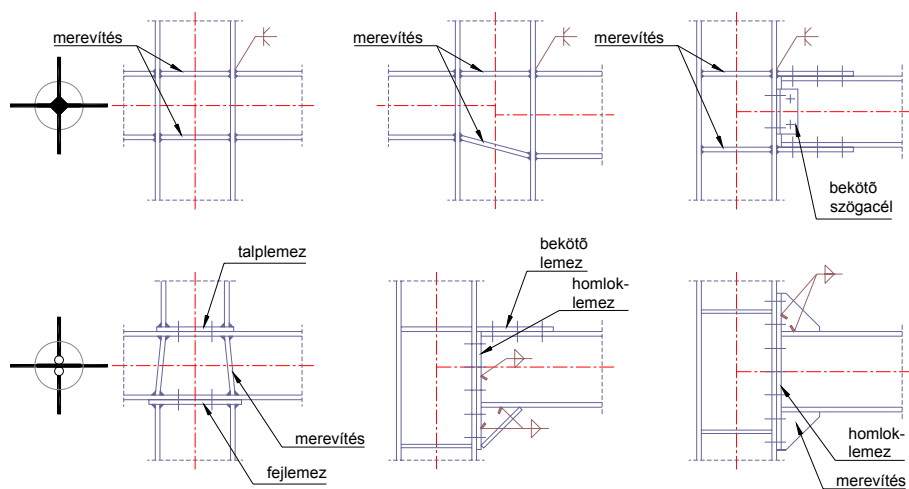
3.18. ábra. Egyszerű szegecselt kapcsolatok



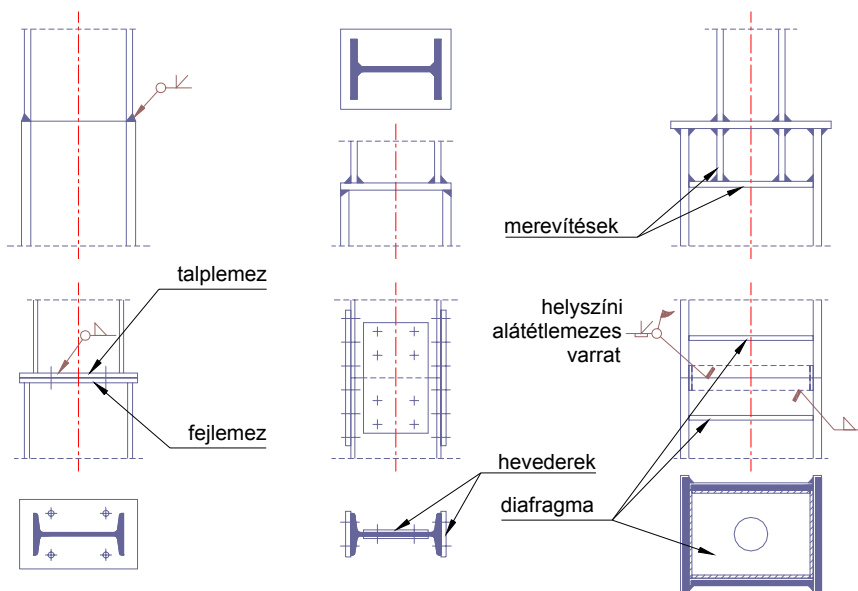
3.19. ábra. Gerinclemeztes szegecselt vasúti híd keresztmetszete és szerkezeti részlete



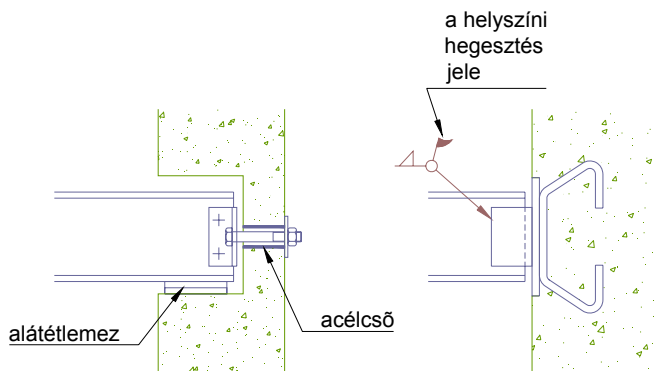
3.20. ábra. Könnyű rácsos tartók csomópontjai



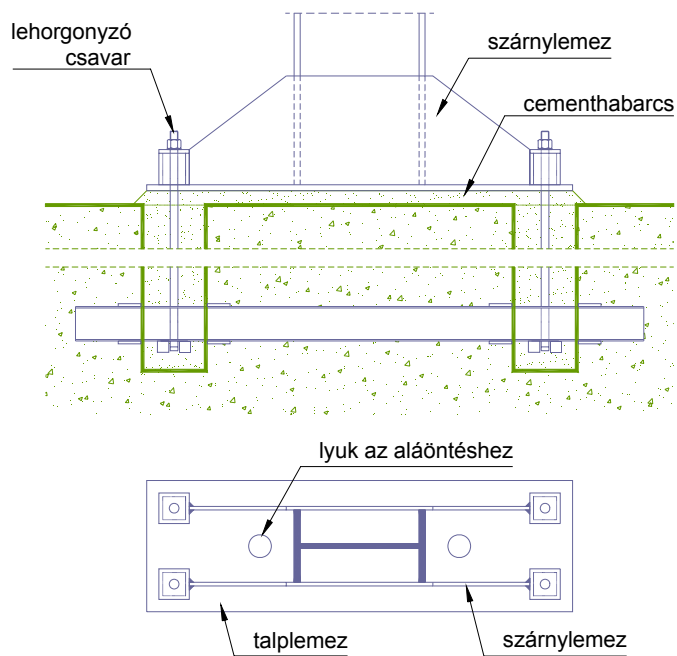
3.21. ábra. Acélvázak oszlop-gerenda kapcsolatai



3.22. ábra. Oszlopok toldása



3.23. ábra. Acélgerenda és vasbeton fal kapcsolata



3.24. ábra. Befogott oszloptalp

A kapcsolatok méretezése egy fontos tervezési részfeladat, célszerű a szerkezeti elemek keresztmetszeti méreteinek meghatározásával párhuzamosan elkészíteni, mert a kapcsolatok merevsége visszahathat a teljes szerkezet igénybevételeinek alakulására. Az *Eurocode 3* a kapcsolatokat *szilárdságuk alapján* a következő csoportokba sorolja:

- *Névlegesen csuklós kapcsolatok*, amelyek alkalmasak a számított erők átvitelére anélkül, hogy bennük olyan nagyságú nyomatékok lépnének fel, amelyek kedvezőtlenül befolyásolnák az összekapcsolt szerkezeti elemek igénybevételeit.
- Teljes szilárdságú kapcsolatok, amelyeknek a tervezési ellenállása nem lehet kisebb, mint az összekapcsolt elemek tervezési ellenállása. (Korábbi szóhasználattal ezek az egyenteherbírású kapcsolatok.)
- *Részleges szilárdságú kapcsolatok*, amelyeknek tervezési ellenállása nem lehet kisebb a számított erők és nyomatékok átvezetéséhez szükségesnél, de kisebb lehet az összekapcsolt rudak tervezési ellenállásánál.

Az *Eurocode 3* a kapcsolatok méretezéséhez a következő táblázatban összefoglalt parciális biztonsági tényezőket rendeli.

Eset	Biztonsági tényező	Ajánlott érték
Csavarok, szegecsek, csapok, ellenállása Lemezek palástnyomási ellenállása	γ_{M2}	1,25
Megcsúszási ellenállás teherbírasi határállapotban („C” kategóriájú csavarok) használati határállapotban („B” kategóriájú csavarok)	γ_{M3} $\gamma_{M3,ser}$	1,25 1,1
Injektált csavarok palástnyomása	γ_{M4}	1,0
Zártszelvényű rácsostartók kapcsolatainak ellenállása	γ_{M5}	1,0
Csapok ellenállása használati határállapotban	$\gamma_{M6,ser}$	1,0
Nagyszilárdságú csavarok feszítő ereje	γ_{M7}	1,1

3.22. táblázat.

3.7.1. Csavarozott kapcsolatok

Szerkezeti kapcsolatokban különböző minőségű hatlapfejű csavarok használatosak, amelyek lehetnek feszítettek és nem feszítettek is. A szokásos csavarminőségek a következők: 4.6, 4.8, 5.6, 5.8, 6.6, 6.8, 8.8, 10.9, 12.9. A jelölésben az első szám a csavar szakítószilárdságának karakterisztikus értékére (f_{ub}) utal, a második pedig a szakítószilárdsághoz viszonyítva adja meg a folyáshatár karakterisztikus értékét (f_{yb}). Például 5.6 csavarminőség esetén:

$$f_{ub} = 500 \text{ N / mm}^2$$
$$f_{yb} = 0,6 \cdot f_{ub} = 0,6 \cdot 500 = 300 \text{ N / mm}^2.$$

A járatos csavarméretek az M12, M14, M16, M18, M20, M22, M24, M27 és M30. Az M a metrikus menetre utal, a szám pedig a szárátmérőt jelenti mm-ben. A csavarszár hosszát úgy kell megállapítani, hogy – az összekapcsolt elemek vastagságának tőrését is figyelembe véve – legalább egy menetmagasságnyi hosszúság maradjon szabadon az anya külső síkján kívül és az anya alatt is.

A normál furatátmérők – az illesztett csavarok kivételével – a szárátmérőnél nagyobbak: M12-es és M14-es csavarok esetén 1 mm-rel, M16 és M 24 között 2 mm-rel, M27-es és nagyobb csavaroknál 3 mm-rel. Általában kívánalom, hogy nyírt kapcsolatban a nyírt síkok ne haladjanak a csavar menetes részén keresztül. Ellenkező esetben a csavar nyírási ellenállása kisebb lesz.

A csavarozott kapcsolatokat az *Eurocode 3* öt kategóriába sorolja, és a kategóriától függően ír elő követelményeket. A nyírtcsavaros kapcsolatok az A – C, a húzott csavarosak pedig a D, ill. E kategóriába tartozhatnak. Az, hogy egy csavarozott kapcsolat nyírtcsavaros vagy húzott csavaros, a kapcsolatra ható erők irányától és elhelyezkedésétől függ. Nyírtcsavaros kapcsolatokban a kapcsolatra ható erőkből a csavarokban azok tengelyére merőleges irányú nyírás keletkezik a nyírt síkokban, a furat és a csavarorsó érintkezési felületén pedig palástnyomás lép fel. A húzott csavaros kapcsolatok csavarjaiban a kapcsolatra ható erőkből tengelyirányú húzóerő keletkezik. A besorolás a következő:

- az **A** kategóriájú csavaroknál az *erőátadás palástnyomással és nyírással történik*. Minden csavarminőség használható, feszítés nem szükséges. Az egy csavarra ható erő tervezési értéke nem lépheti túl a csavar tervezési ellenállását, amely a nyírási és a palástnyomási ellenállás kisebbike.

- a B kategóriába a feszített, használati határállapotban megcsúszásnak ellenálló kapcsolatok tartoznak, teherbírasi határállapotban (ekkor a megcsúszás már megengedett) az egy csavarra ható erő tervezési értéke nem lépheti túl a csavar tervezési ellenállását.
- a C kategóriába a feszített, teherbírasi határállapotban megcsúszásnak ellenálló kapcsolatok tartoznak.
- a **D** kategóriájú *húzott csavaros kapcsolatokban* minden csavarminőség használható, feszítés nem szükséges.
- az **E** kategóriába a feszített, húzott csavaros kapcsolatok tartoznak.

3.7.2. Csavarok tervezési ellenállása

Nyírási ellenállás

Csavarokkal végzett kísérletek tanúsága szerint a húzószilárdságnak mintegy 60%-a a nyírási szilárdság, ebből adódik a nyírási tervezési ellenállás számítási módja.

A nyírási tervezési ellenállás nyírt síkonként, ha a nyírt felület *a menet nélküli részen halad keresztül*:

$$F_{v,Rd} = \frac{0,6 \cdot f_{ub} \cdot A}{\gamma_{M2}},$$

ahol

f_{ub} a csavar szakítószilárdsága;

A a csavar szárkeresztmetszete;

γ_{M2} a csavarozott kapcsolatok biztonsági tényezője.

A csavarok nyírási tervezési ellenállása nyírt síkonként, ha a nyírt felület *a menetes részen halad keresztül*:

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_V \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}},$$

ahol

α_V a csavar anyagától függő módosító tényező, melynek értéke 4.6, 5.6 és 8.8 minőségű csavaroknál 0,6, 4.8, 5.8 és 10.9 minőségű csavaroknál 0,5;

A_s az ún. feszültség-keresztmetszet, amely valamivel nagyobb, mint a magkeresztmetszet, lévén hogy egy teljes törési felület mindig magába foglal egy menetsúcsot is. (A különböző csavarméretekhez tartozó feszültség-keresztmetszetek a Mellékletben megtalálhatók.)

A csavarminőség szerinti különbségtételt (0,6 helyett 0,5) az indokolja, hogy a nagyobb folyáshatárú csavarok kevésbé képlékenyek, hirtelen törnek.

Palástnyomási ellenállás

A palástnyomási ellenállás tervezési értéke az alábbi módon számítható:

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot t \cdot d}{\gamma_{M2}},$$

ahol

d a csavar átmérője;

t a lemezvastagság (különböző vastagságok esetén az egy irányban elmozdulni szándékozót lemezek együttes vastagságának kisebbike);

α_b a következő értékek legkisebbike:

$$\alpha_d; \quad \frac{f_{ub}}{f_u}; \quad 1;$$

α_d értéke a teherátadás irányában szélső, ill. közbenső csavarokra különböző.

szélső csavarokra:
$$\alpha_d = \frac{e_1}{3 \cdot d_0};$$

közbenső csavarokra:
$$\alpha_d = \frac{p_1}{3 \cdot d_0} - \frac{1}{4};$$

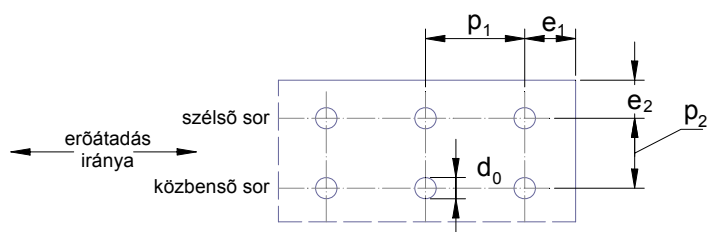
k_1 értéke szintén a csavarkép geometriájától függ:

szélső csavarsorra:
$$k_1 = 2,8 \cdot \frac{e_2}{d_0} - 1,7, \quad \text{de } k_1 \leq 2,5;$$

közbenső csavarsorra: $k_1 = 1,4 \cdot \frac{p_2}{d_0} - 1,7$, de $k_1 \leq 2,5$.

(A csavarkép méreteinek értelmezését a 3.25. ábra mutatja.)

Látható, hogy a palástnyomási ellenállást a csavarkép geometriája is befolyásolja. Ha a palástnyomási ellenállás kisebb, mint a nyírási ellenállás, akkor célszerű a tengelytávolságokat úgy megválasztani, hogy $\alpha_b = 1$ és $k_1 = 2,5$ legyen.



3.25. ábra. Kötőelemek tengelytávolságának értelmezése

A nyírtcsavaros kapcsolatokban a csavarra ható nyíróerő értéke ($F_{V,Ed}$) sem a nyírási ellenállás ($F_{V,Rd}$) sem pedig a palástnyomási ellenállás ($F_{b,Rd}$) tervezési értékét nem haladhatja meg.

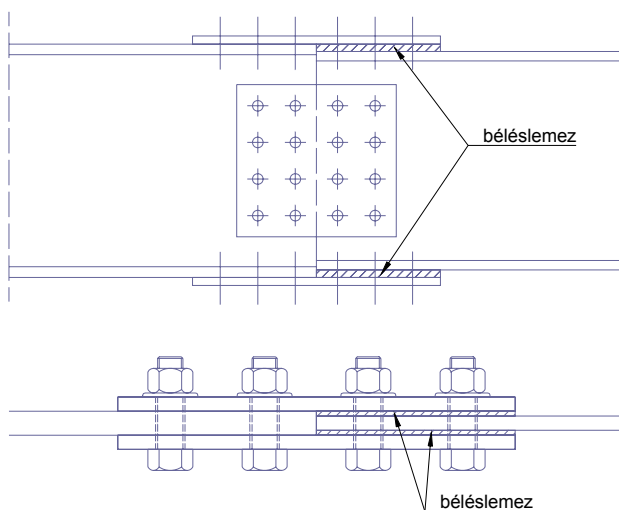
$$\begin{aligned} F_{V,Ed} &\leq F_{V,Rd} \\ F_{V,Ed} &\leq F_{b,Rd} \end{aligned}$$

Béléslemezek alkalmazása esetén (3.26. ábra), ha a béléslemezek vastagsága meghaladja a kötőelemek száraátmérőjének 1/3-át, akkor a nyírási ellenállást a következő tényezővel csökkenteni kell:

$$\begin{aligned} \beta_p &= \frac{9 \cdot d}{8 \cdot d + 3 \cdot t_p} \\ \beta_p &\leq 1, \end{aligned}$$

ahol t_p a béléslemez vastagsága.

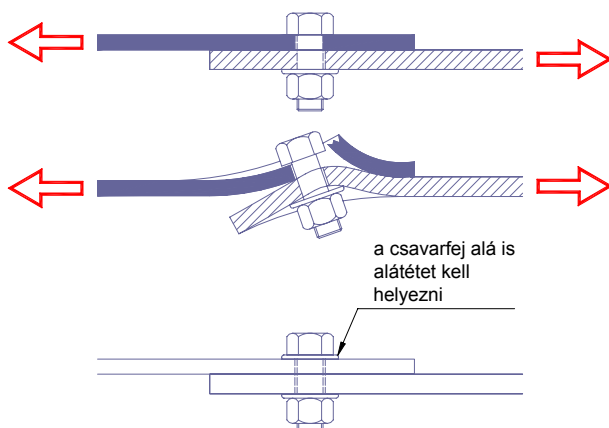
Kétszernyírt csavarok esetén ha mindkét oldalon van béléslemez, akkor csak az egyiket (a vastagabbikat) kell figyelembe venni.



3.26. ábra. Béléslemez alkalmazása

Az átlapolt kapcsolatok egy sorban elhelyezett csavarok esetén a csavarok kigombolódásával is tönkremehetnek. (3.27. ábra) Az ilyen kapcsolatokban a kigombolódás elkerülése végett a csavarfej alá is alátétet kell tervezni, a csavarok palástnyomási ellenállásának számításánál pedig az alábbi korlátozást is figyelembe kell venni:

$$F_{b,Rd} \leq \frac{1,5 \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}}$$



3.27. ábra. Egycsavaros átlapolt kapcsolat kigombolódása

Húzott csavarok ellenállása

A húzott csavarok tönkremenetele vagy a csavarszár elszakadásával vagy az ún. kigombolódási nyírási ellenállás kimerülésével következhet be. A kigombolódási ellenállás kimerülésekor a csavarfej vagy a csavaranya alatti lemez a vastagság mentén körhöz hasonló alakban elnyíródik. A csavar megfelelő, ha a hatásokból számított húzóerő ($F_{t,Ed}$) nem nagyobb a csavar húzási ellenállásának tervezési értékénél ($F_{t,Rd}$) sem és a csavar kigombolódási nyíró ellenállásának tervezési értékénél ($B_{p,Rd}$) sem.

$$F_{t,Ed} \leq F_{t,Rd};$$

$$F_{t,Ed} \leq B_{p,Rd}.$$

A csavar húzási ellenállásának tervezési értéke:

$$F_{t,Rd} = \frac{0,9 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}}.$$

A csavar kigombolódási nyíró ellenállásának tervezési értéke egy hengerfelület nyírási ellenállásából számítható:

$$B_{p,Rd} = \frac{0,6 \cdot f_u \cdot d_m \cdot \pi \cdot t_p}{\gamma_{M2}},$$

ahol :

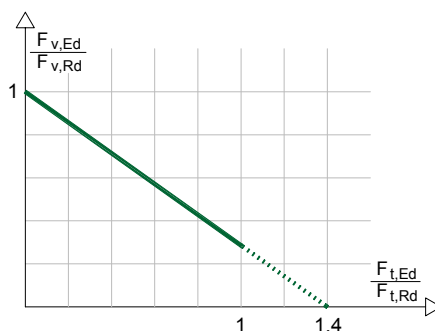
t_p a csavarfej vagy az anya alatti lemez vastagsága;

d_m a csavarfejre és az anyára számított csúcs- és laptávolságok közül a kisebb.

Összetett igénybevételű csavarok ellenállása

Azokban a kapcsolatokban, amelyekben a csavarokat nyírási és húzási terhelés terheli, a csavaroknak mindkét igénybevételre külön-külön meg kell felelniük, és ki kell elégíteni az alábbi feltételt is:

$$\frac{F_{V,Ed}}{F_{V,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4 \cdot F_{t,Rd}} \leq 1.$$



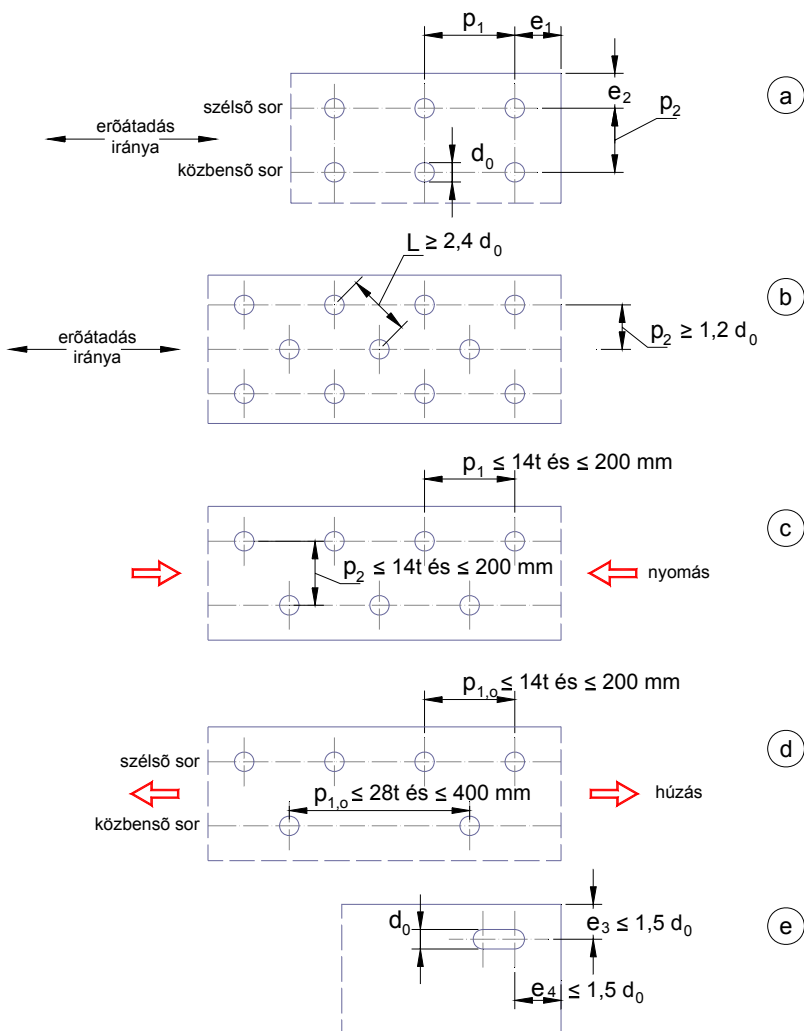
3.7.3. A csavarlyukak kiosztása

A csavarlyukak elhelyezésének olyannak kell lennie, hogy megakadályozza az elemközi korróziót és a helyi horpadások létrejöttét, valamint tegye lehetővé a csavarok behelyezését és meghúzását. A szabványok az előbbi elvekkel összhangban maximális és minimális osztástávolságokat írnak elő. A maximális osztástávolság korlátozása a korrózió és a horpadás elkerülését célozza, a minimális osztástávolságot pedig a gyengített keresztmetszetek szakadásának elkerülése érdekében kell szabályozni. Az *Eurocode 3* csavarlyukak kiosztására vonatkozó előírásait a 3.23. táblázat és a 3.28. ábra foglalja össze.

Osztás- köz ill. távolság jelölések a 3.28. ábra szerint	Minimum	Maximum ^{1) 2) 3)}		
		Az EN 10025 szerinti acélok az EN 10025-5 kivételével		Az EN 10025-5 szerinti acélok (időjárásálló acélok)
		időjárásnak vagy egyéb korróziós hatásnak kitétt acélok	időjárásnak vagy egyéb korróziós hatásnak ki nem tett acélok	felületvédelem nélkül
e_1	$1,2 \cdot d_0$	$4 \cdot t + 40 \text{ mm}$		$8 \cdot t$ és 125 mm nagyobbika
e_2				
e_3	$1,5 \cdot d_0$			
e_4				
p_1	$2,2 \cdot d_0$	$14 \cdot t$ és 200 mm kisebbike	$14 \cdot t$ és 200 mm kisebbike	$14 \cdot t_{\min}$ és 175 mm kisebbike
$p_{1,o}$		$14 \cdot t$ és 200 mm kisebbike		
$p_{1,i}$		$28 \cdot t$ és 400 mm kisebbike		
p_2 ⁴⁾		$14 \cdot t$ és 200 mm kisebbike	$14 \cdot t$ és 200 mm kisebbike	$14 \cdot t_{\min}$ és 175 mm kisebbike

3.23. táblázat.

- 1.) A maximális távolságokra nincs korlátozás, kivéve a következő eseteket: nyomott elemekben a lokális kihajlás és a korrózió elkerülése érdekében; húzott elemekben a korrózió elkerülése érdekében.
- 2.) Nyomott elemekben a kötőelemek közötti kihajlás $0,6 \cdot p_1$ kihajlási hosszal számítandó. Nem kell ellenőrizni a kötőelemek közötti kihajlást, ha $p_1 / t < 9 \cdot \varepsilon$.
- 3.) A táblázatban t a vékonyabb külső kapcsolt elem vastagságát jelenti.
- 4.) Eltolt kiosztás esetén a sorok közötti minimális távolság (p_2) $1,2 \cdot d_0$ lehet, ha bármely két kötőelem közötti távolság nagyobb, mint $2,4 \cdot d_0$.



3.28. ábra. Furatok osztásköze valamint tengelytávolságai az elemek szélétől – „a” osztásköz jelölése; „b” osztásköz jelölése eltolt csavarképnél; „c” eltolt csavarkiosztás nyomott elemekben; „d” eltolt csavarkiosztás húzott elemekben; „e” hasítéklyukak távolsága az elemek szélétől

3.7.4. Feszített csavarok megcsúszási ellenállása

Feszíteni csak a nagyszilárdságú (8.8-tól felfelé) csavarokat lehet. A feszítés csak akkor eredményez az összeszorított felületek között megfelelő

súrlódást, ha a felületeket előkezelik. Az *Eurocode 3* a μ megcsúszási tényező szerint A–D osztályokba sorolja a felületeket a 3.24. táblázat szerint.

Csavarok megcsúszási tényezője		
Felületi osztály	Megcsúszási tényező	Felületelőkészítés
A	0,5	sörétezett vagy szemcsefűtt felületek, minden rozsdá eltávolítva, nincs leváló rész; sörétezett vagy szemcsefűtt felületek alumínium fémszórással; sörétezett vagy szemcsefűtt felületek olyan cink alapú bevonat szórással fémesítve, amely legalább $\mu = 0,5$ megcsúszási tényezőt biztosít;
B	0,4	sörétezett vagy szemcsefűtt felületek 50 ... 80 μm vastagságú alkáli-cink-szilikát festékbevonattal;
C	0,3	drótkéfézéssel vagy lángszórással tisztított felületek, minden rozsdá eltávolítva;
D	0,2	kezeletlen felületek.

3.24. táblázat.

Az ellenőrzött előfeszítéssel rendelkező 8.8 és 10.9 minőségű csavarok megcsúszási ellenállásának tervezési értéke ($F_{s,Rd}$) az alábbiak szerint számítható:

$$F_{s,Rd} = \frac{k_s \cdot n \cdot \mu}{\gamma_{M3}} \cdot F_{p,C},$$

ahol

k_s korrekciós tényező a 3.25. táblázat szerint,

n a súrlódó felületek száma (1 vagy 2);

μ megcsúszási tényező a 3.24. táblázat szerint;

$F_{p,C}$ a csavarszárban a feszítés hatására keletkező erő:

$$F_{p,C} = 0,7 \cdot f_{ub} \cdot A_s.$$

Fontos, hogy a feszítőerő ellenőrzött legyen. Ha a feszítőerő kevés, a csavar teherbírása nem lesz megfelelő, ha sok, a csavar eltörhet. Problémát jelent, hogy a csavarok meghúzásakor a feszítőerő közvetlenül nem mérhető. A meghúzási nyomatókat, illetve a kézi meghúzás után még szükséges túlforgatási szöveget lehet előírni, melyek értékeit kísérleti úton lehet meghatározni.

k_s értékei	
Leírás	k_s
Normál lyukban elhelyezett csavarok	1,0
Túlméretes- vagy az erőátadás irányára merőleges tengelyű rövid hasítéklyukokban elhelyezett csavarok	0,85
Az erőátadás irányára merőleges tengelyű hosszú hasítéklyukokban elhelyezett csavarok	0,7
Az erőátadás irányával párhuzamos tengelyű rövid hasítéklyukokban elhelyezett csavarok	0,76
Az erőátadás irányával párhuzamos tengelyű hosszú hasítéklyukokban elhelyezett csavarok	0,63

3.25. táblázat.

3.7.5. Húzásra és nyírásra igénybevett feszített csavarok

A csavarra ható húzóerő (F_t) a súrlódó felületek összeszorítását csökkenti, emiatt a nyírási ellenállás csökken:

B kategóriájú kapcsolatokban:

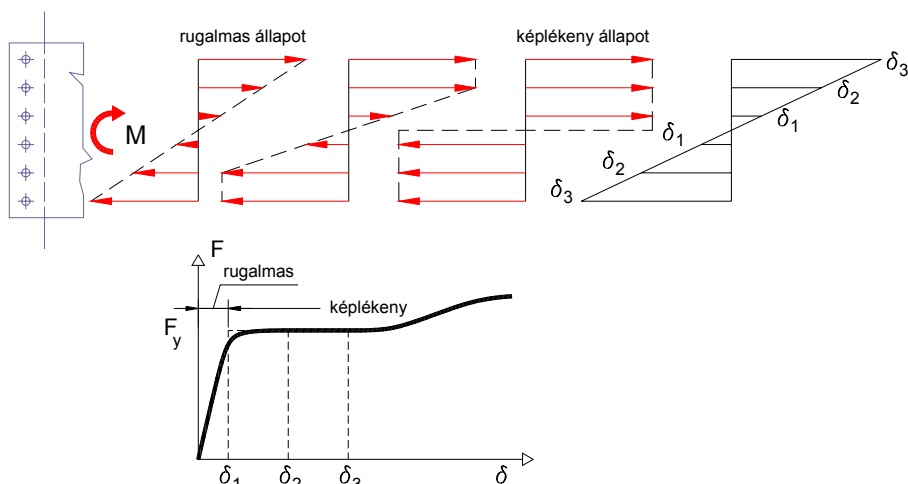
$$F_{s,Rd,ser} = \frac{k_s \cdot n \cdot \mu \cdot (F_{pC} - 0,8 \cdot F_{t,Ed,ser})}{\gamma_{M3,ser}};$$

C kategóriájú kapcsolatokban:

$$F_{s,Rd} = \frac{k_s \cdot n \cdot \mu \cdot (F_{pC} - 0,8 \cdot F_{t,Ed})}{\gamma_{M3}};$$

3.7.6. Az erők elosztása a kötőelemek között

A kapcsolatok egyes kötőelemeire ható erők nagyságát és irányát befolyásolja a kapcsolatra ható igénybevétel nagysága és fajtája, valamint a kapcsolat geometriája. A kötőelemekre ható igénybevételek hatására azok alakváltozást szenvednek. *Rugalmas állapotban az igénybevételek a kötőelem deformációjával arányosak*, képlékeny állapotban viszont ez már nem igaz, ugyanis a kötőelemekre ható erő csak azok megfolyásáig tud az alakváltozással arányosan növekedni. A folyás elérésével azonban – normális esetben – a kötőelem alakváltozási képessége (duktilitása) még nem merül ki, azaz a teher tovább növelhető, ha még nem került minden kötőelem folyási állapotba, de a kötőelemekre ható erők már nem lesznek az elmozdulásokkal arányosak. Az előbbiek miatt nehéz a *valóságos* erőeloszlást meghatározni, ha a kötőelemek egy része még rugalmas, más része pedig már képlékeny állapotban van.



3.29. ábra. Az erők elosztása a kötőelemek között rugalmas és képlékeny állapotban

A kapcsolat teherbírási határállapotában annak legjobban igénybevett eleme(i) törési határállapotban van(nak), de a kötőelem(ek)re ható erők irányát (így a teljes kapcsolat ellenállását) nem minden esetben tudjuk pontosan meghatározni. A teljes kapcsolatnak valamely igénybevétellel szembeni képlékeny ellenállását a biztonság javára közelíti bármely valószerű erőeloszlás alapján számított ellenállás. Az erők kötőelemek közötti elosztását tehát bizonyos feltételezések alapján is megtehetjük. Bármilyen ésszerű elosztás feltételezhető, amennyiben kielégítik a következő feltételeket:

- A kötőelemekben feltételezett erők legyenek egyensúlyban a kapcsolatra ható igénybevételekkel (*egyensúlyi feltétel*).
- A kötőelemekben feltételezett erők ne haladják meg a kötőelem teherbírását (szilárdsági feltétel).
- A kötőelemekben feltételezett alakváltozások ne haladják meg a kötőelem alakváltozási képességét (*duktilitási feltétel*).

Rugalmas állapotban az előbbi három feltételen túlmenően még egy negyediket is ki kell elégíteni:

- A kapcsolt elemek feltételezett merevtestszerű elmozdulásai legyenek egymással összhangban és legyenek fizikailag lehetségesek (*kompatibilitási feltétel*).

Az *Eurocode 3* szerint a csavarozott kapcsolatokban a képlékeny erőátrendeződés feltételezése is megengedett, kivéve a következő eseteket:

- C kategóriájú (teherbírási határállapotban megcsúszásnak ellenálló) kapcsolatok;
- A és B kategóriájú kapcsolatok, ha a csavarok nyírási ellenállása kisebb, mint a palástnyomási ellenállás ($F_{v,Rd} \leq F_{b,Rd}$).
- Ütésszerű terhelésnek rezgésnek vagy változó irányú terhelésnek (a szélteher kivételével) kitett kapcsolatok.

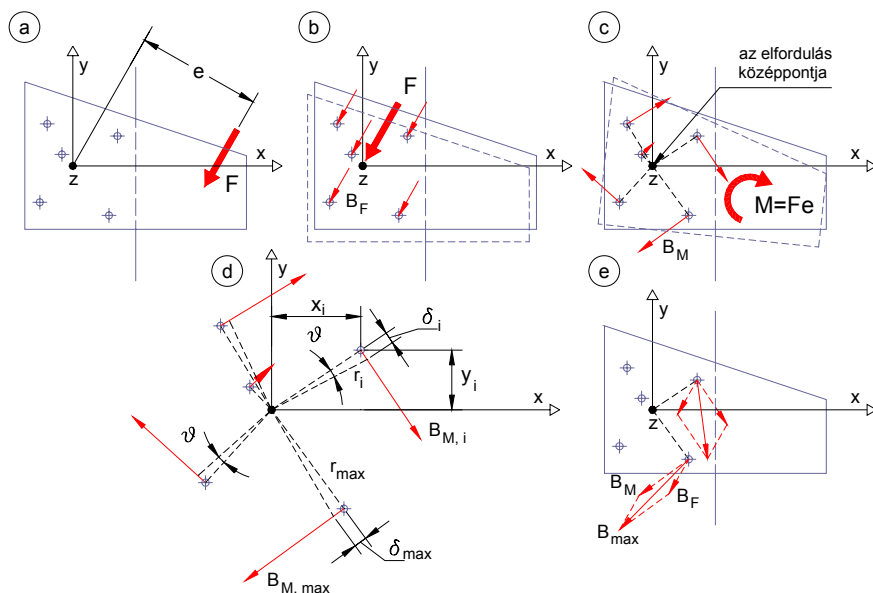
Az első kivételt az indokolja, hogy megcsúszásmentes állapotban nem következhet be erőátrendeződés, mert ahhoz a kötőelemek képlékeny alakváltozása szükséges, a második esetben pedig a duktilitási feltétel nem érvényesül. A csavaroknak a törési állapothoz tartozó alakváltozása ugyanis lényegesen kisebb a nyírási, mint a palástnyomási tönkremenetel esetén.

Az erőeloszlás meghatározása rugalmas állapotban

Olyan nyírtcsavaros kapcsolatokban, amelyekben a kapcsolatra ható erők eredője a csavarkép súlypontján halad keresztül, feltételezhető a kötőelemek közötti egyenletes erőeloszlás. (Kivételt képeznek az ún. hosszú kapcsolatok, amelyekről később lesz szó.) Ilyenek általában a húzott vagy nyomott szerkezeti elemek hevederlemezes illesztései. Méretezéskor ki kell választani a kötőelemek minőségét és méretét, majd meg kell állapítani azok szükséges darabszámát, a csavarkép elrendezését, a hevederlemezek méreteit és szilárdságilag ellenőrizni kell a hasznos keresztmetszeteket.

Célszerű olyan kötőelemet választani, melynek nyírási ellenállása nagyobb, mint a palástnyomási ellenállása.

Külppontosan terhelt nyírtcsavaros kapcsolat esetén a kapcsolatra ható erőket redukáljuk a csavarkép súlypontjára, és külön-külön határozzuk meg a kötőelemekre ható erőket az erőből és a nyomatékból (3.30. ábra). Az erők nagyságát és irányát a kapcsolt elemek merevtestszerű elmozdulását elképzelve tudjuk kiszámítani. A központos erőhatásból minden kötőelemben azonos nagyságú erő ébred, ezek iránya megegyezik a terhelő erő irányával. A nyomatékból elfordulás jön létre a csavarkép súlypontja körül, következésképpen az egyes kötőelemek deformációja a hozzájuk tartozó sugárra merőleges irányú és a sugár hosszával arányos nagyságú lesz.



3.30. ábra. Külppontosan terhelt nyírtcsavaros kapcsolatok méretezési elve rugalmas állapotban

Az egy kötőelemre ható erő az F erőből n számú csavar esetén:

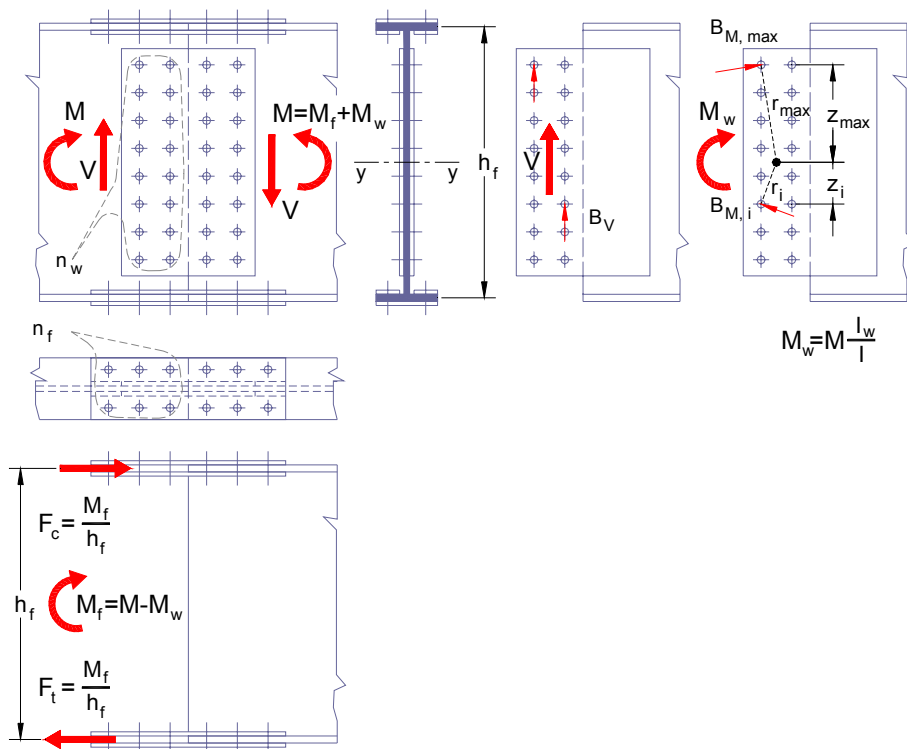
$$B_F = \frac{F}{n}$$

Az i -edik kötőelemre ható erő az M nyomatékból:

$$B_{M,i} = M \cdot \frac{r_i}{\sum r_i^2} = M \cdot \frac{r_i}{\sum (x_i^2 + y_i^2)}$$

Ezek után ki kell választani a legjobban igénybevett kötőelemet – ez általában a csavarkép súlypontjától legtávolabbra levő – és az erőkomponenseket vektoriálisan összegezni kell (3.30. ábra: „d”).

Az előbbiekből meg tudjuk tervezni egy gerinclemezes tartó illesztését (3.31. ábra). A kapcsolatot nyomtérk és nyíróerő is terheli. A nyíróerőt teljes egészében a gerinclemez kötőelemeire hárítjuk, mert az övlemez hevederes kapcsolatának a tartótengelyre merőlegese erőkkel szembeni merevsége gyakorlatilag elhanyagolható a gerinclemez hevederes kapcsolatának ugyanilyen irányú merevségéhez képest. (Képzeld el gerinclemez hevederek nélkül a kapcsolatot: az övlemez hevederei a nyíróerő hatására lehajlanának.) A nyomtérköt vizont a merevségek arányában eloszthatjuk a gerinclemezre és az övekre.



3.31. ábra. Gerinclemezes tartó illesztésének méretezése – rugalmas állapot

A gerinclemezre ható nyomaték:

$$M_w = M \cdot \frac{I_{y,w}}{I_y}.$$

Az övekre ható nyomaték:

$$M_f = M - M_w.$$

Az övekre ható nyomatékból számíthatók az överők, azokból pedig az egy kötőelemre ható erő:

$$F_t = F_c = \frac{M_f}{h_f};$$

$$B_f = \frac{F_t}{n_f}.$$

A gerinclemez kötőelemeinél külön számítjuk a kötőelemekre ható erőket a nyíróerőből és a nyomatékból. A nyíróerőből minden kötőelemen azonos nagyságú, a tartótengelyre merőleges irányú erő keletkezik:

$$B_v = \frac{V}{n_w}.$$

A nyomatékból a gerincheveder (féloldali) csavarképének súlypontja körüli elfordulást feltételezve a sugárra merőleges irányú és a sugár hosszával arányos nagyságú erők keletkeznek. A gyakorlati számításokban $r_i \approx z_i$, ill. $r_{max} \approx z_{max}$ közelítéssel szokás élni, következésképpen a nyomatékból a gerinclemez kötőelemeiben keletkező erőket a tartótengellyel párhuzamosnak vehetjük. A legnagyobb erő a csavarkép súlypontjától legtávolabb levő kötőelemen keletkezik:

$$B_{M,max} = M_w \cdot \frac{r_{max}}{\sum r_i^2} \approx M_w \cdot \frac{z_{max}}{\sum z_i^2}.$$

A legjobban igénybevett kötőelemre ható erő vektoriális összegzéssel számítható:

$$B_{max} = \sqrt{B_v^2 + B_{M,max}^2}.$$

A kapcsolat nyilvánvalóan akkor megfelelő, ha a kötőelemekben a hatásokból számított erő tervezési értéke nem haladja meg a kötőelemek ellenállásának tervezési értékét. Ezt az övekre és a gerinclemezekre külön-külön igazolni kell.

A hevederlemezeket is ellenőrizni kell. A hevederlemezek méretét célszerű az egyenteherbírás elvének megfelelően megállapítani. Igazolni kell, hogy a hevederlemezek együttes hasznos keresztmetszete nem kisebb az illesztett elem hasznos keresztmetszeténél:

$$\sum A_{c,net} \geq A_{net} \cdot$$

A gerinclemez esetében további követelmény, hogy hevederlemezeinek együttes inercianyomatéka nem lehet kisebb a gerinclemez inercianyomatékánál:

$$\sum I_{z,c} \geq I_{z,w} \cdot$$

Nyomatékkal terhelt húzottcsavaros kapcsolatokban – egy ilyenre mutat példát a 3.32. ábra – a csavarokban ébredő erőket a kapcsolat tönkremenetelekor fellépő alakváltozásokat elképzelve tudjuk meghatározni. Az ábrán látható homloklemez oszlop-gerenda kapcsolatban a gerenda elfordulása nem a csavarkép súlypontja, hanem a nyomott övlemez és az oszlop gerenda felőli övlemezének metszéspontja körül következik be. Az oszlopot ugyanis a gerenda nyomott övének magasságában merevíteni kell, mert a merevítés nélkül az oszlop öve a gerenda nyomott övéről átadódó koncentrált erő hatására deformálna. A nyomaték átadása így egyetlen nyomóerő és a csavarokban fellépő húzóerő által történik.

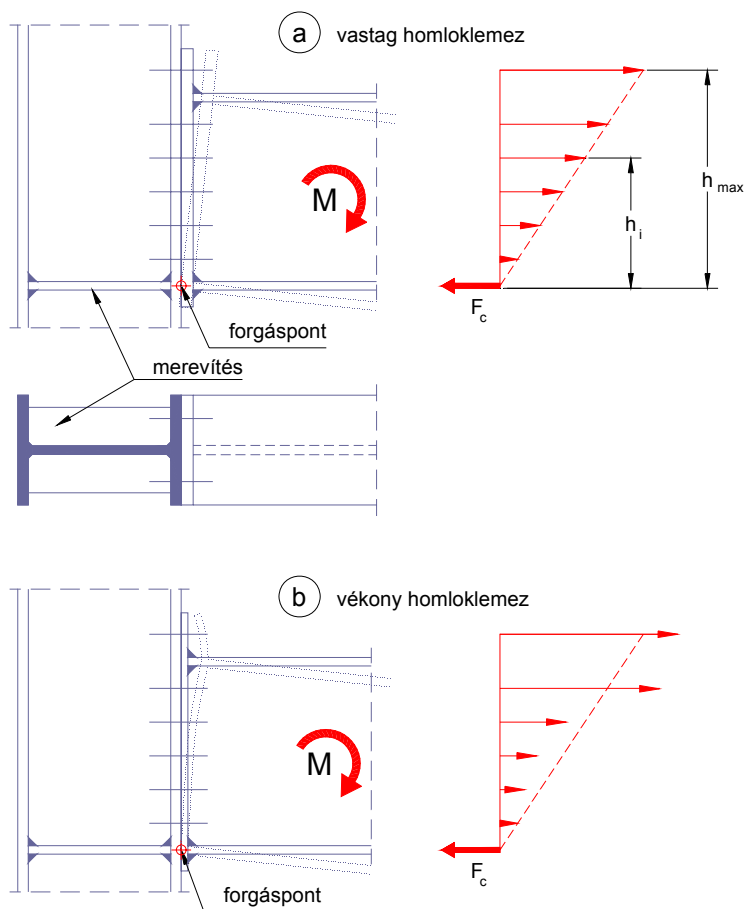
A csavarokban fellépő erők nagyságát és eloszlását a homloklemez merevsége is befolyásolhatja. Vastag homloklemez esetén a homloklemez saját síkjára merőleges deformációja elhanyagolható, ebből lineáris erőeloszlás következik („a” ábra). Ha azonban a homloklemez nem eléggé merev, akkor az erőeloszlás a homloklemez deformációját követi, és a „b” ábra szerint alakul. A lineáris erőeloszlásból a legnagyobb húzóerő az alábbiak szerint számítható:

$$F_{bt,max} = M_{Sd} \cdot \frac{h_{max}}{2 \cdot \sum h_i^2} \cdot$$

(A nevezőben a 2-es szorzótényező azért szerepel, mert a csavarok két oszlopban helyezkednek el.)

A gerenda nyomott övén átadódó erő vetületi egyenletből számítható:

$$F_{c,f} = \sum F_{bt,i} \cdot$$



3.32. ábra. A csavarerők eloszlása nyomatékkal terhelt homloklemez-es kapcsolatban

A 3.32. ábra szerinti kapcsolatokat általában nyíróerő (V_{sd}) is terheli, amelyet egyenletesen oszthatunk szét a csavarok között:

$$F_{bv,Ed} = \frac{V_{Ed}}{n}.$$

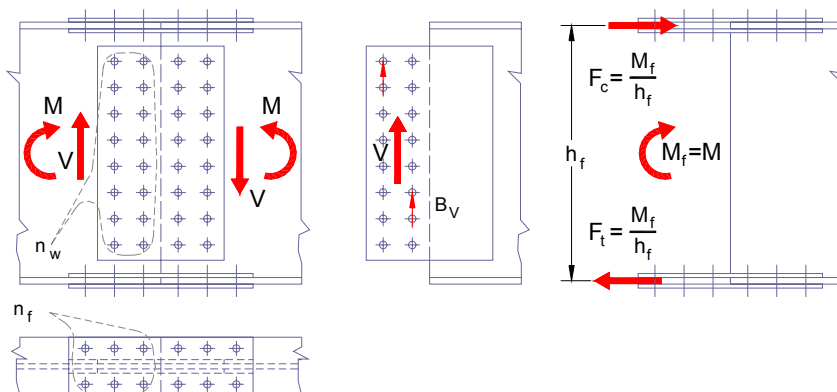
Nyírásra is igénybevett kapcsolatban a kapcsolat kötőelemei akkor megfelelőek, ha a *legkedvezőtlenebb igénybevételű* csavarra nézve fennáll, hogy a csavarra számított nyíróerő nem nagyobb, mint a húzóerő figyelembevételével számított nyírási tervezési ellenállás.

A 3.32. ábra szerinti homloklemez-es kapcsolatban csak a kötőelemek megfelelőségét ellenőriztük. A kapcsolat teljes vizsgálata ennél lényegesen összetettebb, a homloklemez, a varratok, valamint a csatlakozó övek és az oszlop gerinclemezének ellenőrzése is szükséges.

Az előbbi feladatok kapcsán belátható, hogy a kapcsolatok tervezése legkönnyebben ellenőrzés jellegűen, azaz csavarminőséget, méreteket, csavar-számot és elrendezést felvéve, és azokat ellenőrizve hajtható végre. Az optimális megoldáshoz általában csak a felvett adatokat változtatva és a számítást ismételve juthatunk el.

Az erőeloszlás meghatározása képlékeny állapotban

Az *Eurocode 3* szerint – a már ismertetett kivételekkel – a kötőelemek közötti erőeloszlás képlékeny erőátrendeződés feltételezésével is megengedett. Az erőeloszlás meghatározásánál továbbra is ki kell elégíteni az egyensúlyi, a szilárdsági és a duktilitási feltételt, a kompatibilitási feltételből azonban engedményeket tehetünk. Mindenképpen szem előtt kell tartanunk azonban azt az elvet, miszerint *a belső erők a nagyobb merevségek útját követik*. Megtehetjük például, hogy egy gerinclemez-es tartó hajlításra és nyírásra igénybevett illesztésénél (3.33. ábra) a teljes nyomatékot az övek-re, a teljes nyíróerőt pedig a gerinclemezre hárítjuk, mivel minden különösebb számítás nélkül is belátható, hogy nyomaték szempontjából az övek illesztése, a nyíróerő szempontjából pedig a gerinclemez illesztése a merevebb. Az övek illesztése ugyanis inkább az illesztett részek relatív elfordulását, a gerinc illesztése pedig inkább a tartótengelyre merőleges relatív eltolódását akadályozza meg. Fordított igénybevétel-elosztás feltételezése súlyos hiba lenne.



3.33. ábra. Gerinclemezés tartó illesztésének méretezése – képlékeny állapot

A nyomatékból számíthatók az överők, azokból pedig az egy kötőelemre ható erő:

$$F_t = F_c = \frac{M}{h_f};$$

$$B_f = \frac{F_t}{n_f}.$$

A nyíróerőből minden kötőelemben azonos nagyságú, a tartótengelyre merőleges irányú erő keletkezik:

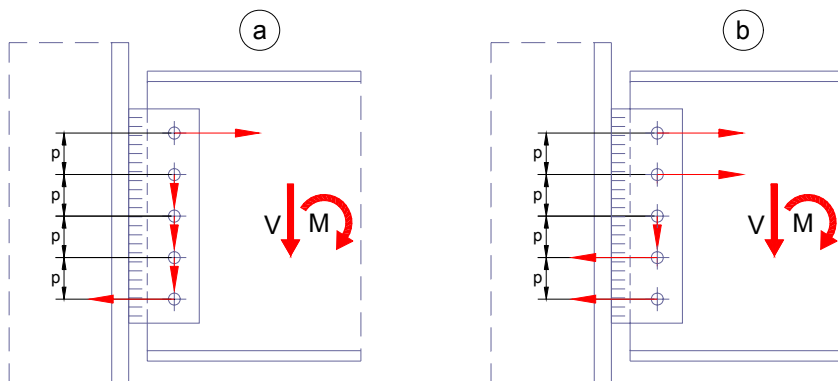
$$B_v = \frac{V}{n_w}.$$

A kapcsolat akkor megfelelő, ha a kötőelemekben a hatásokból számított erő tervezési értéke nem haladja meg a kötőelemek ellenállásának tervezési értékét. Ezt az övekre és a gerinclemezre külön-külön igazolni kell.

Ugyanazon kapcsolaton többféle valószínű képlékeny erőeloszlás is létezhet. Ebből az következik, hogy a kapcsolat tervezési ellenállására különböző értékeket kapunk az egyik vagy a másik eloszlás feltételezésével.

Egy részleges teherbírású oszlop-gerenda kapcsolaton az 3.34. ábra szerinti „a” esetben a nyomatékot 2 a nyíróerőt pedig 3 csavar viseli, a „b” esetben pedig 4 a nyomatékot és csak 1 a nyíróerőt. Teherbírási (képlé-

keny törési) határállapotban az összes csavarban a tervezési ellenállással azonos nagyságú erő ($F_{b,Rd}$) keletkezik. A kapcsolat nyomatéki és nyírási tervezési ellenállását az ábrán mindkét esetre feltüntettük.



$$V_{Rd} = 3 \cdot F_{b,Rd};$$

$$M_{Rd} = 4 \cdot p \cdot F_{b,Rd}.$$

$$V_{Rd} = F_{b,Rd};$$

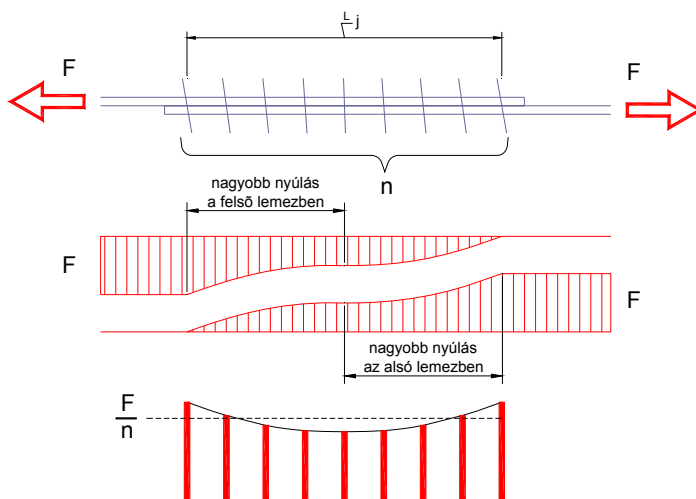
$$M_{Rd} = 6 \cdot p \cdot F_{b,Rd}.$$

3.34. ábra. Különböző lehetséges képlékeny erőeloszlások

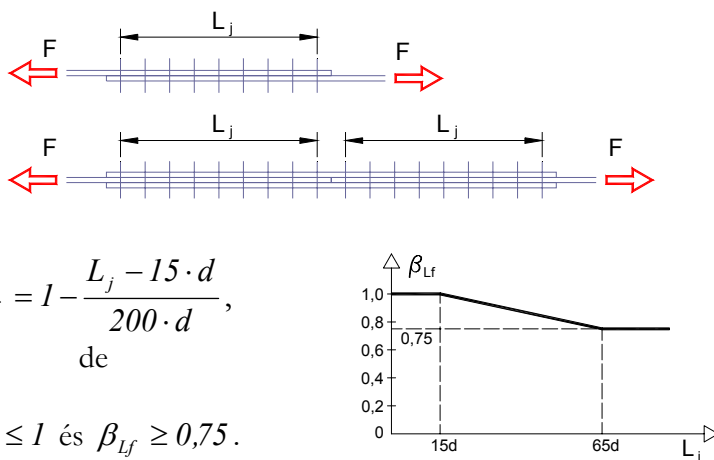
Hosszú kapcsolatok

A kapcsolatok kötőelemei közötti erőeloszlás számításánál rugalmas állapotban alapelv, hogy az összekapcsolt elemek merevtestszerű elmozdulását vesszük csak figyelembe, azaz az összekapcsolt elemek kapcsolaton belüli alakváltozásától eltekintünk. Ez a közelítés azonban a biztonság kárára téved az erőátadás irányában hosszú kapcsolatok esetén.

A 3.35. ábra egy átlapolt kapcsolatban a csavarok alakváltozását érzékelte és az összekapcsolt elemekben számítható átlagfeszültséget is mutatja. Belátható, hogy a lemezek fajlagos nyúlása az átlapolt szakaszon egyenlőtlen, mert a nyúlásoknak a feszültséggel arányosnak kell lenniük. Így az alsó és a felső lemez nyúlásainak különbségét alakváltozással kell követniük a csavaroknak, az egyenlőtlen alakváltozásnak pedig egyenlőtlen erőeloszlás a következménye. Amennyiben ezt a hatást nem vesszük figyelembe, progresszív tönkremenetel következhet be: a túlterhelt szélső csavarok alakváltozási képessége kimerül és eltörnek, mielőtt a belsők elérnék teljes terhelhetőségüket.



3.35. ábra. Egyenlőtlen erőeloszlás hosszú kapcsolatban



$$\beta_{L_f} = 1 - \frac{L_j - 15 \cdot d}{200 \cdot d},$$

de

$$\beta_{L_f} \leq 1 \text{ és } \beta_{L_f} \geq 0,75.$$

3.36. ábra. Csökkentő tényező hosszú kapcsolatokhoz

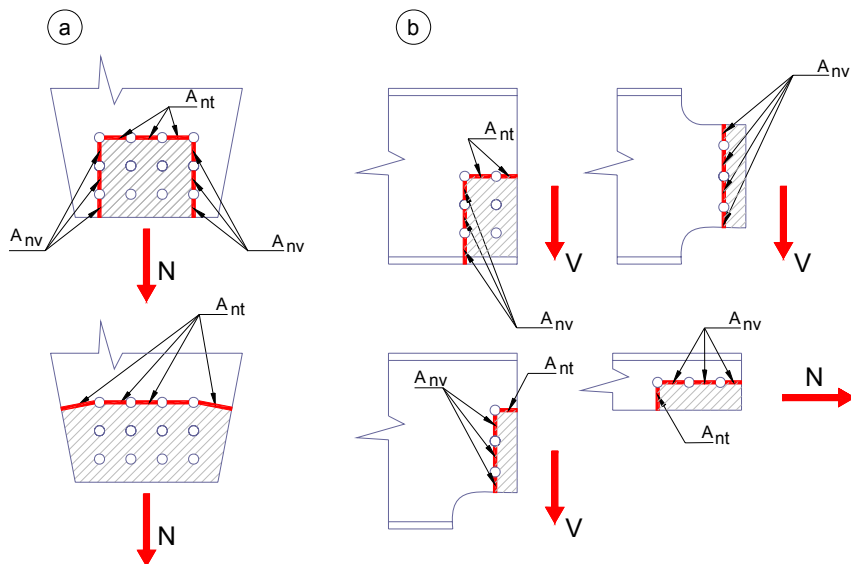
Az átlapolt kapcsolatok és a hevederlemezes toldások méretezésénél – hosszú kapcsolatokban is – egyenletes erőeloszlást szokás feltételezni a kötőelemek között, de a csavarok nyírás tervezési ellenállást egy β_{L_f} tényezővel csökkenteni kell, ha a szélső kötőelemek erőátadás irányában

mért távolsága nagyobb, mint $15 \cdot d$. (Csak a nyírási ellenállást kell csökkenteni. A palástnyomásit azért nem, mert ha a palástnyomás a mértékadó, akkor a csavar alakváltozási képessége lényegesen nagyobb, ezáltal az erőkülönbségek ki tudnak egyenlítődni.)

A kötőelemek közötti egyenlőtlen erőeloszlásnak oka lehet a gyártási pontatlanság, vagy a lyukhézag is. Egy M20-as csavarnál például 22 mm a normál furatátmérő. A 2 mm lyukhézag már elegendő ahhoz, hogy kis terhelés esetén a kapcsolatból csak egy csavar dolgozzon.

3.7.7. Kötőelemek együttes kiszakadása

A szerkezeti kapcsolatok egyik lehetséges tönkremeneteli módja a kötőelemek együttes kiszakadása, amikor a kapcsolt szerkezeti elem külső csavarsorai mentén a gyengített keresztmetszet elszakad, illetve elnyíródik. (3.37. ábra) A kapcsolatokat ezzel a tönkremeneteli móddal szemben a kiszakadási ellenállás kiszámításával kell ellenőrizni. Ez abból áll, hogy a töréskép húzott és nyírt szakaszain külön-külön meghatározzuk a töréssel szembeni ellenállást, és azokat összegezzük. Esetenként szükséges lehet többféle, lehetséges töréskép megvizsgálása is.



3.37. ábra. kötőelemek együttes kiszakadása
„a”: szimmetrikus terhelés, „b”: aszimmetrikus terhelés

Szimmetrikus elrendezés és terhelés esetén a kiszakadási ellenállás tervezési értéke:

$$V_{eff,1,Rd} = \frac{A_{nt} \cdot f_u}{\gamma_{M2}} + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{A_{nv} \cdot f_y}{\gamma_{M0}},$$

ahol

A_{nt} a húzásnak kitett hasznos keresztmetszet,

A_{nv} a nyírásnak kitett hasznos keresztmetszet.

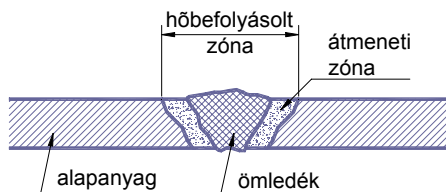
Nem szimmetrikus esetekben pedig:

$$V_{eff,2,Rd} = 0,5 \cdot \frac{A_{nt} \cdot f_u}{\gamma_{M2}} + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{A_{nv} \cdot f_y}{\gamma_{M0}},$$

A különbségtételt az indokolja, hogy aszimmetrikus esetben – egyensúlyi okokból – nem tételezhetünk fel egyenletes feszültségeloszlást a töréskép húzott felületein.

3.7.8. Hegesztett kapcsolatok

A kapcsolatok készítésének – kedvező gyártási körülmények között – a hegesztés a leggazdaságosabb módja. Az üzemben készülő kapcsolatok ezért ma már rendszerint hegesztettek. Sokfajta hegesztő eljárás ismeretes, az acélszerkezetek kapcsolatainak készítésénél azonban szinte kizárólagosan ívhegesztő eljárásokat alkalmaznak. (Ezekből is többfajta létezik, ismertetésüktől most eltekintünk.) A 3.38. ábra a varrat szerkezetének szokásos elnevezéseit szemlélteti.



3.38. ábra. A varrat szerkezete

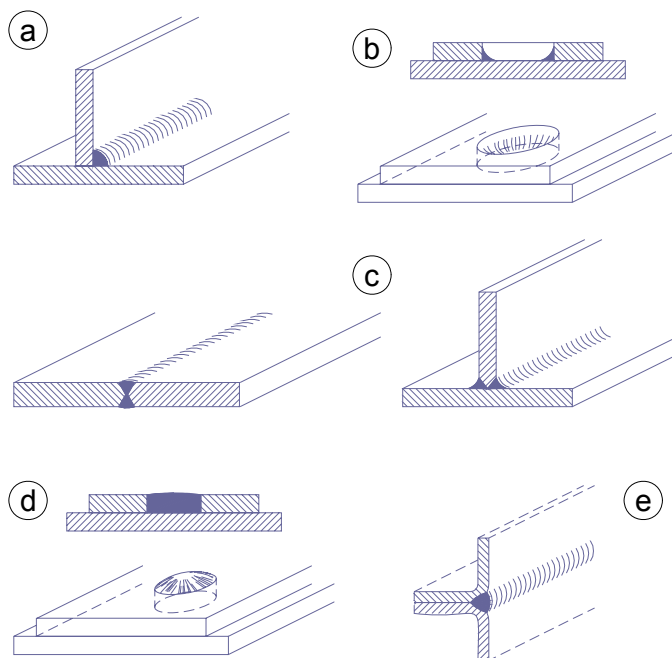
A hegesztett kapcsolatok hátrányos tulajdonságai, hogy a lehűléskor zsugorodó varrat miatt kisebb-nagyobb alakváltozások (görbülések, vetemedések) is létrejöhetnek, és hegesztés után számottevő sajátfeszültségek is maradhatnak a szerkezetben. A hegesztési alakváltozásokat és a sajátfeszültségeket a varratok készítésének sorrendje is befolyásolja.

További probléma, hogy a varrat környezetében a hegesztés hatására az alapanyag tulajdonságai megváltoznak. Az alapanyag és a heganyag (ömladék) határán lévő átmeneti zónában – a felmelegedés és gyors lehűlés hatására az anyag felkeményedik (beedződés) és ridegebbé válik. Az anyag tulajdonságainak megváltozása ridegtörési és – ismétlődő terhelésnek kitett szerkezetek esetén – fáradási problémákhoz vezethet.

Acélszerkezetek tervezésénél a hegesztett kapcsolatok helyét és kialakításuk módját nagy körültekintéssel – a hátrányos tulajdonságokra is gondolva – kell meghatározni. A felesleges varratokat és az indokolatlanul nagy varratméreteket nem csak gazdaságossági, hanem műszaki okok miatt is kerülni kell.

Varratfajták

Az *Eurocode 3* öt varratfajtát sorol fel. Ezek a sarokvarratok, a lyukperemvarratok, a tompavarratok, a telivarratok és a horonyvarratok (3.39. ábra).



3.39. ábra. Varratfajták – „a”: sarokvarrat; „b”: lyukperemvarrat; „c”: tompavarratok; „d”: telivarrat, „e”: horonyvarrat

Sarokvarratokkal egymáshoz 60 és 120 fok közötti szögben hajló elemeket lehet összekapcsolni. A sarokvarrat lehet egyoldali vagy kétoldali, attól függően, hogy a kapcsolt elem egyik vagy mindkét oldalán készül, illetve folytonos vagy szakaszos. A szakaszos varratok nem hagyhatók abba az elemek sarkainál, hanem folyamatosan vissza kell fordulni a sarok körül a varrat gyökméretének (lásd később) legalább kétszeresével.

A *lyukperemvarrat* egy furat vagy hasítéklyuk belső peremén körbevezetett sarokvarrat. Csak a lemezek síkjában működő erők továbbítására alkalmazható, húzott csavar helyettesítésére nem alkalmas. Egymáson fekvő széles lemezek összekapcsolhatók vele a lokális kihajlás megakadályozása, illetve a korróziós érzékenység csökkentése céljából.

A *tompavarrat* a lemez teljes vastagsága mentén kialakított varrat, tompa illesztés és T-kötés is kialakítható vele.

A *telivarrat* csak abban különbözik a lyukperemvarrattól, hogy itt a furat vagy hasítéklyuk teljesen ki van töltve.

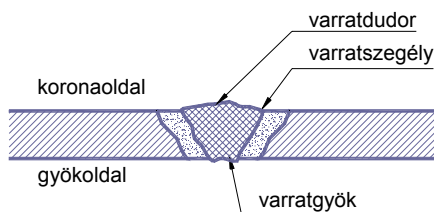
A *boronyvarrat* lekerekített élű szelvényeknek az élek menti összekapcsolására, illetve körszelvényű elemeknek sík lemezekhez való kapcsolására alkalmas.

A *tompavarrat* lehet teljes- vagy részleges beolvadású, attól függően, hogy a varrat a kapcsolt elem teljes vastagságára kiterjed vagy nem (3.40. ábra).

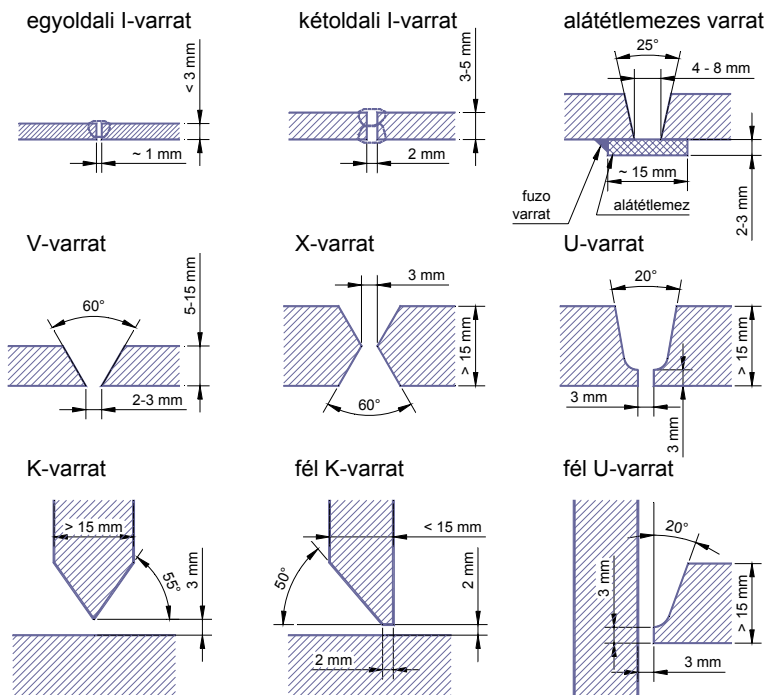


3.40. ábra. Teljes- és részleges beolvadású tompavarrat

A tompavarratok 3 – 5 mm vastagságig élélőkészítés nélkül hegeszthetők, vastagabb lemezek esetén azonban a kapcsolódó lemezek éleit meg kell munkálni. A tompavarratokat az élélőkészítés alakjára utaló névvel is szokás megnevezni. (3.42. ábra) Varratokkal kapcsolatos egyéb elnevezéseket mutat a 3.41. ábra.



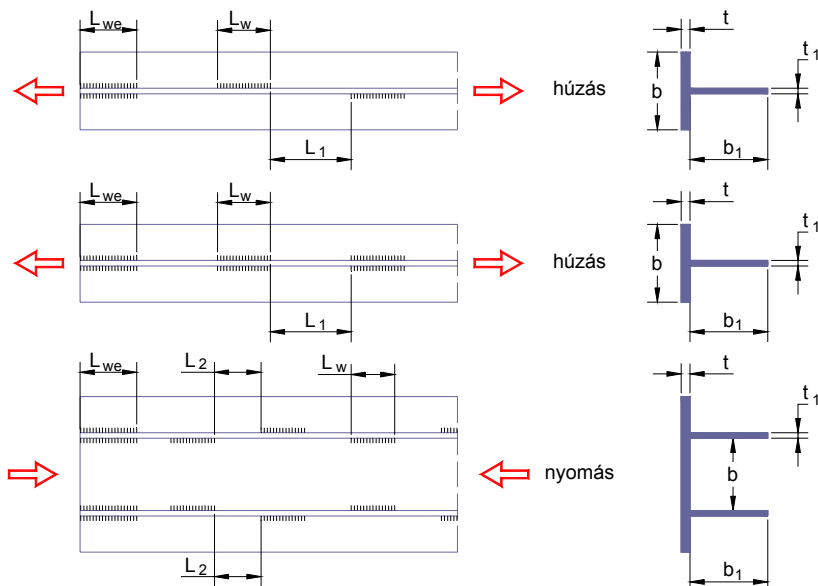
3.41. ábra. Varratokkal kapcsolatos elnevezések



3.42. ábra. Élelőkészítés tompavarratokhoz

Szakaszos varratok

Korróziónak ki nem tett környezetben szakaszos sarokvarratok is készülhetnek. Az ilyen varratok az összekapcsolt elemek végénél varrattal kell, hogy kezdődjenek és végződjenek. A szakaszos varratokra vonatkozó szerkesztési előírások az alábbiak:



szélső varratok hossza bármilyen elemekben:	varratköz húzott elemekben:	varratköz nyomott vagy nyírt elemekben:
$L_{we} \geq \begin{matrix} 0,75 \cdot b \\ 0,75 \cdot b_1 \end{matrix}$	$L_1 \leq \begin{matrix} 16 \cdot t \\ 16 \cdot t_1 \\ 200 \text{ mm} \end{matrix}$	$L_2 \leq \begin{matrix} 12 \cdot t \\ 12 \cdot t_1 \\ 0,25 \cdot b \\ 200 \text{ mm} \end{matrix}$

3.43. ábra. Szekaszos varratokra vonatkozó szerkesztési előírások

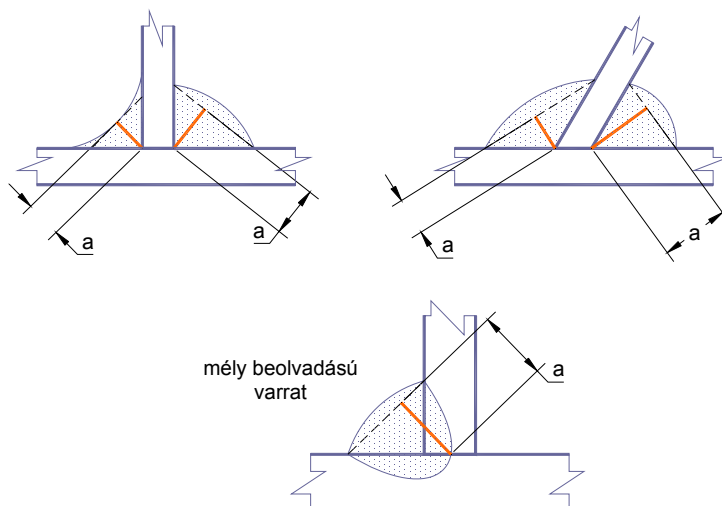
Számításba vehető varratméretek

A gyökméret

A varratok teherbírását befolyásoló geometriai méret a gyökméret, melyet a továbbiakban a -val jelölünk. Sarokvarratok esetén a varrat gyökmérete a varrat keresztmetszetébe rajzolható legnagyobb háromszög (akár egyenlőszárú, akár nem) külső oldalához tartozó magasságával egyenlő. Az ún. mély beolvadású¹ varratoknál az összeolvadás többlete is figyelembe

¹ Egyes, nagy fajlagos hőbevitelű hegesztőeljárásokkal elérhető, hogy összeolvadás nem csak az alapanyag és a varrat érintkező felületein jön létre, hanem a hegesztendő elemek a

vehető, ha előzetes technológiai próbákkal igazolható, hogy a kívánt beolvadás megbízhatóan elérhető.



3.44. ábra. Sarokvarratok gyökmérete

Teljes beolvadású tompavarrat esetén a gyökméret az összekapcsolt elemek közül a vékonyabbiknak a vastagságával azonos.²

Részleges beolvadású tompavarratoknál és horonyvarratoknál – ugyanúgy, mint a mély beolvadású sarokvarratoknál – a technológiai próbákkal igazolt összeolvadási mélység a gyökméret.³

A hasznos varrathossz

A sarokvarrat hasznos hossza a teljes méretű varratrész hossza, beleértve a sarkoknál visszaforduló részeket is: $l_{eff} = l$.

Ha a varrat kezdeténél és végénél – technológiai okokból – a gyökméret a teljes méretnél kisebb, akkor a hasznos varrathossz a teljes varrat-hosszúságnál $2 \cdot a$ értékkel kisebb: $l_{eff} = l - 2 \cdot a$.

nagy hőhatás következtében a varrattal nem érintkező részen is egybeolvadnak bizonyos mélységig. Ezek a mély beolvadású varratok.

² Csak akkor, ha a varrat megfelelő elektródával készül, és kísérletek igazolják, hogy a varratnak sem a szakító szilárdsága, sem pedig a folyási határa nem kisebb, mint az alapanyagé.

³ A próbahegesztéseket fel kell darabolni és a gyökméretet meg kell mérni, hogy kiválasztható legyen az az eljárás, amely biztosítja a tervezett gyökméret elérését a termékben.

Erőátvitel szempontjából nem vehetők figyelembe azok a varratok, amelyek hasznos hossza nem éri el a 30 mm-t, illetve a 6-szoros gyökméretet.

Sarokvarratok tervezési ellenállása

A sarokvarratok fajlagos (egységnyi varrathosszúságra jutó) tervezési ellenállásának számítására az *Eurocode 3* két módszert közöl. Az egyszerűsített és az alternatív módszer is korlátozás nélkül alkalmazható, de meg kell jegyezni, hogy az egyszerűsített módszer alkalmazása esetén általában (de nem mindig) nagyobb varratméretek adódnak.

Az egyszerűsített módszer

Az egyszerűsített módszerben az az egyszerűsítés, hogy a varrat szilárdságát a varrat nyírási szilárdságával vesszük azonosnak. Ez a biztonság javára szolgáló közelítés, mivel a varratok nyírással szembeni ellenállása mindig kisebb a húzással szembeni ellenállásnál. A számítási mód előnye, hogy a varratra ható erők irányától függetlenül számítható a fajlagos (egységnyi varrathosszra jutó) tervezési ellenállás ($F_{w,Rd}$ [N/mm]):

$$F_{w,Rd} = f_{vw,d} \cdot a,$$

ahol

$f_{vw,d}$ a varrat tervezési nyírási szilárdsága, amely a következők szerint számítható:

$$f_{vw,d} = \frac{f_u}{\sqrt{3} \cdot \beta_w \cdot \gamma_{M2}},$$

ahol

f_u az összekapcsolt elemek (különböző minőségek esetén a gyengébbik) névleges húzószilárdsága,

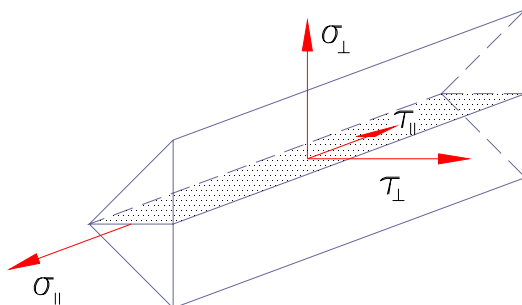
β_w az anyagminőségtől függő korrelációs tényező (3.26. táblázat)

Anyagminőség	β_w korrelációs tényező
S235	0,8
S275	0,85
S355	0,9
S420	1,0
S460	1,0

3.26. táblázat.

Az alternatív módszer

Az alternatív módszer szerint az egységnyi varrathosszra ható erőket a varrattengellyel párhuzamos és arra merőleges, illetve a varrat síkjába eső és arra merőleges komponensekre kell bontani (3.45. ábra). A varrat síkja alatt a gyökméret és a varrat hossz tengelye által meghatározott sík értendő. A feszültségkomponensek általában egyenként, az igénybevételfajtákból külön-külön is meghatározhatók.



3.45. ábra. Varratok feszültségkomponenseinek értelmezése

A varrattengellyel párhuzamos irányú normál feszültségeket (σ_{\parallel}) nem kell figyelembe venni a statikusan terhelt kapcsolatok méretezésénél, mert – kísérletek tanúsága szerint – a képlékeny törésre gyakorolt hatásuk elhanyagolható.

A sarokvarrat tervezési ellenállása elegendő, ha a következő két feltétel mindegyike teljesül:

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3\tau_{\perp}^2 + 3\tau_{\parallel}^2} \leq \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}} \quad \text{és} \quad \sigma_{\perp}^2 \leq 0,9 \cdot \frac{f_u}{\gamma_{M2}},$$

ahol

f_u a névleges húzószilárdság;

β_w a megfelelő korrelációs tényező (3.26. táblázat).

Különböző minőségű anyagok hegesztett kapcsolata esetén itt is a gyengébb minőségű anyaghoz tartozó jellemzőket kell figyelembe venni.

A jelenleg még érvényes MSZ 15024/1 szerint az összetett igénybevételű varratok számítására az alternatív módszerhez hasonló, de nem azonos eljárást ír elő:

$$\sigma_{v\check{o}} = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 2\tau_{\perp}^2 + 2\tau_{\parallel}^2} \leq \sigma_{vH}.$$

ahol

$\sigma_{v\check{o}}$ a redukált feszültség a varratban,

σ_{vH} a varrat határfeszültsége (= az alapanyag határfeszültsége).

Tompavarratok tervezési ellenállása

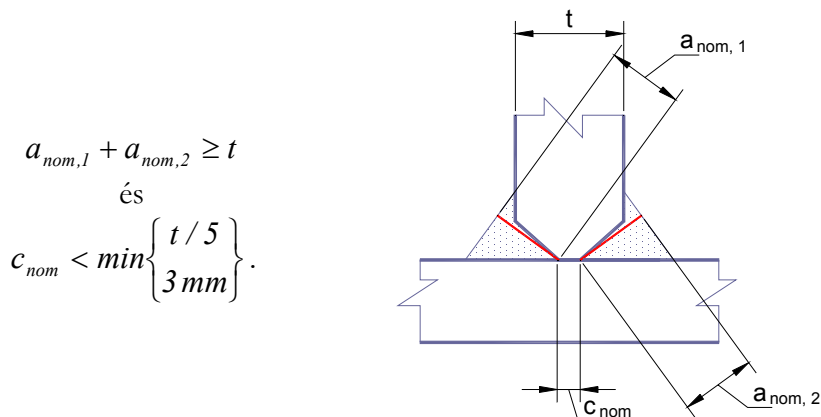
Teljes beolvasású tompavarratok

A teljes beolvasású tompavarratok tervezési ellenállása az összekapcsolt elemek közül a gyengébbiknek a tervezési ellenállásával azonosnak vehető. Ebből következik, hogy a statikusan terhelt tompavarratokat nem kell vizsgálni, azok nyilvánvalóan megfelelnek, ha az összekapcsolandó elemeket megfelelően méreteztük.

Részleges beolvasású tompavarratok

A részleges beolvasású tompavarratok ugyanúgy vizsgálandók, mint a sarokvarratok, hiszen a varratméret síkján a feszültségkomponensek ugyanúgy értelmezhetők, mint sarokvarratok esetén (3.45. ábra).

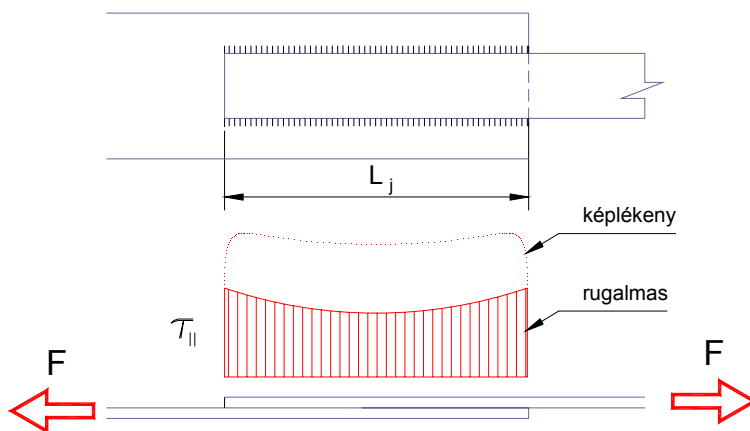
Részleges beolvasású tompavarrattal készített T-kötést sarokvarratokkal meg lehet úgy erősíteni, hogy a kötés tervezési ellenállása a teljes beolvasásával azonos legyen. Ennek az a feltétele, hogy:



3.46. ábra. Sarokvarrattal megerősített részleges beolvadású tompavarrat

Hosszú kapcsolatok

A 3.47. ábra a feszültségeloszlást szemlélteti egy átlapolt kapcsolatban. Az eloszlás hasonlít a hosszú csavarozott kapcsolatok kötőelemei közötti erőeloszláshoz, a kapcsolat végein nagyobbak a feszültségek. Az egyenlőtlen eloszlás oka is hasonló: rugalmas állapotban a varratok nyírási alakváltozása kompatibilis kell, hogy legyen a kapcsolt elemek deformációjával. A törési határállapot elérése előtt azonban – ha a varrat nem túlságosan hosszú – a varratban bekövetkező képlékeny alakváltozások révén a feszültségkülönbségek csaknem teljesen kiegyenlítődnek.



3.47. ábra. Feszültségeloszlás hosszú kapcsolatban

Az *Eurocode 3* előírása szerint 150 a -nál hosszabb átlapolott kötésekben a sarokvarratok tervezési ellenállását $\beta_{Lw,1}$ tényezővel redukálni kell annak érdekében, hogy a feszültségeloszlás hosszanti egyenlőtlenségének hatását figyelembe vegyük.

$$\beta_{Lw,1} = 1,2 - \frac{0,2 \cdot L_j}{150 \cdot a}, \text{ de } \beta_{Lw,1} \leq 1,$$

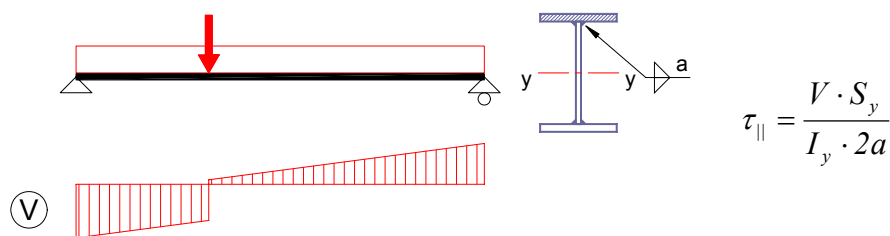
ahol

L_j az átlapolás teljes hossza az erőátadás irányában.

Olyan 1,7 m -nél hosszabb sarokvarratokban, amelyek keresztirányú merevítőket kapcsolnak egy lemezes szerkezethez (pl. gerinclemez tartók függőleges merevítéseinél), $\beta_{Lw,2}$ tényezővel kell redukálni a sarokvarrat tervezési ellenállását.

$$\beta_{Lw,2} = 1,1 - \frac{L_w}{17}, \text{ de } \beta_{Lw,2} \leq 1 \text{ és } \beta_{Lw,2} \geq 0,6.$$

A hosszú varratokra vonatkozó csökkentő tényezőt nem kell alkalmazni olyan esetekben, amikor a feszültségeloszlás a varratmenti alapanyag feszültségeloszlásával azonosnak vehető. Ilyen eset például a hegesztett I tartók öv- és gerinclemezét összekapcsoló nyakvarrat, amelyben a feszültségeloszlás a nyíróerő ábrát követi (3.48. ábra). A kétoldali sarokvarratban a nyíróerőből számítható feszültség:



3.48. ábra. Feszültségeloszlás hegesztett tartó nyakvarratában

Erőeloszlás hegesztett kapcsolatokban

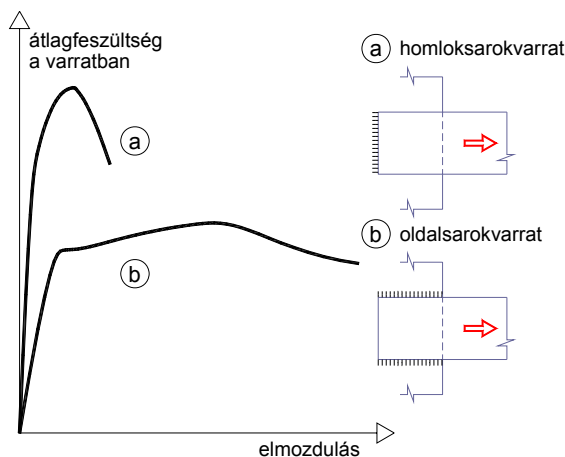
Statikusan terhelt hegesztett kapcsolatokban az erőeloszlás a kapcsolat rugalmas és képlékeny viselkedésének feltételezésével is számítható.

A rugalmas erőeloszlás meghatározásának az az alapja, hogy a varratokban fellépő feszültség a szomszédos alapanyag feszültségeivel konform (azokhoz hasonló). A kapcsolatok bonyolult geometriája miatt azonban legtöbbször a rugalmas feszültségeket csak pontatlanságot eredményező közelítések alkalmazásával tudjuk kiszámítani. Ilyen közelítés például a kapcsolt elemek saját alakváltozásának elhanyagolása, amely egyes esetekben alapvetően megváltoztatja a valós feszültségeloszlást. Ezért hosszú kapcsolatok, vagy merevítetlen övlemezekhez merőlegesen csatlakozó elemek kapcsolatai esetére a szabványok megszorításokat alkalmaznak. Egy ilyen már láttunk a hosszú kapcsolatok esetére, a merevítetlen övlemezekhez csatlakozó elemek kapcsolatairól később lesz szó.

Pontosabb, rugalmasságtani elveken alapuló számítások készítésére ma már a végeelem programok lehetőséget nyújtanak, de egy-egy kapcsolat vizsgálata még azokkal is igen munkaigényes, ezért inkább a megfontolt közelítések alkalmazása az elterjedt gyakorlat. Sokszor előforduló bonyolultabb esetekre (mint például a zárt szelvények hegesztett kapcsolatai) a szabványok kidolgozott eljárásokat közölnek.

A hegesztési varratok közötti képlékeny erőeloszlás egyszerűsítő feltételezéseken alapszik. Az egyszerűsítések azonban – hasonlóan, mint a csavarozott kapcsolatok esetében – olyan valószerű erőeloszlást kell, hogy eredményezzenek, amelyek kielégítik az alábbi feltételeket:

- Az egyes varratokban ható erők legyenek egyensúlyban a kapcsolatra ható igénybevételekkel (*egyensúlyi feltétel*).
- A varratokban feltételezett erők ne haladják meg a varrat teherbírását (szilárdsági feltétel).
- A varratokban feltételezett alakváltozások ne haladják meg a varrat alakváltozási képességét (*duktilitási feltétel*).

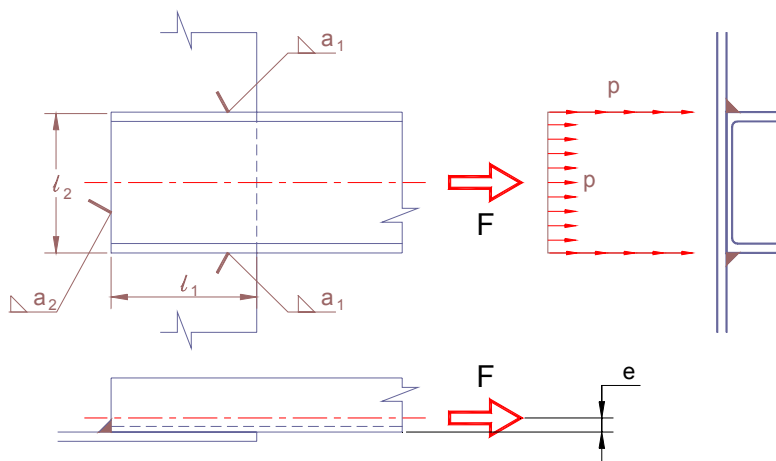


3.49. ábra. Különböző merevségű varratok

A duktilitási feltétel az erő irányára merőleges és az erő irányával párhuzamos varratok feltételezett együttműködésénél jelenthet problémát. A hossz tengelyükre merőlegesen terhelte varratok ugyanis lényegesen merevebbek, mint a hossz tengellyel párhuzamosan terheltek (3.49. ábra). Ez a különbség együttműködőnek feltételezett homlok- és oldalvarrat esetén azt eredményezheti, hogy a homlokvarrat már eltörik, mielőtt az oldalvarratokban elérnék a teljes teherbíráshoz tartozó alakváltozást. (Ez csak akkor fordulhat elő, ha a homlokvarrat gyökmérete lényegesen kisebb, mint az oldalvarraté.)

Központosan terhelte kapcsolatoknál (a kapcsolatra ható erő a varratkép súlypontján halad keresztül) egyenletes feszültségeloszlás tételezhető fel a kapcsolat minden varratában. Például a 3.50. ábra szerinti U-szelvény hegesztett bekötésénél mind a homlokvarrat, mind pedig a sarokvarratok középsíkján fellépő feszültség egységesen:

$$p = \frac{F}{\sum a \cdot \ell}$$



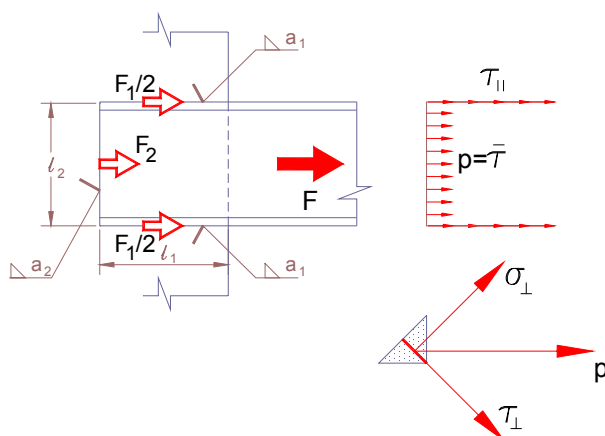
3.50. ábra. U-szelvény hegesztett bekötése

A kapcsolatnak a csomólemez síkjára merőleges irányú külpontossága (e) elhanyagolható.

A kapcsolat tervezési ellenállása az egyszerűsített módszerrel számítva:

$$F_{R,d} = f_{vw,d} \cdot \sum a \cdot \ell = \frac{f_u}{\sqrt{3} \cdot \beta_w \cdot \gamma_{M2}} \cdot (2a_1 \cdot \ell_1 + a_2 \cdot \ell_2).$$

Az alternatív módszerrel az előbbinél nagyobb értéket kapunk. Legegyszerűbb, ha külön-külön kiszámítjuk az oldalvarratok és a homlokvarrat teherbírását, és azokat összegezzük. (3.51. ábra)



3.51. ábra. U-szelvény bekötése az alternatív módszerrel számítva

Az oldalvarratokban csak $\tau_{||}$ feszültség keletkezik, ebből adódik, hogy:

$$F_{1,R,d} = \frac{f_u}{\sqrt{3} \cdot \beta_w \cdot \gamma_{M2}} \cdot 2a_1 \cdot l_1.$$

A homlokvarratban keletkező feszültséget komponensekre kell bontani. Mivel a varrat keresztmetszete egyenlőszárú derékszögű háromszög (a legtöbb sarokvarrat ilyen),

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{p}{\sqrt{2}}.$$

(A homlokvarratoknak a varrat középsíkjaival 45° -os szöget bezáró feszültség a jellemző igénybevétele, a korábbi szabványok ezt $\bar{\tau}$ -sal jelölték, és az ilyen igénybevételre külön határfeszültséget állapítottak meg.)

σ_{\perp} és τ_{\perp} értékék az alternatív módszer szerinti (első) képletbe behelyettesítve kapjuk, hogy:

$$\sqrt{\left(\frac{p}{\sqrt{2}}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{p}{\sqrt{2}}\right)^2} = \sqrt{2} \cdot p \leq \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}}.$$

Ebből $p \leq \frac{f_u / \sqrt{2}}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}}$ adódik, melynek felhasználásával a homlokvarrat tervezési ellenállása:

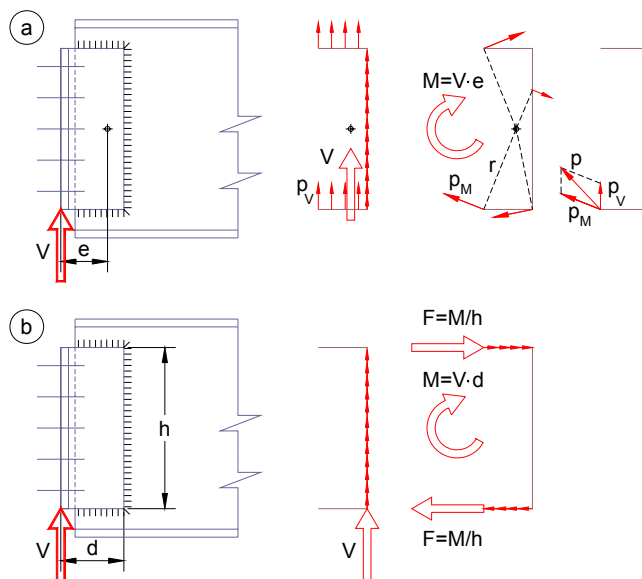
$$F_{2,R,d} = \frac{f_u / \sqrt{2}}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}} \cdot a_1 \cdot \ell_1.$$

A varratok együttes tervezési ellenállása:

$$F_{R,d} = F_{1,R,d} + F_{2,R,d} = \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}} \cdot \left(\frac{2a_1 \cdot \ell_1}{\sqrt{3}} + \frac{a_2 \cdot \ell_2}{\sqrt{2}} \right).$$

Külponthoz terhelte varratok, illetve varratcsoportok esetén a külponthoz hatását is figyelembe kell venni. Erre mutat példát a 3.52. ábra, melyen két lehetőséget is bemutatunk a varratokban keletkező feszültségek meghatározására.

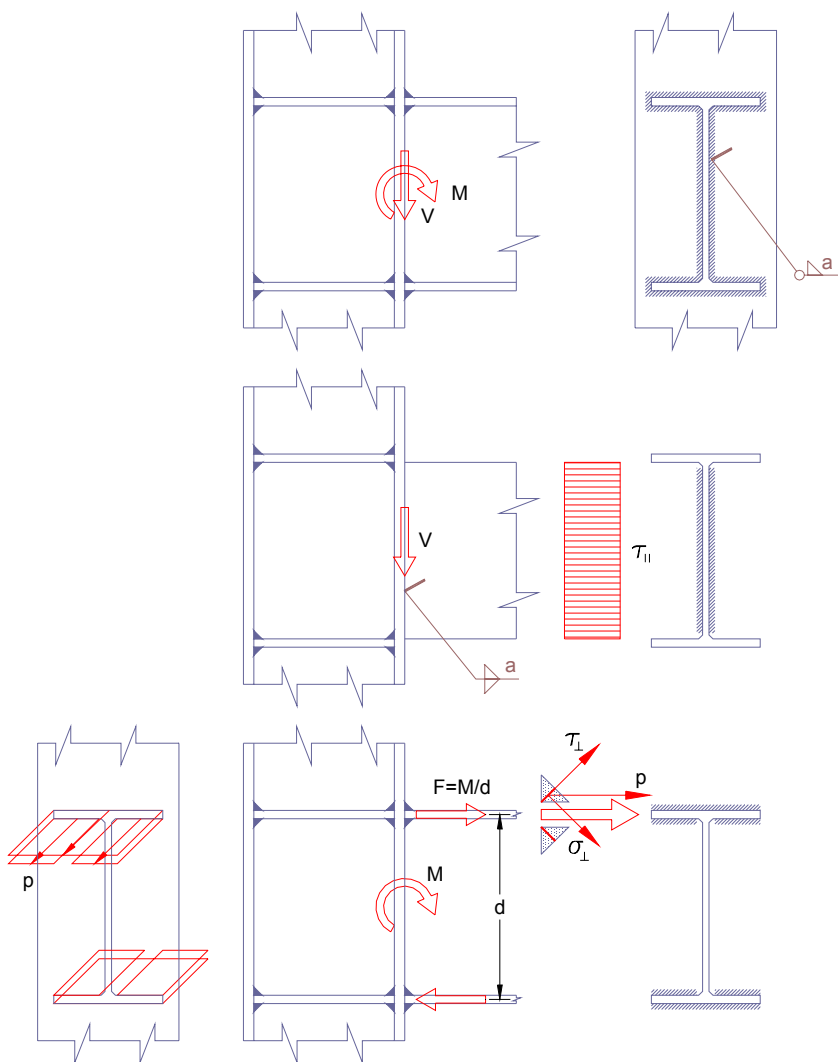
A rugalmas feszültségeloszláshoz közelebb álló „a” esetben a varratkép súlypontjára redukált igénybevételekből (V és M) külön-külön számítunk feszültségeket. A V erő hatására egyenletes feszültségeloszlást tételezünk fel, az M nyomaték hatására pedig a varratkép súlypontjától mért sugárral arányosat. A V -ből csak függőleges, az M -ből pedig a sugárra merőleges irányú feszültségek keletkeznek, amelyek a kritikus pontokban vektoriálisan összegezendők.



3.52. ábra. Külpontosan terhelt varratsoport számítási lehetőségei

A „b” esetben azt tételezzük fel, hogy a függőleges varratszakasz csak függőleges, a vízszintesek pedig csak vízszintes erőket vesznek fel, és az egyes varratszakaszokon belüli feszültségeloszlás egyenletes. Az egyes varratszakaszokra ható erők egyszerű egyensúlyi egyenletekből számíthatók.

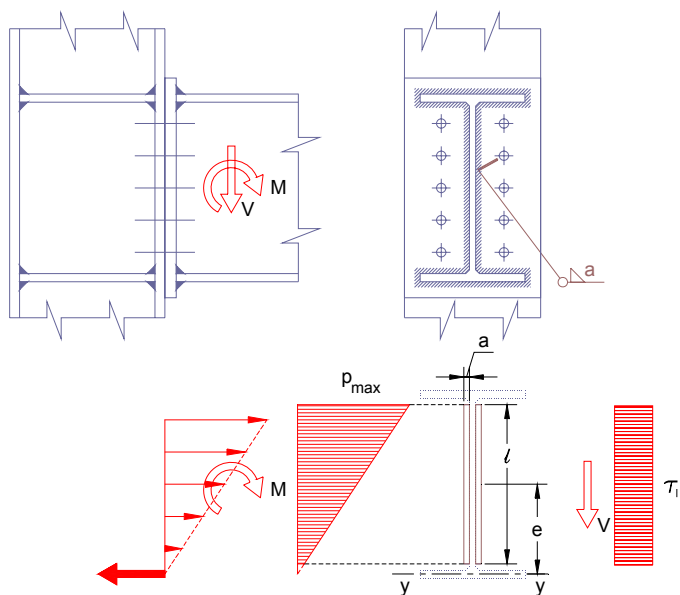
Az előbbihez hasonló módon járhatunk el I szelvényű oszlopok és gerendák nyomatékkal és nyíróerővel terhelt sarokvarratos kapcsolatánál. (3.53. ábra) A nyomatékot az övlemezek, a nyíróerőt pedig a gerinclemez bekötő varrataira hárítjuk, az egyes varratszakaszokon pedig egyenletes feszültségeloszlást tételezünk fel.



3.53. ábra. I szelvényű oszlop és gerenda sarokvarratos kapcsolata

Hiba lenne azonban az előbbi elveket követni a 3.54. ábra szerinti homloklemez-es kapcsolat varratainak számításánál. Egyszerűsítő feltételezéseket csak úgy tehetünk, hogy a feltételezett feszültségeloszlás hasonlítson az alapanyagban a varratok mentén kialakult feszültségek eloszlásához. A homloklemez-es kapcsolatban a nyomatékot a csavarokban keletkező húzóerők és az alsó övlemez mentén fellépő nyomóerő veszi fel. A 3.54. ábra szerinti kialakításnál a homloklemez gyakorlatilag csak a gerinclemez-

re ad át húzóerőt, ezért a gerinclemezben a csavarerők változását követő feszültségeloszlást szabad csak feltételezni. A nyíróerő teljes egészében itt is a gerinclemez bekötő varratára hárítható.



3.54. ábra. Homloklemezre csatlakozó varrat vizsgálata

A gerinclemez bekötő varratában a nyomatékból származó feszültséget a (dolgozó) varratképnek a feltételezett elfordulási tengelyre felírt tehetetlenségi nyomatéka segítségével lehet kiszámítani. A varratok tehetetlenségi nyomatékát úgy lehet felírni, hogy a varratméret síkját a varratgyök körül a kapcsolat síkjába forgatva képzeljük.

A 3.54. ábra jelöléseivel a varratkép dolgozó részének tehetetlenségi nyomatéka az $y - y$ tengelyre:

$$I_{w,y} = 2 \cdot a \cdot \frac{\ell^3}{12} + 2 \cdot a \cdot \ell \cdot e^2.$$

A varratban a nyomatékból keletkező legnagyobb feszültség:

$$p_{max} = \frac{M}{I_{w,y}} \cdot \left(e + \frac{\ell}{2} \right);$$

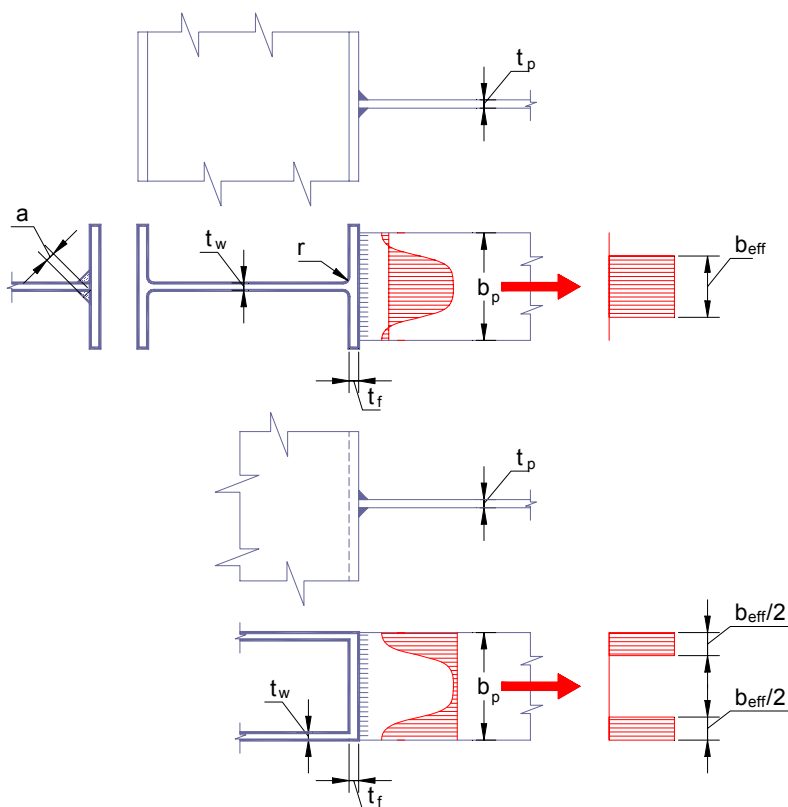
$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{p_{max}}{\sqrt{2}}.$$

A nyíróerőből ébredő feszültség:

$$\tau_{\parallel} = \frac{V}{2 \cdot a \cdot \ell} \cdot$$

Kötések merevítetlen övekhez

Ha egy lemezt hegesztett varrattal kapcsolunk egy I, H vagy zárt szelvény *merevítetlen* övéhez, az öv a terhelés hatására deformálódik és a varratban a feszültségeloszlás egyenetlen lesz. A varrat lényegesen nagyobb terhelést kap a gerinc közelében, mint attól távolabb.



3.55. ábra. Merevítetlen övhöz csatlakozó lemezek dolgozó szélessége

Az *Eurocode 3* előírása szerint a merevítetlen övek és a kapcsolt elem között kialakuló T-kötésnél egy redukált dolgozó szélességet (b_{eff}) szabad csak számításba venni az alapanyagban is és a varratban is. A redukált szé-

lességen egyenletes feszültségeloszlás tételezhető fel, de olyan varratot kell tervezni, hogy az képes legyen átadni a teljes szélességű csatlakozó lemez tervezési ellenállásának ($b_p \cdot t_p \cdot f_{y,p} / \gamma_{M0}$) megfelelő erőt.

I vagy H szelvényekre a dolgozó szélesség:

$$b_{eff} = t_w + 2 \cdot s + 7 \cdot k \cdot t_f,$$

ahol

$$k = \frac{t_f \cdot f_{y,f}}{t_p \cdot f_{y,p}} \quad \text{de } k \leq 1;$$

$f_{y,f}$ az övlemez folyási feszültsége,

$f_{y,p}$ az övlemezhez hegesztett lemez folyási feszültsége.

Az s méret a következők szerint veendő számításba:

- hengerelt I vagy H szelvénynél: $s = r$,
- hegesztett szelvényeknél: $s = \sqrt{2} \cdot a$.

Ki kell elégíteni azt a feltételt is, hogy a csatlakozó lemez dolgozó szélességgel számított törési ellenállása ne legyen kisebb, mint a teljes szélességgel számított folyási ellenállás:

$$b_{eff} \cdot f_{u,p} \geq b_p \cdot f_{y,p},$$

ahol

$f_{u,p}$ a csatlakozó lemez szakítószilárdsága.

Ha az előbbi feltétel nem teljesül, akkor az övlemezt merevíteni kell.

Egyéb keresztmetszetek – mint például zárt- vagy U szelvények – esetén a b_{eff} dolgozó szélesség az alábbiak szerint számítható:

$$b_{eff} = 2 \cdot t_w + 5 \cdot t_f, \text{ de } b_{eff} \leq 2 \cdot t_w + 5 \cdot k \cdot t_f.$$

Mellékletek

Az Eurocode 3 jelölésrendszere

Latin nagybetűk

A	rendkívüli hatás
A	terület
B	csavarerő
C	teherbírás; rögzített érték; tényező
D	károsodás (fáradási kármegállapítás)
E	rugalmassági tényező
E	a hatások eredménye
F	hatás
F	erő
G	állandó hatás
G	nyírási rugalmassági tényező
H	teljes vízszintes teher vagy reakció
I	tehetetlenségi nyomaték (inercianyomaték)
K	merevségi tényező (I/L)
L	hossz; támaszköz; hálózati hossz
M	nyomaték általában
M	hajlítónyomaték
N	normálerő
Q	változó hatás
R	ellenállás; reakció
S	belső erők és nyomatékok (d vagy k alsó indexszel)
S	merevség (nyírási, elfordulási ... v, j ... alsó indexszel)
T	csavarónyomaték, hőmérséklet
V	nyíróerő; teljes függőleges teher vagy reakció
W	keresztmetszeti modulus
X	anyagjellemző értéke

Görög nagybetűk

Δ	különbség valamiben (a fő jelölőbetű előtt áll)
---	---

Latin kisbetűk

a	távolság, geometriai adat
a	varratméret (keresztmetszeti méret)
a	területarány
b	szélesség
c	távolság, túlnyúlás
d	átmérő, mélység, átló hossza
e	külpontosság (excentricitás); súlyponti tengely eltolódása
e	széltávolság; végtávolság
f	anyag szilárdsága
g	rés, hézag, húzott mező szélessége
h	magasság
i	inerciasugár; egész szám
k	együttható, tényező
ℓ (írott l)	hosszúság; fesztáv; kihajlási hossz
n	normálerők vagy normálfeszültségek aránya
n	valamiknek a száma
p	osztás; osztástávolság; köz
q	egyenletesen megoszló erő
r	sugár, lekerekítési sugár
s	eltolt osztás, távolság
t	vastagság
uu	„erős” tengely
vv	„gyenge” tengely
xx, yy, zz	derékszögű tengelyek

Görög kisbetűk

α (alfa)	szög, arány, tényező
α	lineáris hőtágulási együttható
β (beta)	szög, arány, tényező
γ (gamma)	osztott biztonsági tényező; arány
δ (delta)	lehajlás, alakváltozás

ε	(epszilon)	fajlagos nyúlás, együtttható = $\sqrt{235 / f_y}$ (f_y N/mm ² -ben)
η	(eta)	együtttható
θ	(teta)	szög; hajlás
λ	(lambda)	karcsúsági tényező, arány
μ	(mű)	megcsúszási tényező, tényező
ν	(nű)	POISSON-tényező
ρ	(ró)	csökkentő tényező, sűrűség
σ	(szigma)	normálfeszültség
τ	(tau)	nyírófeszültség
φ	(fi)	elfordulás, hajlásszög, arány
χ	(khí)	csökkentő tényező (kihajláshoz)
ψ	(pszí)	feszültségek aránya, csökkentő tényező
Ψ		változó hatások reprezentatív értékének meghatározásához szolgáló tényező

Alsó indexek

A	rendkívüli; terület
a	átlag (folyáshatár)
a, b ...	első, második ... változat
b	alap (folyáshatár)
b	palástnyomás, kihajlás vagy horpadás
b	csavar, gerenda, heveder
C	teherbírás, következmények
c	keresztmetszet
c	beton, oszlop
com	nyomás
cr	kritikus
d	tervezési, átló
dst	stabilitáscsökkentő
E	a hatások eredménye (d-vel vagy k-val)
E	EULER
eff	hatékony

e	hatékony (további indexekkel)
eℓ (írott ℓ)	rugalmas
ext	külső
f	öv, kötőelem
g	bruttó, teljes (gyengítetlen)
G	állandó hatás
h	magasság; magasabb
h	vízszintes
i	belső
inf	alsó
i, j, k	indexek (számmal helyettesítendő)
j	illesztés (kötés, kapcsolat, csomópont)
k	jellemző
ℓ	alsó
L	hossz
LT	kifordulási
M	anyag
M	hajlítónyomatékra utaló
m	hajlító; átlag
max	maximum
min	minimum
N	normálerőre utaló
n	normál
net	gyengített (hasznos)
nom	névleges
o	lyuk; kezdeti kiinduló; külső
o	helyi horpadás
o	zérus nyomatéki pont
ov	átfedés, átlapolás
p	lemez, csukló, béléslemez
p	előterhelésre, előfeszítésre utaló
p	részleges, kigombolódási nyírás
pℓ	képlékeny

Q	változó hatás
R	ellenállás
r	szegecs, megtámasztás
rep	reprezentatív
S	belső erőre, belső nyomatékra utaló
s	húzófeszültségre, húzásra redukált keresztmetszetre utaló
s	csúszás; emelet
s	merev, merevítő
ser	használhatósági
stb	stabilizáló
sup	felső
t (vagy ten)	húzás, húzó
t (vagy tor)	csavaró
u	keresztmetszet nagyobb inerciájú főtengelye
u	törési, törő (szakítószilárdság)
ult	teherbírási határállapot
V	nyíróerőre utaló
v	nyírás, függőleges
v	keresztmetszet kisebb inerciájú főtengelye
vec	vektoriális hatások
w	gerinclemez; hegesztés; torzulás
x	az elem hossztengelye, megnyúlás
y	folyás
y	keresztmetszeti tengely
z	keresztmetszeti tengely
σ	normálfeszültség
τ	nyírófeszültség
\perp	merőleges
	párhuzamos

A szerkezeti acélok fizikai anyagjellemzőinek tervezési értéke	
rugalmassági modulus	$E = 210\,000\text{ N/mm}^2$
nyírási rugalmassági modulus	$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)}$
POISSON-tényező	$\nu = 0,3$
lineáris hőtágulási együttható	$\alpha = 1,2 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{C}^\circ}$
sűrűség	$\rho = 7850\text{ kg/m}^3$

Szerkezeti acélok folyáshatára és szakítószilárdsága				
Szabvány és acélminőség	Vastagság t [mm] *			
	$t \leq 40\text{ mm}$		$40\text{ mm} < t \leq 80\text{ mm}$	
	f_y [N/mm ²]	f_u [N/mm ²]	f_y [N/mm ²]	f_u [N/mm ²]
EN 1025				
S 235	235	360	215	340
S 275	275	430	255	410
S 355	355	510	335	490
S 275 N/NL	275	390	255	370
S 355 N/NL	355	490	335	470
S 420 N/NL	420	540	390	520
S 460 N/NL	460	570	430	550
S 275 M/ML	275	380	255 ¹⁾	360 ¹⁾
S 355 M/ML	355	470	335 ¹⁾	450 ¹⁾
S 420 M/ML	420	520	390 ¹⁾	500 ¹⁾
S 460 M/ML	460	550	430 ¹⁾	530 ¹⁾
S 460 Q/QL/QL1	460	570	440	550
S 235 W	235	360	215	340
S 355 W	355	510	335	490

* : t az elem névleges vastagsága
¹⁾ : síklemez esetén $40\text{ mm} < t \leq 63\text{ mm}$

Csavarok szakítószilárdsága és névleges folyáshatára							
csavarminőség	4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8	10.9
f_{ub} [N/mm ²]	400	400	500	500	600	800	1000
f_{yb} [N/mm ²]	240	320	300	400	480	640	900

Csavarok ellenállásának számításához szükséges mennyiségek				
csavar	d átmérő [mm]	d_0 furatátmérő [mm]	A szárkereszt- metszet [mm ²]	A_s feszültség- keresztmet- szet [mm ²]
M12	12	13	113	84,3
M14	14	15	154	115
M16	16	18	201	157
M18	18	20	254	192
M20	20	22	314	245
M22	22	24	380	303
M24	24	26	452	353
M27	27	30	573	459
M30	30	33	707	561