

A.21. Nyomatéknak ellenálló kapcsolatok

A.21.1. A kapcsolatok jellemzése

A.21.1.1. Általános elvek

A keretek tervezése során igen fontos lépést jelent a kapcsolatok elfordulási viselkedésének jellemzése, azaz a kapcsolat merevségére, ellenállására és alakváltozási képességére vonatkozó mechanikai jellemzők meghatározása.

Ennek során alapvetően három módszert lehet követni:

- a kísérleti módszert;
- a numerikus módszert;
- az analitikus módszert.

Gyakorlati szempontból a tervező egyedül az analitikus eljárással képes megoldani a feladatot. Olyan analitikus módszer szerint kell tehát eljárni, amelynek segítségével a kapcsolati alkotóelemek mechanikai és geometriai jellemzőinek ismeretében a kapcsolat viselkedése előre jelezhető.

A következőkben áttekintünk egy általánosan használható analitikus eljárást, az úgynevezett **komponensmódszert**. A módszer alkalmazható az acél- és együttdolgozó szerkezetek összes kapcsolattípusa esetén, függetlenül attól, hogy milyen a kapcsolat elrendezése, milyenek a terhelési viszonyok (normálerő és/vagy hajlító nyomaték stb.) és milyen szelvényűek az összekapcsolandó szerkezeti elemek. A módszert az „A nyomatéknak ellenálló kapcsolatok viselkedésének jellemzése. Gyakorlati módszerek” című fejezetben fogjuk használni, ahol áttekintjük, hogyan lehet a hajlító nyomatékkal és nyíróerővel terhelt kapcsolatok mechanikai jellemzőit meghatározni.

A.21.1.2. A komponensmódszer alapjai

A komponensmódszer alkalmazása során a kapcsolatot *egyedi alapvető alkotóelemek* együttesének tekintjük. A *A.21.2.b ábrán* látható kapcsolat (hajlító nyomatékkal terhelt túlnyúló homloklemezkes kapcsolat) esetén például a következő alkotóelemeket különböztetjük meg:

A nyomott zónában:

- az oszlop nyomott gerinclemezét;
- a gerenda nyomott öv- és gerinclemezét;

a húzott zónában:

- az oszlop húzott gerinclemezét;
- az oszlop hajlított övlemezét;
- a húzott csavarokat;
- a hajlított homloklemezét;
- a gerenda húzott gerinclemezét;

a nyírt zónában:

az oszlop nyírt gerincpaneljét.

-

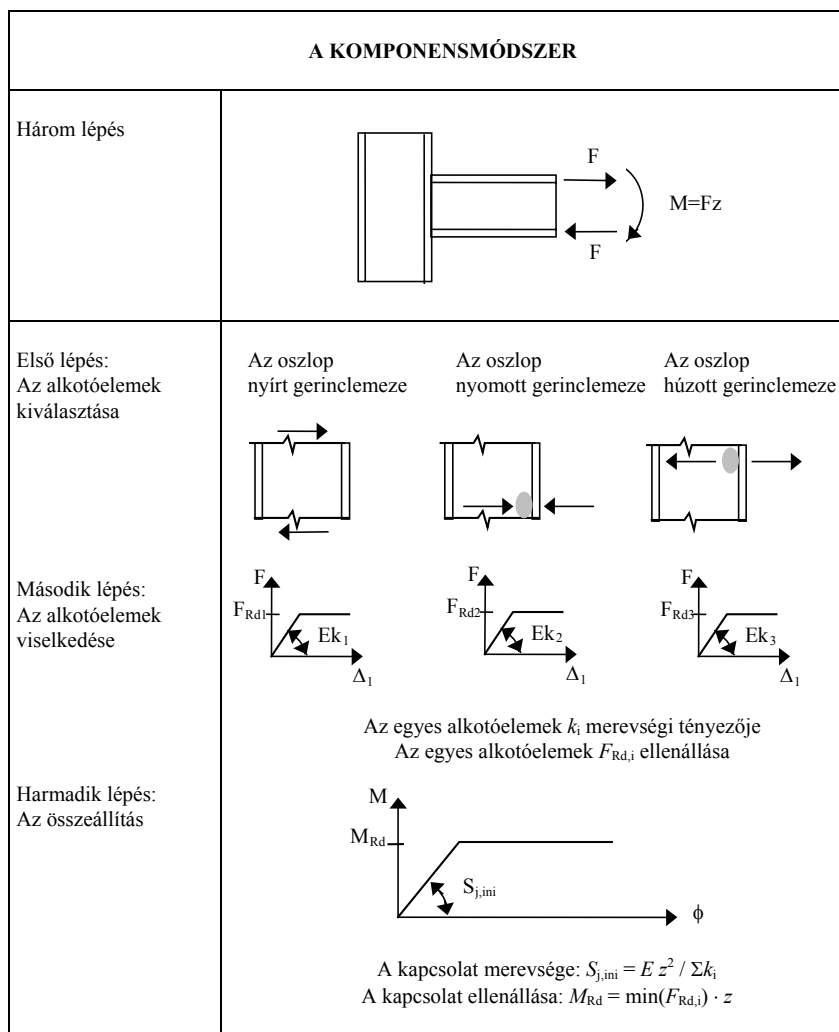
Az egyes alapvető alkotóelemek mindegyike rendelkezik ellenállással és merevséggel a rá működő húzással, nyomással vagy nyírással szemben. Az oszlop gerinclemezére egyszerre működik nyomás, húzás és nyírás. Az

egyazon alkotóelemre egyszerre működő különböző igénybevételek nyilvánvalóan a feszültségek kölcsönhatását okozhatják, aminek következtében csökkenhet az egyes alkotóelemek ellenállása.

A komponensmódszer alkalmazása során a következő lépéseket kell végrehajtani:

- a vizsgált kapcsolat aktív alkotóelemeinek kiválasztása;
- az egyes alkotóelemek merevségi, illetve szilárdsági jellemzőinek meghatározása (egyes jellemzők – a kezdeti merevség, a tervezési ellenállás stb. meghatározása, illetőleg a teljes alakváltozási görbe felvétele);
- az egyes alkotóelemek összeállítása és a teljes kapcsolat merevségi, illetve szilárdsági jellemzőinek meghatározása (egyes jellemzők – a kezdeti merevség, a tervezési ellenállás stb. meghatározása, a teljes alakváltozási görbe felvétele).

Az A.21.1. ábra egy hegesztett oszlop–gerenda kapcsolat esetére bemutatja a komponensmódszer alapelveit.



A.21.1. ábra: A komponensmódszer alkalmazása hegesztett kapcsolatra

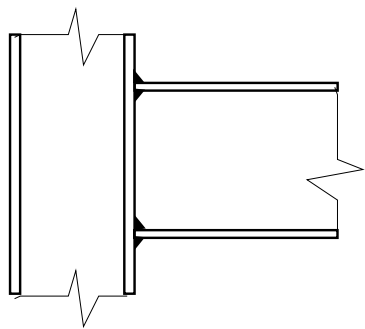
Az összeállítás tulajdonképpen azt jelenti, hogy az egyes kapcsolati alkotóelemek viselkedéséből származtatni kell a teljes kapcsolat viselkedését. Ehhez az szükséges, hogy a kapcsolatra működő erőket előzetesen a kapcsolati alkotóelemekre működő belső erőkbe osszuk szét oly módon, hogy a belső erők egyensúlyban legyenek a külső erőkkel.

Az Eurocode 3 1.8.rész az analitikus összeállítási eljárást a kapcsolatok kezdeti merevségének és tervezési nyomatéki ellenállásának meghatározására ismerteti. E két alapvető jellemző alapján a tervező meg tudja határozni a kapcsolatnak az adott típusú szerkezeti analízishez szükséges tervezési nyomaték–elfordulás jelleggörbáját (*A.21.4–A.21.6. ábra*).

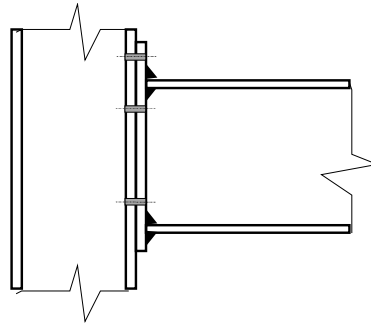
A komponensmódszer alkalmazásához megfelelő ismeretekkel kell rendelkezünk a kapcsolat alkotóelemeinek viselkedéséről. Az Eurocode 3 által tárgyalt kapcsolóelemeket az *A.21.1. táblázat* sorolja fel. Ezen alkotóelemekből a gyakorlatban előforduló kapcsolati elrendezések jelentős része felépíthető; ezek az alkotóelemek elegendőnek tekinthetők a gyakorlatban előforduló hajlított oszlop–gerenda kapcsolatok és gerendaillesztések mechanikai jellemzőinek meghatározásához. Ilyen kapcsolatokra mutat példát a *A.21.2. ábra*.

Az alkalmazási terület azonban bizonyos megfontolások alapján kibővül, a részleteket a TÁBLÁZATOK tartalmazzák:

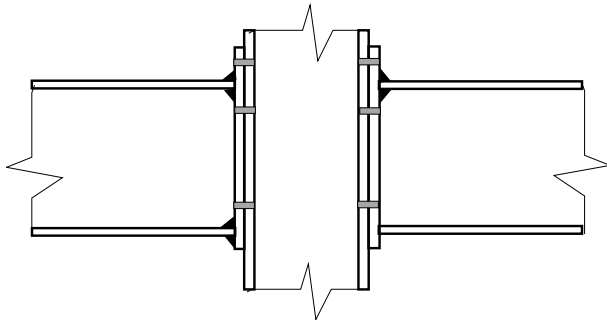
- a hajlító nyomatékkal (és nyíróerővel), valamint normálerővel terhelt kapcsolatokra;
- az egyidejű hajlító nyomatékkal, nyíróerővel és normálerővel terhelt oszloptalpakra, ahol a következő alkotóelemeket is be kell vezetni:
 - a nyomott beton alaptestet;
 - a különleges geometriájú homloklemez (talplemezt);
 - a húzott lehorgonyzó csavarokat;
 - az altalaj és az alapozás közötti érintkezési felületet.



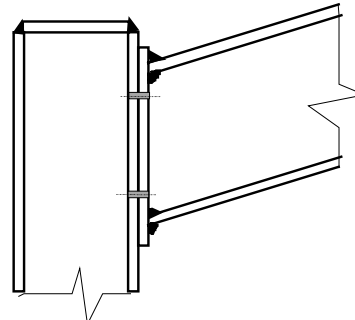
(a) Hegesztett kapcsolat



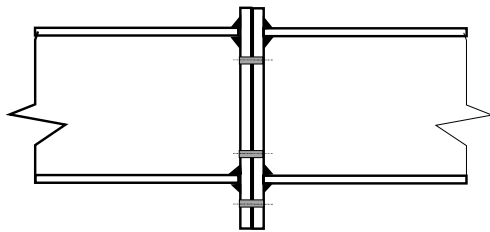
(b) Túlnyúló homloklemez csavarozott kapcsolat



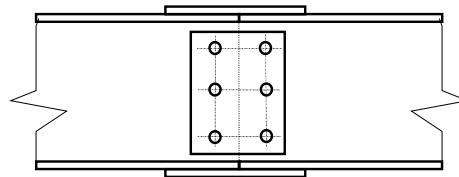
(c) Két túlnyúló homloklemez csavarozott kapcsolat (kétoldali elrendezés)



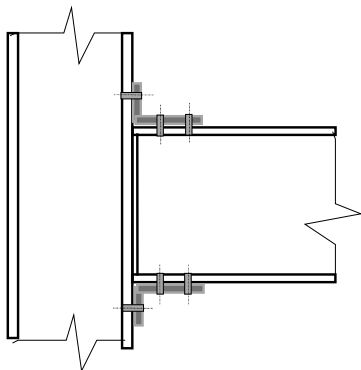
(d) Nem túlnyúló homloklemez csavarozott kapcsolat



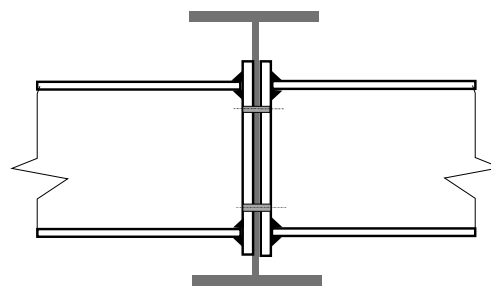
(e) Homloklemez gerendaillesztés



(f) Hevederlemez gerendaillesztés



(g) Övbekötő szögacélos csavarozott kapcsolat



(h) Két gerenda–gerenda kapcsolat (kétoldali elrendezés)

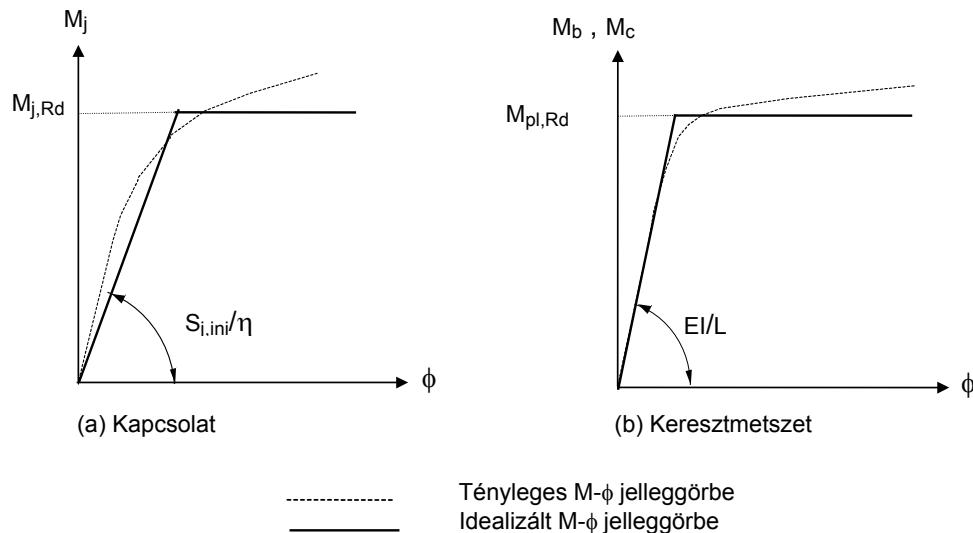
A.21.2. ábra: Példák az Eurocode 3 által tárgyalt kapcsolatokra

A.21.1. táblázat: Az Eurocode 3 által tárgyalt kapcsolati alkotóelemek

Sorszám	Kapcsolati alkotóelem	
1.	Oszlop nyírt gerincpanelje	
2.	Oszlop nyomott gerinclemeze	
3.	Gerenda nyomott gerinc- és övlemeze	
4.	Oszlop hajlított övlemeze	
5.	Oszlop húzott gerinclemeze	
6.	Hajlított homloklemez	
7.	Gerenda húzott gerinclemeze	
8.	Hajlított övbekötő szögacél	
9.	Húzott csavar	
10.	Nyírt csavar	
11.	Palástnyomásra működő (a gerenda övlemeze, az oszlop övlemeze, a homloklemezre vagy az övbekötő szögacélra feltámaszkodó) csavar	
12.	Húzott vagy nyomott lemez	

A.21.2. A kapcsolati viselkedés idealizálása

A kapcsolat tényleges viselkedését leíró csavarrugó nemlineáris viselkedése nehézségeket okoz a mindennapos tervezési gyakorlat számára. A nyomaték–elfordulás jelleggörbék azonban „idealizálhatók” anélkül, hogy a számítási pontosság jelentősen csorbulna. Az idealizálás egyik legegyszerűbb módszere a rugalmas–tökéletesen képlékeny viszony (A.21.3.a ábra). E modell nagy előnye, hogy hasonlít a hajlított elemek keresztmetszeteinek leírására hagyományosan használt jelleggörbéhez (A.21.3.b ábra).



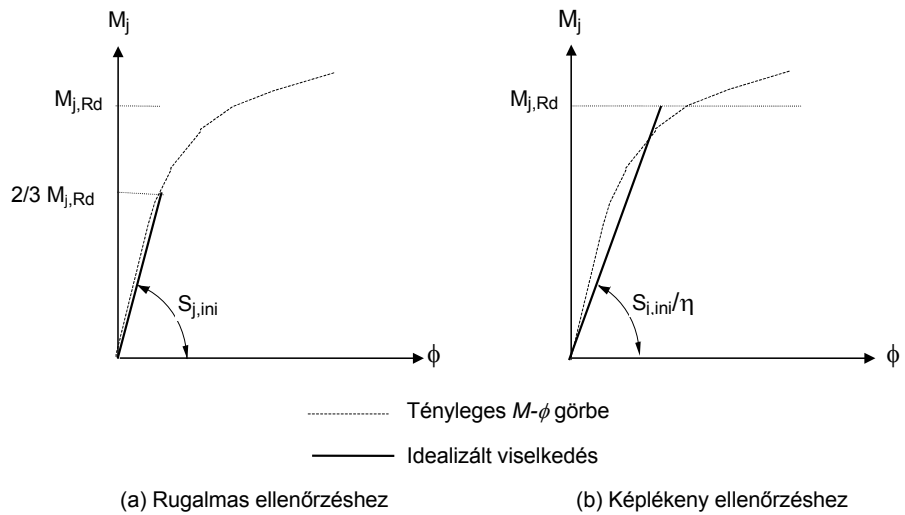
A.21.3. ábra: Bilineáris nyomaték–elfordulás jelleggörbék

A folyási platóhoz tartozó $M_{j,Rd}$ nyomatékot az Eurocode 3 a kapcsolat *tervezési nyomatéki ellenállásának* nevezi, és tulajdonképpen a kapcsolat *pszeudoképlékeny nyomatéki ellenállásának* tekinthető. Ez azt jelenti, hogy a felkeményedés és a membránhatás következményeit elhanyagoljuk – e jelenségekből származnak a A.21.3. ábrán látható M – ϕ jelleggörbe és az idealizált viselkedés folyási platója közötti eltérések.

A továbbiakban az állandó, $S_{j,ini} / \eta$ nagyságú elfordulási merevséggel foglalkozunk.

Az M – ϕ jelleggörbe idealizálására valójában számos lehetőség kínálkozik. Hogy melyiket választjuk, az attól függ, hogy a keret analízisét milyen módszerrel kívánjuk elvégezni.

- *Rugalmas idealizálás a rugalmas analízishez* (A.21.4. ábra). Ilyenkor a kapcsolat legfontosabb jellemzője az állandó nagyságú elfordulási merevség. Az Eurocode 3 (átdolgozott) J melléklete szerint két lehetőség között választhatunk:
 - *A kapcsolat ellenállásának rugalmas ellenőrzése* (A.21.4.a ábra): az állandó merevséget az $S_{j,ini}$ kezdeti merevség értékére vesszük fel; a keret analízisének elvégzése után ellenőrizni kell, hogy a kapcsolatban kialakuló M_{sd} nyomatéki igénybevétel kisebb-e a kapcsolat legnagyobb rugalmas nyomatéki ellenállásánál, amely a szabvány szerint $2/3 M_{j,Rd}$.
 - *A kapcsolat ellenállásának képlékeny ellenőrzése* (A.21.4.b ábra): az állandó merevséget egy fiktív merevségértékre vesszük fel, amely a kezdeti merevség és az $M_{j,Rd}$ nyomatékhoz tartozó húrmerevség közé esik. Ezt a merevséget a kezdeti merevség egy η paraméterrel való osztásával származtatjuk. Ez az idealizálás mindaddig érvényes, amíg a kapcsolatban ébredő nyomatéki igénybevétel nem haladja meg az $M_{j,Rd}$ értéket. Az η paramétert a A.21.2. táblázat szerint kell felvenni.

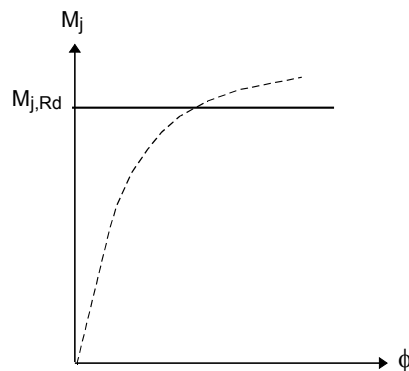


A.21.4. ábra: Lineáris $M-\phi$ görbék

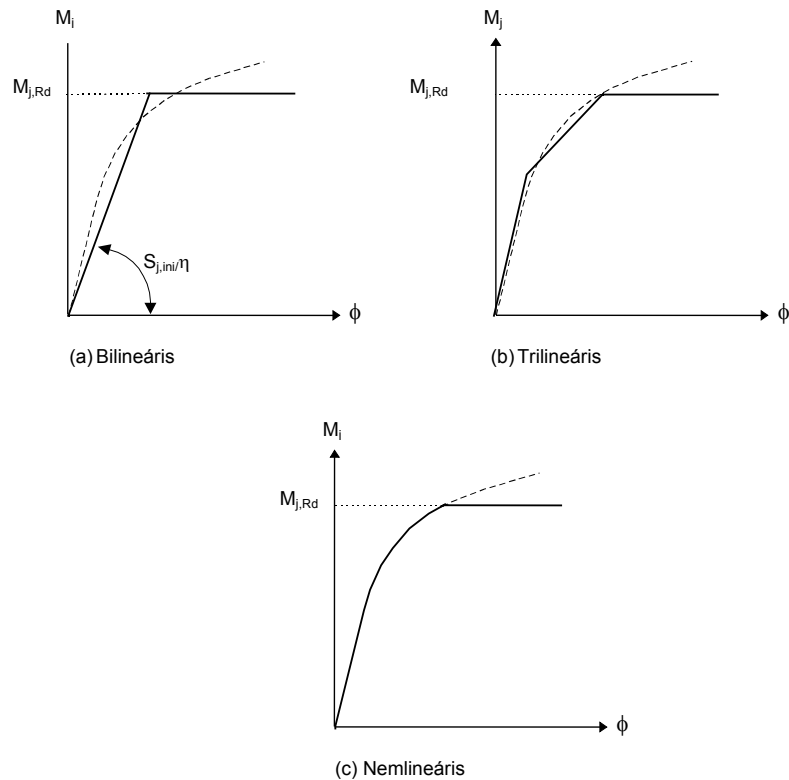
A.21.2. táblázat: Az η paraméter értékei

Kapcsolat típusa	Oszlop–gerenda kapcsolat	Egyéb
Hegesztett	2	3
Csavarozott homloklemez	2	3
Csavarozott övbekötő szögacélos	2	3,5

- *Merev-képlékeny idealizálás a merev-képlékeny analízishez (A.21.5. ábra).* Ekkor csak a kapcsolat $M_{j,Rd}$ nyomatéki ellenállására van szükség. Mivel a kapcsolatokban képlékeny csuklók alakulhatnak ki, és ezekben koncentrált elfordulások következhetnek be, ellenőrizni kell, hogy a kapcsolat rendelkezik-e kellő elfordulási képességgel.



A.21.5. ábra: Merev-képlékeny $M-\phi$ görbék



A.21.6. ábra: Nemlineáris $M-\phi$ görbék

- *Nemlineáris idealizálás a rugalmas–képlékeny analízishez (A.21.6. ábra).* Ebben az esetben a merevségi és a teherbírasi jellemzők azonos fontosságúak. Az idealizált jelleggörbe a bi- vagy trilineáris jelleggörbékétől a teljes mértékben nemlineáris görbéig tetszőleges lehet. A kapcsolat elfordulási képességét ilyenkor is ellenőrizni kell abban az esetben, ha várható, hogy a kapcsolatokban képlékeny csuklók, ezekben pedig koncentrált elfordulások fognak kialakulni.

A.21.3. A kapcsolatok merevségi és teherbírasi jellemzőinek meghatározása az EC 3 1.8 rész szerint

A már említett komponensmódszer alkalmazása során három lépésben határozzuk meg a kapcsolatok merevségi és teherbírasi jellemzőit. Az első lépésben azonosítjuk a kapcsolatot alkotó alkotóelemeket. Ezután meghatározzuk az egyes alkotóelemek merevségi, illetve teherbírasi jellemzőit.

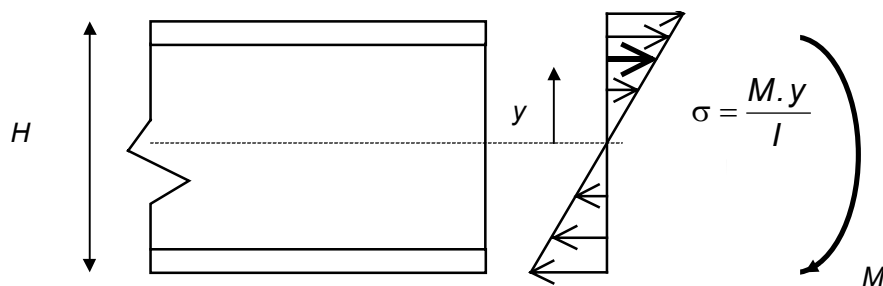
A módszer alkalmazásának harmadik és egyben utolsó lépése a kapcsolat összeállítási eljárásának elvégzése. Mint a nevéből is látszik, ez a művelet azt jelenti, hogy az egyedi alkotóelemeket oly módon kombináljuk, hogy kiadódjanak a teljes kapcsolat mechanikai jellemzői. Az alkotóelemek jellemzői és a kapcsolat jellemzői közötti viszony alapját az a művelet adja, amelyet általában „a kapcsolati erők szétosztásának” szokás nevezni. Ez utóbbi annak meghatározását jelenti, hogy a kapcsolatra működő adott külső erők esetén milyen erők működnek a kapcsolat egyes alkotóelemeiben. Az egyes alkotóelemekben működő erőket szokás „belső erőknek” nevezni.

Ez a fogalom nemcsak kapcsolatok, hanem keresztmetszetek esetén is értelmezhető. A továbbiakban bemutatjuk a két eset közötti párhuzamosságot. A gerendák és az oszlopok keresztmetszeteiben a belső erők (igénybevételek) megoszlását azért kell meghatározni, hogy megtudjuk, a keresztmetszet milyen elfordulási merevséggel, illetve milyen hajlítási, nyírási, csavarási, illetve nyomási vagy húzási ellenállással rendelkezik. Ennek megfelelően a következőkben a „keresztmetszet” szó egyaránt jelentheti oszlop vagy gerenda keresztmetszetét, vagy akár a kapcsolatot.

A belső erők olyan ésszerű megoszlását kell meghatározni, amely elméleti szinten kielégíti a következő követelményeket:

- a belső erők és a keresztmetszetre működő külső erők egyensúlyban legyenek egymással;
- a keresztmetszetek egyes részei (kapcsolat esetén a kapcsolat alkotóelemei) között az alakváltozások kompatibilisek legyenek;
- a keresztmetszet egyes részei legyenek képesek viselni és továbbítani a rájuk működő belső erőket;
- a keresztmetszet egyes részei legyenek képesek a belső erők megoszlása szerint meghatározott alakváltozásokra.

Hajlító nyomatékkal terhelt H vagy I keresztmetszetű gerenda- vagy oszlopkeresztmetszet esetén a belső erők (ez esetben a feszültségek) megoszlásáról a rugalmas tartományban általában feltételezzük, hogy követik a *Bernoulli–Navier-féle* hipotézist (A.21.7. ábra).

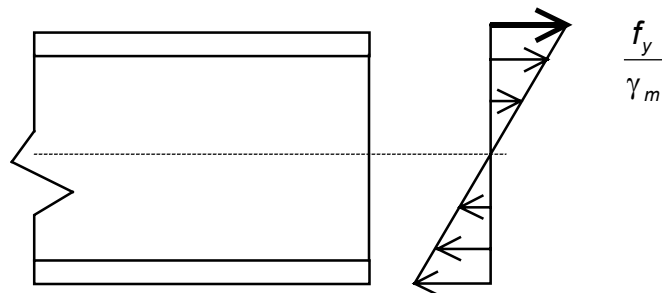


A.21.7. ábra: A belső erők (itt: feszültségek) rugalmas megoszlása hajlított gerenda-keresztmetszetben (I az inercianyomatékot jelöli).
(a) gerenda; (b) belső feszültségek; (c) külső erő

Amikor a legnagyobb belső feszültség (az $y = \pm H/2$ koordinátájú pontban) eléri az f_y folyáshatárnak egy γ_M biztonsági tényezővel csökkentett értékét, akkor a keresztmetszetre működő nyomaték megadja a keresztmetszet rugalmas nyomatéki ellenállását (A.21.8. ábra). A tervezési nyomatéki ellenállás a következőképpen fejezhető ki:

$$M_{Rd} = \frac{I}{H/2} \frac{f_y}{\gamma_M} = W f_y / \gamma_M, \quad (1)$$

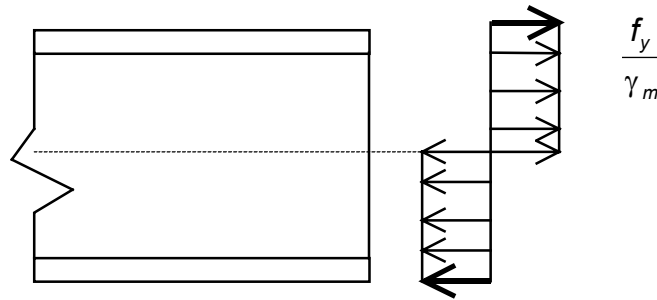
ahol W a hajlított keresztmetszet rugalmas keresztmetszeti modulusa.



A.21.8. ábra: A keresztmetszet legnagyobb rugalmas tervezési nyomatéki ellenállásához tartozó belső erők (itt: feszültségek)

A keresztmetszet képlékeny állapotba kerüléséből származó többletterhbírást az *A.21.9. ábrán* vázolt feszültségeloszlás révén aknázhatjuk ki. A tervezési ellenállás ekkor:

$$M_{Rd} = W_{pl} f_y / \gamma_M, \quad (2)$$



A.21.9. ábra: A keresztmetszet képlékeny tervezési nyomatóki ellenállásához tartozó belső erők (itt: feszültségek)

ahol W_{pl} a hajlított keresztmetszet képlékeny keresztmetszeti modulusa.

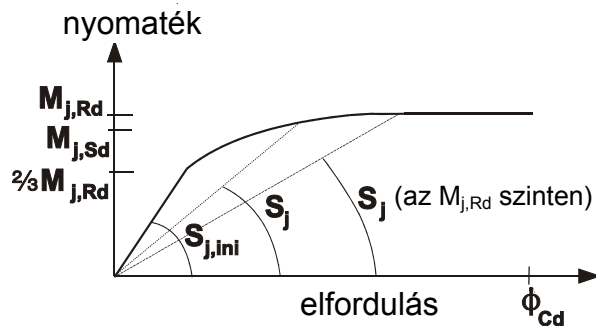
Az előzőekben vázolt feszültségeloszlások esetén a keresztmetszet szomszédos szálainak megnyúlása, illetve megrövidülése közötti kompatibilitást a *Bernoulli–Navier*-hipotézis szerint biztosítottuk. Mind az *A.21.8. ábra* szerinti rugalmas, mind pedig az *A.21.9. ábra* szerinti képlékeny feszültségeloszlás esetén a belső erők egyensúlyban vannak a külső erőkkel, és kielégítik a képlékenységi feltételt ($\sigma \leq f_y / \gamma_M$). A vázolt feszültségeloszlások tehát megfelelnek az előzőekben megadott négy követelmény közül az első háromnak.

A rugalmas vagy a képlékeny nyomatóki ellenállás eléréséhez a keresztmetszetet alkotó elemi szálaknak megfelelő alakváltozási képességgel kell rendelkezniük rugalmas feszültségeloszlás esetén ahhoz, hogy kialakuljon a folyáshatárnak megfelelő feszültség, képlékeny feszültségeloszlás esetén pedig ahhoz, hogy kialakuljon a folyáshatárnak megfelelő feszültség, és bekövetkezhessen a szomszédos szálak közötti feszültségek képlékeny átrendeződése. Ez azt jelenti, hogy a nyomatóki ellenállásnak megfelelő nyomatók elérése előtt a nyomott részen egyetlen alkotó lemezben sem következhet be lemezhorpadás, a húzott részen pedig nem következhet be az anyag szakadása. A szabványok általában konkrét szabályokat tartalmaznak, amelyek segítségével kizárható, hogy a tervező túlbecsülje a keresztmetszet ellenállását e jelenségek miatt. Ezek a szabályok egyben biztosítják az előzőekben említett négy követelmény közül a negyedik teljesülését.

H és I szelvények esetén szokás, hogy a keresztmetszetre működő nyomatókot felbontjuk egy, az övlemezek felezővonalainak magasságában működő erőpárra. Az erőpárt alkotó erők intenzitásának határt szab az övlemezek húzási, illetve nyomási ellenállása, természetesen alkalmas módon figyelembe véve a nyomott övlemezben bekövetkező esetleges horpadást is. A gerinclemezzől, amelynek hajlítási ellenállását elhanyagoljuk, általában feltételezzük, hogy csak a nyíróerő felvételében játszik szerepet. Ennek megfelelően az előzőekben említett négy követelmény közül három teljesül; a negyedik (a kompatibilitási feltétel) azonban nem. Ez az úgynevezett „statikai” módszer bizonyíthatóan alsó korlátot ad a keresztmetszet ellenállására, és általában jóval egyszerűbb, mint a kompatibilitást is figyelembe vevő eljárások.

A tartószerkezetek kapcsolataiban a belső erők megosztását hasonlóan kell elvégezni az előzőekben gerendák és oszlopok keresztmetszeteinek esetére bemutatott eljáráshoz. A következőkben az Eurocode 3 1.8. rész eljárását ismertetjük, amely olyan oszlop–gerenda kapcsolatokra és gerendaillesztésekre érvényes, amelyekben a gerendára (gerendákra) csak hajlító nyomatók és nyíróerő hat. Az egyszerűség és a "kézi" számítás igényeinek szem előtt tartásával két különböző eljárást ismertetünk, amelyek közül az első a kezdeti merevség, a második pedig a nyomatóki ellenállás meghatározására alkalmas.

Az Eurocode 3 szerint a hajlított kapcsolatok viselkedését alapvetően e két mennyiség, a rugalmas kezdeti merevség és a tervezési ellenállás határozza meg. E két érték alapján származtatható a teljes $M-\phi$ jelleggörbe (*A.21.10. ábra*).



A.21.10. ábra: A nemlineáris $M-\phi$ jelleggörbe

Amennyiben a nemlineáris $M-\phi$ jelleggörbét az elfordulási képesség (ϕ_{Cd}) nem korlátozza, a görbe három részből áll. Az M_{Rd} nyomatéki ellenállás $2/3$ -áig a görbe lineárisan rugalmasnak tekinthető az úgynevezett kezdeti merevségnek ($S_{j,ini}$) megfelelő merevséggel. A $2/3 M_{Rd}$ és M_{Rd} közötti tartományban a görbe nemlineáris. A jelleggörbe az M_{Rd} nyomaték elérése után vízszintes folyási platóban folytatódik.

A modell feltételezi, hogy az $S_{j,ini}$ kezdeti merevség és a folyási plató (az $M = M_{Rd}$ egyenletű szakasz) kezdetéhez tartozó S_j húrmerevség aránya állandó. Homloklemez és hegesztett kapcsolatok esetén ez az arány 3, övbekötő szögacélos kapcsolatok esetén pedig 3,5.

A $2/3 M_{Rd}$ és M_{Rd} közötti nemlineáris szakasz alakját a következő egyenlet szolgáltatja:

$$S_j = \frac{S_{j,ini}}{\left(\frac{1,5M_{Sd}}{M_{Rd}}\right)^\psi}, \quad (3)$$

ahol homloklemez és hegesztett kapcsolatokra $\psi = 2,7$; övbekötő szögacélos kapcsolatokra pedig $\psi = 3,1$. Az összefüggés tehát az S_j érték M_{Sd} értéktől való függését határozza meg.

A.21.3.1. A kapcsolat merevségének meghatározása

Mivel az EC 3. 1.8.rész az úgynevezett komponensmódszer szerinti eljárás alapján alapul, a kapcsolat elfordulási viselkedését az egyes alkotóelemek mechanikai jellemzőiből kell származtatni. Ennek az az előnye, hogy bármely kapcsolat mechanikai jellemzői meghatározhatók oly módon, hogy alkotóelemekre bontjuk. Az elemekre bontásra vonatkozóan az 1.8. rész közvetlenül alkalmazható szabályokat ad meg a homloklemez, a hegesztett és az övbekötő szögacélos kapcsolatok esetére. Az A.21.1. táblázat áttekintést ad az egyes kapcsolattípusok kezdeti merevségének meghatározása során figyelembe veendő alkotóelemekről.

A.21.1. táblázat: Különböző kapcsolattípusok alkotóelemeinek áttekintése

Alkotóelem	Sorszám	Homlok- lemez	Hegesztett	Övbekötő szögacélos
Oszlop nyírt gerincpanelje	1	x	x	x
Oszlop nyomott gerinclemeze	2	x	x	x
Oszlop hajlított övlemeze	3	x		x
Oszlop húzott gerinclemeze	4	x	x	x
Hajlított homloklemez	5	x		
Hajlított övbekötő szögacél	6			x
Húzott csavarok	7	x		x
Nyírt csavarok	8			x
Palástnyomásra működő csavarok	9			x

A modell feltételezi, hogy három alkotóelem (a gerenda nyomott és húzott övlemeze, a gerenda húzott gerinclemeze, valamint a húzott és nyomott lemezek) alakváltozásait a hajlított gerenda alakváltozásai már

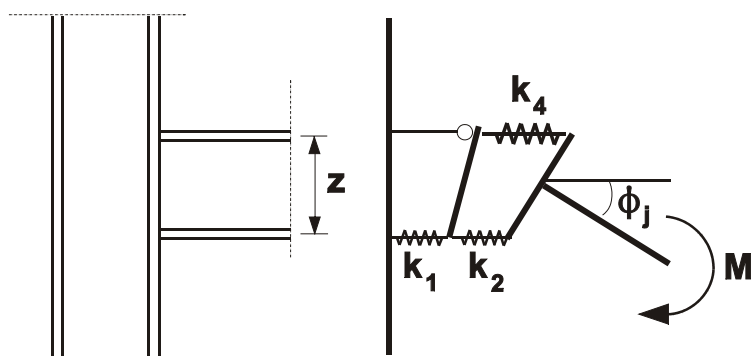
tartalmazzák. Ennek megfelelően ezek az alkotóelemek nem járulnak hozzá a kapcsolat hajlékonyságához. Ugyanez érvényes az esetleges kiékelésekre is.

Az $S_{j,ini}$ kezdeti merevséget az alkotóelemek rugalmas merevségéből származtatjuk. Az egyes alkotóelemek rugalmas viselkedését rugókkal modellezzük. E rugó erő–alakváltozás viselkedését a következő összefüggés adja:

$$F_i = k_i E \Delta_i, \quad (4)$$

ahol F_i az i -edik rugóban ébredő erő, k_i az i -edik alkotóelem merevségi tényezője, E a rugalmassági modulus, Δ_i pedig az i -edik rugó alakváltozása.

A kapcsolatot alkotó rugókat ezek után egy rugómodellben vesszük figyelembe. Az *A.21.11. ábra* példaképpen egy merevítetlen hegesztett oszlop–gerenda kapcsolat rugómodelljét mutatja.



A.21.11. ábra: Merevítetlen hegesztett kapcsolat rugómodellje

Az egyes rugókban F nagyságú erő működik. A rugómodellre működő M nyomaték egyenlő $F \cdot z$ -vel, ahol z a húzófeszültségek eredője (amely hegesztett kapcsolatokban a gerenda felső övlemezének súlypontjában van) és a nyomófeszültségek eredője (amely hegesztett kapcsolatokban a gerenda alsó övlemezének súlypontjában van) közötti távolság. A kapcsolat ϕ elfordulása a következő képletből számítható:

$$\phi = \frac{\Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_4}{z},$$

vagy másképpen:

$$S_{j,ini} = \frac{M}{\phi} = \frac{Fz}{\frac{\sum \Delta_i}{z}} = \frac{Fz^2}{E \sum \frac{1}{k_i}} = \frac{Ez^2}{\sum \frac{1}{k_i}}. \quad (5)$$

Ugyanez a képlet érvényes az egyetlen húzott csavarsorral rendelkező homloklemez-es kapcsolatokra és az övbekötő szögacélos kapcsolatokra is, azzal az eltéréssel, hogy az *A.21.1. táblázat* értelmében mindegyik esetben más-más alkotóelemeket kell figyelembe venni.

Az *A.21.12. ábra* azon homloklemez-es kapcsolatok rugómodelljét mutatja, amelyekben egynél több húzott csavarsor van. A modell feltételezi, hogy az egyes csavarsorokban az alakváltozás egyenesen arányos a nyomófeszültségek középpontjától mért távolsággal, de az egyes csavarsorokban lévő rugalmas csavarerők függenek az alkotóelemek merevségétől. Az *A.21.12.b ábra* azt szemlélteti, hogy a 3., 4., 5. és 7. alkotóelemek $k_{i,r}$ alakváltozásai alapján csavarsoronként egy $k_{eff,r}$ egyenértékű merevséggel rendelkező helyettesítő rugót kell felvenni (ahol r a csavarsor indexe). A következő lépésben az *A.21.12.c ábrának* megfelelően ezeket a csavarsoronkénti helyettesítő rugókat egyetlen, a z erőkarnek megfelelő magasságban elhelyezkedő egyenértékű rugóval kell helyettesíteni. E rugó merevségi tényezője k_{eq} ; ez a k_{eq} egyenértékű rugómerevség azután közvetlenül alkalmazható az (5) képletben. A $k_{eff,r}$ és a k_{eq} rugómerevségeket a következő összefüggésekből kell meghatározni:

$$k_{eff,r} = \frac{1}{\sum_i \frac{1}{k_{i,r}}}; \quad (6)$$

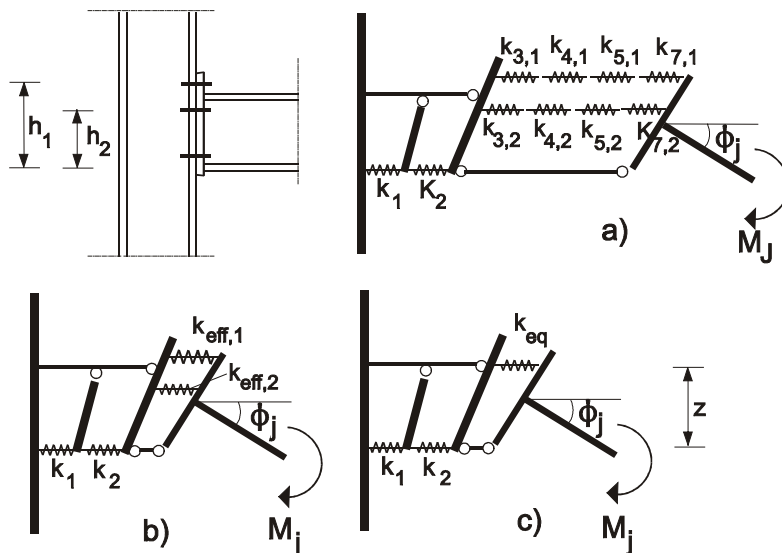
$$z = \frac{\sum_r k_{eff,r} h_r^2}{\sum_r k_{eff,r} h_r}; \quad (7)$$

$$k_{equ} = \frac{\sum_r h_{eff,r} h_r}{z}. \quad (8)$$

Ezek a képletek az A.21.12. ábra vázlataiból származtathatók. A képletek azon alapulnak, hogy az A.21.12.a-c ábrákon látható három rendszer nyomaték–elfordulás viselkedése megegyezik. További feltétel, hogy az alsó merev rúdban fellépő nyomóerő mindhárom rendszerben ugyanakkora.

A merevségi modellben:

- a belső erők egyensúlyban vannak a hajlító nyomatékkal;
- az alakváltozások kompatibilitását a gerenda keresztmetszetének végtelen nagy keresztirányú merevsége biztosítja;
- a képlékenységi feltétel teljesül mindaddig, amíg a rugóerők nem érik el a rugók rugalmas ellenállását;



A.21.12. ábra: Egynél több húzott csavarsorral rendelkező homloklemez-eszlop-gerenda kapcsolatok rugómodellje

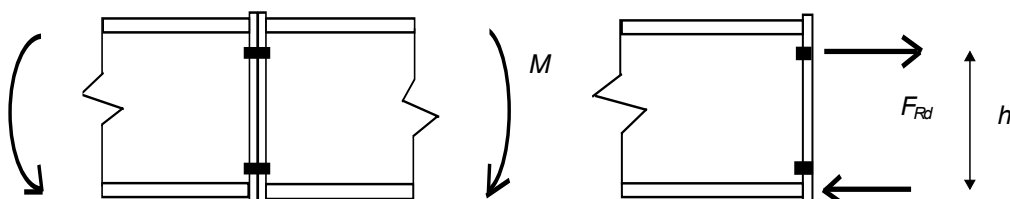
- az Eurocode 3 1.8. rész szerinti kapcsolati összetevőkben a rugalmas tartományban várhatóan nem lesz mértékadó a rugók alakváltozási képességére vonatkozó követelmény.

Az Eurocode 3 1.8. rész szerinti, a kezdeti merevség meghatározására szolgáló eljárás tehát kielégíti az előzőekben a kapcsolaton belüli erők megoszlására megfogalmazott négy követelmény mindegyikét, tehát elméletileg „pontos” megoldásnak tekinthető.

A.21.3.2.A kapcsolat ellenállásának meghatározása

Az Eurocode 3 1.8. rész szerinti, a kapcsolat ellenállásának meghatározására szolgáló eljárás a kapcsolat úgynevezett tervezési ellenállásának meghatározását teszi lehetővé. Az egyszerűség és a követhetőség szem előtt tartásával nem általánosan mutatjuk be az eljárást, hanem konkrétan, a nem túlnyúló homloklemezekkel kialakított gerendailestések példáján keresztül.

Az *A.21.13. ábrán* vázolt kapcsolatban a belső erők megoszlását egyszerű meghatározni: a nyomóerő a gerenda övlemezének súlypontjában adódik át, a húzóerő pedig a felső csavarsor magasságában. Az alsó csavarsor figyelembevételével adódó többletteherbírást általában elhanyagoljuk, mert a teljes nyomatéki ellenálláshoz képest nem jelentős nagyságú (kicsi az erőkar).



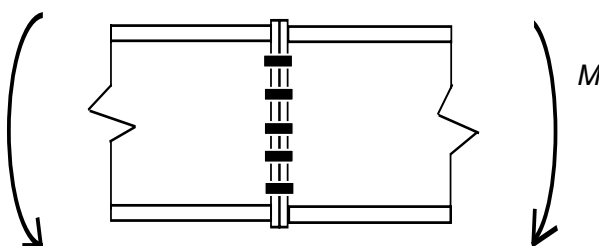
A.21.13. ábra: Egy húzott csavarsorral rendelkező kapcsolat

A kapcsolat M_{Rd} tervezési ellenállása a leggyengébb alkotóelem F_{Rd} ellenállásából számítható, amely a következők egyike: (a) a gerenda nyomott gerinclemeze; (b) a gerenda húzott gerinclemeze; (c) a hajlított homloklemez vagy (d) a húzott csavarok. Az utóbbi két alkotóelem (a homloklemez és a csavarok) ellenállását az Eurocode 3 1.8. rész részletesen ismertetett úgynevezett T idom-modell alapján határozzuk meg. A nyomatéki ellenállást a következő összefüggés adja:

$$M_{Rd} = F_{Rd} z, \quad (9)$$

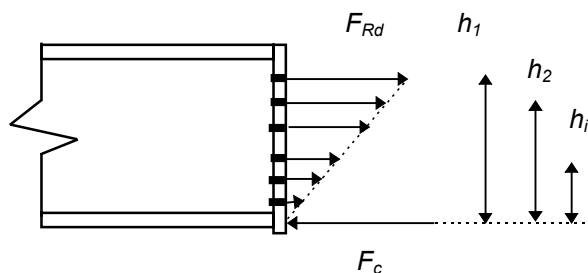
ahol $z = h$ az erőkar.

Ha a húzott zónában egynél több csavarsor helyezkedik el (*A.21.14. ábra*), akkor a belső erők megoszlása valamivel bonyolultabb.



A.21.14. ábra: Egynél több húzott csavarsorral rendelkező kapcsolat

Először tételezzük fel, hogy a kapcsolatban lévő homloklemez vastagsága jóval nagyobb a csavarok átmérőjénél (*A.21.15. ábra*). Ilyenkor az egyes csavarok között az erők eloszlása egyenesen arányos a nyomófeszültségek középpontjától mért távolsággal. A húzóerőkkel egyensúlyt tartó F_c nyomóerő a gerenda alsó övlemezének súlypontjában működik. Az áttekinthetőség kedvéért ezt az erőt csak az *A.21.15. ábrán* tüntetjük fel, az ezt követő ábrákon nem.



A.21.15. ábra: Vastag homloklemezrel kialakított kapcsolat

A kapcsolat M_{Rd} ellenállása akkor merül ki, amikor a legnagyobb igénybevételnek kitett csavarsorban (a valóságban a nyomófeszültségek középpontjától legtávolabb elhelyezkedő csavarsorban) az összes csavarerő eléri a $2B_{t,Rd}$ értéket.

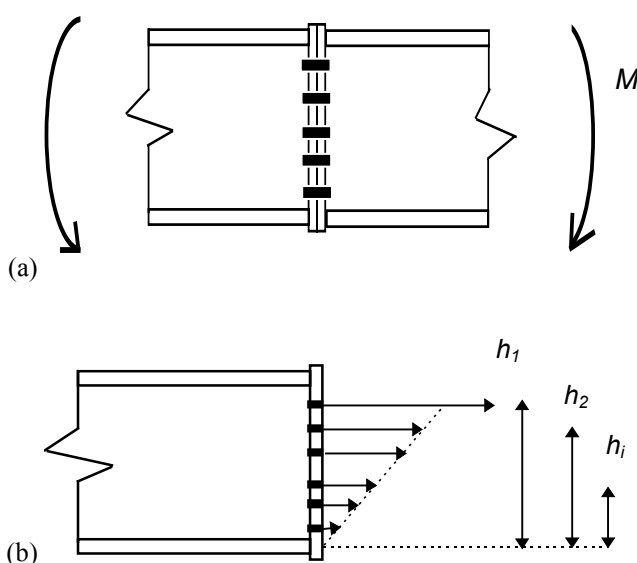
A húzott csavarok csekély alakváltozási képessége miatt az egyes csavarsorok között az erők nem rendeződnek át.

Feltételezzük, hogy a gerenda nyomott övlemeze és gerinclemeze elegendő ellenállással rendelkezik az F_c erő felvételére. Feltételezzük azt is, hogy a kapcsolat ellenállása szempontjából a gerenda gerinclemezeének húzási ellenállása sem mértékadó. A kapcsolat M_{Rd} tervezési nyomatéki ellenállását a következő összefüggés szolgáltatja (A.21.15. ábra):

$$M_{Rd} = \frac{F_{Rd}}{h_1} \sum h_i^2 \quad (10)$$

Ha a homloklemez vékonyabb, a belső erők eloszlása nagyobb figyelmet igényel. Ha a kapcsolatra kis nyomóerő működik, az erők a csavarsorok között a csavarsorok egymáshoz viszonyított merevségének megfelelően oszlanak meg. A csavarsorok merevségét a valóságban a csavarsor környezetében elhelyezkedő homloklemez rész határozza meg. Az A.21.16. ábra konkrét esetében a legfelső csavarsorhoz nagyobb merevség tartozik, mert a gerendának a homloklemezhez hegesztett öv- és gerinclemeze merevíti a homloklemezt.

Nagyobb merevsége miatt a legfelső csavarsor nagyobb erő átadására képes, mint a lejjebb elhelyezkedők (A.21.16.b ábra).



A.21.16. ábra: Vékony homloklemezrel kialakított kapcsolat.
(a) Elrendezés; (b) A belső erők megoszlása a terhelés kezdetén

Az Eurocode 3 1.8. rész feltételezi, hogy először a felső csavarsorban lévő erő éri el a csavarsor húzási ellenállását. A vizsgált esetben ez a feltételezés kézenfekvő, de valószínűleg kevésbé indokolt más esetekben, különösen túlnyúló homloklemezes csavarozott kapcsolatok esetén, amelyekben általában a második – a húzott övlemez alatti – csavarsor húzási ellenállása merül ki.

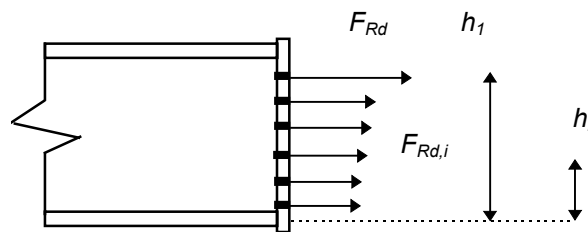
A legfelső csavarsor tervezési ellenállását a következő alkotóelemek valamelyike határozhatja meg: (a) csak a csavarok; (b) csak a homloklemez; (c) a csavarok és a homloklemez együtt vagy (d) a gerenda húzott gerinclemeze. Ha a tönkremeneteli mód olyan, hogy a tönkremenetelt nagy alakváltozások kísérik, akkor a csavarsorok között felléphet az erők átrendeződése – amikor a legfelső csavarsor tervezési ellenállása kimerül, akkor a kapcsolatra működő nyomaték növelésével jelentkező többlet-igénybevételt a lejjebb elhelyezkedő csavarok viselik (a második, aztán a harmadik stb.), addig, amíg ezeknek is egyenként ki nem merül a tervezési ellenállásuk.

A tönkremenetel háromféleképpen következhet be:

- (i) Ha elegendő a csavarsorok alakváltozási képessége, akkor a belső erők átrendeződése valamennyi csavarsorra kiterjed. Ilyenkor „teljes átrendeződésről” beszélünk, és azt mondjuk, hogy a belső erők eloszlása „képlékeny”. Az M_{Rd} tervezési nyomatéki ellenállást a következő összefüggés szolgáltatja (A.21.17. ábra):

$$M_{Rd} = \sum_i F_{Rd,i} h_i \quad (11)$$

Az $F_{Rd,i}$ képlékeny erők a tönkremeneteli módnak (csavar, homloklemez, csavar és homloklemez együtt, gerenda gerinclemeze) megfelelően minden csavarsorban eltérőek lehetnek.



A.21.17. ábra: A belső erők képlékeny megoszlása

Az Eurocode 3 szerint a csavarsor akkor rendelkezik megfelelő alakváltozási képességgel a belső erők képlékeny átrendeződéséhez, ha

- $F_{Rd,i}$ -t a gerenda húzott gerinclemeze tönkremenetele határozza meg; vagy
- $F_{Rd,i}$ -t a csavarok–homloklemez együttes tönkremenetele (beleértve csak a csavarok vagy csak a homloklemez tönkremenetelét is) határozza meg, és

$$F_{Rd,i} \leq 1,9 B_{t,Rd}$$

- (ii) Az erők képlékeny átrendeződése megszakad, mert az a csavarsor, amelynek utoljára merült ki a tervezési ellenállása, nem rendelkezik megfelelő alakváltozási képességgel ($F_{Rd,k} > 1,9 B_{t,Rd}$ és a tönkremenetelt a csavarok vagy a csavar–homloklemez együttes tönkremenetele okozza).

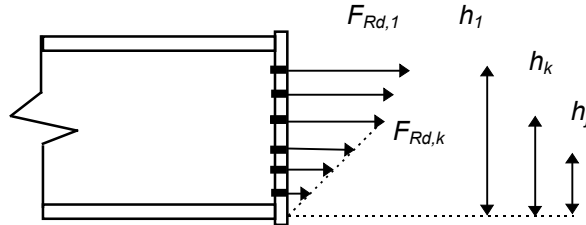
A k -adiknál lejjebb elhelyezkedő csavarsorokban az erők megoszlása ilyenkor egyenesen arányos a nyomófeszültségek középpontjától mért távolsággal (A.21.18. ábra).

A tervezési nyomatéki ellenállás:

$$M_{Rd} = \sum_{i=1,k} F_{Rd,i} h_i + \frac{F_{Rd,k}}{h_k} \sum_{j=k+1,n} h_j^2, \quad (12)$$

ahol n az összes csavarsor száma, k pedig annak a csavarsornak a száma, amelynek nem elegendő az alakváltozási képessége.

Ilyen esetben a csavarerők megoszlását rugalmas-képlékenynek nevezzük.



A.21.18. ábra: A belső erők rugalmas-képlékeny megoszlása

- (iii) A belső erők képlékeny vagy rugalmas-képlékeny átrendeződése megszakad, mert az F_c nyomóerő eléri a gerenda nyomott öv- és gerinclemezeinek tervezési ellenállását. Az M_{Rd} ellenállást az (11) és (12) összefüggésekhez hasonló képletekből számítjuk, de természetesen csak korlátozott számú csavarsor figyelembevételével. Annyi csavarsort veszünk figyelembe, amennyire teljesül a következő feltétel:

$$\sum_{\ell=1,m} F_{\ell} = F_{c,Rd},$$

ahol m az utolsó, még húzóerőt közvetítő csavarsor sorszám, F_{ℓ} az ℓ -edik csavarsorban működő húzóerő, $F_{c,Rd}$ pedig a gerenda nyomott öv- és gerinclemezeinek tervezési ellenállása.

Az előzőekben felvázolt alapelvek hasonló módon alkalmazhatók oszlop-gerenda kapcsolatokra is. Akárcsak gerendaillesztések esetén, a kapcsolat M_{Rd} tervezési nyomatéki ellenállását várhatóan a következő alkotóelemek ellenállása határozza meg:

- a hajlított homloklemezé;
- a húzott csavaroké;
- a gerenda húzott gerinclemezeé;
- a gerenda nyomott öv- és gerinclemezeé,

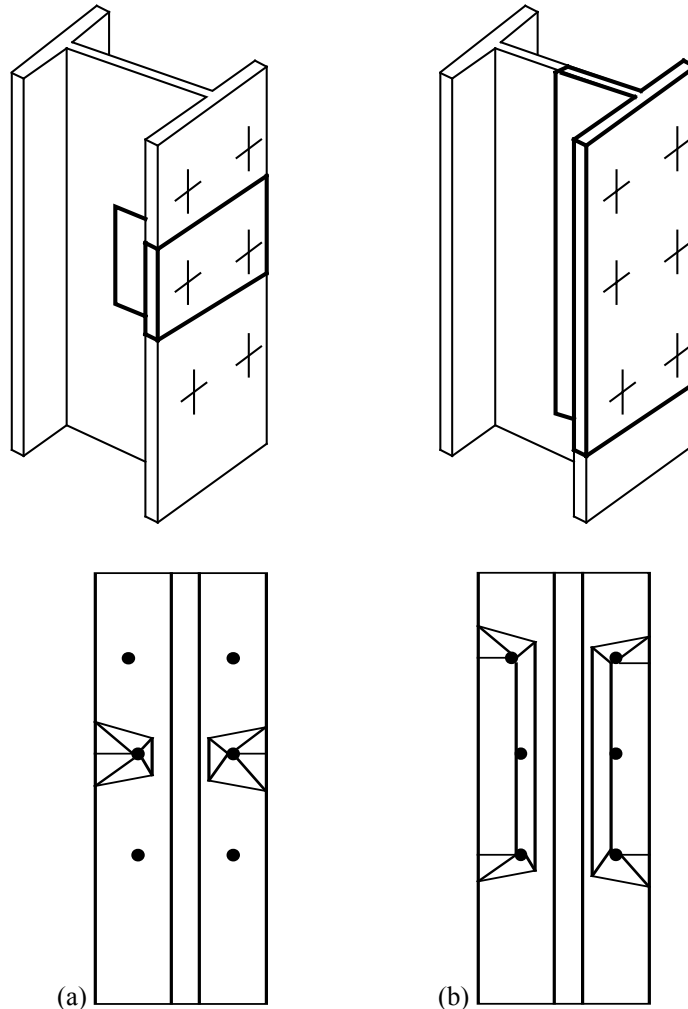
de egyes esetekben a következő alkotóelemek is meghatározó szerepet játszhatnak:

- az oszlop húzott gerinclemeze;
- az oszlop hajlított övlemeze;
- a oszlop nyomott gerinclemeze;
- az oszlop nyírt gerincpanelje.

Az Eurocode 3 1.8. rész valamennyi felsorolt alkotóelemre tartalmazza a tervezési ellenállás meghatározásának módját. Az 1.8. rész tartalmaz továbbá egy példát is, amely bemutatja, hogyan kell egy összetettebb esetben (több húzott csavarsorral rendelkező csavarozott homloklemezés kapcsolatok esetében) szétosztani a belső erőket.

Ez a példa rávilágít az egyedi és a csoportos folyási mechanizmusok szerepére is. Ha egymás melletti csavarsorokat húzóerővel terhelünk, akkor az összekapcsolt lemezekben (homlok- vagy övlemezben) különböző folyási mechanizmusok alakulhatnak ki:

- egyedi mechanizmusok (A.21.19.a ábra), amelyek akkor alakulnak ki, ha a csavarsorok egymástól kellően távol vannak;
- csoportos mechanizmusok (A.21.19.b ábra), amelyek egynél több csavarsort tartalmaznak.



A.21.19. ábra: Képlékeny mechanizmusok: (a) egyedi; (b) csoportos mechanizmus

Valamennyi ilyen mechanizmushoz konkrét, a szabványban és a TÁBLÁZATOK-ban megadott ellenállásérték tartozik.

A belső erők megoszlásának meghatározásához az Eurocode 3 azt ajánlja, hogy egy adott csavarsorban soha ne vegyünk figyelembe:

- nagyobb erőt, mint amekkorát abban az esetben tudna viselni, ha egyedül kellene továbbítania az összes húzóerőt (egyedi ellenállás);
- akkora erőt, amely meghaladja a csavart tartalmazó csavarcsoport ellenállását.

Az eljárás meglehetősen hosszadalmas, de a „A nyomatéknak ellenálló kapcsolatok viselkedésének jellemzése. Gyakorlati módszerek” című fejezet bemutat olyan számítási eszközöket, amelyek közvetlenül tervezés céljára is felhasználhatók.