



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

A réteges szerkezetű fatermékek tartószerkezeti alkalmazása és számítása

TDK dolgozat

Engedy Anna

5. évfolyam



Konzulens:

Dr. Armuth Miklós

egyetemi docens

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Építésztechnológiai Kar, Szilárdságtani és Tartószerkezeti Tanszék

2011. november 16.

Tartalomjegyzék

1. A dolgozat témája	3
2. Anyagismeret: a fa, mint alapanyag.....	4
2.1. Anyagismeret – történeti áttekintés	4
2.2. Az anizotrópia általános jellemzői	6
2.3. Anizotrópia a természetben	7
2.4. A faanyag felépítése – biológiailag kialakult anizotrópia	8
2.4.1. Kémiai összetétel.....	8
2.4.2. A sejtfal szerkezete.....	9
2.4.3. A fatest szerkezetének felépítése.....	11
2.4.4. A természetes faanyag modellje.....	13
3. Szerkezeti fa. Szilárdsági osztályok.....	14
3.1. A szabvány	14
3.2. Szimbólumok és rövidítések	16
3.3. Fa populációk osztályba sorolása	17
3.3.1. Válogatás.....	17
3.3.2. Besorolás	17
4. Réteges szerkezetű tartószerkezeti fatermékek.....	18
4.1. A réteges szerkezetű táblák fajtái. Elnevezések	18
4.2. A termékek felépítése, előállítása.....	19
4.3. Gyártók, termékek, alkalmazási területek, általános adatok.....	22
5. Szilárdságtani számítások. Teherbírás	25
5.1. Számítási módszerek	25
5.2. Finnforest Leno	26
5.3. Finnforest Kerto-Q	28
5.4. KLH Massivholz	29
5.4.1. “ γ -módszer”.....	30
5.4.2. Nyírási alakváltozások	32
6. Fa tartószerkezetek tűzterherre való méretezése	36
6.1. A fa, mint éghető anyag	36
6.2. Tervezési célok tűz esetén.....	38
6.3. Méretezés tűzterherre	39
6.3.1. Alapfogalmak, jelölések.....	39
6.3.2. Anyagtulajdonságok, ellenállások tervezési értéke tüzesetre	41
6.3.3. Terhek tervezési értéke tüzesetre.....	42
6.3.4. Beégési mélység.....	43
6.3.5. Kezdetben védett elemek beégése	44

6.3.5.1. Beégési sebességek	44
6.3.5.2. A beégés kezdete: t_{ch}	45
6.3.5.3. A védőburkolat tönkremenetelének időpontja: t_f	45
6.3.6. Méretezési eljárások	46
6.3.6.1. Csökkentett keresztmetszet alapján történő méretezés	46
6.4. Számítási példa – Finnforest Leno	47
6.5. KLH Massivholz tüzeseti teherbírása	50
7. További kutatási irányok	51
<i>Ábrajegyzék</i>	53
Irodalomjegyzék.....	55
1. MELLÉKLET	57
1.1. Teherbírési és tüzeseti értékek összehasonlítása, közbenső födém, $T = 30$ min	57
1.2. Teherbírési és tüzeseti értékek összehasonlítása, közbenső födém, $T = 45$ min	57
1.3. Teherbírési és tüzeseti értékek összehasonlítása, közbenső födém, $T = 60$ min	58
1.4. Teherbírési és tüzeseti értékek összehasonlítása, zárófödém, $T = 30$ min.....	58
1.5. Teherbírési és tüzeseti értékek összehasonlítása, zárófödém, $T = 45$ min.....	59
1.6. Teherbírési és tüzeseti értékek összehasonlítása, zárófödém, $T = 60$ min.....	59
2. MELLÉKLET	60
2.1. Finnforest Leno teherbírési számítása	60
2.2. Finnforest Leno tüzeseti teherbírásának számítása zárófödém esetén, $T=30$ min	60

1. A dolgozat témája

A dolgozat témája a napjainkban egyre szélesebb körben elterjedő réteges szerkezetű fatermék, amely több néven is ismeretes a szakma előtt (Kreuzlagenholz, Brettsperrholz, Dickholz, Mehrschichtige, Massivholzplatte, Cross-laminated timber). Ennek numerikus vizsgálatával foglalkozom, elsősorban szilárdsági szempontból. A vizsgálat néhány forgalmazásban levő termék példáján keresztül történik. A gyártók alkalmazási segédleteit összevetem az alakváltozási követelményekből, és egyéb szilárdságtani ismeretekből levezetett számításokból kapott eredményekkel, figyelembe véve a réteges felépítés sajátosságait, és a lassú alakváltozások hatását. Az így kapott eredményekből következtetéseket vonok le a kiindulási alapanyag minőségét, valamint a gyártók számítási módszereit illetően. A keresztmetszetek síktól eltérő deformációjának lehetőségét is vizsgálom, illetve azt, hogy ezt milyen módszerekkel lehet figyelembe venni a számítás során. A rétegek egymáshoz képest bekövetkező relatív elmozdulásait sem lehet figyelmen kívül hagyni. Következtetéseket vonok le, hogy e sok bizonytalanságot a gyártók hol vették figyelembe az alkalmazási útmutatókban.

Áttekintem a tárgyalt fatermékek lehetséges történeti előzményeit, a tárgyalt termékek gyártási technológiáját, alkalmazási területeit is.

A természetes fa felépítésének és anyagmodelljének ismerete segítséget nyújt a réteges fatermékek viselkedésének megértésében. A mikro szinten jelentkező inhomogenitás és anizotróp tulajdonságok jelentősen befolyásolják az anyagtulajdonságokat makro szinten is. A termékek réteges szerkesztése, párhuzamba állítható a faanyag hasonló szerkezetével. Hasonlóság fedezhető fel a keresztmetszeten belüli feszültségeloszlásokban is.

A fa tartószerkezetek alkalmazásának egyik korlátja az éghetőség. Ezért foglalkozom a geometriai és anyagjellemzőik alapján a termékek tűzterherre való méretezésével. Az ide vonatkozó szabvány ismertetése után az egyik termékkel részletesebben – számítás szintjén – is foglalkozom. Mivel tömörek a szerkezetek, a szabvány útmutatása jól alkalmazható.

2. Anyagismeret: a fa, mint alapanyag

2.1. Anyagismeret – történeti áttekintés

Napjainkban a műszaki területeken egyre nagyobb igény mutatkozik a felhasznált anyagok viselkedésének mélyreható megismerésére. Az egyes anyagok másképp reagálnak a mechanikai és klimatikus igénybevételekre, más és más szilárdsági, merevségi, alakíthatósági, alaktartósági, stabilitási, kifáradási, öregedési, illetve klímaállósági tulajdonságok jellemzik őket.

A szerkezeti elemekben lejátszódó folyamatok matematikai modellezése a *kontinuummechanika* és a *termodinamika* alaptörvényein alapszik. A kontinuum-elmélet lényege, hogy a véges testen megfigyelt viselkedésből levonható tulajdonságokat a test térfogatelemeire alkalmazhatjuk. A jelenségek leírásához *egyensúlyi egyenleteket* (pl.: $\sigma = F/A$), *anyagegyenleteket* (pl.: $\varepsilon = \sigma/E$), és *geometriai egyenleteket* (pl.: $\varepsilon_x = \delta u / \delta x$) használunk. Az egyensúlyi egyenletek anyagtól függetlenül, minden szerkezeti elemre érvényesek, míg az anyagegyenletek a felhasznált anyag jellemző viselkedését írják le. Mivel egy – az anyag viselkedését pontosan leíró – anyagtörvény nagyon sok állapotjellemzőt tartalmazna, s így a számításaink nagyon bonyolulttá válnának, ezért csak a jelenség szempontjából fontos tulajdonságokat vesszük figyelembe. Ezzel az egyszerűsítéssel az anyagtörvényünk egy *idealizált anyagra* érvényes, ahol a folyamat szempontjából érdektelen tulajdonságokat állandónak tekintjük. Emiatt az anyagtörvényeink csak bizonyos feltételezések mellett alkalmazhatóak.

A vizsgált anyag egy pontjához, illetve annak kis környezetéhez a jelenséget leíró anyagjellemzők, más néven anyagállandók tartoznak. Ilyenek pl.: E – rugalmassági modulus (*Young-modulus*), és ν – *Poisson-tényező*. Az anyagállandók száma az anyag mikro- és makroszerkezeti felépítésétől függ. Fa esetén mikroszintnek a faszövetek rétegei, makroszintnek a fa sejtek feleltethetők meg.

Ha az anyag egy adott pontjában minden irányban más és más anyagjellemzőkkel írható le, akkor az adott anyagot *anizotróp*nak nevezzük. A szó az *an* = nem, *isos* = egyenő, *tropos* = irány görög szavak összetételéből származik. Ha léteznek ekvivalens irányok, akkor speciális az anizotrópia, pl.: *ortotrópia*, vagy *transzotrópia*. Ez utóbbinál egy kitüntetett irány van, s az erre merőleges síkban az anyagjellemzők minden irányban megegyeznek. Ha minden irányban azonosak az anyagjellemzők, ez azt valószínűsíti, hogy az anyag mikro-, és

makroszinten is teljesen rendezetlen struktúrájú, nem tartalmaz irányultságokat, ilyen pl.: az acél.

Az anizotróp anyagok tulajdonságaival először a kristályokkal kapcsolatban kezdtek el foglalkozni. *Christian Huygens (1629 – 1695)* ismerte fel a kettős törés törvényszerűségét, és felfedezte, hogy a mészpát keménysége különböző síkokon és annak különböző irányában nem azonos. A kristályok fizikai tulajdonságaival és azok törvényszerűségeivel kapcsolatban elméleteket állítottak fel többek között *Claude-Louis Navier (1785 – 1836)*, *Siméon Denis Poisson (1781 – 1840)*, és *Augustin Cauchy (1789 – 1857)* az 1820-as évek táján, de kísérletek csak később igazolták feltevéseiket. Az első megfigyeléseket *P. Savart* végezte 1829-ben. Kezdetben a *részecske elmélettel* írták le az anizotróp viselkedést, mely a szilárd testet anyagi pontok összességének tekinti, ahol a pontok a többi pont által kifejtett erők hatására egyensúlyi állapotban vannak, és ez csak tömeg és felületi erők hatására változik meg. Ezt az elméletet később a *kontinuum-elmélet* váltotta fel (más néven *fenomenológiai elmélet*), melynek lényege, hogy az egész testre jellemző tulajdonságokból levonható következtetéseket a test egy kis elemére vonatkoztatjuk.

A kristályok alaki tulajdonságainak, szimmetriatörvényeinek felfedezése *Franz Neumann (1795-1898)* munkásságához kötődik (1885). Alapelve, hogy a kristály alakjának szimmetria jellemzői jelentősen befolyásolják a fizikai tulajdonságokat. *Woldemar Voigt (1850 – 1919)* összefoglaló műve: *Lehrbuch der Kristallphysik* 1910-ben rendszerezve adta közre a kristályokkal kapcsolatos ismereteket, s már tenzorokat alkalmazott a leíráshoz.

Az anizotróp anyagok szilárdságával a fa és fa-alapú anyagok kapcsán kezdtek el vizsgálni a 20. század elején. Az elméleti ismeretekre többek között a repülőgépgyártás, és a szálerősítésű műanyagok miatt volt szükség. Elsőként néhány fafaj normálszilárdságának változását vizsgálták a rostiránnyal bezárt szög függvényében *C. F. Jenkin* és *R. L. Hankinson*, eredményük: $\sigma_{\alpha} = \frac{\sigma_0 \sigma_{90}}{\sigma_0 \sin^p \alpha + \sigma_{90} \cos^p \alpha}$, ahol p különböző kitevőket jelenthet.

P. Savart már 1830-ban felismerte, hogy a faanyag három, egymásra merőleges szimmetriasíkkal rendelkezik a rugalmassági tulajdonságok szempontjából. A szilárdsági vizsgálatokon túl a kutatások kiterjedtek a Young-féle rugalmassági modulus, a Poisson-tényező, és a nyírási rugalmassági modulus mérésére is. A rugalmassági állandók teszik lehetővé, hogy a rugalmassági egyenleteket alapul véve a műszaki gyakorlatban is alkalmazhatóak legyenek az eredmények.

A faanyag rövid idejű statikus és dinamikus, illetve a hosszú idejű statikus és dinamikus szilárdsági tulajdonságai eltérőek. 1848-ban *E. Chevandier* és *G. Wertheim* azt találták, hogy a dinamikus mérésekből meghatározott Young-modulusok nagyobbak, mint a statikusak. A nyírószilárdságok, az összetett igénybevételekhez tartozó feszültségi állapotok, és a tönkremeneteli módok meghatározása nehezebb feladatnak számított.

A hosszú idejű statikus szilárdsággal, *reológiai folyamatokkal* kevesebbet foglalkoztak a kutatások. Ugyanakkor a fa tartószerkezeti alkalmazásakor nem lehet elhanyagolni az idő elteltével bekövetkező lassú alakváltozás – *kúszás* – hatását, mert ez többlet lehajlásokat okoz a szerkezeten.

2.2. Az anizotrópia általános jellemzői

A makroszintű tulajdonságok és az anyag belső felépítése közötti összefüggést két féle módszerrel vizsgálhatjuk.

A *korpuszkuláris elmélet* a makroszintű viselkedés belső szerkezeti felépítésen alapuló magyarázatával, az anyagok belső szerkezetének vizsgálatával foglalkozik. Az ilyen leírások minőségi szempontból fontosak, azonban a műszaki gyakorlatban nem alkalmazhatóak, mert figyelmen kívül hagynak olyan imperfekciókat, mint a szennyeződés és a torzult rácsszerkezet, vagy pl.: fa esetén a normálistól eltérő növekedés, ággöcsök, csomók, rovarkárosítás, stb.

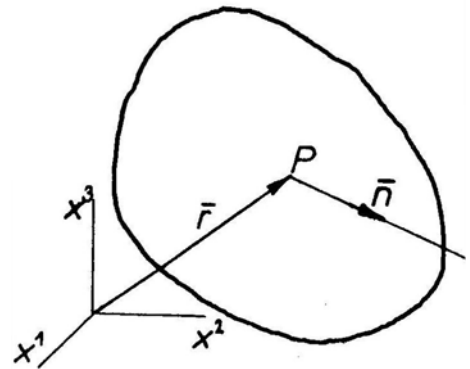
A másik megközelítés – a *fenomenológiai módszer (kontinuum-elmélet)* – figyelmen kívül hagyja az anyag részecskékből felépülő szerkezetét, és azt feltételezi, hogy az anyag folytonosan tölti ki a teret, azaz kontinuum. A kontinuum-elmélet csak a fizikailag mérhető tulajdonságokkal foglalkozik, és nem vizsgálja, hogy ez milyen szerkezeti felépítésnek a következménye. A fizikai tulajdonságokat – sűrűség, rugalmassági modulus, szilárdság – anyagállandókkal írja le.

Fenomenológiai módszeren belül megkülönböztetünk *izotróp és anizotróp*, illetve *homogén és inhomogén* anyagokat. Izotróp anyagról akkor beszélünk, amikor egy adott pont kis környezetében a fizikai jellemzők függetlenek az iránytól (azaz minden irányban egyenlőek), míg anizotrópról akkor, ha a különböző irányokban más-más jellemzőket tapasztalunk. Egy testről azt mondjuk, hogy homogén, ha a fizikai tulajdonságai minden pontjában azonosak, és inhomogén, ha az előbbi feltétel nem teljesül.

Tekintsük egy test P pontját, t jelentse a tulajdonság jellemző értékét P pontban. Ha az anyag *anizotróp és inhomogén*, akkor a P pont tulajdonságát egy két változós függvényként tudjuk megadni: $t = t(r, n)$, ahol r – a P pont helyvektorát, n – a vizsgált irány egységvektorát jelenti. Ha *homogén és anizotróp*, akkor t független r -től, tehát t egyváltozós függvény lesz: $t = t(n)$. Ha inhomogén és izotróp, akkor t csak a vizsgált pont helyvektorától függ, $t = t(r)$. Ha homogén és izotróp is egyszerre, akkor t tulajdonság konstans, n -től és r -től is független.

Egy adott pontban két különböző irányhoz tartozó érték hányadosát az anizotrópia fokának vagy mértékének nevezzük.

$$r = \frac{t_1}{t_2} = \frac{t(n_1)}{t(n_2)} \quad \text{ahol } t_1 > t_2$$



1. ábra: (an)izotrópia és (in)homogenitás

2.3. Anizotrópia a természetben

Az anizotrópia egyik legjobb példája a természetben a csontok, illetve a növényi szárak felépítése. A növények szára, és a fák törzse a lehető legoptimálisabb úton közvetíti a talajra a külső hatásokból, pl.: szélterből, és az önsúlyból származó igénybevételeket. A szár vagy törzs alakja, sudarlóssága, a faanyag sűrűsége, a rugalmassági és szilárdsági jellemzőknek a törzsön belüli váltakozása, a korai és késői pásztákból való réteges felépítés, valamint a növekedés során létrejövő belső feszültségek mind ezt a célt szolgálják.

Az élő fa a törzs hossz tengelyével – azaz a rostiránnyal – párhuzamos normáligénybevételnek (nyomásnak), és a vízszintes terhek okozta hajlításnak van főként kitéve. Az optimális teherviselést elsősorban a szilárdságot biztosító szerkezeti elemek (cellulóz → sejtfa → rostok) irányultsága teszi lehetővé. Az önmagukban is anizotróp faszemek a törzs hossz tengelyével párhuzamosan helyezkednek el, ezáltal ebben az irányban a szilárdsági, merevségi jellemzők sokkal nagyobbak, mint más irányokban, ami megfelel annak, hogy ebben az irányban történik a terhek nagy részének továbbítása.

3. ábra: cellulóz

A *hemicellulóz* nevű poliszaharid a sejtfaalak kb. 30%-át alkotja, lombos fáknál *pentózokból*, fenyőféléknél *hexózokból* áll, láncai rövidebbek a cellulóznál, de elágazásokat is tartalmaznak.

A *pektin* kis mennyiségben jelen levő molekula, mely a sejtek összekapcsolásáért felelős. A faanyag kb. 28%-át *lignin* teszi ki, mely egy három dimenziós polimer. A fő alkotóelemeken túl kísérőanyagok (terpének, éterikus olajok, gyantasavak, zsírok, viaszok, ásványi anyagok) is találhatóak a sejtfaalakban.

Összefoglalva a fa egy "betétezett anyagnak" tekinthető. A cellulóz molekulák alkotják a vázrendszert, mely a hemicellulóz és a lignin alkotta amorf részbe, kitöltőanyagba, más szóval "mátrixba" ágyazódik be.

2.4.2. A sejtfaalak szerkezete

A cellulóz molekulák egymással párhuzamosan futnak, és kötegeket, ún. *elemi fibrillákat* alkotnak. Hosszuk a cellulóznál többszöröse lehet, keresztmetszeti méretük 3-5 nm. A kötegekben cellulóz molekulák egyes láncai összekapcsolódnak, s cellulózkristályt – *micellát* – alkotnak. A cellulóz 60-70%-a alkot kristályos szerkezetet, ennek tudhatók be kedvező szilárdsági tulajdonságai. A kristályos szakaszok hossza 50-100 nm, a közöttük levő amorf részeké 20-60 nm, de egy keresztmetszetben általában a cellulóz mindkét megjelenési formája fellelhető. A víz molekulák méreteik miatt csak az amorf részbe képesek beépülni, a kristályosba nem.

A 20-30 db elemi fibrilla szövődése *mikrofibrillát* alkot, hosszuk az elemi fibrilla többszöröse, keresztmetszeti méretük 10-20 nm. Mivel az elemi fibrillák között hézagok – intermicelláris részek – találhatóak, ide hemicellulóz, lignin, és vízmolekulák, azaz a mátrixot alkotó molekulák épülhetnek be. A vízmolekulák kilépése, illetve belépése okozza a sejtfaalak zsugorodását, illetve duzzadását. A mikrofibrillák anizotrópok, a kitöltőanyag (mátrix) a rendezetlen elhelyezkedése miatt nem mutat irányultságot, ezért izotrópnak tekinthető.

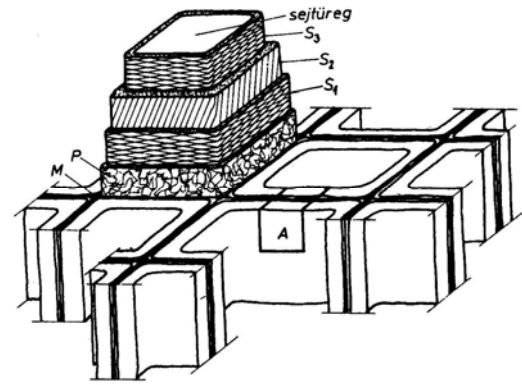
A mikrofibrillák további *fibrillákba* (kötegekbe), vagy laminákba (szalagokba) rendeződnek, s ezekből épülnek fel a sejtfaalak rétegei.

A faszövetek szorosan egymáshoz kapcsolódnak, jellemzően nincsen sejtek közötti állomány. Az érintkező felületeket a *középlamella* (M) választja el, melynek pektintartalma felel a szomszédos sejtek összeragasztásáért. Elsőként a *primer sejtfaalak* (P) alakul ki, s addig

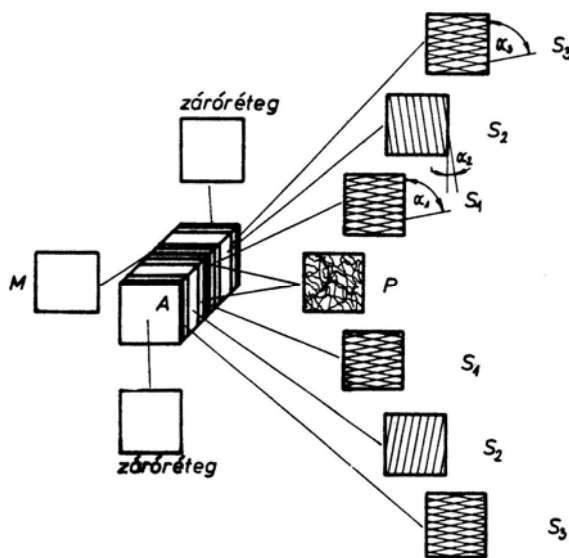
nő, míg el nem éri végleges alakját, méretét. Ezután vastagodni kezd, és kialakul a *másodlagos – szekunder – sejtfa* (S), mely 3 rétegből épül fel: S_1 , S_2 , S_3 .

A sejtfa különböző rétegeiben a mikrofibrillák elhelyezkedése (irányultsága) más és más, a rétegek cellulóztartalma is eltérő. Az M+P réteg kb. 5%, az S_1 kb. 15%, az S_2 kb.

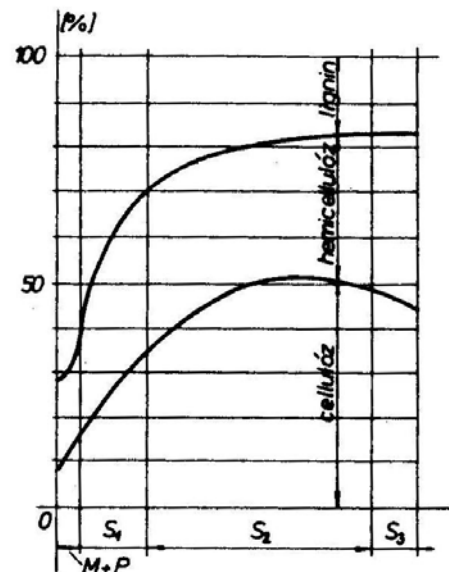
72%, az S_3 kb. 8%-át teszi ki a teljes sejtfa vastagságnak. A P rétegben a mikrofibrillák filcszerű, rendezetlen képet mutatnak, az S rétegeiben irányultság figyelhető meg. A rostirányt tekintve $\alpha=0^\circ$ -nak, az S_1 rétegben jellemzően $\alpha=\pm 80^\circ$ keresztálós, az S_2 rétegben $\alpha=20-30^\circ$ egyirányú, az S_3 rétegben $\alpha=\pm 75^\circ$ keresztálós a kötegek elrendeződése.



4. ábra: fasejt rétegei



5. ábra: fasejt rétegeinek irányultsága

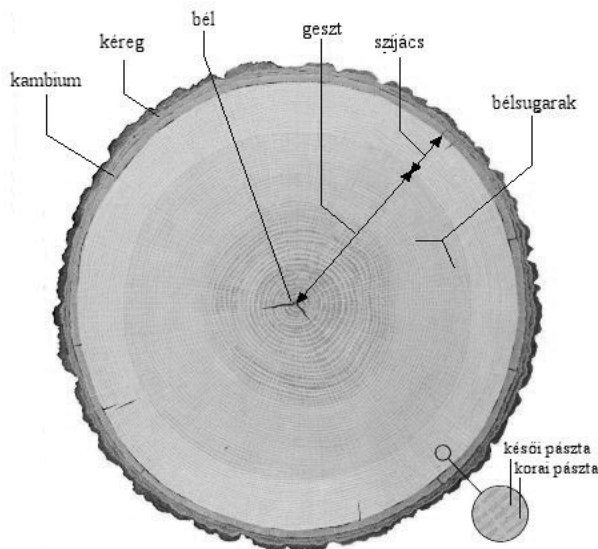


6. ábra: alkotók aránya a fasejt rétegeiben

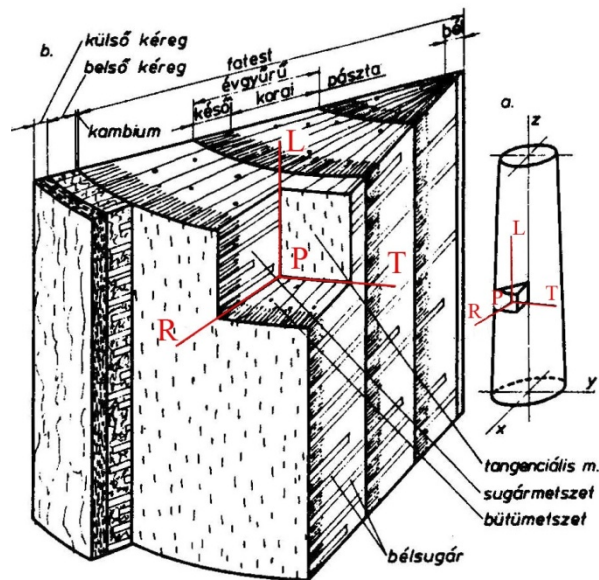
Egy fasejtet kiragadva, és hossz tengelyével párhuzamos nyomóerővel terhelve az összenyomódáson kívül csavarodás is fellép, hiszen aszimmetrikus a sejtfa szerkezete. A szomszédos sejtek S_2 rétegei azonban általában ellentétes irányultságúak, így egy több sejtből álló farész már nagy nyírési merevségű, és nem csavarodik.

2.4.3. A fatest szerkezetének felépítése

A fa törzse csónkakúp vagy henger alakúnak feltételezhető. Egy kimetszett szeleten longitudinális-, sugár-, és húr- (más néven tangenciális vagy érintő) irányt értelmezünk. A *longitudinális irány* (*L*) párhuzamos a törzs hossztenelyével, a kész fatermékekben ez jelenti a rosirányt. A *sugárirány* (*R*) merőleges a longitudinális tengelyre, és metszi a törzs hossztenelyét. A *húrirány* (*T*) merőleges a longitudinális- és sugárirányra is. Az LR síkú (függőleges és húrirányú) metszetet *sugármetszetnek*, az LT (függőleges és húrirányú) metszetet *tangenciális metszetnek*, az RT (vízszintes) metszetet *bütülmetszetnek* hívjuk. Az L, T, R tengelyeket *anatómiai főtengeleknek*, az általuk alkotott síkokat *anatómiai fősíkoknak* nevezzük.



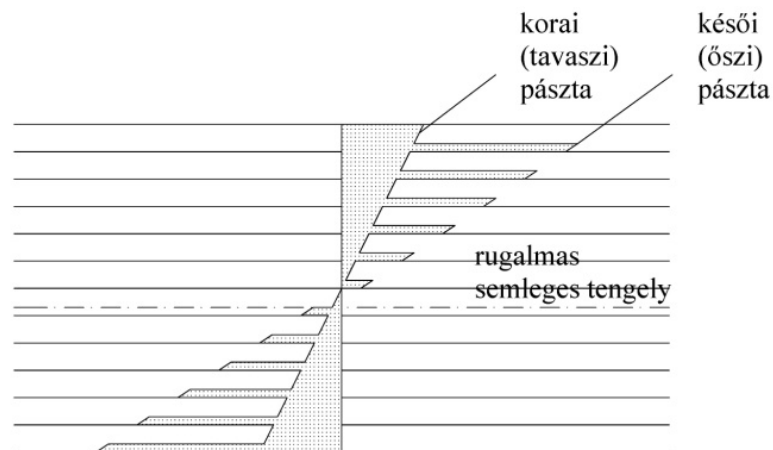
7. ábra: fatörzs keresztmetszete



8. ábra: irányok, síkok értelmezése

A törzs vastagsági növekedéséért felelős *kambium* kifelé hancssejteket, befelé fasejteket hoz létre. Ez utóbbi használható fel műszaki célokra. A *szíjács* az életműködésben még részt vevő szövetek elnevezése. A törzs hossztenelyével párhuzamos hosszú fasejtek a tápanyagszállítás és a szilárdítás feladatát látják el. Az évszakok váltakozása miatt a fasejtek keresztmetszete nem állandó. Tavasszal nagyobb sejtüregű, vékonyabb falú sejtek képződnek, melyek a növény életműködéséhez szükséges tápanyagot szállítják, majd a nyári szárazabb időszak felé haladva egyre kisebb üregű, vastagabb falú sejtek alakulnak ki, melyek a szilárdítást szolgálják. E szerint *korai* és *késői pásztát* különböztetünk meg egy *évgűrűn* belül. A korai általában világosabb, a későbbi sötétebb. A koraiból a későbbibe egyenletes, a későbbiből (őszi) a koraiba (tavaszi) ugrásszerű az átmenet, bár ez fajtától is függ. A kései

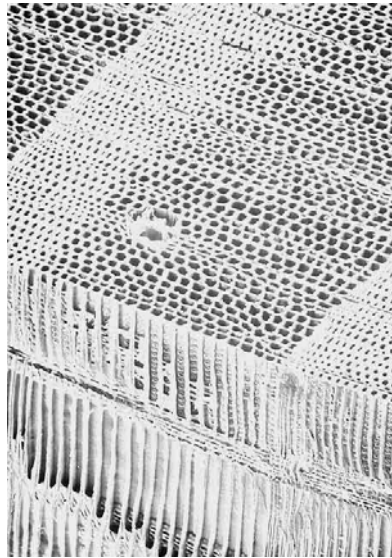
pászta aránya 10-30% között mozog a teljes évgyűrű szélességéhez képest. A kétféle pászta fizikai jellemzői eltérőek. Ylinen 1943-ban megmutatta, hogy a konstans nyomatókkal terhelt gerendában a feszültségek ugrásszerűen változnak a kétféle pászta eltérő Young-modulusai miatt. Mivel $\sigma = \varepsilon E$, ezért a rugalmas súlyponti tengelytől dy távolságra levő szálban ε -t állandónak feltételezve a nagyobb rugalmassági modulusú őszi pászta nagyobb, a kisebb rugalmassági modulusú tavaszi pászta kisebb feszültséget képes felvenni.



9. ábra: Ylinen szerint a hajlított gerenda keresztmetszetében ébredő feszültségeloszlás

A bélből kiinduló *bélsugarak* sugárirányú sejtkötegek, az R és T irányhoz tartozó szilárdsági tulajdonságokért felelősek, valamint összefüggő rendszerük a sugárirányú tápanyagszállítást végzi el. Szabad szemmel általában még éppen láthatóak. A bélnek a kifejlődött fa szempontjából nincs jelentősége, mindössze néhány mm.

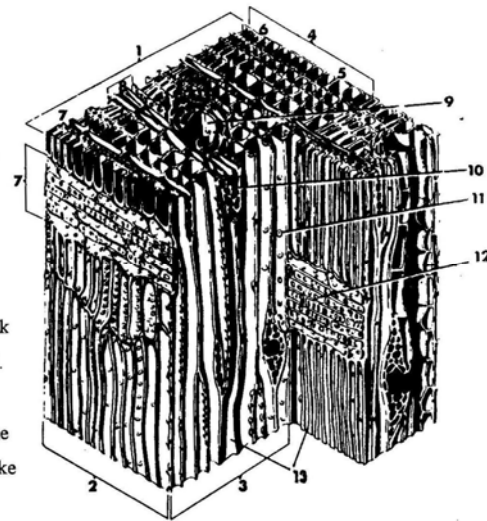
A *geszt* a fa bél körüli részein, elhalt sejtekből alakul ki, gyantákat, cserző- és ásványi anyagokat tartalmaz. Általában sötétebb színű, mint a szíjács, keményebb, nagyobb térfogatsúlyú és szilárdságú annál. A műszaki célra leggyakrabban használt lucfenyőnél szabad szemmel nem különböztethető meg a geszt és a szíjács (ún. színfa), a fatest külső és belső rétege között csak abban van különbség, hogy a bél felé haladva egyre kisebb a víztartalom.



10. ábra: korai és késői pászták

Fenyő faanyag
tipikus felépítése

- 1 – bütümentszet
- 2 – sugármetszet
- 3 – tangenciális m.
- 4 – évgűrű
- 5 – korai pászta
- 6 – késői pászta
- 7 – bélsugárköteg
- 8 – orsós bélsugarak
- 9 – függőleges gy.j.
- 10 – vízszintes gy.j.
- 11 – udvaros gödörke
- 12 – egyszerű gödörke
- 13 – rostok (tracheidák)



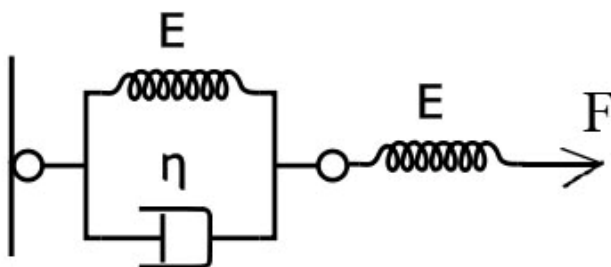
11. ábra: fenyő felépítése

2.4.4. A természetes faanyag modellje

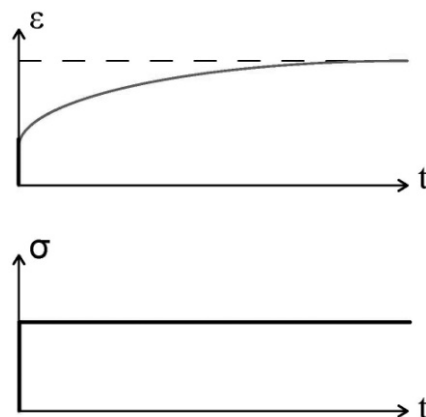
A fa felépítéséből egyértelmű, hogy az anyag mikro szinten (fasejtek rétegei), és makro szinten (fasejtek) is inhomogén és anizotróp. Az inhomogenitást a felhasznált elemek méretei, és a keresztmetszetek kialakítása miatt általában figyelmen kívül hagyhatjuk, és homogén anyagmodellt tételezhetünk fel. Az anizotróp viselkedést nem hagyhatjuk figyelmen kívül, de megállapítható, hogy a faanyag szerkezeti rendszere szimmetriatulajdonságokat mutat. A rombikus kristályszerkezet jellemzői érvényesek rá, vagyis *ortogonálisan anizotróp (ortotróp)* anyag. Bizonyos fizikai tulajdonságok a fősíkokkal megegyező szimmetriasíkkal rendelkeznek. Egyes fafajoknál a rostirányra merőleges síkhoz tartozó irányokban a tulajdonságok akár meg is egyezhetnek, ekkor *transzverzálisan izotróp*nak (*transzotróp*nak) nevezzük. Ennek feltételezése kevesebb anyagállandót eredményez a számításokban. A gyakorlatban transzotrópnek tekintjük a fát, így a tulajdonságokat csak két irányban: rostiránnyal párhuzamosan, és arra merőlegesen adjuk meg.

A faanyag viselkedését legjobban megközelítő anyagmodell három elemű rendszerrel írható le, ha egy Kelvin-Voigt féle modellt egy Hooke-féle modellel kapcsolunk sorba. F erő hatására a Kelvin –Voigt féle modell a dugattyú miatt nem tud alakváltozni, ezért itt a rugó nem tud erőt felvenni, a teljes erőt a dugattyú veszi fel. A sorbakapcsolt rugó azonnal megnyúlik, ezáltal képes a teljes F erőt felvenni. A későbbiekben az állandó külső F erő hatására a sorbakapcsolt rugó már nem nyúlik tovább. A Kelvin-Voigt féle modell dugattyúja lassú mozgást végez, ezért rugó egyre jobban megnyúlik, így az F erőnek egyre nagyobb

hányada jut rá, míg végül a teljes F erőt a rugó veszi fel. Ez a modell számításba veszi a teher hatására bekövetkező azonnali, és az idő elteltével megnövekedő lassú alakváltozásokat is.



12. ábra: Kelvin-Voigt félé modell Hooke-féle modellel sorbakapcsolva



13. ábra: relatív megnyúlás-idő, feszültség-idő diagram

3. Szerkezeti fa. Szilárdsági osztályok

3.1. A szabvány

A szerkezeti faanyagokat és szilárdsági osztályokat tárgyaló MSZ EN 338:2003 helyett a Magyar Szabványügyi Testület az EN 338:2009 *európai szabványt* magyar nemzeti szabvánnyá nyilvánította a közzététel napjától. Az EN 338:2009 európai szabványt a CEN (Comité Européen de Normalisation) 2009. szeptember 29-én hagyta jóvá.

Az MSZ EN 338:2009 *európai harmonizált szabvány* tartalma az európai szabvány *angol nyelvű* változata, mivel az európai szabványt a CEN hivatalosan csak angol, francia és német nyelveken teszi közzé. A szabványt az 1995. évi XXVIII. törvény alapján tették közzé, alkalmazása a törvény 6§-ának (1) bekezdése alapján önkéntes. A törvény 6§-ának (2) bekezdése szerint műszaki tartalmú jogszabály vonatkozhat olyan nemzeti szabványra, melynek alkalmazását úgy kell tekinteni, hogy azzal az adott jogszabály vonatkozó követelményei is teljesüljenek.

A fejezet további pontjai az MSZ EN 338:2009 európai harmonizált szabvány angol nyelvű változatából származnak.

Az új európai szabvány – a már meglévőeken túl – új szilárdsági osztályokat vezetett be a kemény lombos fák esetében (D18, D24). A puhafa osztályok nyírási-, és rostirányra

merőleges húzószilárdság értékei módosultak, pl.: minden puhafa osztályban a rostirányra merőleges húzószilárdság $0,4 \text{ N/mm}^2$, míg keményfánál ez $0,6 \text{ N/mm}^2$.

Az elérhető faanyagok fajta és minőségbeli sokfélesége, a helyi kitermelés mértéke, a végső felhasználás módja, és a különböző fajtájú és szilárdságú anyagok kombinálása nehezíti a fa szerkezetek tervezését.

A szilárdsági osztályok rendszere egy osztályba gyűjti össze a különböző tulajdonságú, de azonos szilárdságú fajokat, melyek így egymással kiválthatóak. Ez teszi lehetővé, hogy a tervező adott szilárdságú anyagot válasszon ki, és ezzel végezhesse a számításokat.

A szilárdsági osztályozás rendszerének előnyei:

- a) Bármikor további osztályok vehetők be a rendszerbe, anélkül, hogy ez a meglévő előírásokat megsértené.
- b) A tervezés ideje alatt a tervezőnek nem kell tekintettel lennie a választott fajta költségeire, a lehetséges fajok és osztályok beszerezhetőségére. Egy adott osztály ismert szilárdsági, merevségi, sűrűségi értékeivel számolhat, és a tender során dől el, hogy milyen fajtát ajánl. Ekkor már fontos lehet a faanyag megjelenése, tartóssága, várható élettartama, faanyagvédőszerrel, felületkezelő anyagokkal való kezelhetősége, ragaszthatósága, feldolgozhatósága.
- c) Ha az osztályok tulajdonságai adottak, a forgalmazók az anyagokat ezeknek az előírásoknak megfelelően tudják besorolni.

A szabvány megadja a karakterisztikus szilárdságot, a merevségi tulajdonságokat, és a sűrűségi értékeket minden osztályra, valamint rendelkezik a fa populációk kialakításáról (elhelyezés, fajok kombinációja, eredet).

A szabvány hivatkozik a következő dokumentumokra:

- (1) EN 384, Structural timber – Determination of characteristic values of mechanical properties and density (*Szerkezeti fa – Mechanikai tulajdonságok és sűrűség karakterisztikus értékeinek meghatározása*)
- (2) EN 14081 (teljes), Timber structures – Strength graded structural timber with rectangular cross section (*Fa szerkezetek – Téglalap keresztmetszetű szilárdságilag osztályozott szerkezeti fa*)

3.2. Szimbólumok és rövidítések

$E_{0,mean}$	rostiránnyal párhuzamos rugalmassági modulus középértéke	[kN/mm ²]
$E_{0,05}$	rostiránnyal párhuzamos rugalmassági modulus 5%-os kvantilise	[kN/mm ²]
$E_{90,mean}$	rostirányra merőleges rugalmassági modulus középértéke	[kN/mm ²]
$f_{c,0,k}$	rostirányú nyomószilárdság karakterisztikus értéke	[N/mm ²]
$f_{c,90,k}$	rostirányra merőleges nyomószilárdság karakterisztikus értéke	[N/mm ²]
$f_{m,k}$	hajlítószilárdság karakterisztikus értéke	[N/mm ²]
$f_{t,0,k}$	rostirányú húzószilárdság karakterisztikus értéke	[N/mm ²]
$f_{t,90,k}$	rostirányra merőleges húzószilárdság karakterisztikus értéke	[N/mm ²]
$f_{v,k}$	nyírószilárdság karakterisztikus értéke	[N/mm ²]
G_{mean}	nyírási rugalmassági modulus középértéke	[kN/mm ²]
ρ_k	sűrűség karakterisztikus értéke	[kg/m ³]
ρ_{mean}	sűrűség középértéke	[kg/m ³]

A szabvány az egyes szilárdsági osztályokat a hajlítószilárdságuk értékével nevezi meg. Pl.: C30 olyan faanyagot jejl, melyre $f_{m,k}=30$ N/mm². A szilárdság, a merevség és a sűrűség karakterisztikus értékei táblázatos formában vannak megadva.

A táblázat értékei a hajlítószilárdság, a hajlítási rugalmassági modulus középértéke, és a karakterisztikus sűrűség alapján az alábbi egyenletekkel is meghatározhatóak:

rostirányú húzószilárdság karakterisztikus értéke	$f_{t,0,k} = 0,6 f_{m,k}$	
rostirányú nyomószilárdság karakterisztikus értéke	$f_{c,0,k} = 5(f_{m,k})^{0,45}$	
nyírószilárdság karakterisztikus értéke	$f_{v,k}$ táblázatból	
rostirányra merőleges húzószilárdság karakterisztikus értéke	$f_{t,90,k} = 0,4$ N/mm ² $f_{t,90,k} = 0,6$ N/mm ²	puhafára keményfára
rostirányra merőleges nyomószilárdság karakterisztikus értéke	$f_{c,90,k} = 0,007 \rho_k$ $f_{c,90,k} = 0,015 \rho_k$	puhafára keményfára
rostiránnyal párhuzamos rugalmassági modulus 5%-os kvantilise	$E_{0,05} = 0,67 E_{0,mean}$ $E_{0,05} = 0,84 E_{0,mean}$	puhafára keményfára
rostirányra merőleges rugalmassági modulus középértéke	$E_{90,mean} = E_{0,mean}/30$ $E_{90,mean} = E_{0,mean}/15$	puhafára keményfára
nyírási rugalmassági modulus középértéke	$G_{mean} = E_{0,mean}/16$	
sűrűség középértéke	$\rho_{mean} = 1,2 \rho_k$	

3.3. Fa populációk osztályba sorolása

3.3.1. Válogatás

A faanyagok osztályozása (szilárdsági osztályokba sorolása) történhet *manuálisan*, *vizuális úton*, és *géppel*. Az osztályozás során rendszerint olyan tulajdonságokat figyelünk meg, amelyek közvetlenül befolyásolják a faanyag szilárdságát, vagyis az ezen tulajdonságok szerint történő besorolás közvetlenül értelmezhető szilárdsági besorolásként is.

Gépi osztályozás esetén általában a rugalmassági modulus ez a tulajdonság, *vizuális osztályozás* esetén általában fahibák, göcsök, évgyűrű-szélesség, rostlefutás alapján történik a besorolás. A szilárdsági osztályozás, kategorizálás jelentős mértékben megkönnyíti, illetve segítő szándékkal behatárolja a faszerkezet tervezését. Ezáltal könnyebben választja ki a tervező a célnak megfelelő faanyagot, illetve keresztmetszeteket. Az egyes faanyag-osztályokhoz tartozó szilárdsági- és rugalmassági tulajdonságok ismeretében könnyedén kiválasztható a szerkezethez leginkább megfelelő faanyag, illetve azon belül a szilárdsági kategória.

A gépi osztályozás lehet roncsolásos (törökísérlet) és roncsolásmentes. A Nyugat-magyarországi Egyetem Faipari Mérnöki Karának roncsolásmentes, hordozható fűrészáru osztályozó berendezése a hangsebesség és sűrűség méréseivel határozza meg, hogy az adott faanyag milyen szilárdsági osztályba tartozik, majd hagyományos úton ellenőrzik a faanyag teherbíró képességét törővizsgálattal. A berendezés hivatalos minősítéshez összesen 900 db gerenda illetve palló összetörésére volt szükség.

3.3.2. Besorolás

Egy faanyag akkor sorolható be egy adott szilárdsági osztályba, ha a hajlítószilárdság és a sűrűség karakterisztikus értékei egyenlőek, vagy meghaladják ennek a szilárdsági osztálynak a táblázatban megadott megfelelő értékeit, és a hajlítási rugalmassági modulus eléri az ennél az osztálynál előírt érték min. 95%-át. Azaz egyszerre teljesül:

$$f_{m,k}^* > f_{m,k}, \text{ és}$$

$$\rho_k^* > \rho_k, \text{ és}$$

$$E_{0,\text{mean}}^* > 0,95E_{0,\text{mean}}$$

feltétel, ahol a ^{*}-al jelölt jellemzők a besorolandó faanyag jellemzőit jelentik.

4. Réteges szerkezetű tartószerkezeti fatermékek

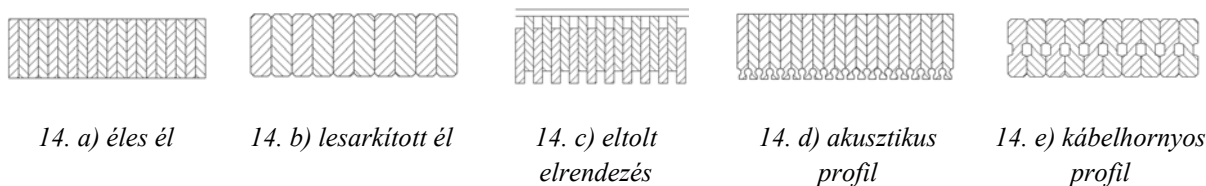
4.1. A réteges szerkezetű táblák fajtái. Elnevezések

A tömörfa építésmódokon belül három, alapvetően eltérő csoportot különböztetünk meg.

A *gerendafalas építés* (boronafalas építés) nagy hagyománnyal rendelkezik a fában gazdag vidékeken. Az épület alaprajzának megfelelően kör-, illetve négyszög keresztmetszetű gerendák fekszenek fel egymásra. A falsarkokban átlapolással, csap-hornyos gerendavéggel kapcsolódnak az elemek.

Az *éldeszka táblából* (Brettstapel) készült fal elemei a gerendafalas építés gerendáival ellentétben nem vízszintes, hanem függőleges irányúak. Az élükre állított és egymás mellé helyezett deszkákat vagy pallókat szegezéssel, illetve facsapokkal erősítik egymáshoz. Az így kapott lapok fal-, földem-, és tetőelemként funkcionálhatnak. A deszkák vagy pallók vastagsága 24-60 mm. A szokásos elemszélesség 2,40 m, az elemek hossza max. 12 m lehet.

A táblák változatos szerkesztésűek lehetnek:

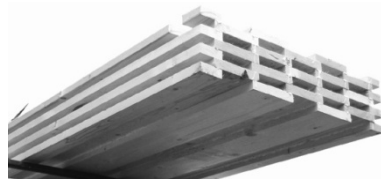


A *lapdeszka táblák* lapjaival egymás mellé fektetett és összeragasztott, vagy facsapokkal összeerősített deszkarétegekből készülnek. Az elemeket fal-, földem-, és tetőelemként alkalmazzák. Német nyelvterületen *Brettsper Holz*-nak (BSH), *Kreuzlagenholz*-nak (KLH) hívják a deszka méretű (<40mm), és *Furnierschichtholz*-nak a furnérvastagságú (~ 3 mm) rétegekből álló táblákat, angolban a *Cross-laminated timber* név terjedt el. A magyarul *lapdeszka tábla* elnevezés különböző szerkesztésű táblákat takarhat:

- a) egymást keresztező, szorosan egymás mellé ragasztott deszkarétegek, pl.: Finnforest Leno, KLH Massivholz;
- b) egymást keresztező, a deszkák között távolságot hagyva ragasztott deszkarétegek, pl.: LIGNOTREND tömörfa elemek, LIGU-Holz-épületelemek;
- c) párhuzamos, deszkák között távolságot hagyva ragasztott deszkarétegek, pl.: THOMA Holz 100.



15. a) ábra: Finnforest Leno, KLH Massivholz



15. b) ábra: LIGU Holz födémelem

Az elemeket fal-, földem-, és tetőelemként alkalmazzák.

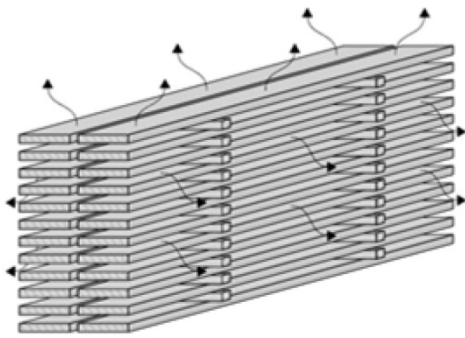
A következőkben az a) pontban leírt lapdeszkatáblákkal, és a Finnforest Kerto-Q furnér alapú rétegelt termékével foglalkozom.

4.2. A termékek felépítése, előállítása

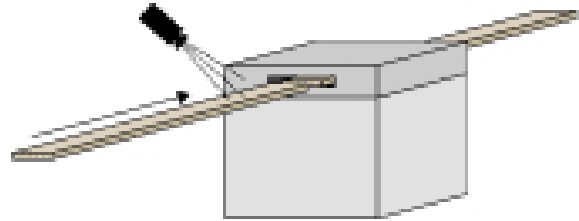
A fenyőből előállított, egymás mellé fektetett deszkák váltakozó irányú rétegeit ragasztással teszik együttdolgozóvá. A keresztben elhelyezett rétegek minimálisra csökkentik a tábla síkjában jelentkező duzzadás és zsugorodás okozta alakváltozásokat, növelik a szilárdságot, és az alaktartást.

A táblákat nagyüzemi körülmények között gyártják. A gyártási folyamat első lépése a faanyag kiszárítása. Annak érdekében, hogy kizárják a kártevők, gombák, és rovarok hatását, a fa nedvességtartalmát szárítókamrában, 55°C feletti hőmérsékleten, minimum 48 órán át szárítva, 12% +/- 2% -ra állítják be. Ez jellemzően a fa belső, fűtött terekben mérhető nedvességtartalmának felel meg. A felhasznált faanyag elsősorban lucfenyő, de vörösfenyő, erdeifenyő, Douglas fenyő és cirbolyafenyő is lehet. A faanyagok kombinálása függ az elérni kívánt felületi minőségtől. Ezt követően a kiszárított faanyagot a kívánt rétegvastagságra gyalulják le. Minden deszka ellenőrzötten kerülhet csak beépítésre.

A gyalulást a szilárdsági osztályokba való *besorolás* követi, mely történhet szemrevételezéssel, vagy gépi ellenőrzéssel. Ez utóbbi roncsolásos és roncsolásmentes is lehet. Látszó szerkezetek esetén a felületi minőség alapján is osztályba sorolják a deszkákat. A, B, vagy C megjelenési osztályok léteznek, melyekre különböző követelmények vonatkoznak a ragasztási fugákat, ággöcsöket, repedéseket, esetleges rovarkárosítást, és egyéb jellemzőket illetően.



16. ábra: szárítás

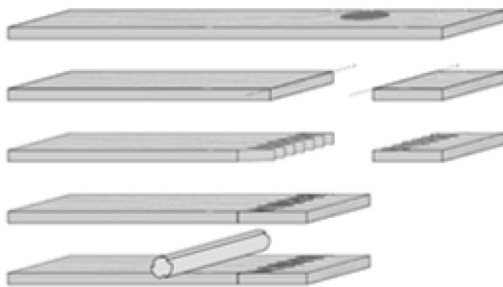


17. ábra: osztályozás

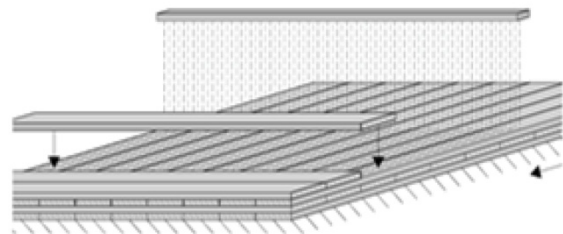
A szemrevételezés során felfedezett, a követelményeket meghaladó méretű hibás részeket a *hibakiejtés* során kivágják. Ez jelenthet sérülést, ággöcsöt, elszíneződést, csomót, repedést, zárványt, görbe növést, és rovarkárosodást.

A hibakiejtést követően a deszkákat ferde lapolással vagy fűrészfogas hosszoldással toldják, majd egyenletes vastagságúra gyalulják.

A *ragasztás* a deszkák teljes felületén történik. A felületeket megfelelő módon elő kell készíteni az eljárás előtt, pl.: gyalulni, felcsiszolni, feldurvítani. A ragasztó általában formaldehid, melamin, illetve poliuretán alapú, és többféle követelménynek kell megfelelnie. Alapvető követelmények a hosszú élettartalom, a víz-, penész-, és gombaállóság. A ragasztás nyírószilárdságának legalább akkorának kell lennie, mint a tisztán fa anyagú keresztmetszetek nyírószilárdsága. A ragasztó a megmunkáló gépek vágóéleit nem rongálhatja. Látszó szerkezeteknél igény lehet a ragasztóanyag színe, átlátszósága. Minden esetben a technológiai elvárásoknak, és a felhasználási módnak megfelelő ragasztóanyag alkalmazandó.

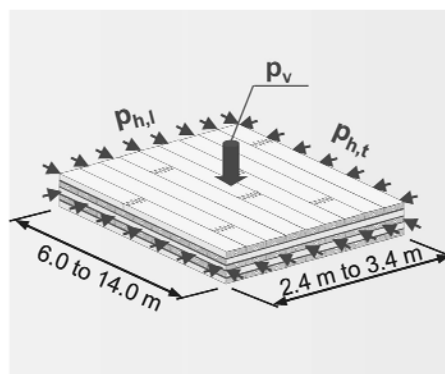


18. ábra: hibakiejtés



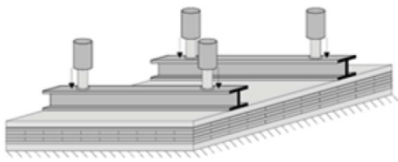
19. ábra: ragasztás

A ragasztás nyomás alatt történik, és a technológia függ a préselőgéptől is. A *préselési eljárás* történhet vákumos, hidraulikus, és szorító prégéppel. A táblákat nemcsak a síkjukra merőlegesen, hanem a síkjukban is nyomás alá helyezik egy vagy két oldalról, hogy ne csúszhassanak el egymáshoz képest. A vertikális nyomóerő kb. $0,4-1,5 \text{ N/mm}^2$, a tábla síkjában kb. $0,3 \text{ N/mm}^2$, de ez a fafajtától is függ: fenyő és lágy lombos fajoknál $0,4-0,8 \text{ N/mm}^2$, kemény lombos fajoknál $1,0-1,6 \text{ N/mm}^2$. A deszkák függőleges oldalait nem minden esetben ragasztják, ez gyártónként változik. A függőleges síkú ragasztás növeli a tábla légzárását, azonban a ragasztás nélküli változat előnye, hogy nem keletkeznek zsugorodási feszültségek, ami látszó felületeknél követelmény lehet. A felhordott ragasztó mennyisége kb. $200-500 \text{ g/m}^2$, ami a kész tábla kb. 1%-át teszi ki. Egy ragasztóréteg $0,1-0,3 \text{ mm}$ vastagságú. A deszkák hosszoldását max. 24 órával követheti a rétegek összeépítése, mert a száradás hatására megváltozhatnak a méreteik, és ekkor a csatlakozások pontatlanok lesznek. A táblák minimum 3 rétegből állnak, s a keresztmetszetet mindig szimmetrikusan alakítják ki. A lapdeszka táblák rétegszáma kb. 3 és 9 között változik, $50-300 \text{ mm}$ -es vastagságot adva, míg a furnértáblák $9-27$ rétegből állnak, mely $27-69 \text{ mm}$ -es vastagságot eredményez. Általában az összes réteg egyféle fafajtából készül, de kombinálni is lehetne, vagy másféle rétegelt lemez is beépíthető egy réteggént.

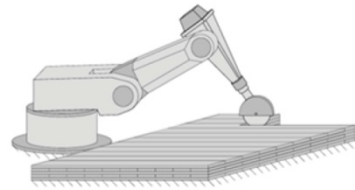


20. ábra: préselés

A ragasztás-préselés munkafázisa után a táblák vágása történik. A táblákat a terveknek megfelelően CNC technológiával alakítják ki. Az ajtók és ablakok helyét kivágják a táblából, a bútort legyalulják, falcolják az éleket, bemarják a kapcsolóelemek és a gépészeti vezetékek helyét.



21. ábra: prézelés



22. ábra: vágás

4.3. Gyártók, termékek, alkalmazási területek, általános adatok

Felsorolás szintjén néhány gyártó a teljesség igénye nélkül:

Eugen Decker Holzindustrie KG	Eugen Decker Holzindustrie KG	www.hochwald.com
Finnforest Merk GmbH		www.finnforest.de
Haas Fertigbau GmbH		www.haas-fertigbau.de
Lignotrend Produktions GmbH		www.lignotrend.com
Merkle Holz GmbH		www.merkleholz.de
Paul Stephan GmbH + Co. KG		www.stephan-holz.de
Stora Enso WP Bad St. Leonhard GmbH		www.clt.info
W. u. J. Derix GmbH + Co.		www.derix.de
KLH Massivholz GmbH		www.klh.at

Részletesen három termékkel foglalkozom: Finnforest Leno, Finnforest Kerto-Q, és KLH Massivholz (továbbiakban KLH). Ezekhez a gyártmányokhoz részletes számítási módszert közölnek. Például a terhek, a fesztáv, és a maximálisan megengedett lehajlás érték alapján táblázatból kereshető ki az alkalmazandó tábla szükséges minimális vastagsága. A két Finnforest termék számítása megegyezik, itt a táblákat felépítő rétegek vastagságában és számában van különbség. A KLH panelje a Finnforest Leno-hoz hasonló, de a számítási módszer jelentősen eltér attól.

A termékek előnyei már a tervezés fázisában jelentkeznek. Kötetlen alaprajzi szerkesztést tesznek lehetővé, a tervező nincs raszterhálózathoz kötve, mint vázas szerkezetek esetében. Egyszerű épületelemekből építkezik a rendszer, tulajdonképp egy felnagyított makettként fogható fel. Az előre kidolgozott csomópontok csökkentik a hibás tervezés

kockázatát. Mivel a panelek ellenőrzött körülmények között, előregyártva készülnek, ezért nagy megbízhatósággal biztosítható az egyenletes minőség.

Építés közben az előregyártott elemeket már csak összeszerelni kell a helyszínen, ezért az építkezés időjárástól szinte függetlenül, gyorsan végezhető. A szerkezetek kivitelezése az átlagos építési munkáknál kevesebb, de szakképzett munkaerőt igényel. A panelek csatlakozásai, pl. falcolások, szintén az előregyártás során készülnek, a panelek csatlakozása egyszerű. Mivel a fát nedvességtől védeni kell, ezért a felmenő szerkezeteket célszerű a pince vasbeton dobozáról, lehetőleg a talajszint felett min. 30 cm-től indítani. A rendszer előnye, hogy fal- és födémszerkezetként is azonos szerkezeti elemet használhatunk. Mivel a táblákból célszerűen falas (cellás) rendszerű épület hozható létre, a megfelelő számú és irányú fal, illetve a födémek már önmagukban biztosítják az épület merevségét, nincs szükség kiegészítő merevítésre. A cellás jellegből adódóan leginkább lakó, esetleg iskola funkciójú épületekhez szokták használni. Két megvalósult példa:



23. ábra: University of Karlsruhe, étterem



14. ábra: London, lakóépület

étterem

Németország, University of Karlsruhe
2005

Architecture office J. Mayer-H, Berlin
Finnforest Glulam, Finnforest Kerto®,
Leno®

lakóépület

Anglia, London, Hackney
2009

Waugh Thistleton
KLH Massivholz

A panelek tömör felépítése nagy tartósságot biztosít. Környezetvédelmi szempontból nagyon kedvező a fa használata, mert a faanyag CO₂-t tárol, mely így kötött állapotban nem járul hozzá a légkör hőmegtartó képességéhez: az üvegházhatáshoz. Érdeemes a rétegrendet páraáttersztő módon kialakítani, azaz kifelé haladva egyre kisebb páradiffúziós ellenállású

rétegeket beépíteni. Mivel a szerkezet a környezetéből nedvességet képes felvenni, aktívan szabályozza a belső terek páratartalmát, az elnyelt párárt vissza tudja adni a belső térnek. Természetes építőanyagként kellemes életteret biztosít. A panelek teherhordó, merevítő és térelhatároló funkciót is betöltenek egyszerre. Precíz kivitelezés esetén a táblák szélzárása kielégítő, így nem szükséges szélzáró fólia alkalmazása. Más anyagokkal való csatlakozásnál, pl. vasbetonnál, feltétlenül vizsgálni kell az épületfizikai viselkedést. Követelményektől függően a külső oldalra csapadékszáró fólia kerül, amit csatlakoztatni kell az ajtókhöz, ablakokhoz. A légtömörség a panel sűrűségétől és a csatlakozásoktól függ. Ha a hőszigetelés elég merev, akkor közvetlenül a panelre rögzíthető, ellenkező esetben egy köztes szigetelést tartó vázra készül. Legkívülre még homlokzatburkolat kerül, általában kétrétegű, átszellőztetett homlokzatokat készítenek. Háromféle felületi minőségben gyártják a táblákat: ipari, ipari látszó, és látszó felületek érhetők el.

A három féle tábla általános jellemzése táblázatos formában:

	Finnforest Leno	Finnforest Kerto-Q	KLH Massivholz
hossz	max. 14,80 m	1,82 m szélességnél max. 23,0 m 2,50 m szélességnél max 20,0 m	max. 16,5 m
szélesség	max. 4,80 m	1,82/2,50 m	2,40/2,50/2,72/2,95 m
sűrűség	kb. 500 kg/m ³	480 – 510 kg/m ³	480 kg/m ³
rétegszám	3-9	7-23	3-8
rétegvastagság	17, 27, 33 mm	3 mm	19, 22, 27, 30, 34, 40
táblavastagság	51-297 mm	27-69 mm	60-320 mm
nedvességtartalom	10±2 %	10%	12%±2%
deformációk	-	-	elhanyagolható
külső rtg. rostirányában:	0,01%/1% nedvességtartalom változás hatására	0,01%/1% nedvességtartalom változás hatására	elhanyagolható
merőleges réteg irányában:		0,03%/1%	elhanyagolható
a lap síkjára merőlegesen:	0,2%/1%	0,24%/1%	0,24mm/m 1%

			nedvességtartalom változás hatására
kiindulási anyagminőség	C24	anyagjellemzők vannak meghatározva, de kb. C30	anyagjellemzők vannak meghatározva
beégési sebesség	0,7 mm/min	$\beta_0=0,67$ mm/min $\beta_n=0,70$ mm/min	0,67 mm/min ha csak a legkülső réteg ég be 0,76 mm/min ha több réteg ég be
tűzállósági besorolás	nincs adat	D-s1-d0	nincs adat
μ – páradiffúziós ellenállás	60	60	25-50 (kapcsolatok figyelembe vételével)
λ – hőátbocsátási tényező	0,13 W/mK	0,13 W/mK	0,13 W/mK
hőtároló kapacitás	nincs adat	nincs adat	1600 J/kgK
hangszigetelés	nincs adat	nincs adat	93 mm-es panel esetén, a kerülőutak figyelembevételével: 29 dB

5. Szilárdságtani számítások. Teherbírás

5.1. Számítási módszerek

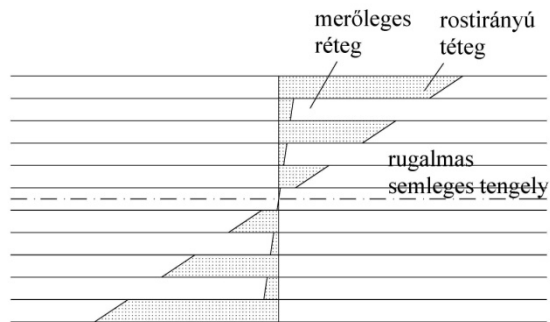
A Finnforest és a KLH gondolatmenete jelentős eltéréseket mutat, de általánosságban mindkettőről elmondható, hogy egy irányban teherhordónak tekinti a panelokat, így a számításokat 1 m széles födémszakaszra végzik. A kersztmetszet kialakításából származó bizonytalanságokat, gyengítéseket az inercianyomatékban, és a rugalmassági modulusban veszik figyelembe. A Finnforest a terhek, a fesztáv, és a lehajlási követelmények alapján adja meg az alkalmazandó paneltípust. A KLH a fesztáv függvényében az egyes panelekhez különböző effektív inercianyomatékokat rendel és ebben veszi figyelembe a rétegek irányának váltakozását, a rétegek közötti relatív elmozdulásokat, és a nyírásból adódó többlet lehajlásokat. A Finnforest alkalmazása egyszerűbb, felhasználóbarátabb, mert kevesebb tényező használatát igényli. A KLH számításában effektív hajlítási merevséget kell meghatározni, ami sokkal munkaigényesebb, kevésbé kényelmes. A Finnforest Leno

számítása minden változót egy helyen: a rugalmassági modulusban vesz figyelembe. Így a keresztmetszet inerciájának meghatározását tömör szelvényként végezhetjük, ami nagy egyszerűsítést jelent.

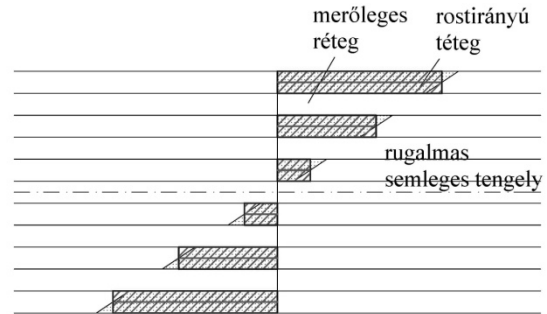
5.2. Finnforest Leno

A *Finnforest* által közreadott táblázatos panel kiválasztási módszer, és az ott szereplő különböző megengedett lehajlási értékek arra utalnak, hogy a háttérben álló számítás lehajlás-vizsgálaton alapul. Ez azért is tűnik valószínűnek, mert a lehajlási korlátozás általában szigorúbb követelményeket támaszt a szerkezettel szemben, mint a teherbírás. Az anyagjellemzők esetében panelonként változó értékeket ír elő a gyártó, míg az inercianyomatókánál mint tömör keresztmetszetre vannak meghatározva az értékek. E kettő szorzatából számítja az útmutató a hajlítási merevséget: $I_{\text{tot}}E_{\text{eff}}$, ahol E_{eff} (a 24. és 25. ábrán: $E_{0,\text{mean}}$) táblánként különböző.

A „*saját módszer*” szerint az egy irányba teherhordó lemezsávnak csak azon rétegeit tekintem dolgozónak – hatékonyak –, melyek rostiránya a födém teherhordásával egyező. A merőleges rétegeket teljesen elhagyom („kihúzott fog analógia”), és az így kapott keresztmetszet inerciáját tekintem I_{eff} effektív inerciának. A következő két ábra a táblák hajlításból származó valódi-, és a számítás alapját adó feszültségeloszlást mutatja be. A táblákon belüli feszültségeloszlás hasonlít a természetes faanyagon belül hajlítás hatására kialakuló feszültségeloszlásra (9. ábra), ahol az ugrásokat a korai és a késői pászta eltérő rugalmassági modulusai okozták. A táblák esetében az ugrások magyarázata, hogy a rostirányú rugalmassági modulus 15-20-szorosa a rostirányra merőleges rugalmassági modulusnak, illetve a teherhordási irányra merőleges rétegekben a deszkák oldalai nincsenek feltétlenül vannak összeragasztva. A természetes faanyagban a késői pásztákban a sejtüregek kisebbek, így relatív több cellulózt (szilárdító anyagot) tartalmaznak, mint a korai pászták. Ez esetben tehát az anyag inhomogenitása felel az eltérésért. A vizsgált táblák esetében azonban a fa anizotróp tulajdonsága okozza a változást: rostirányban és arra merőlegesen jelentős eltérések vannak az anyagjellemzőkben.



25. ábra: valódi feszültségeloszlás

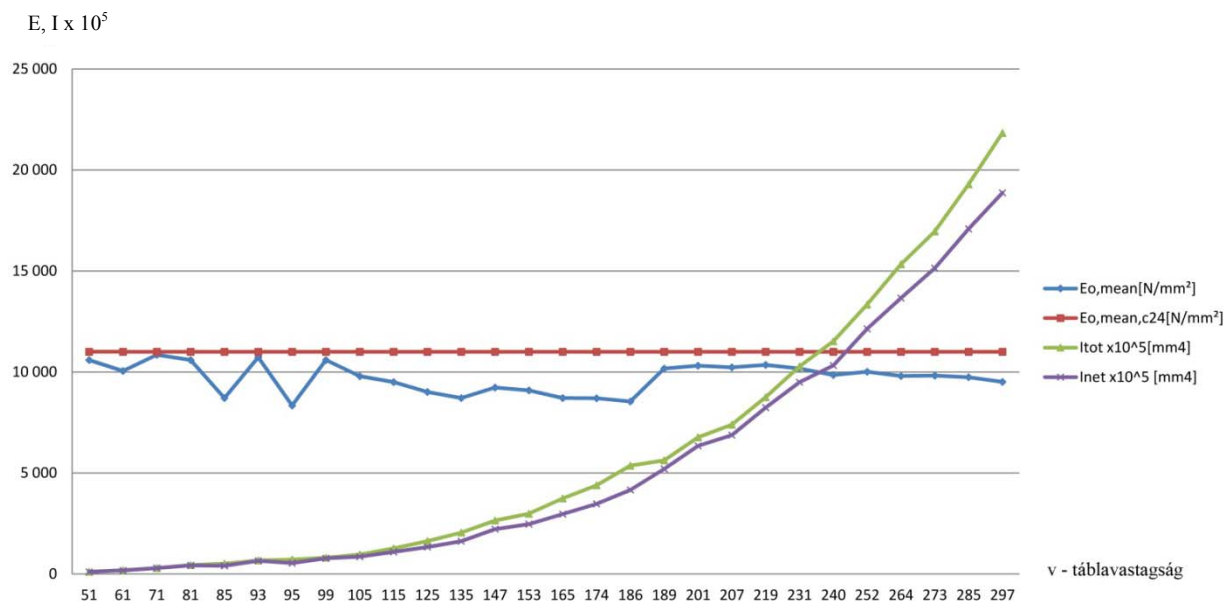


26. ábra: feszültségeloszlás a számításhoz

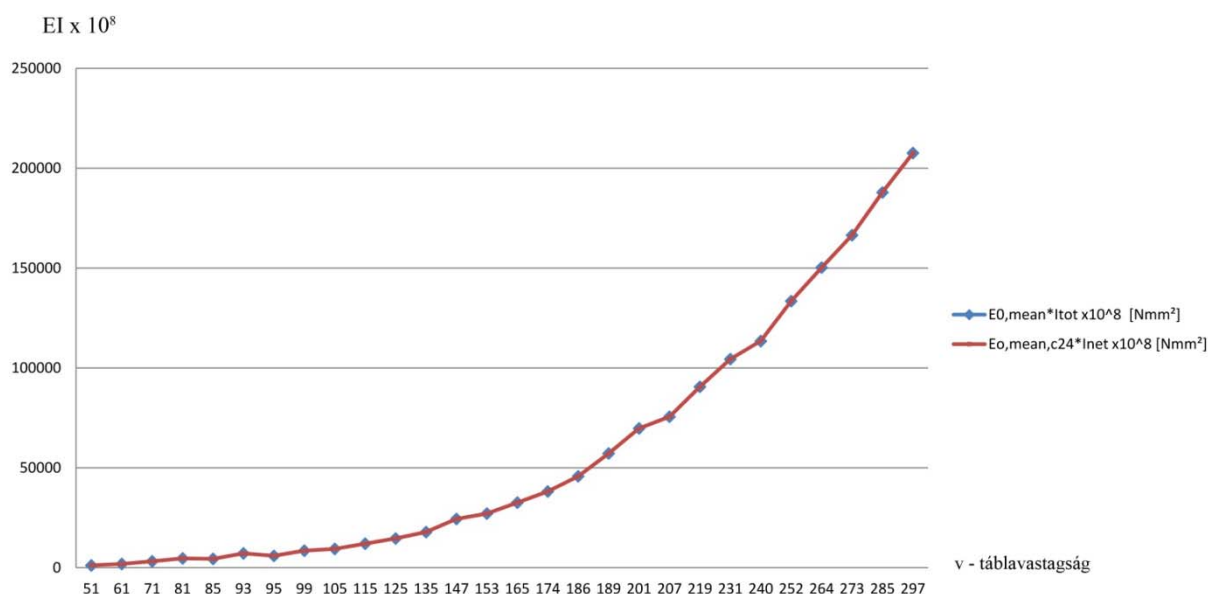
Ez a feltételezett feszültségeloszlás két okból is a biztonság javára közelít. Egyrészt, mert a fődém általában nem csak egy irányban hordja a terheket, másrészt a merőleges rétegek kis mértékben, de szintén részt vesznek az egy irányú teherbírásban. Ez a többlet biztonság fedezi a rétegek közötti relatív eltolódások, és a nyírásból származó többlet alakváltozások kedvezőtlen hatásait. Az effektív hajlítási merevséget $I_{eff}E_{0,mean,c24}$ szorzataként határozom meg, ahol $E_{0,mean,c24}$ a C24-es kiindulási alapanyag rugalmassági modulusának közéértéke.

Mivel a két eljárásból nyert hajlítási merevségek pontosan megegyeznek, feltételezem, hogy E_{eff} értékeket a saját módszerrel kapott hajlítási merevség és a teljes keresztmetszet inerciájának hányadosaként határozták meg:

$$E_{eff} = \frac{I_{eff}E_{0,mean,c24}}{I_{tot}}$$



27. ábra: E és I értékei a kétféle számításban

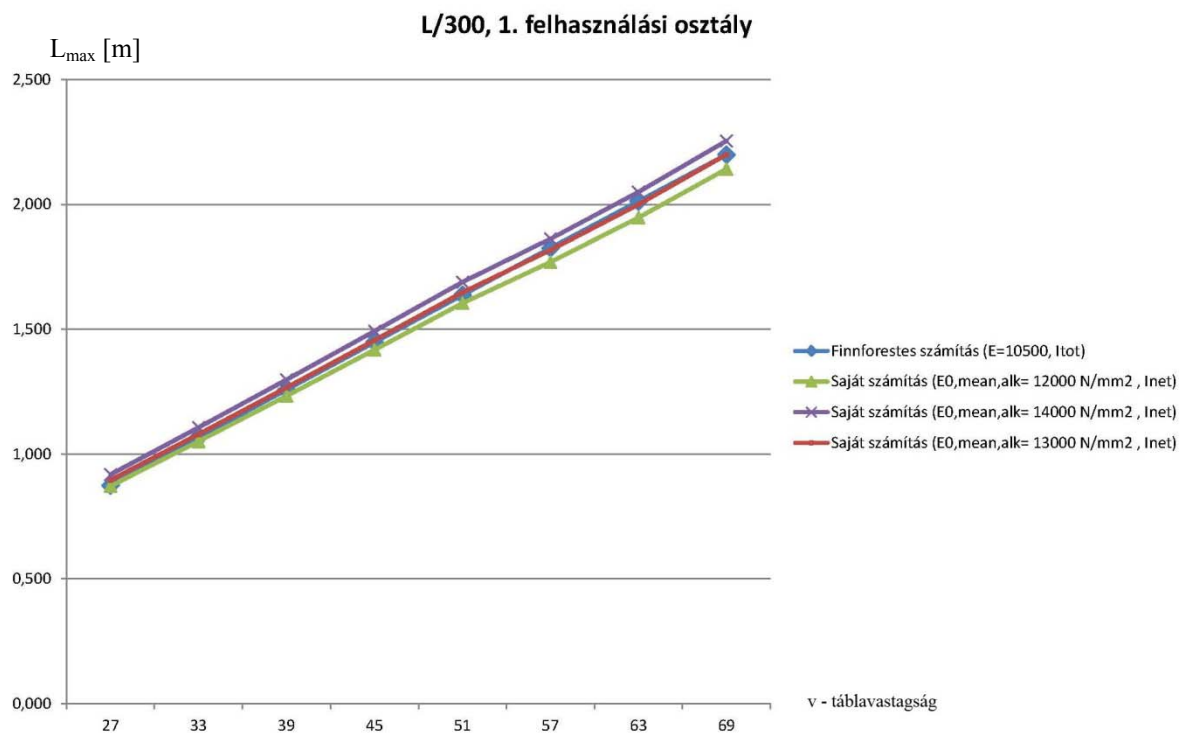


28. ábra: EI hajlítási merevség a kétféle számításban

5.3. Finnforest Kerto-Q

A Kerto-Q furnér vastagságú, 3 mm-es lapokból épül fel. A rétegek közül nem minden második keresztirányú, ahogy a Leno-nál vagy a KLH-nál, de arányaiban nagyjából ugyanannyi. Mivel ebből a termékből inkább vonalszerű, keskeny, de magas tartószerkezeteket célszerű készíteni, ezért földemként csak sűrűbb alátámasztással alkalmazható.

A hajlítási merevség, a Leno-nál ismertetett módon történik. Itt az volt a kérdés, hogy a kiindulási alapanyag milyen minőségű lehetett. Ennek megválaszolására 3 féle szilárdsági osztályra: C30, C35, és C40 határoztam meg az L/300-as lehajéási követelményhez, és adott teherhez tartozó maximális fesztávokat. Ezeket az értékeket a Finnforest számításával kapott eredményekkel hasonlítottam össze. A C35-ös szilárdsági osztály esetén voltak a legkisebbek az eltérések a Finnforest számításától (max. 1,38 cm), így a kiindulási anyag kb. C35-ös lehet. Megjegyzem, hogy a megengedett maximális fesztávok helyett a hajlítási merevségek összehasonlítását is végezhettem volna, de $L_{\max}$ -ok különbsége szemléletesebb. C30-as osztálynál 6,97 cm, C40-esnél 5,89 cm volt a két számítás közötti legnagyobb eltérés.



29. ábra: kiindulási anyag szilárdsági osztályának meghatározása

5.4. KLH Massivholz

Alapelve a KLH rétegrendjének megtervezésekor, hogy a hosszanti – teherhordó – rétegek vastagsága 19, 33, és 40 mm, a keresztirányúaké 19, 22, 30, 34, vagy 40 mm lehet. Egy táblán belül a hosszanti rétegek mind azonos vastagságúak, és a panel mindig szimmetrikus felépítésű.

A hajlítoszilárdság növeléséhez a keresztmetszet szélén alkalmaznak dupla hosszirányú réteget, nagyobb nyírási teherbírás érdekében a középső réteget kettőzik. A tábla keresztirányú teherbírása növelhető úgy, hogy a keresztirányú rétegeket vastagabb, a hosszirányú rétegeket vékonyabb pallókból készítik. Az elforgatott rostirány miatt maga a panel kétirányban teherhordó. Azonban a kétféle irányú rétegek aránya, helyzete a keresztmetszeten belül, illetve a lefedett tér alaprajzi arányai miatt egyirányban teherhordónak tekintjük a termékeket.

A KLH a valóságot megközelítőleg jól leíró számítási módot alkalmaz. A táblák rétegei közötti ragasztás szigorúan véve rugalmas kapcsolatot biztosít, tehát az elemek között relatív elmozdulások jönnek létre. Bár ez a ragasztás esetén nagyon kis mértékű, azonban elhanyagolásával a biztonság kárára tévedünk, mert a keresztmetszet teherbírását csökkenti. A Fa Tartószerkezetek Segédlet és a rétegelt-ragasztott faelemek szokásos számítása úgy tekinti a ragasztással összekapcsolt kétszelvényű rudat, mintha tömör keresztmetszet lenne. A gyártó a segédletében azt írja, hogy a keresztmetszt effektív inercianyomatékában a váltakozó rétegeken túl a nyírási alakváltozásokat is figyelembe veszi. Ezen kívül a hajlítási merevség számításakor egy ún. “ γ -módszerrel” számol, ami a mechanikusan kapcsolt gerendák *effektív hajlítási merevségének* megállapítására ad eljárást, tehát a rétegek relatív elmozdulását sem hanyagolja el.

A saját számításban a hajlítási merevséget csökkentő három hatást – *a merőleges rétegeket, a nyírásból adódó többlet alakváltozásokat, és a rétegek közötti relatív elmozdulásokat* – a következők szerint számítom.

5.4.1. “ γ -módszer”

A merőleges rétegeket és a rétegek közötti relatív elmozdulásokat az ún. “ γ -módszerrel” veszem figyelembe, melyet az *Eurocode 5: Faszerkezetek tervezése* ír le részletesen. A számítási módszer lineárisan rugalmas számításon alapul és feltételezi a következőket:

- (1) kéttámaszú gerendákat vizsgálunk, l támaszközzel. Több támaszú gerendák esetén a kifejezésekben a fesztáv a valódi 0,8-szorosának, konzol esetén a 2-szeresének felel meg.
- (2) Az egyes részek (rétegek) mindegyike egy elemből van a fesztáv teljes hossza mentén, vagy ragasztással vannak toldva, és téglalap keresztmetszetűek.

(3) Az egyes részek (rétegek) mechanikus kapcsolóelemekkel kapcsolódnak, melyek K_{ser} pillanatnyi csúszási tényezővel (slip modulus) vannak figyelembe véve.

(4) A kapcsolóelemek közötti s távolság állandó, vagy egyenletesen változik a nyíróerőnek megfelelően úgy, hogy $s_{max} < 4 s_{min}$.

(5) A z irányban (vertikális ir.) működő terher szinuszosan vagy parabolikusan változó $M=M_{(x)}$ nyomatékot, és $V=V_{(x)}$ nyíróerőt ad.

A lehajlásokat az effektív hajlítási merevséggel számíthatjuk. Az effektív hajlítási merevség 3 elemű keresztmetszet esetén:

$$(EI)_{eff} = \sum_{i=1}^3 (E_i I_i + \gamma_i E_i A_i a_i^2)$$

ahol

$A_i = b_i h_i$ az egyes elemek keresztmetszeti területe

$I_i = \frac{b_i h_i^3}{12}$ az egyes elemek inercianyomatéka a saját súlypontjukra

$\gamma_i = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 E_i A_i s_i^2}{K_i l^2}}$ a rétegek közötti relatív elmozdulásokat figyelembe vevő tényező,

$\gamma_2=1$ mert 3 elemből álló keresztmetszet esetén a középső elemhez viszonyítjuk a szélső rétegek elmozdulásait

s_i a középső és az i -edik réteg közötti kapcsolóelemek kiosztási távolsága

K_i a középső és az i -edik réteget összekapcsoló kapcsolóelem csúszási tényezőjének teherbírási (K_u), vagy használhatósági (K_{ser}) vizsgálatához tartozó értéke

Mivel ragasztás esetén s_i és K_i nem értelmezhető, ezért a KLH útmutatása szerint:

$$\frac{s_i}{K_i} = \frac{h_i}{G_R b}$$

helyettesítést alkalmazhatunk, ahol

h_i két kapcsolt réteg közül a teherbírási irányra merőleges réteg vastagsága

G_R nyírási modulus (shear modulus), melynek értéke $G_R=50 \text{ N/mm}^2$

tehát:

$$\gamma_i = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 E_i A_i h s_i}{G_R b l^2}}$$

Ezzel a helyettesítéssel a módszer 3-nél több elemből összeállított keresztmetszetre is alkalmazhatóvá válik.

5.4.2. Nyírási alakváltozások

Mivel a gerenda hajlított-nyírt szerkezet, ezért mindig van nyírási alakváltozás is. Acélnál, vasbetonnál ez elhanyagolható, mert $G = \frac{E}{3} - \frac{E}{2}$ között mozog, azonban a fenyőfánál ez az arány $G = \frac{E}{16}$, azaz a nyírási rugalmassági modulus a hajlítási rugalmassági modulushoz képest egy nagyságrenddel kisebb érték. A két anyagjellemző kapcsolatára bármely homogén, lineárisan rugalmas anyag esetén a $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ összefüggés fennáll. Nyírási rugalmassági modulusként a rostiránnyal párhuzamos értéket szoktuk használni, mert a különböző irányokban mérhető értékek közül ez a legkisebb, így legfeljebb a biztonság javára tévedünk.

Čížek 1932-ben már publikálta azt az eredményét, mely szerint a zömök gerendák vertikális nyírási igénybevétele csökkenti a mérhető hajlítózilárdságot. Baumann 1922-ben megmutatta, hogy a szakítózilárdság értéke hogyan csökken az L/h arány csökkenésével, azaz egyre zömökebb gerendák esetén. A hajlítózilárdság $L/h > 20$ esetén tekinthető konstans értéknek. Ha ismert a hosszú gerendára vonatkozó hajlítózilárdság, ebből a következő képlet segítségével számolható a rövid (zömök) gerenda hajlítózilárdsága (de csak $7,5 < L/h < 40$ teljesülése esetén):

$$\sigma_{bbs} = \sigma_{bbl} \frac{L}{L+h},$$

ahol σ_{bbs} zömök gerenda hajlítózilárdsága, σ_{bbl} a karcsú gerenda hajlítózilárdsága.

A Bernoulli-Navier gerendaelmélet feltételezi, hogy az eredetileg sík keresztmetszetek a deformációk után is síkok, és adott pontban merőlegesek maradnak a meggyömbült rúdtengelyre, vagyis annak érintőjére. A Timoshenko-modell figyelembe veszi a nyírási deformáció hatását, vagyis a keresztmetszetek pontjainak a tengelyre merőleges eltolódását.

A nyírást figyelembe vevő eljárások lehetnek:

- a nyírási-analógia módszer (DIN 1052)

- γ -módosító tényezővel való számítás (az alábbiakban)
- Timoshenko gerenda elmélete

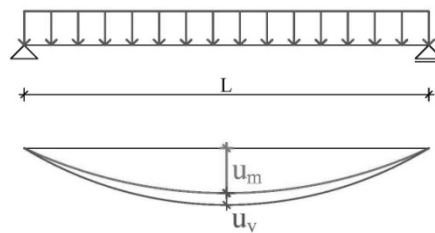
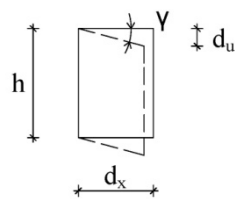
A következőkben a hajlításból és a nyírásból származó lehajlások összehasonlítását teszem meg. Megállapítom a kettő arányát, és egy p_v tényező bevezetésével a nyírásból adódó többletlehajlásokat $I_{eff} = I_0 p_v$ csökkentett inerciával veszem vigyelembe, ahol I_0 a nyírási alakváltozások hatását még nem tartalmazó inercianyomatékot jelenti.

Kéttámaszú, l hosszúságú, EI hajlítási merevségű, tömör, és q terhet viselő tartó esetén a hajlításból származó lehajlás értéke:

$$u_m = \frac{5}{384} \frac{ql^2}{EI}$$

A nyírásból adódó u_v lehajlás függ a gerenda l/h arányától, és aránya kifejezhető a hajlításból származó u_m lehajláshoz képest.

$$d_u = \gamma d_x$$



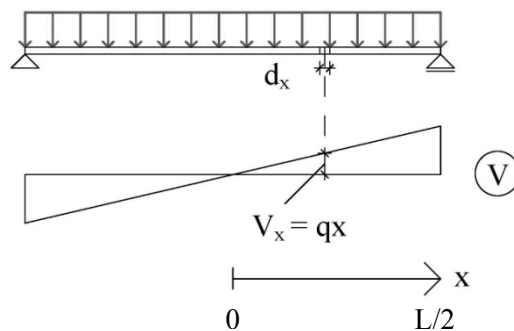
$\square \rightarrow EI$

30. ábra: lehajlás hajlításból és nyírásból

$$\gamma = \frac{\tau}{G} = \rho \frac{V}{AG}$$

ahol $\rho = 1,2$

(téglalap keresztmetszet esetén)



31. ábra: nyíróerő ábra

$$V_x = qx$$

$$u_v = \sum_0^{l/2} d_u = \int_0^{l/2} \rho \frac{qx}{AG} dx = \left[\rho \frac{q}{AG} \frac{x^2}{2} \right]_0^{l/2} = 1,2 \frac{q}{AG} \frac{\left(\frac{l}{2}\right)^2}{2} - 0 = \frac{1,2ql^2}{8AG}$$

$$\frac{u_v}{u_m} = \frac{1,2ql^2}{8AG} \frac{384}{5} \frac{EI}{ql^2} = 15,36 \left(\frac{h}{l}\right)^2$$

azaz

$$\frac{u_v}{u_m} = 15,36 \left(\frac{h}{l}\right)^2$$

Látható, hogy a nyírásból adódó lehajlás a gerenda L/h arányától függ. Így már érthető, hogy a KLH táblázatában mért függ I_{eff} a fesztávtól, illetve, hogy kisebb fesztáv – azaz nagyobb L/h arány – esetén miért kisebb I_{eff}/I_{tot} . Ha $L/h < 20$, akkor a gerenda zömök, és a nyírásból származó többlet lehajlásokat figyelembe kell venni. Ha $L/h > 20$, akkor a gerenda karcsú, és u_v lehajlás elhanyagolható nagyságrendű.

		L/h							
$\frac{L}{h}$	5	6	8	10	12	16	20	22	
$\frac{u_v}{u_m}$	0,47	0,43	0,24	0,16	0,11	0,06	0,04	0,03	

A maximális lehajlás a hajlításból és a nyírásból:

$$u_{tot} = u_m + u_v = u_m \left(1 + 15,36 \left(\frac{h}{l}\right)^2\right)$$

$u_{tot} \sim \frac{1}{I_{eff}}$ ahol I_{eff} -el számított lehajlás már tartalmazza a nyírásból adódó lehajlást is

$u_m \sim \frac{1}{I_0}$ ahol I_0 a tömör keresztmetszet eredeti inercianyomatéka

$$\frac{u_{tot}}{u_m} = \frac{I_0}{I_{eff}} \quad \Rightarrow \quad I_{eff} = I_0 \frac{u_m}{u_{tot}} = I_0 \frac{u_m}{u_m \left(1 + 15,36 \left(\frac{h}{l}\right)^2\right)} = I_0 \frac{1}{\left(1 + 15,36 \left(\frac{h}{l}\right)^2\right)}$$

azaz

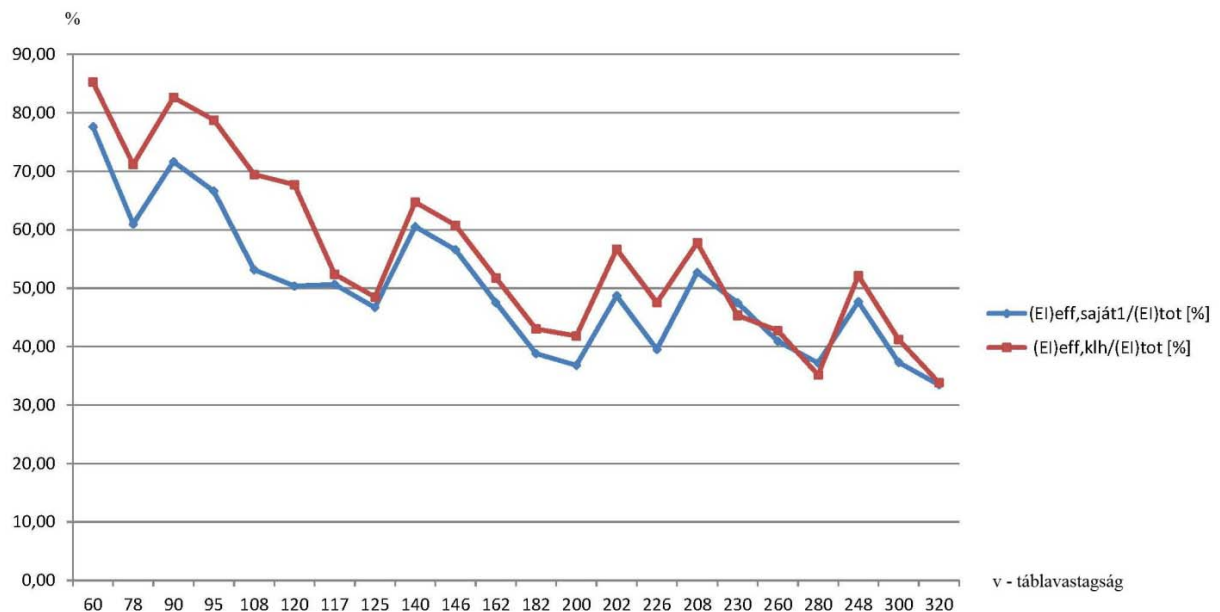
$$I_{eff} = \frac{1}{\left(1 + 15,36 \left(\frac{h}{l}\right)^2\right)} I_0$$

Bevezetem p_v tényezőt:

$$p_v := \frac{1}{\left(1 + 15,36 \left(\frac{h}{l}\right)^2\right)}$$

Így: $I_{eff} = p_v I_0$.

A γ -módszerrel kapott hajlítási merevséget p_v tényezővel szorozva egy olyan hajlítási merevséget kapunk, melyben már nemcsak a merőleges rétegeket, és a rétegek közötti relatív elmozdulásokat vettük figyelembe, hanem a nyírási alakváltozásokból származó többlet lehajlást is. (Ez az effektív hajlítási merevség $(EI)_{\text{eff,saját1}}$ néven szerepel az Excel-táblázatban.) Az effektív hajlítási merevséget $E_{0,\text{mean}} = 12000 \text{ N/mm}^2$ -rel osztva – melyet a KLH segédlete ad meg – kapjuk $I_{\text{eff,saját1}}$ -et. A KLH táblázata a számításokban alkalmazható $I_{\text{eff}}/I_{\text{tot}}$ arányát adja meg. A saját számításból nyert $I_{\text{eff,saját1}}/I_{\text{tot}}$ értékek jól közelítik a KLH adatait. Az összehasonlítást $L = 2 \text{ m}$ fesztávú födémre végeztem el, mert a helyettesítő lemezsáv kis L/h aránya esetén lesz a nyírási lehajlások hatása is számottevő. Az alábbi grafikon a KLH $I_{\text{eff}}/I_{\text{tot}}$ és a saját számításból kapott $I_{\text{eff,saját1}}/I_{\text{tot}}$ értékeket hasonlítja össze. I_{tot} a teljes gerenda (helyettesítő lemezsáv) inercianyomatéka tömör kersztmetszetet véve, tehát akár úgy is értelmezhető az effektív inercia, hogy b szélességű gerenda helyett $b_{\text{eff}} = b \frac{I_{\text{eff}}}{I_{\text{tot}}}$ szélességű, de azonos magasságú tömör gerendával számolhatunk.

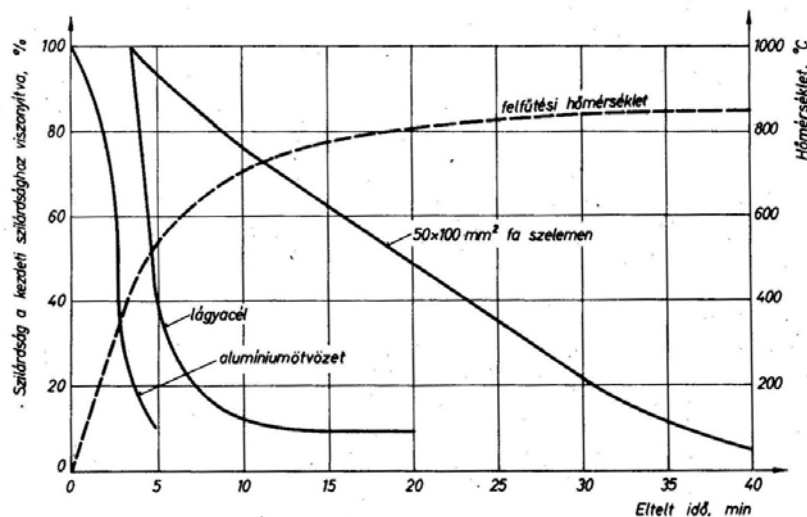


32. ábra: KLH és saját számítás $(EI)_{\text{eff}}/(EI)_{\text{tot}}$ összehasonlítása

6. Fa tartószerkezetek tűzterherre való méretezése

6.1. A fa, mint éghető anyag

Fa tartószerkezetek esetén fokozottan jelentkezik a tűz elleni védelem igénye, mivel maga az alapanyag éghető. Ez a tulajdonsága azonban nem gátolja tartószerkezetként való alkalmazását, hiszen tűz eseti viselkedése sok más építőanyagéhoz képest igen kedvező. Az egyenletes beégés, és az elszenesedett részek kedvező hatása miatt a keresztmetszeti ellenállás a keresztmetszet csökkenésének mértékében változik. Önmagában a hőhatásból nem származik stabilitási tönkremenetel, ellentétben pl.: a vékony falú acél szelvények, melyek megolvadnak.



33. ábra: építőanyagok szilárdsága tűz esetén

Az égés három szükséges feltétele: az éghető anyag, oxigén, és az éghető anyag gyulladásponti hőmérsékletének megfelelő hőmérséklet. Fa égésénél tökéletlen égésről beszélhetünk, mert a rendelkezésre álló oxigén mennyisége nem elegendő az összes komponens oxidációjához, így további éghető égéstermékek keletkeznek. Az anyagok égésekor energia szabadul fel. Az egységnyi mennyiségű éghető anyag tökéletes égésekor felszabaduló energiát *égéshő*nek hívjuk, melynek értéke atmoszférikus nyomásra és 25°C-ra vonatkozik. A fa égéshője 15 MJ/kg. Összehasonlításképpen: a gázolajé 44,8 MJ/kg, a kőszéné 15-27 MJ/kg. Az égés sebessége fa esetén kb. 0,5-0,8 mm/min. Bizonyos értelemben égés a bomlási folyamat és a detonáció is, hiszen ezalatt oxidáció történik, de nagyon különböző sebességgel. Fa égésekor az éghető anyag és az oxigén a folyamat kezdetén nem keverednek, ún. reakció zónában találkoznak egymással, s így az égés hosszabb ideig tart. Ezt *diffúz égés*nek nevezzük. Az oxigén és az éghető anyag eloszlása szempontjából *kevert*

égésről beszélünk, ha e kettő az égés kezdetén már keveredik egymással, pl.: gázrobbanás esetén. Ekkor az égés nagyon rövid idő alatt képes lezajlani. A fa tűz jelenségét fény és hőhatás is kíséri, e kettő szorosan összefügg.

A faanyagban végbemenő változások a hőmérséklet függvényében lehetnek reverzibilisek és irreverzibilisek. 100-103°C-ig *reverzibilis folyamatok* játszódnak le, a sejtfalban kémiaiilag kötött víz távozik. 100-200°C között *termikus bomlás* történik, melynek során éghető gázok még nem, de illóolajok már felszabadulnak, valamint felszíni elszíneződés következik be. 200-260°C között van a *lobbanási zóna*, ekkor helyenként már egy kevés éghető gáz is felszabadul. 260-330°C az *égési, gyulladási zóna*, melyben az égési gázok felszabadulása folyamatos. 330°C felett *öngyulladással*, gyújtóláng nélkül kezd égni a fa.

A nagy testsűrűségű fafajok jobban ellenállnak a tűznek. Ezekben a nagy sűrűség, és a nagy sűrűséget okozó magas cellulóztartalom miatt az oxigén nehezen fér hozzá az éghető gázokhoz. Égéssel szembeni ellenállóság szempontjából a következő csoportokba soroljuk a fafajokat:

Ellenálló: a bükk, a kőris, a tölgy, az akác, és általában az egzotikus fajok,

Jól ellenálló: az erdei fenyő, a fekete fenyő, és a nyírfa,

Kevésbé ellenálló: a lucfenyő, a cseresznye, és a dió,

Legkevésbé ellenálló: a jegenyefenyő, a nyárfa, az éger, a fűzfa és a hárs.

A tűzzel szembeni ellenállóképességet a beégési sebesség jellemzi. A beégési sebesség azt adja meg, hogy egyenletes beégést feltételezve egy perc alatt hány mm-es mélységet ér el az elszénesedett zóna, melynek szilárdságát nullának tekintjük. A beégési sebesség (charring rate) a faanyagtól, a tűzvédelmi kezelés mértékétől, és a termék kialakításától is függ. Fa tartószerkezetek jellemzően maximum 60 perc tűzállóságot tudnak elérni.

A fa tűzállóságát három eltérő módon növelhetjük. A *tűzálló bevonatok* a fa felületén képeznek összefüggő réteget, és nehezítik annak felmelegedését, lángra lobbanását, de önmagában a fa éghetősége nem változik. Ez a módszer a legkevésbé hatékony, mert a festék vagy máz megrepedezik és lepattogzik a hő hatására. Így ha a szerkezet egy eleme lángra lobban, nem képes lokalizálni azt, és tovább vezeti a tüzet. A rómaiak ecettel kevert agyaggal vonták be a fát. Napjaink alkalmazott bevonatai: vízüvegoldat, bórax, bórsav, timsó, ammoniumsulfát, klórkalcium oldatával kevert égetett mész, hő hatására habosodó vízbázisú vagy szerves oldószeres bevonatok.

Egy másik lehetőség a tűzálló anyaggal való *körbeburkolás*. Itt szintén nem csökken a fa éghetősége, de annyival kedvezőbb a tűzálló bevonatoknál, hogy nehezebben megy tönkre tűz esetén. Körbeburkolásra használják: a kb. 8 mm vastag azbesztpapírt (bár ezt egészségkárosító hatása miatt ma már nem alkalmazzák), a rabitz-vakolatot, a gipszpallót, a parafakövet, és a gipszkartont.

A leghatásosabb módszer, amikor magának a fa anyagának hőhatással szembeni ellenállását javítjuk. A védőszer bejuttatásának technológiái: szórás, permetezés, kapilláris erőn alapuló: bemártás, fűrészelés, és áztatás.

Másik eljárás a nyomás alatt történő, sóoldattal való telítés. A telítés előtti gőzölés segíti a telítőszer behatolását. A jól impregnált fa a legnagyobb hőmérsékleten sem gyullad meg, gátolja a tűz továbbterjedését, tehát lokalizálja. Felülete csak kb. 1 cm mélységig szenesedik el, s ez a réteg már szigeteli a belsőbb részeket, illetve gátolja az oxigén utánpótlást. A telítőszerkezetek általában a korhadás, gombásodás, és rovarkárok ellen is védelmet nyújtanak.

6.2. Tervezési célok tűz esetén

Az épületek kialakításakor a tűz elleni védekezés legfőbb szempontja az életvédelem, a vagyonvédelem csak másodlagos cél. Ennek megfelelően biztosítani kell tudni a bentlévők biztonságos menekülését, mentésük lehetőségét, és az épület tűzoltó gépjárművel való megközelíthetőségét. A tűz szomszédos épületekre való áttérjedését korlátozni kell. Az épületszerkezeteknek meghatározott ideig ellen kell állniuk a tűzből származó hatásoknak, a fent leírt célok érdekében.

Az építőanyagok tűzzel és magas hőmérséklettel szembeni ellenállását különböző szempontok szerint tehetjük meg. Éghetőség szempontjából *éghetőségi csoportokba* soroljuk az anyagokat. Az osztályozás A-tól F-ig terjed, ahol A1 és A2 nem éghető, B-F eltérő mértékben éghető tulajdonságot jelent. Létezik még *füstfejlesztési osztályozás* (s1-s3), *égve csepegés és olvadákképződés* szerinti besorolás (d0-d2), ahol s1 és d0 jelentik a kedvezőbb értékeket.

Az építőiparban általában használatos téglalap keresztmetszetű, min 450 kg/m^3 sűrűségű fűrészelt faáru és a rétegelt-ragasztott min. 380 kg/m^3 sűrűségű faanyag égéskésleltetés nélkül D-s2, d0 besorolást kap. Az osztályozás nem veszi figyelembe a

mérgező füst hatását, de fa esetén ezzel nem kell számolni, ellenben például a PUR-hab kitöltésű szendvicspanelekkal, ahol a mérgező gázok felszabadulása jelentős.

Az osztályba sorolás kísérletekkel történik. Vizsgálják a gyúlékonyságot, az anyag hozzájárulását a tűzfejlődéshez, a nem éghetőséget, és a bruttó fűtőértéket.

A tűzállósági határértékek az MSZ EN 13501-2 szabályozás szerint a következők: *stabilitás* (R), mely a teherhordó képesség megőrzését, *integritás* (E), mely az átégés megakadályozását, lángáttörés és gyúlékony gázok átjutását, és *felmelegedés* (I), mely a védett oldal hőmérsékleti viszonyaira vonatkozó feltételeket jelenti.

A felmelegedési határállapot akkor következik be, ha a védett oldalon a hőmérséklet átlaga meghaladja a 140°C-ot, vagy bármely ponton a 180°C-ot. A három határértékre külön-külön, és együtt is adható meg követelmény, az épületszerkezet funkciójából is adódik, hogy melyeket kell előírni. Térrelválasztó szerkezet esetén integritási, és esetleg felmelegedési, kizárólag teherhordó funkcionál csak teherbírasi (stabilitási), és teherhordó-térrelválasztó szerkezet esetén integritási, teherbírasi, és esetleg felmelegedési követelményeket írunk elő. Pl.: REI 60, azt jelenti, hogy a három határállapot bármelyike a tűznek való kitettség kezdetét követő 60. perc után következhet csak be. További előírás vonatkozhat az épületszerkezet mechanikai ellenálló-, és füstzáró képességére. Tűzgátló szerkezeteknél REI-M (M a mechanikai hatásokkal szembeni ellenállóság), válaszfalaknál EI szükséges értékeit írják elő.

Tűzszakasz kialakításánál a tűzhatárokat alkotó elemeket, kapcsolatokat úgy kell kialakítani, hogy biztosítsák az elválasztó funkciójukat a tűznek való kitettség ideje alatt. Integritási, teherbírasi, és felmelegedési követelményeknek kell eleget tenniük. Fa szerkezet esetében 300°C alatt nincs hőhatásból származó tűzterjedés.

6.3. Méretezés tűzteherre

A következő méretezési eljárást az *Eurocode 5 Faszerkezetek tervezése* című kiadvány tartalmazza, és az EN 1995-1-2:2004 európai harmonizált szabványt követi. Magyar nemzeti szabványként az európai szabvány angol nyelvű változatát kell alkalmazni.

6.3.1. Alapfogalmak, jelölések

A következőkben néhány alapfogalom, és jelölés magyarázata következik:

Beégési vonal (char-line): határvonal a beégett réteg és a visszamaradó keresztmetszet között.

Megmaradó keresztmetszet (residual cross-section): az eredeti keresztmetszet beégett réteggel való csökkentése.

Effektív keresztmetszet (effective cross-section): a keresztmetszet csökkentés alapú eljárásban használjuk. A megmaradómaradó keresztmetszetből (residual cross-section) eltávolítjuk az átmeneti zónát is, vagyis azokat a részt, amely már nem égett be, de a szilárdságát és a merevségét nullának feltételezzük.

Képzelt keresztmetszet (notional cross-section): a beégési vonal sarok-lekerekítéseinek hatását tartalmazó téglalap keresztmetszet.

Védelem kimerülésének ideje (failure time of protection): közvetlen tűznek kitett elem védettségének ideje, mely akkor ér véget, amikor a tűzvédő burkolat leesik a fa elemről, vagy az elemet védő szerkezeti elem leomlik, vagy amikor egy másik szerkezeti elem által nyújtott védelem pl. a túlzott deformációk következtében megszűnik.

Tűzvédő anyag (fire protection material): olyan anyag, vagy anyagok kombinációja, amely abból a célból kerül alkalmazásra egy szerkezeti elemen, hogy növelje annak tűzzel szembeni ellenállóságát.

Védett elemek (protected members): olyan elemek, amelyekben redukálva van a hőmérséklet emelkedés és a beégés lehetősége.

G_k az állandó hatás karakterisztikus értéke

$Q_{k,1}$ a kiemelt esetleges teher karakterisztikus értéke

S_{05} a merevségi jellemző (rugalmassági vagy nyírási modulus) 5%-os kvantilise normál hőmérsékleten

$f_{d,fi}$ a szilárdság tervezési értéke tűz esetén

$S_{d,fi}$ merevségi jellemző (rugalmassági vagy nyírási modulus) 5%-os kvantilise tűzesetre ($E_{d,fi}$ vagy $G_{d,fi}$)

f_{20} a szilárdság 20%-os kvantilise

S_{20} a merevségi jellemző 20%-os kvantilise

$\gamma_{M,fi}$ parciális biztonsági tényező tűzesetre

$k_{mod,fi}$ a felhasználási osztályt, és a teheridőtartamot figyelembe vevő tényező tűzesetre

6.3.2. Anyagtulajdonságok, ellenállások tervezési értéke tűzesetre

Tűzre való méretezés során más anyagtulajdonságokat veszünk figyelembe, mint teherbírási, vagy használhatósági határállapotokban. Az anyag ajánlott parciális biztonsági tényezője tűzesetben: $\gamma_{M,fi} = 1,0$.

$$f_{d,fi} = k_{mod,fi} \frac{f_{20}}{\gamma_{M,fi}}$$

$$S_{d,fi} = k_{mod,fi} \frac{S_{20}}{\gamma_{M,fi}}$$

ahol

$$f_{20} = k_{fi} f_k$$

$$S_{20} = k_{fi} S_{05}$$

A k_{fi} értéke a faanyagtól függ a táblázat értékei szerint, és f_{20}/f_k hányados értékét adja meg, amely utal az anyag sűrűségfüggvény-eloszlására. Ha k_{fi} nagy, akkor az anyagjellemző szórása nagy, az eloszlási görbe a vízszintes tengely mentén elnyújtott, f_k (az 5%-os kavtilishez tartozó érték) és f_{20} távol vannak egymástól. Ha k_{fi} kicsi, akkor az anyagjellemző szórása kicsi, tehát az eloszlásgörbe y tengely mentén nyújtott, f_k és f_{20} értékek közelebb vannak egymáshoz az x tengelyen.

	k_{fi}
tömör fa	1,25
rétegelt-ragasztott fa	1,15
fa-alapú panelek	1,15
LVL (rétegelt furnér fa)	1,1
kapcsolat: fa és fa alapú panelek között, nyírt kapcsolóelem	1,15
kapcsolat: fa és acél között, nyírt kapcsolóelem	1,05
kapcsolat: tengelyirányban terhelt kapcsolóelemek	1,05

6.3.3. Terhek tervezési értéke tűzesetre

A terhek tűzeseti tervezési értéke kétféle képpen számítható. Az egyik a teherbírasi határállapot, rendkívüli tervezési állapotához tartozó teherkombináció. A másik egy egyszerűsített módszer, ahol a teherbírasi határállapot tartós vagy ideiglenes tervezési állapot teherkombinációjából kapott terhet egy csökkentő tényezővel szorozzuk, így meghatározva a tűzeseti terhet.

I. Első módszer: a teherbírasi határállapot, rendkívüli tervezési állapothoz tartozó teherkombinációból számított teherrel számolunk:

$$\sum_i G_{ki} + A_d + \Psi_{1,i} Q_{k,i} + \sum_{j \neq 1} \Psi_{2,j} Q_{k,j},$$

ahol A_d a rendkívüli teher, az állandó terheket karakterisztikus értékükkel (a teher sűrűségfüggvényének 95%-os kvantilise), a kiemelt esetleges terhet a gyakori tényezőjével (a szerkezet élettartamának 1%-a alatt lépi túl ezt az értéket a teher), a többi esetleges terhet pedig egyidejűségi tényezővel veszünk figyelembe.

II. A második – egyszerűsített – módszer $E_{d,fi}$ számítására:

$$E_{d,fi} = \eta_{fi} E_d$$

ahol

E_d a terhek tervezési értéke teherbírasi határállapotban, normális hőmérsékleti viszonyok mellett

$E_{d,fi}$ a teher tervezési értéke tűzesre

η_{fi} csökkentő tényező a teherbírasi teherkombinációra

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \Psi_{fi} Q_{k,1}}{\gamma_G G_k + \gamma_{Q,1} Q_{k,1}},$$

ahol

a) Ψ_{fi} az esetleges terhek tűzrseti gyakori kombinációs tényezője, értéke $\Psi_{1,1}$ -nek vagy $\Psi_{2,1}$ -nek vehető fel

Az η_{fi} értéke $Q_{k,1}/G_k$ hányados és Ψ_{fi} ismeretében táblázatból is kiolvasható.

b) További egyszerűsítésként $\eta_{fi} = 0,6$ -nak vehető, amivel általában a biztonság javára nagyobb terhet kapunk, mint η_{fi} valódi értékével számítva.

6.3.4. Beégési mélység

A beégést minden tűznek kitett felületen, és védett felületek esetén is figyelembe kell venni, ha a tűz időtartama alatt ott beégés következik be. A beégési mélység az eredeti keresztmetszet felülete és a beégési vonal közötti távolság, mely a tűzterhelés időtartamától, és a beégési sebességtől függ.

A sarkoknál le kell kerekíteni a beégési vonalat, vagy egy ún. *képzeletbeli keresztmetszettel* (notional cross-section) számolhatunk. Beégési vonalnak a 300°C-os izoterma tekinthető a legtöbb puhafa és keményfa esetén.

A beégési sebesség különböző a tűzhatás fennállása alatt a védetlen, a védett, és a bizonyos ideig védett felületek esetén. Az adott ideig védett elemek beégési sebessége a védelem kimerülése után megnő.

I. Egy oldali (one-dimensional) beégés esetén a beégési mélység tervezési értéke:

$$d_{char,0} = \beta_0 t,$$

ahol

$d_{char,0}$ a beégési mélység tervezési értéke

β_0 a beégési sebesség egydimenziós (egy oldali) beégés esetén

t a tűznek való kitettség időtartama

Ha több oldali beégést így számolunk, akkor a sarokat $d_{char,0}$ sugárral kell lekerekíteni.

II. Egy elem több oldalról történő beégése esetén képzeletbeli keresztmetszettel, és képzeletbeli beégési sebességgel számolunk.

$$d_{char,n} = \beta_n t,$$

ahol

$d_{char,n}$ a beégési mélység tervezési értéke képzeletbeli keresztmetszetet figyelembe véve,

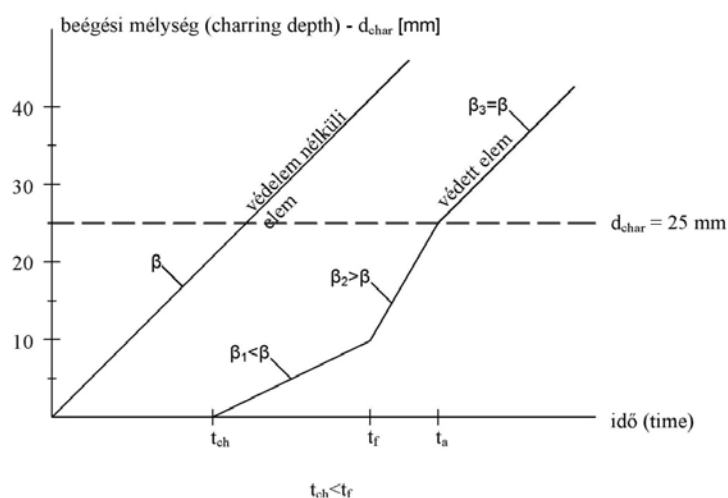
β_n a beégési sebesség több oldali beégés esetén képzeletbeli keresztmetszetet figyelembe véve.

	β_0 mm/min	β_n mm/min
Puhafa és bükk		
rétegelt ragasztott fa, $\rho_k \geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,70
tömör fa $\rho_k \geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,80
Keményfa		
tömör vagy rétegelt ragasztott fa $\rho_k \geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,70
tömör vagy rétegelt ragasztott fa $\rho_k \geq 450 \text{ kg/m}^3$	0,50	0,55
LVL		
$\rho_k \geq 480 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,70

6.3.5. Kezdetben védett elemek beégése

6.3.5.1. Beégési sebességek

A tűzvédő burkolatokkal, tűzvédő anyagokkal ellátott szerkezeti elemeknél kezdetben a védett elem nem ég. A tűz kezdetét követő t_{ch} idő elteltével kezdődik el a beégése, s a védelem kimerüléséig a táblázat értékeihez képest csökkentett beégési sebességet vehetünk figyelembe. A védelem kimerülése után, azaz t_f időponttól a beégés a táblazati beégési sebességeknél gyorsabban folytatódik, egészen t_a időpontig. A t_a időpont az az időpont, amikor a kezdetben védett elem beégési mélysége eléri a teljes idő alatt védetlen ugyanilyen elem beégési mélységét, vagy a kezdetben védett elem beégési mélysége eléri a 25 mm-t.



34. ábra: azonos szerkezeti elem védelem nélkül és védelemmel ellátva, $t_{ch} < t_f < t_a$

$t_{ch} < t < t_f$ esetén $\beta_1 = k_2 \beta$, ahol k_2 csökkentő tényező

Egy réteg F típusú gipszkarton lemez védelem esetén:

$k_2 = 0,018h_p$, ahol h_p a védő réteg vastagsága.

Min. 20 mm vastag és min. 26 kg/m³ közetgyapot védelem esetén h_{ins} függvényében:

$k_2 = 1$, 20 mm vtg. védelem esetén

$k_2 = 0,6$, 45 mm vtg. védelem esetén (0,6-nál kisebb k_2 csökkentő tényező nem vehető figyelembe)

A két érték közé eső vastagság esetén lineárisan interpolálni kell.

$t_f < t < t_a$ esetén $\beta_2 = k_3 \beta$, ahol k_3 növelő tényező

$k_3 = 2$

$t_a < t$ esetén $\beta_3 = \beta$, vagyis ettől kezdve a táblázatból kiolvasható beégési sebességgel ég tovább a fa

6.3.5.2. A beégés kezdete: t_{ch}

A védett elem beégésének kezdete függ a védő burkolat anyagától. (ch – charring)

Egy réteg A, F, vagy H típusú gipszkarton lemez esetén:

$t_{ch} = 2,8h_p - 1,4$ ahol h_p a lemez vastagsága mm-ben.

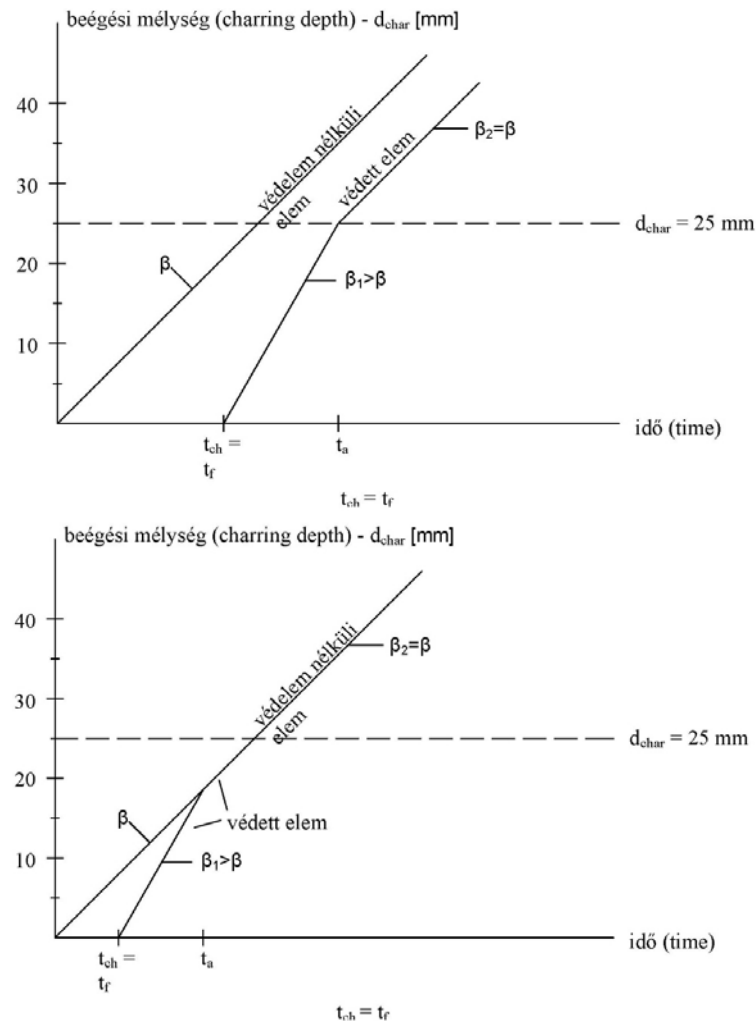
Közetgyapot lemezzel védett elem esetén:

$t_{ch} = 0,07(h_{ins} - 20) \sqrt{\rho_{ins}}$ ahol h_{ins} a hőszigetelő lemez vastagsága mm-ben, ρ_{ins} pedig a sűrűsége kg/m³-ben.

A képletek t_{ch} -t percben adják meg.

6.3.5.3. A védőburkolat tönkremenetelének időpontja: t_f

Pontos számítás helyett $t_f = t_{ch}$ (f-failure) értékkel a biztonság javára tévedünk, mert a védett elem beégésének kezdetekor azonnal tönkrementnek tekintjük a védelmet. Így már kezdetben is egy növelt beégési sebességgel számolunk az alábbi ábrák szerint.



35. ábra: azonos szerkezeti elem védelem nélkül és védelemmel ellátva, $t_{ch} = t_f$

6.3.6. Méretezési eljárások

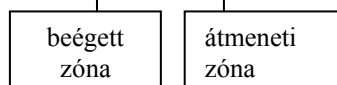
A keresztmetszet tüzeseti ellenállásának számításakor kétféle méretezési eljárás közül lehet választani. Az egyik a *csökkentett keresztmetszet elvét*, másik a *csökkentett anyagtulajdonságok elvét* követő módszer. Részletesen csak az elsőt mutatom be.

6.3.6.1. Csökkentett keresztmetszet alapján történő méretezés

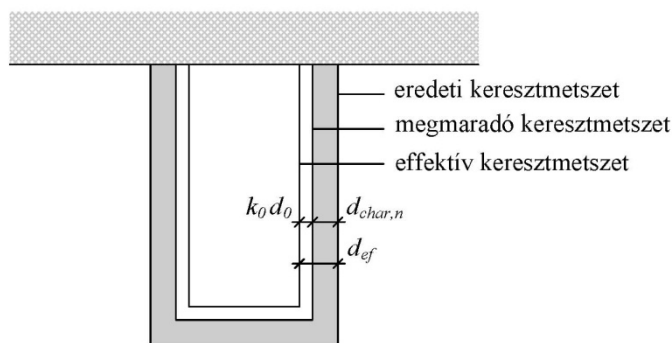
Az eredeti keresztmetszetet d_{ef} -el csökkenteni kell, és az így kapott csökkentett keresztmetszetet lehet figyelembe venni a tüzeseti teherbírás számításakor. A d_{ef} a beégett, és az átmenti zóna vastagságának összege. A d_{ef} réteg szilárdságát nullának tekintjük. A d_{ef} elhagyásával kapott keresztmetszetet *effektív keresztmetszetnek* nevezzük. A szilárdsági és merevségi jellemzők számításánál $k_{mod,fi} = 1$ -nek vehető.

$$d_{ef} = d_{char,n} + k_0 d_0$$

ahol



$$d_0 = 7 \text{ mm}$$



37. ábra: beégési vonal, keresztmetszetek értelmezése

k_0 az alábbiak szerint:

36. a) ábra: $k_0 - t$ diagramm	36. b) ábra: $k_0 - t$ diagramm
Ha az elem védetlen, vagy védett, de $t_{ch} < 20$ perc, akkor $t < 20$ perc esetén $k_0 = t/20$, $t > 20$ perc esetén $k_0 = 1$;	Ha az elem védett és $t_{ch} > 20$ perc, akkor $t < t_{ch}$ esetén $k_0 = t/t_{ch}$, $t > t_{ch}$ esetén $k_0 = 1$.

6.4. Számítási példa – Finnforest Leno

Egy számítási példán keresztül megvizsgálom a Finnforest Leno termék tűzeseti teherbírását egy 6 m fesztávú födémre. A födém egy közbenső 1 m széles szakaszát tekintem, mint kéttámaszú gerendát, a beégést csak alulról és felülről veszem figyelembe. Így β_0 egydimenziós beégési sebességgel végzhetem a számítást, melynek értéke a gyártó szerint 0,7 mm/perc. Ha a merőleges rétegek oldalsó felületei nincsenek összeragasztva, akkor ez az elméleti érték 0,9 mm/percnek tekintendő.

Vizsgálom zárófödémeket, és közbenső födémeket, 30, 45, illetve 60 perc tűzállóságra. A zárófödémnél hasznos teherként nem járható tető terhet, illetve a meteorológiai hóterhet

veszem figyelembe. A közbenső födémnél egy lakás hasznos terhét veszem esetleges tehernek.

A számítások az 2. *Melléklet* táblázataiban követhetők nyomon. Az 1. *Melléklet* grafikonjai a tűzeseti értékek és a teherbírasi értékek (teher, szilárdság, igénybevétel, teherbírás) egymáshoz viszonyított arányait, továbbá a tűzeseti és az eredeti teherbírás kihasználtságát, valamint a lehajlási kihasználtságot ábrázolják. Minden esetben megfigyelhető, hogy a tűzeseti teher kisebb a tartós tervezési helyzethez tartozó tehernél, annak kb. 60%-a. Ez azt jelenti, hogy a tűzeseti igénybevételeink kisebbek lesznek az eredeti állapothoz képest. A tűzeseti hajlítószilárdság nagyobb a hajlítószilárdság tervezési értékénél, kb. 160%-a.

A beégés miatt a keresztmetszet inercianyomatéka a kis vastagságú tábláknál jelentős mértékben csökken. Az inercianyomaték számításában csak a teherhordási iránnyal megegyező (a továbbiakban *párhuzamos*) rétegeket veszem figyelembe. A beégés utáni effektív keresztmetszet teherbírásának számításában a merőleges rétegeket, és a rétegek közötti rel. elmozdulásokat úgy veszem figyelembe, hogy a *közelítő (saját) számítás* mintájára az *effektív keresztmetszetből* számított *Inet* inerciát, és a *Finnforest számítás* során használt csökkentett szilárdságból – $f_{0,mk}$ – kapott $f_{d,fi}$ -t használom. Ezzel a módszerrel jobban a biztonság javára tévedek, mintha C24-es anyagból ($f_{mk}=24 \text{ N/mm}^2$), számítottam volna $f_{d,fi}$ -t. A beégés utáni inercianyomaték és a kezdeti inercianyomaték hányadosa kis elemeknél nagyon kicsi, van, ahol szinte elfogy a keresztmetszet a beégés után. A nagyobb kezdeti vastagságú elemek kevésbé érzékenyek a keresztmetszet csökkenésre, különösen, ha a széleken kettő – a teherhordási iránnyal megegyező – réteg található. Ezekből még 60 perc után, és védelem nélkül is valószínűleg maradni fog valamennyi. Mivel a keresztmetszet súlypontjától távol esnek, a teherbíráshoz jelentősen hozzájárulnak. A grafikon $M_{rd,fi}/M_{rd}$ pontokra illesztett görbéje jól szemlélteti ezt a hatást. A kisebb vastagságoknál jelentkező ugrások annak a következményei, hogy bizonyos keresztmetszeteknél a külső réteg teljes leégése az effektív inerciát nullára csökkenti. Azonban, ha egy kevés is marad belőle, akkor a nagyobb erőkar miatt a Steiner-tag jelentősen megnöveli az inerciát.

Mivel a két különböző irányban a rétegek ugyanolyan anyagból épülnek fel, ezért kedvezőbb a szélső részekbe teherbírasi iránnyal megegyező rétegeket tenni. Ezt követően a keresztmetszet belseje felé haladva merőleges réteg következik, melynek teherhordó képességét elhanyagolom. A párhuzamos rétegek égése közben a teherbírás a beégett résszel

arányosan csökken. Ha azonban a beégés eléri a merőleges réteget, akkor ennek égése alatt a teherbírás a számítási módszerből adódóan nem csökken, a merőleges réteg tulajdonképpen védelemként figható fel. Ezek szerint ha adott fesztáv, és terhelés mellett előre meghatározott tűzállósági határértékre kívánjuk megtervezni egy tábla rétegfelépítését, akkor kétféle gondolatmenetet követhetünk.

Az első esetben a kiszámítható beégési mélység ismeretében a külső, párhuzamos rétegek vastagságát akkorára vesszük fel, hogy a beégés után elegendő – az igénybevételekből, és a belső rétegek felépítéséből meghatározható – vastagság megmaradjon belőlük. Tehát nem engedjük meg, hogy teljesen elveszítsük a leghasznosabb, külső részeket. Pl: **33-33-...-33-33**. (A vastag betűvel szedett számok a rostirányú rétegeket jelentik.)

A második tervezési módszer az lehet, hogy a külső párhuzamos réteget csak akkora vastagságúra vesszük fel, hogy az utána következő merőleges réteggel együtt éppen a d_{ef} keresztmetszeti csökkentés értékét adják ki. Így kívülről a harmadik, párhuzamos réteg a tűz után teljesen részt vesz a teherbírásban. Pl.: **27-17-27-...-27-17-27** (Ilyen tábla jelenleg nincsen.)

Az első tervezési módszer valószínűleg előnyösebb inerciát ad, mert a keresztmetszet súlypontjától elhelyezkedő távolabbi – akár kisebb vastagságú – réteg a Steiner-tagja miatt nagyobb mértékben növeli a teherbírást, mint egy vastagabb, de súlyponthoz közelebbi réteg. A pontos arányok a teljes keresztmetszet méretétől is függnének, hiszen a Steiner-tag (hbt^2) a súlyponttól mért távolsággal négyzetesen arányos. A gyártott termékek rétegfelépítése is arra utal, hogy az első módszer a hatékonyabb.

A grafikonokról leolvasható hogy azonos tűzállósági határérték esetén közbelső födémként, illetve zárófödémként minimum mekkora vastagságú táblát kell alkalmazni ($M_{Ed,fi}/M_{Rd,fi} < 100\%$). A d_{ef} az adott tűzállósági határértékhez tartozó keresztmetszeti csökkenést adja meg mm-ben, védelemmel nem rendelkező tábla esetén.

	v_{min} közbelső födémhez [mm]	teherbírás kihasználtsága [%]	v_{min} zárófödémhez [mm]	teherbírás kihasználtsága [%]	d_{ef} [mm]
T30	174	95,9	189	45,3	28,0
T45	189	48,1	189	78,6	38,5
T60	201	68,6	219	66,5	49,0

A táblázat eredményeinek értelmezéséhez ismernünk kell a táblák rétegfelépítését. A vastag betűvel szedett számok a párhuzamos, teherbírás szempontjából hasznos rétegeket jelentik. A bekeretezett rész azt mutatja, hogy adott két határérték között melyik réteg(ek)ben halad d_{ef} .

Leno 189: $\boxed{27 - 27} - 27 - 27 - 27 - \boxed{27 - 27}$ d_{ef} helye a 30. és a 45. perc között zárófödém esetén.

A Leno 189-nél zárófödém esetén a 30. és a 45. perc között hatékony réteg ég: $d_{ef} = 28,0 - 38,5$ mm a két 27 mm-es rétegbe esik. Ezért a tábla kihasználtsága T30-ra 45,3 %, T60-ra már 78,6 %, de még mindig megfelel.

Más terhek esetén előfordulhatna az is, hogy két tűzállósági határérték között merőleges réteg ég. Mivel ennek teherbírását nem vesszük figyelembe, ezért azt kapnánk, hogy mindkét tűzállósági határértékhez ugyanaz a tábla megfelel, és még a kihasználtságuk is egyenlő.

További vizsgálat tárgya lehet a *védelemmel ellátott*, illetve az *egy oldalról beégő* táblák viselkedése. Egyoldalú beégés esetén a keresztmetszet súlypontja el fog tolódni. Védett elemek esetén késleltetve indul meg a beégés, majd a számítás precizitásától függően előbb csökkentett majd növelt, vagy csak növelt beégési sebességeket veszünk figyelembe. Védő réteggént zárófödémnél a külső közetgyapot hőszigetelés, közbenső födémnél a padló rétegrend egyes rétegei (aljzatbeton, közetgyapot lépéshangszigetelés) vagy alsó oldaláról gipszkarton vehető figyelembe.

6.5. KLH Massivholz tűzeseti teherbírása

Az alkalmazási útmutató kétféle beégési sebességet ad meg. A kisebb – 0,67 mm/min értéket akkor használhatjuk, ha csak a legkülső réteget érinti a beégés, és minimum 3%-a megmarad. Ha ezzel számolunk, akkor a megmaradó keresztmetszetet 10%-al csökkenteni kell még a beégésen túl. Másik esetben, ha a tűznek való kitettség időtartama alatt nemcsak a külső réteget ég be, akkor 0,76 mm/min beégési sebességgel számolhatunk. Ezek az értékek a panelek kapcsolatait is figyelembe veszik, itt a tűz minden oldalról könnyebben hozzáfér a panelhez.

Általánosságban elmondható, hogy a 3 rétegű táblák 30 perc tűzállóságot nyújtanak stabilitási, integritási, és felmelegedési határállapotra is (REI 30). Ez alól kivételek azok a panelek, melyek külső rétegei 19 mm-esek. Tekintve a Leno számítási példájában a 30 perc

után bekövetkező 28 mm-es beégést, látható, hogy a külső – hatékony – rétegek teljesen elfogynak. A megmaradó belső réteg a rostiránya miatt a födém eredeti teherhordási irányában nem képes terheket közvetíteni.

Az 5 rétegű táblák többnyire teljesítik a REI 60 tűzállóságot, de ez a tehertől is függ. Tűz esetén két oldali beégésnek kitett falak esetén célszerű olyan táblát alkalmazni, melynek külső rétegei vízszintesek, így ezek leégése esetén a következő függőleges – teherhordó – réteg sértetlen marad. Falak esetén az ablakok és ajtók között kialakuló falpillérek a legkritikusabb helyek tűzeseti teherbírás szempontjából. Az 5 rétegű födémek kb. 60 perc tűzállósággal rendelkeznek.

Számítás elvégzésével a fenti határértékeknél nagyobb tűzállóságot is igazolni lehet, akár REI 90, vagy REI 120 –t a panel vastagság és a terhek függvényében. Különleges esetekben a forgalmazott tábláktól eltérő rétegfelépítésű panel is készíthető. A KLH paneljeinél a külső rétegek általában vatagabbak – 34, 40, 2x34, 2x40 – így pl.: 30 perces tűz után a 34 mm-es rétegből még számottevő rész megmarad, és a Steiner-tag miatt a keresztmetszet teherbírásának jelentős részét képezi.

7. További kutatási irányok

A szilárdsági vizsgálatok során felmerült, hogy bár a számítás egyszerűsítése miatt egyirányban teherhordó födémcsávot vizsgálunk, az egymásra keresztirányú rétegekből felépülő táblák – megfelelő feltámaszkodás és csomóponti kialakítás esetén – valójában kétirányban teherhordó lemezként viselkednek. Ezt figyelembe véve valószínűleg kisebb vastagságú elemek is kielégítik a szilárdsági és teherbírási követelményeket.

Vizsgálni lehetne még a többtámaszúsított lemezeket. Itt a közbenső támaszok felett nemcsak nagy nyomaték, hanem nagy nyírás is adódik a keresztmetszetben, ezek interakcióját vizsgálni kell. Hasonlóan érdekes kérdés lehet a konzolok kialakításának lehetősége, ahol a támasznál szintén egyszerre ébred nagy nyomaték és nyíróerő.

A számításokban felület mentén megoszló terhekkel számoltam, de a táblák pontszerű terhelést is kaphatnak, akár esetleges teherből, akár tartószerkezeti elemektől. Ilyen lehet, ha nem falas (cellás), hanem vázas rendszerű épületeket kívánunk létrehozni. Pontszerű terhelés hatására a tábla síkjában fekvő mindkét irányú réteg rostirányra merőleges nyomásra van

igénybevételére. A fa rostirányra merőleges szilárdsága a hajlítószilárdsághoz képest nagyon kicsi, így ez kritikus lehet.

A táblákat jelenleg a lehajlási követelmény alapján méretezik, de bizonyos esetekben a tűzeseti teherbírás szigorúbb eredményeket ad. Ez akkor fordulhat elő, ha a lehajlási követelmény az épület funkciójából adódóan nem túl szigorú, vagy ha olyan terméket alkalmazunk, melynek beégési sebessége valamivel nagyobb, mint a számításban alkalmazott. A funkcióból eredő hasznos terhek mértékétől, időbeli eloszlásától (kombinációs tényezőitől), a hőteher földrajzi helytől függő nagyságától, az alkalmazott anyag kiindulási szilárdságától is függ a végeredmény. A számítás csak azt mutatta meg, hogy egy szigorú lehajlási követelmény (pl.: $L/300$) alapján meghatározott táblavastagság 30/45/60 perces tűzállósági határértéket is elérhet. További vizsgálat tárgya lehet a védelemmel ellátott, illetve az egy oldalról beégő táblák viselkedése.

A dolgozatban csak a födémekkel foglalkoztam, de legalább ilyen részletesen a falakat is meg lehet vizsgálni hasonló szempontok szerint. A szilárdsági követelmények alapján viszonylag vékony táblák is megfelelnek, ennek azonban a stabilitási – kihajlási – teherbírás szab határt.

Érdemes lenne összevetni az ismertetett termékeket alternatív építőanyagokkal: monolit vasbetonnal, acéllal, kerámia béléstartós födémmel. Az összehasonlítás szempontjai lehetnek:

- a szükséges szerkezeti vastagság, szerkezet önsúlya
- a szerkezet épületfizikai tulajdonságai
- anyagfelhasználás, költségek,
- előregyárthatóság, helyszíni kivitelezés élőmunka igénye, szakképzettsége,
- környezetvédelmi szempontok teljesülése,
- beépített szürke energiatartalom, újrahasznosíthatóság.

Ábrajegyzék

1. ábra: (an)izotrópia és (in)homogenitás	7
2. ábra: glükóz	8
3. ábra: cellulóz	8
5. ábra: fasejt rétegeinek irányultsága	10
6. ábra: alkotók aránya a fasejt rétegeiben	10
4. ábra: fasejt rétegei	10
7. ábra: fatörzs keresztmetszete	11
8. ábra: irányok, síkok értelmezése	11
9. ábra: Ylinen szerint a hajlított gerenda keresztbetszetében ébredő feszültségeloszlás	12
10. ábra: korai és késői pászták	13
11. ábra: fenyő felépítése	13
12. ábra: Kelvin-Voigt féle modell Hooke-féle modellel sorbakapcsolva	14
13. ábra: relatív megnyúlás-idő, feszültség-idő diagram	14
14. a) éles él	18
14. b) lesarkított él	18
14. c) eltolt elrendezés	18
14. d) akusztikus profil	18
14. e) kábelhornyos profil	18
15. a) ábra: Finnforest Leno, KLH Massivholz	19
15. b) ábra: LIGU Holz födémelem	19
16. ábra: szárítás	20
17. ábra: osztályozás	20
18. ábra: hibakiejtés	20
19. ábra: ragasztás	20
20. ábra: préselés	21
21. ábra: préselés	22

22. ábra: vágás	22
23. ábra: University of Karlsruhe, étterem.....	23
24. ábra: London, lakóépület.....	23
25. ábra: valódi feszültségeloszlás	27
26. ábra: feszültségeloszlás a számításhoz	27
27. ábra: E és I értékei a kétféle számításban	28
28. ábra: EI hajlítási merevség a kétféle számításban	28
29. ábra: kiindulási anyag szilárdsági osztályának meghatározása	29
30. ábra: lehajlás hajlításból és nyírásból	33
31. ábra: nyíróerő ábra	33
32. ábra: KLH és saját számítás $(EI)_{eff}/(EI)_{tot}$ összehasonlítása.....	35
33. ábra: építőanyagok szilárdsága tűz esetén	36
34. ábra: azonos szerkezeti elem védelem nélkül és védelemmel ellátva, $t_{ch} < t_f < t_a$	44
35. ábra: azonos szerkezeti elem védelem nélkül és védelemmel ellátva, $t_{ch} = t_f$	46
36. a) ábra: $k_0 - t$ diagramm.....	47
36. b) ábra: $k_0 - t$ diagramm.....	47
37. ábra: beégési vonal, keresztmetszetek értelmezése.....	47
38. ábra: Teherbírési és tűzeseti értékek összehasonlítása, közbenső födém, $t = 30$ min	57
39. ábra: Teherbírési és tűzeseti értékek összehasonlítása, közbenső födém, $t = 45$ min	57
40. ábra: Teherbírési és tűzeseti értékek összehasonlítása, közbenső födém, $t = 60$ min	58
41. ábra: Teherbírési és tűzeseti értékek összehasonlítása, zárófödém, $t = 30$ min.....	58
42. ábra: Teherbírési és tűzeseti értékek összehasonlítása, zárófödém, $t = 45$ min.....	59
43. ábra: Teherbírési és tűzeseti értékek összehasonlítása, zárófödém, $t = 60$ min.....	59

Irodalomjegyzék

- [1] SZALAI JÓZSEF: *A faanyag és faalapú anyagok anizotróp rugalmasság- és szilárdságtana*, Erdészeti és Faipari Egyetem Műszaki Mechanika Tanszék, Sopron, 1994
- [2] KOVÁCS ILLÉS: *Faanyagismerettan*, Mezőgazdasági Kiadó, Budapest, 1979
- [3] FRANZ F. P. KOLLMANN, WILFRED A. COTÉ: *Principles of Wood Science and Technology I Solid Wood*, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 1968
- [4] ARMUTH MIKLÓS: *Faszerkezetek előadás – órai jegyzet*, 2010
- [5] ARMUTH MIKLÓS: *Faszerkezetek konstruálása előadás – órai jegyzet*, 2011
- [6] TAKÁCS LAJOS: *Tervezés tűzterhelésre, Építmények tűzvédelmi követelményei, építmények tűzvédelme – előadás jegyzet*
- [7] JÓZSA ZSUZSANNA: *Építőanyagok 2. – előadás jegyzet*
- [8] ULRICH MEIER: *Moderne Holzhäuser – Systeme, Konstruktionen, Beispiele*, Bruderverlag, Karlsruhe, 2004
- [9] 2011Magyar szabvány MSZ EN 1995-1-1 Eurocode 5: *Faszerkezetek tervezése 1-1. rész Általános szabályok. Közös és az épületekre vonatkozó szabályok. – Mechanically jointed beams (Mechanikusan kapcsolt gerendák – “ γ -módszer”)*
- [10] Magyar szabvány MSZ EN 1995-1-2 Eurocode 5: *Faszerkezetek tervezése 1-2. rész: Általános szabályok.*
- [11] Finnforest Leno ismertető
- [12] Finnforest Kerto-Q ismertető
- [13] KLH Massivholz ismertető
- [14] Bukta Katalin: *Faanyagok és faszerkezetek ragasztása – tanulmány*, 2011
- [15] Krenn Tamás: *Brettsperholz szerkezetek – tanulmány*, 2011

Internetről:

[16] <http://www.finnforest.hu>

[17] *CLT - European Experiences ,Cross-Laminated Timber Symposium, Vancouver, Canada, 8th February 2011*

http://www.fpinnovations.ca/files/pdfs/en/factsheets/clt-symposium_feb_2011/clt-european_experiences.pdf

[18] *Kempelen Farkas Digitális Könyvtár - 1. Az európai szabvány 29. fejezet - Fa a szerkezetekben*

<http://www.tankonyvtar.hu/konyvek/faepites/faepites-1-europai>

[19] *Kempelen Farkas Digitális Könyvtár - 5.8. A fa gyúlékonysága és tűz elleni védelme*

<http://www.tankonyvtar.hu/konyvek/faepites/faepites-5-8-fa>

[20] *Fűrészáru osztályozása az új EU előírás szerint*

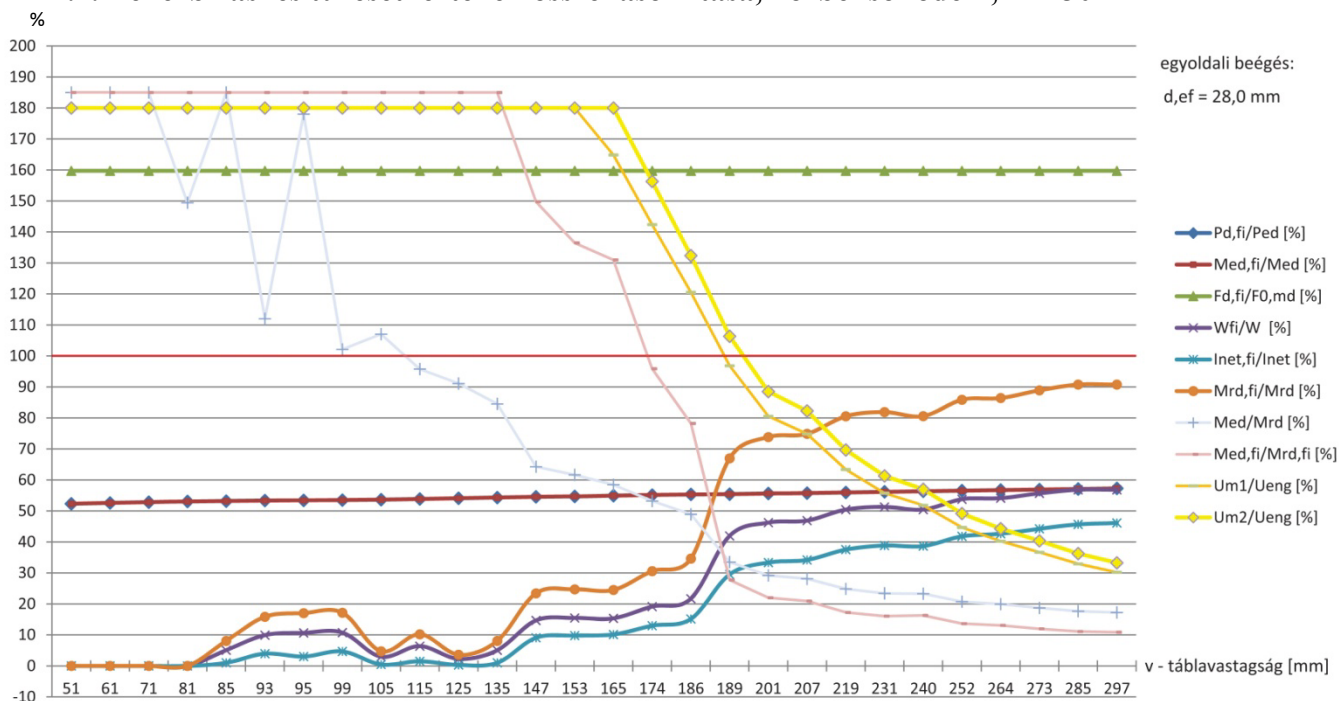
http://www.fataj.hu/2010/02/257/201002257_szilardsag-osztalyozas.php

[21] *Wikipédia – Égés (Tűzvédelem)*

http://hu.wikipedia.org/wiki/%C3%89g%C3%A9s_%28t%C5%B1zv%C3%A9delem%29

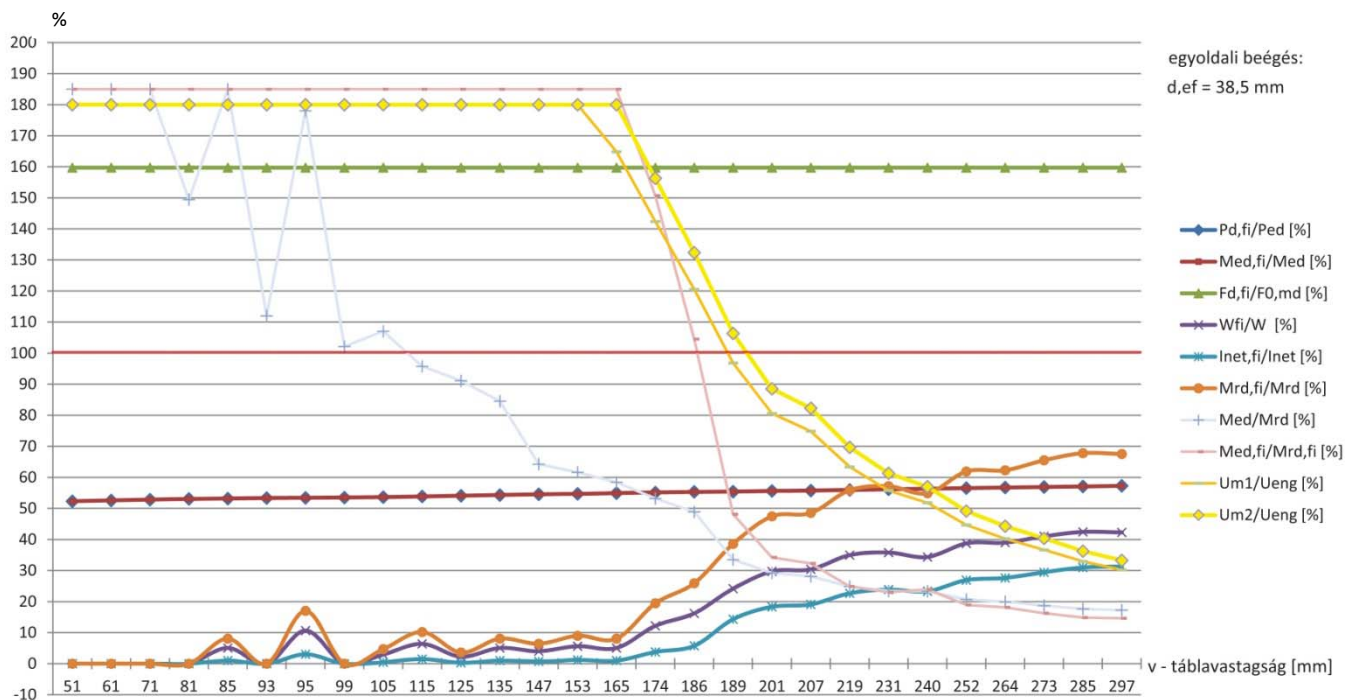
1. MELLÉKLET

1.1. Teherbírési és tűzeseti értékek összehasonlítása, közbenső földem, $T = 30$ min



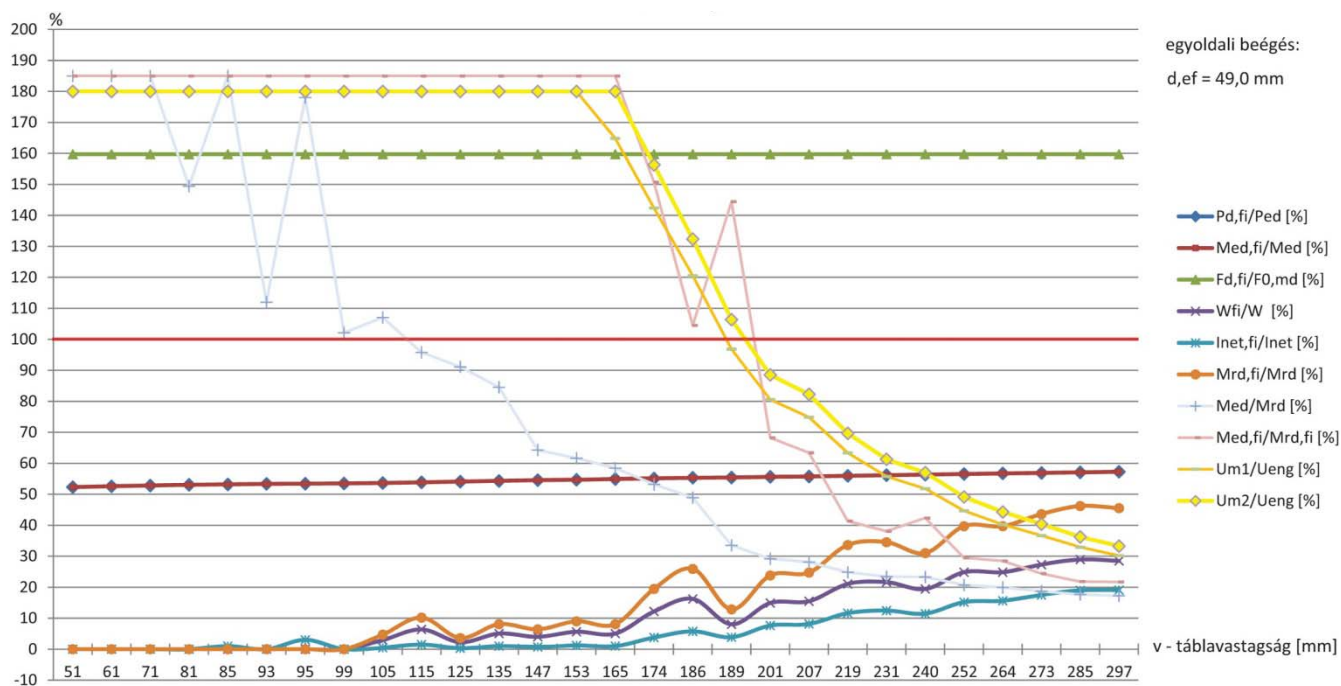
38. ábra: Teherbírési és tűzeseti értékek összehasonlítása, közbenső földem, $t = 30$ min

1.2. Teherbírési és tűzeseti értékek összehasonlítása, közbenső földem, $T = 45$ min



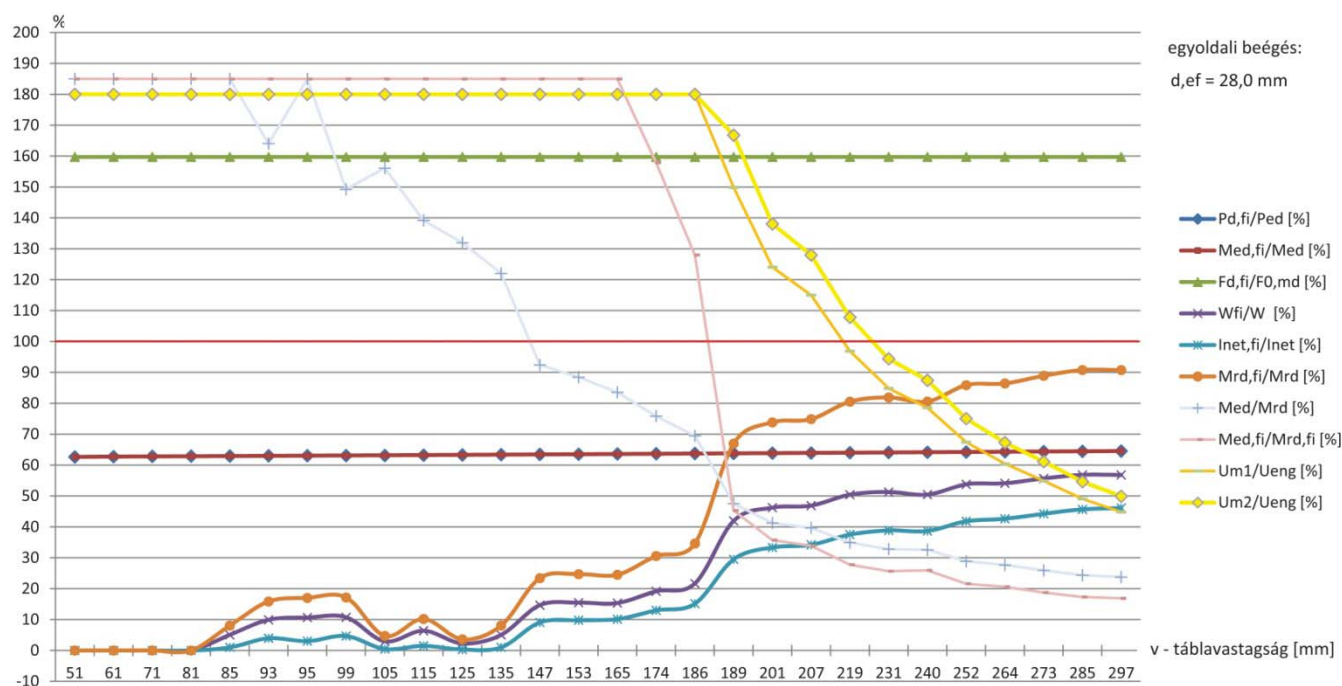
39. ábra: Teherbírési és tűzeseti értékek összehasonlítása, közbenső földem, $t = 45$ min

1.3. Teherbírási és tűzeseti értékek összehasonlítása, közbenső födém, $T = 60$ min



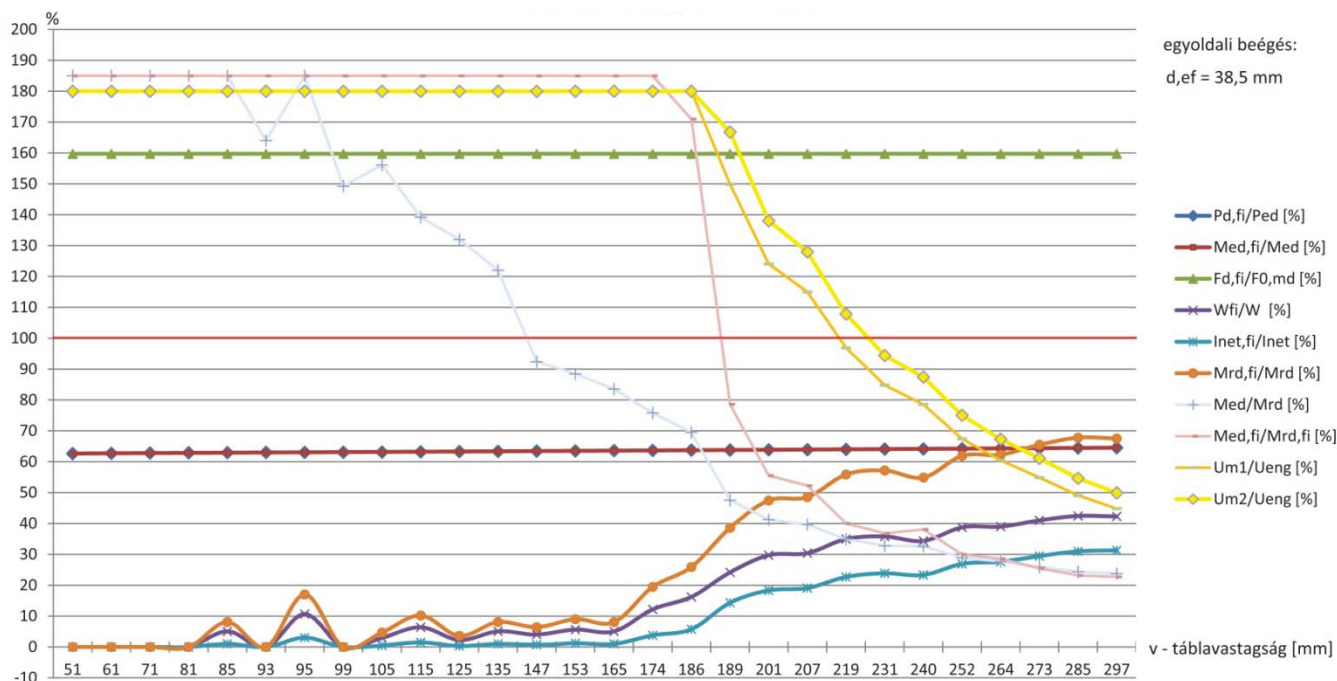
40. ábra: Teherbírási és tűzeseti értékek összehasonlítása, közbenső födém, $t = 60$ min

1.4. Teherbírási és tűzeseti értékek összehasonlítása, zárófödém, $T = 30$ min



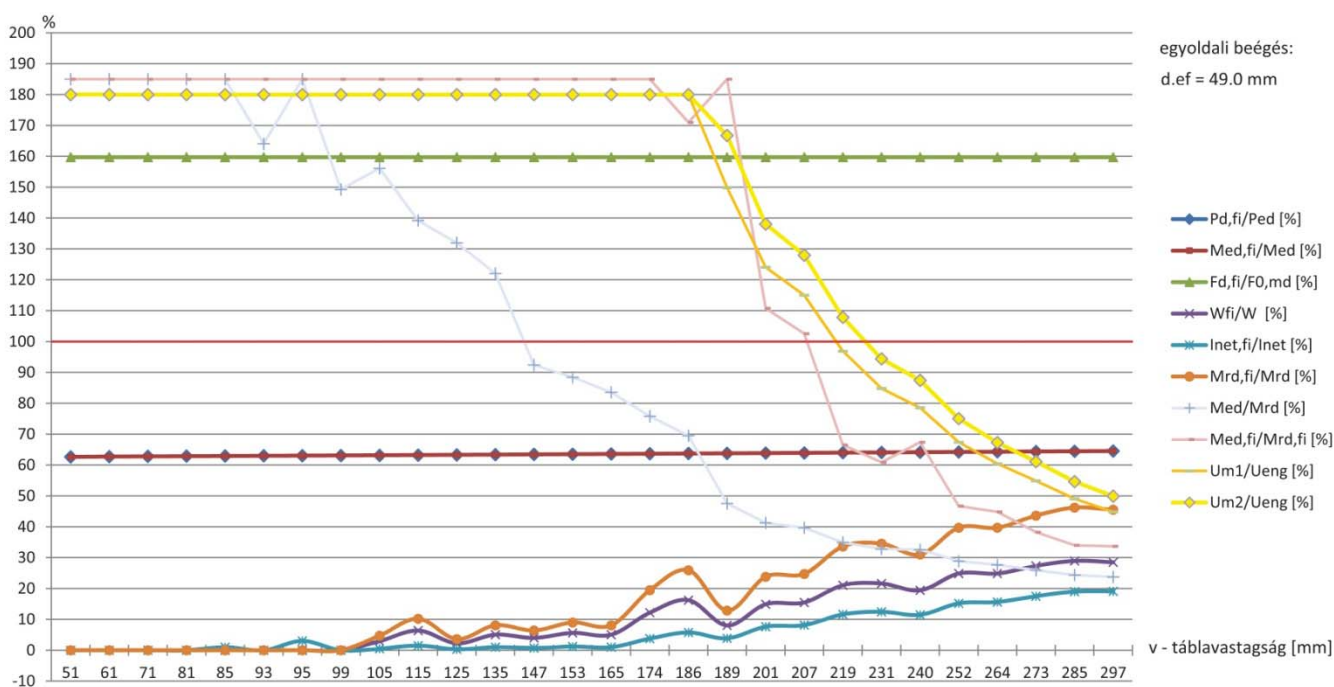
41. ábra: Teherbírási és tűzeseti értékek összehasonlítása, zárófödém, $t = 30$ min

1.5. Teherbírási és tűzeseti értékek összehasonlítása, zárófödém, $T = 45$ min



42. ábra: Teherbírási és tűzeseti értékek összehasonlítása, zárófödém, $t = 45$ min

1.6. Teherbírási és tűzeseti értékek összehasonlítása, zárófödém, $T = 60$ min



43. ábra: Teherbírási és tűzeseti értékek összehasonlítása, zárófödém, $t = 60$ min

2. MELLÉKLET

2.1. Finnforest Leno teherbírési számítása

2.2. Finnforest Leno tűzeseti teherbírásának számítása zárófödém esetén, $T=30$ min

Finnforest LENO

a rétegek számozása a középsővel kezdődik, majd "ugrálva" halad a km szélei felé; a félkövérrel jelölt rétegek a külső réteg rostányával párhuzamosak

1 m széles sávot vizsgálunk
b= 1000 mm

2 támaszú tartó

C24 alapanyag Fmk=24 [N/mm²]
E0,mean=11000[N/mm²]
E90,mean=400[N/mm²]

Lmax meghatározása lehajlási követelmény alapján

Geometria

Σv [mm]	n	v9 [mm]	v7 [mm]	v5 [mm]	v3 [mm]	v1 [mm]	v2 [mm]	v4 [mm]	v6 [mm]	v8 [mm]	Itot [mm4]	Inet [mm4]	Itot x10^5[mm4]	Inet x10^5 [mm4]
51	3				17	17	17				11 054 250	10 644 833	111	106
61	3				17	27	17				18 915 083	17 274 833	189	173
71	3				27	17	27				29 825 917	29 416 500	298	294
81	3				27	27	27				44 286 750	42 646 500	443	426
85	5			17	17	17	17	17			51 177 083	40 532 250	512	405
93	3			33	27	33					67 029 750	65 389 500	670	654
95	5			17	17	27	17	17			71 447 917	54 173 083	714	542
99	3			33	33	33					80 858 250	77 863 500	809	779
105	5			27	17	17	17	27			96 468 750	85 823 917	965	858
115	5			27	17	27	17	27			126 739 583	109 464 750	1 267	1 095
125	5			27	27	17	27	27			162 760 417	133 343 917	1 628	1 333
135	5			27	27	27	27	27			205 031 250	162 384 750	2 050	1 624
147	5			33	27	27	27	33			264 710 250	222 063 750	2 647	2 221
153	5			33	27	33	27	33			298 464 750	246 584 250	2 985	2 466
165	5			33	33	33	33	33			374 343 750	296 480 250	3 743	2 965
174	6			33	33	27	27	27	33		439 002 000	347 148 000	4 390	3 471
186	6			33	27	33	33	27	33		536 238 000	416 196 000	5 362	4 162
189	7		27	27	27	27	27	27	27		562 605 750	519 959 250	5 626	5 200
201	7		27	33	27	27	27	33	27		676 716 750	634 070 250	6 767	6 341
207	7		27	33	27	33	27	33	27		739 145 250	687 264 750	7 391	6 873
219	7		33	33	27	33	27	33	33		875 288 250	823 407 750	8 753	8 234
231	7		33	33	33	33	33	33	33		1 027 199 250	949 335 750	10 272	9 493
240	8		27	33	27	33	33	27	33	27	1 152 000 000	1 031 958 000	11 520	10 320
252	8		33	33	27	33	33	27	33	33	1 333 584 000	1 213 542 000	13 336	12 135
264	8		33	33	33	33	33	33	33	33	1 533 312 000	1 365 606 000	15 333	13 656
273	9	33	33	27	27	33	27	27	33	33	1 695 534 750	1 513 813 500	16 955	15 138
285	9	33	33	27	33	33	33	27	33	33	1 929 093 750	1 708 492 500	19 291	17 085
297	9	33	33	33	33	33	33	33	33	33	2 183 172 750	1 886 692 500	21 832	18 867

Kdef=Ucreep/Uinst
Kdef1= 0,6
Kdef2= 0,8
Ueng1= L/300
Ueng2= L/400
Ueng3= L/500

Megengedett lehajlás: Ueng
Ueng1= L/300
Ueng2= L/400
Ueng3= L/500

Ψ2= 0,3
kvázi-állandó tényező

Alkalmazási útmutató (adott L fesztáv, és adott terhek esetén) - "Try and error" módszer

Adott terhekből Pfin számítása. (G2k és Qk pontosan megadható; G1k csak a km. Ismeretében, ezért vegyünk fel egy reálisnak tűnő km-t!)

Pfin=Σ Gk*(1+Kdef,i)+Q1k*(1+Ψ2*Kdef,i)

A lehajláskorlátozás (pl.: L/300), pfin, Kdef, és Inet meghatározzák Lmax-ot.

Ha L<Lmax, akkor a kiválasztott km. megfelelő. Ha nem, akkor nagyobb km-el az ellenőrzés újra elvégzendő, amíg L<Lmax-ot nem kapunk.

Azoknál a tábláknál, melyeknél Inet/Itot viszonylag kisebb, ott E0,mean-re kisebb értéket ad meg a segédlet.

Inet/Itot arányát a rugalmassági modulussal veszi figyelembe a számítás.

Anyagjellemzők

ρ[kN/m³]	F0,mk[N/mm²]	C24[N/mm²]	E0,mean[N/mm²]	E0,mean,c24[N/mm²]	E0,mean*Itot x10^8 [Nmm²]	E0,mean,c24*Inet x10^8 [Nmm²]
5	23,11	24	10 590	11 000	1171	1171
5	21,93	24	10 050	11 000	1901	1900
5	23,67	24	10 850	11 000	3236	3236
5	23,11	24	10 590	11 000	4690	4691
5	19,00	24	8 710	11 000	4458	4459
5	23,41	24	10 730	11 000	7192	7193
5	18,20	24	8 340	11 000	5959	5959
5	23,11	24	10 590	11 000	8563	8565
5	21,36	24	9 790	11 000	9444	9441
5	20,73	24	9 500	11 000	12040	12041
5	19,66	24	9 010	11 000	14665	14668
5	19,00	24	8 710	11 000	17858	17862
5	20,16	24	9 230	11 000	24433	24427
5	19,83	24	9 090	11 000	27130	27124
5	19,00	24	8 710	11 000	32605	32613
5	18,98	24	8 700	11 000	38193	38186
5	18,63	24	8 540	11 000	45795	45782
5	22,19	24	10 170	11 000	57217	57196
5	22,49	24	10 310	11 000	69769	69748
5	22,32	24	10 230	11 000	75615	75599
5	22,58	24	10 350	11 000	90592	90575
5	22,19	24	10 170	11 000	104427	104427
5	21,49	24	9 850	11 000	113472	113515
5	21,84	24	10 010	11 000	133492	133490
5	21,38	24	9 800	11 000	1502165	150217
5	21,43	24	9 820	11 000	166519	166519
5	21,25	24	9 740	11 000	187894	187934
5	20,75	24	9 510	11 000	207620	207536

Terhek (b=1 m) tehát [kN/m²]→[kN/m]

Gk1[kN/m]	Gk2[kN/m]	Qk[kN/m]	Pfin1[kN/m]	Pfin2[kN/m]	Ped[kN/m]
0,255	2,500	2,755	2,000	6,768	6,719
0,305	2,500	2,805	2,000	6,848	6,787
0,355	2,500	2,855	2,000	6,928	6,854
0,405	2,500	2,905	2,000	7,008	6,922
0,425	2,500	2,925	2,000	7,040	6,949
0,465	2,500	2,965	2,000	7,104	7,003
0,475	2,500	2,975	2,000	7,120	7,016
0,495	2,500	2,995	2,000	7,152	7,043
0,525	2,500	3,025	2,000	7,200	7,084
0,575	2,500	3,075	2,000	7,280	7,151
0,625	2,500	3,125	2,000	7,360	7,219
0,675	2,500	3,175	2,000	7,440	7,286
0,735	2,500	3,235	2,000	7,536	7,367
0,765	2,500	3,265	2,000	7,584	7,408
0,825	2,500	3,325	2,000	7,680	7,489
0,870	2,500	3,370	2,000	7,752	7,550
0,930	2,500	3,430	2,000	7,848	7,631
0,945	2,500	3,445	2,000	7,872	7,651
1,005	2,500	3,505	2,000	7,968	7,732
1,035	2,500	3,535	2,000	8,016	7,772
1,095	2,500	3,595	2,000	8,112	7,853
1,155	2,500	3,655	2,000	8,208	7,934
1,200	2,500	3,700	2,000	8,280	7,995
1,260	2,500	3,760	2,000	8,376	8,076
1,320	2,500	3,820	2,000	8,472	8,157
1,365	2,500	3,865	2,000	8,544	8,218
1,425	2,500	3,925	2,000	8,640	8,299
1,485	2,500	3,985	2,000	8,736	8,380

1. fho.

Lmax [m] (L/250)	Lmax [m] (L/300)	Lmax [m] (L/400)	Lmax [m] (L/500)
1,745	1,642	1,492	1,385
2,043	1,923	1,747	1,622
2,430	2,287	2,078	1,929
2,739	2,578	2,342	2,174
2,689	2,531	2,299	2,135
3,145	2,959	2,689	2,496
2,859	2,777	2,523	2,343
3,326	3,130	2,843	2,640
3,428	3,226	2,931	2,721
3,704	3,485	3,167	2,940
3,941	3,709	3,370	3,128
4,193	3,946	3,585	3,328
4,635	4,362	3,963	3,679
4,790	4,507	4,095	3,802
5,071	4,772	4,336	4,025
5,329	5,015	4,556	4,230
5,638	5,306	4,821	4,475
5,872	5,709	5,187	4,815
6,455	6,075	5,519	5,124
6,617	6,227	5,658	5,252
7,000	6,588	5,985	5,556
7,312	6,881	6,252	5,804
7,495	7,053	6,408	5,949
7,882	7,417	6,739	6,256
8,168	7,686	6,983	6,483
8,428	7,931	7,206	6,689
8,742	8,226	7,474	6,938
9,004	8,474	7,699	7,147

2. fho.

Lmax [m] (L/250)	Lmax [m] (L/300)	Lmax [m] (L/400)	Lmax [m] (L/500)
1,691	1,591	1,446	1,342
1,979	1,863	1,692	1,571
2,354	2,215	2,013	1,869
2,740	2,578	2,269	2,174
2,605	2,452	2,227	2,068
3,046	2,867	2,604	2,418
2,859	2,690	2,444	2,269
3,221	3,031	2,754	2,557
3,320	3,125	2,839	2,635
3,587	3,375	3,067	2,847
3,816	3,591	3,263	3,029
4,060	3,821	3,472	3,223
4,488	4,223	3,837	3,562
4,637	4,364	3,965	3,681
4,909	4,620	4,197	3,897
5,159	4,855	4,411	4,095
5,458	5,136	4,666	4,332
5,872	5,526	5,021	4,661
6,248	5,879	5,342	4,959
6,404	6,027	5,476	5,083
6,775	6,375	5,792	5,377
7,076	6,659	6,050	5,615
7,252	6,824	6,200	5,756
7,626	7,176	6,520	6,052
7,902	7,436	6,756	6,272
8,167	7,685	6,983	6,482
8,453	7,931	7,206	6,690
8,743	8,227	7,475	6,939
9,003	8,472	7,698	7,146

Finnforest "számítás" Itot-al(Fmk és E0mean táblaként más és más)

1. felhasználási osztály

Lmax [m] (L/250)	Lmax [m] (L/300)	Lmax [m] (L/400)	Lmax [m] (L/500)
1,745	1,642	1,492	1,385
2,043	1,923	1,747	1,622
2,430	2,287	2,078	1,929
2,739	2,578	2,342	2,174
2,689	2,531	2,299	2,135
3,145	2,959	2,689	2,496
2,859	2,777	2,523	2,343
3,326	3,130	2,843	2,640
3,428	3,226	2,931	2,721
3,704	3,485	3,167	2,940
3,941	3,709	3,370	3,128
4,193	3,946	3,585	3,328
4,635	4,362	3,963	3,679
4,790	4,507	4,095	3,802
5,071	4,772	4,336	4,025
5,329	5,015	4,556	4,230
5,638	5,306	4,821	4,475
5,872	5,709	5,187	4,815

