

Teherhordó trapézlemeztes tetőfödémek tűzállósága

Rétegrend

Napjainkban a nagy terek lefedésének döntő hányada a következő rétegrenddel készül:

- PVC vízszigetelés mechanikai rögzítéssel
- lépésálló hőszigetelés
- párazáró fólia
- magas hullámú trapézlemez

A vízszigetelést tányér-alátétes hosszú csavarokkal rögzítik a hőszigetelésen keresztül a trapézlemez felső övéhez. A következő PVC sáv a csavarsort lefedi. A PVC sávokat meleg levegős hegesztéssel teszik folytonossá.



A hőszigetelés lehet kőzetgyapot, amely szervesetlen, "A1" osztályú nem éghető anyag. Lehet habosított szerves anyag, polisztirol, PIR-hab, ezek általában "E" tűzvédelmi osztályúak. Lehet több rétegben fektetett vegyes anyag, pl. alul kőzetgyapot, fölötté szerves anyag.

A trapézlemezt leggyakrabban 6 m tengelytávolságban levő vasbeton gerendákra fektetik, profilja döntő többségben T 150/280, ha az önsúlyon kívül más számottevő teher nincs, a szokványos lemezvastagság 0,88 mm.

A fenti leírás nagyon vázlatos. A szakszerű kivitelezéshez alapos ismeretre és tapasztalatra van szükség, sok épületszerkezeti részletet, szakmai fogást kell ismerni hozzá, amelyekkel most nem foglalkozunk.

Tűzvédelmi követelmények

Fogalmaival, alapvető kérdéseivel a Tételhatároló szerkezetek követelményei című írásunkban foglalkoztunk.

Az OTSZ, ezzel együtt a tetőfödémekre vonatkozó előírások gyakran változnak, és ez valószínűleg így is fog maradni. A pályám elején a tűzvédelmi előírásokat nem jogszabály, hanem szabvány tartalmazta, ez volt az MSZ 595 szabványsorozat. Az OTSZ átalakulásainak főbb állomásai 1996, 2002, 2008, 2011, 2014. Korábban nagyobb változások 8 évenként, újabban 3 évenként voltak, kisebb változások ezek között is előfordultak.

Az OTSZ megkülönböztet 60 kg/m²-nél nehezebb és 60 kg/m²-nél könnyebb tetőfödémeket. 2011-es OTSZ (28/2011 (IX.6.) BM rendelet) a nehezebbeket a tetőfödémek tartószerkezeteihez sorolja, a könnyebbeket a tetőfödém térelhatároló szerkezetének nevezi, a terhet állandó teherként definiálja. A 7.§ 32. pont szerint: „Tetőfödém térelhatároló szerkezete: a tetőfödém tartószerkezeteire támaszkodó könnyűszerkezetes, réteges felépítésű, legfeljebb 60 kg/m² felülettömegű szerkezetek (önhordó) rétegei. Az állandó terhelésbe valamennyi tetőréteget, valamint a ráfüggesztett és rátett dolgok terhet is bele kell számolni.” A meghatározás 2. mondata tőlem származik, a korábbi verziókban nem szerepelt. Ez egy részleges eredmény volt, többet nem tudtam elérni. Az első mondatban szereplő felülettömeg rendkívül

félrevezető, mert azt sugallja, hogy csak az önsúlyt kell számításba venni. Ez nyilvánvalóan helytelen, mert tüzeset alkalmával jelen vannak a gépészeti és villamos függesztett berendezések, a tetőn levő járólapok, stb.; ezek a tüzeseti állékonyságot csökkentik. A célom az volt, hogy a besorolásnál minden terhet figyelembe vegyünk, amelyet tüzeset során jelen lehet, ill. a statikai méretezés során számításba kell venni. Ennek egzakt megfogalmazása a **tüzeseti rendkívüli tehercsoportosításból számított teher**. Szerintem ezt kellett volna (és ezt kellene) szerepeltetni, és a határvonalat 80 kg/m^2 -nél kellene meghúzni (60 kg/m^2 + a lapostetős hőteher 100 kg/m^2 -es értéke szorozva a hőteher $\Psi_1=0,2$ rendkívüli tehercsoportosításban alkalmazandó kombinációs tényezőjével). A kiegészítő mondat csak a fogalom-meghatározásoknál szerepelt, azt sem tudtam elérni, hogy a követelményeket tartalmazó táblázatoknál szerepeljen, ott továbbra is a félrevezető felülettömeg maradt. A 2011-es OTSZ eltérő követelményeket írt elő a tető tartószerkezeteire és térelhatároló szerkezeteire, pl. a III. tűzállósági fokozatú csarnoképület tető térelhatároló szerkezetének tűzállósági követelménye REI 15, a tartószerkezeté REI 30 volt. Tűzvédelmi osztály tekintetében az A2 nem éghető követelmény a II. tűzállósági fokozatú 3 szint fölötti épületeknél, és a II. tűzállósági fokozatú csarnokoknál jelent meg, ez alatt B vagy gyengébb tűzvédelmi osztály volt előírva.

A jelenleg hatályos OTSZ-ben (54/2014. (XII. 5.) BM rendelet) mind a definíció, mind a követelmény-táblázatban szereplő rövidített félrevezető megfogalmazás megmaradt. Az előírt tűzállósági teljesítmény AK kockázati osztály fsz. + 2 emeletig REI 15 mind a tető tartószerkezetre, mind a tető térelhatároló szerkezetre. Utána csak a KK kockázati osztályú földszintes épület tető térelhatároló szerkezete REI 15, egyébként az előírás REI 30 vagy szigorúbb. A tűzvédelmi osztályt tekintve mind a tető tartószerkezetnél, mind a tető térelhatároló szerkezetnél hiányzik a "B" osztály. AK kockázati osztály fsz. + 2 emeletig, valamint KK kockázati osztályú földszintes épületnél B-nél alacsonyabb, egyéb esetekben pedig A2 a követelmény.

Mind a jelenleg hatályos, mind az azt megelőző OTSZ-ből a "B" és az "A2" tűzvédelmi osztály, illetve a REI 15 és a REI 30 teljesítmény közötti határt emeltem ki. A későbbiekben látható lesz, hogy ennek határozott oka van.

A teherhordó trapézlemez tetőfödém tűzvédelmi osztálya

A lépésálló kőzetgyapot hőszigetelésű tetőfödémek "A2" osztályúak. A párazáró fólia és a kőzetgyapot szálait összetartó ragasztó ugyan éghető, mennyisége azonban olyan kicsi, hogy az "A2" kategóriába belefér. A PVC vízszigetelő fólia egyértelműen éghető anyag, a tetőfödém vizont tűzállósági teljesítmény szempontjából csak alsó tűzhatásra vizsgálják, az igazolás szerinti időpontig vizont a hőszigetelés annyira képes megvédeni a fölül levő vízszigetelést, hogy annak hőmérséklete alig emelkedik. A legjobb kőzetgyapotnak is sokkal nagyobb összenyomódása van, mint a leggyengébb lépésálló polisztirolnak vagy PIR-habnak. Ez bizonyos szempontból hátrány, mert ha sokat mászkálnak a tetőn (pl. gépészeti szerelés és karbantartás céljából), az maradandó összenyomódást okozhat. Tűzvédelem szempontjából vizont előny, mert a táblák rugalmasak, és követni tudják a nagy lehajlásokat.

A kombinált hőszigetelésű tetőfödémek tűzvédelmi osztálya általában "B". Ezért is érdekes, hogy pont ez nem szerepel a követelmények között. Alul kőzetgyapot hőszigetelés van, melynek szerepe, hogy megvédje a fölötte levő éghető anyagú hőszigetelést, az az előírt időtartamig ne tudjon annyira átmelegedni, hogy meggyulladjon. Hőszigetelő képességénél fogva ezt a szerepet könnyen be is tudná tölteni, e szempontból 5 cm-es vastagság is elég lenne. A lehajlás vizont rendkívül nagy, egy 4 m hosszú kemence esetén nagyságrendileg 30 cm. A hőszigetelésben igen nagy görbületek keletkeznek, a táblák eltörhetnek, az illesztéseknél rések keletkeznek, amelyeken keresztül a hő átterjed, és az éghető hőszigetelés előbb-utóbb meggyullad. A sokkal merevebb szerves anyagú hőszigetelő táblák között még hamarabb kialakulnak a hézagok, ezért ha a kőzetgyapot hőszigetelésben folytonossági hiány keletkezik, a hő igen gyorsan fölterjed a tető külső rétegeibe. Ez a tűzvédelmi osztályon kívül a tűzállósági teljesítményt is lerontja, a teherbírás kimerülése előtt az "I" kritériumra megy tönkre a szerkezet. Javul a helyzet, ha alul két vékonyabb kőzetgyapot hőszigetelést alkalmazunk eltolt illesztésekkel.

- A vizsgálatot nem lehet egy adott hőmérsékleten megállítani, csak egy folyamatként lehet értelmezni. Igen nagy lehajlások keletkeznek, a minta a vizsgálat során állandóan mozgásban van.
- A statikai modell nem egyértelmű, e vonatkozásban sok a tévedés. Jelen írás legfőbb célja rendet tenni e kérdésben.
- A különböző gyártók az azonos trapézlemezre külön vizsgálatokat készítenek, amelyek csak a saját termékeikre vonatkoznak. A konkurencia-harc miatt e tevékenységüket nem hangolják össze, ami a tudomány fejlődését gátolja.
- A különböző intézetek nagyon hasonló mintákra igen eltérő eredményeket produkálnak. A megrendelők ahhoz az intézethez mennek, amelyről elterjed, hogy magasabb értékeket ad. Nem történik meg az összehasonlítás, az okok föltárása, ez lehetőséget ad egy esetleges hibás módszer elterjedésére.

A számítás hátrányai:

- Egzaktnak csak az "R" teherbírási érték igazolható. Ha hasonló rétegfelépítésre van tűzvizsgálat, annak "EI" értékét át lehet venni. Ha a szerkezet folytonos, hőelemzéssel az "I" kritérium elvileg igazolható. Ennek problematikája, hogy nincs megbízható adat a hőszigetelő anyagok magas hőmérsékleten való hővezetési tényezőjére, és nem kezelhetők a nagy lehajlás miatt esetlegesen kialakuló rések.
- A számítás kisebb teherbírást eredményez, mint a kísérlet.
- A tűzeseti ellenállás számítása matematikailag bonyolult, gyakorló mérnök általában nem vállalkozik rá. Erre irányuló szoftver nemigen van, vagy ha van, az kezdeti stádiumú. Acélszerkezet esetén vagy az ellenállások kísérleti értékével dolgoznak, vagy valamilyen tűzállóságot fokozó védelmet írnak elő (tűzgátló burkolat vagy tűzvédő festés).

A tönkremenetel kritériuma

Minden reál és műszaki tudomány fejlődésének az a menete, hogy egyre több megfigyelt jelenséget tudjunk számításal igazolni, ezáltal a hasonló eseményeket előre tudjuk jelezni. Ezért nagy értéke van a kísérleti és a számítási eredmények összehasonlításának. Ilyen szempontból a teherhordó trapézlemez tetőfödémek tűzállósági teljesítményével rosszul állunk.

Az első probléma elméleti jellegű. **A kísérleti és a számítási módszer szerinti határállapot nem ugyanarra az állapotról vonatkozik.** Kísérlettel csak akkor lehetne a számítást követni, ha a megcélzott minősítési időponttól kezdve a kemence-hőmérsékletet úgy változtatnánk, hogy a trapézlemez hőmérséklete állandó maradjon.

Laboratóriumi vizsgálatnál a vizsgálati szabvány a tönkremenetel kritériumát a lehajlási sebesség (dD/dt) és az abszolút lehajlás (D), határértékeihez köti, amelyek a következők:

$$\frac{dD}{dt} = \frac{L^2}{9000d} [mm/min] \quad , \quad \text{ha } D > \frac{L}{30} [mm] \quad \text{és} \quad D = \frac{L^2}{400d} [mm]$$

ahol L a fesztávolság [m]-ben, d pedig a hajlított szerkezet magassága [mm]-ben. A szerkezet teherbírása – vizsgálati szempontból – akkor merül ki, ha *mindkettő* kritériumot túllépi a hajlított szerkezet.

Statikai számítás szempontjából a tönkremenetelt az jelenti, ha a szerkezet egyre csökkenő ellenállása az igénybevétel szintje alá esik.

Növekvő lehajlási sebesség 3 esetben alakulhat ki:

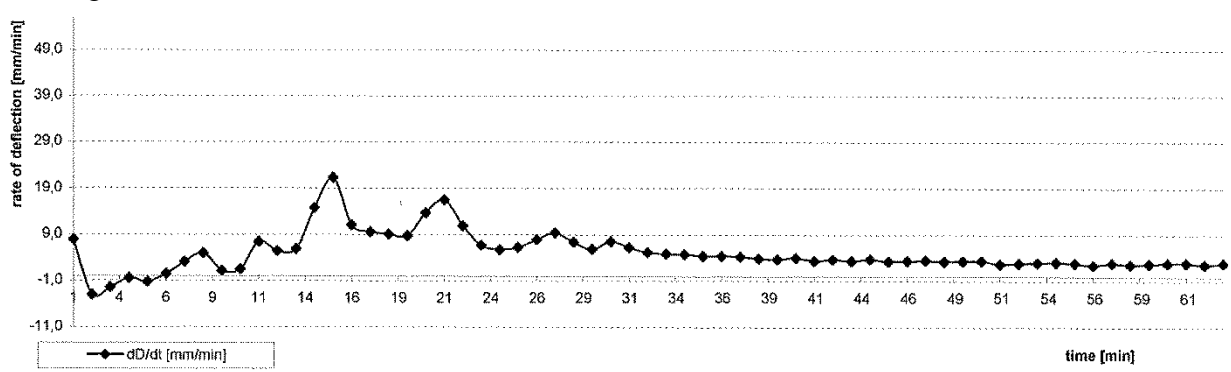
1. A vizsgálat elején a hőmérséklet igen gyorsan emelkedik, majd a hőmérséklet emelkedése lassul. Bizonyos szerkezetekben (amelyeknél a teherhordó elem alsó része jobban átmelegszik, mint a felső), a hőhatás a teherbírás kimerülése nélkül görbületet okoz, amelynek kialakulása a vizsgálat elején gyors, majd lassul, vagy meg is állhat. Emiatt rendelkezett a szabvány úgy, hogy a lehajlási sebességet csak $L/30$ lehajlás után kell figyelembe venni.
2. A belső erőjáték átrendeződésekor
3. Amikor maga a tönkremenetel zajlik. A szerkezetek többsége nem rideg töréssel omlik össze egy pillanat alatt, főleg az acélszerkezetek nem. A keresztmetszet egyes részei megfolynak, a szelvény gyűrődik, ez egy időben lejátszódó folyamat.

A trapézlemez tetőfödém kísérleti vizsgálatának végén a 3. esettel van dolgunk, tehát a tönkremeneteli kritérium hosszabb idő alatt fog jelentkezni, mint a teherbírás kimerülésének időtartama. Emiatt a laborvizsgálattal meghatározott időtartam hosszabb a számítással meghatározhatónál.

A statikai modell

Első ránézésre ez roppant egyszerű kérdés: A laborvizsgálatban a modell kéttámaszú tartó, hiszen a minta a kemence két végén fekszik föl, belül nincs közbenső támasz. A valós beépítéseknél leggyakrabban 3 támaszú (2 mezős) egyenlő támaszközü tartót alkalmaznak. Egyenletesen megoszló teher esetén a teherbírás törvényszerűen a középső támasz fölött merül ki. Ez azonban nem jelenti a szerkezet leszakadását. A középső támasz fölött a keresztmetszet megroppan, a szerkezet átalakul 2 db kéttámaszú (1 mezős) tartóvá. Így alkalmazhatók rá a kéttámaszú laborvizsgálat eredményei.

A helyzet azonban bonyolultabb: Vannak olyan külföldi vizsgálatok, amelyeknél a mintát az egyik oldalon konzolosan túlfuttatták, a konzol végének felemelkedését pedig megakadályozták; a mintát pedig 3 támaszú tartónak tekintették. Szerintem ez több szempontból is rendkívül aggályos. A következő grafikon egy ilyen vizsgálat jegyzőkönyvéből való, ahol a minta mindkét végét hullámonként két csavarral rögzítették:



A lehajlási sebességnek két kiugró értéke van, amelyeknek 15. és a 21. percben van a csúcspontja. Mivel ezek nem a vizsgálat elején vannak, semmiképpen nem 1-es típusú növekmények (a szerkezetünk kialakítása amúgy sem teszi lehetővé az 1-es típust). A statikai modell a vizsgálat kezdetén egyszerűen határozatlan. A jelenség csak azzal magyarázható, hogy először a közbenső támasznál, a kemence konzol felőli oldalán roppan meg a tartó és keletkezik csukló, a másodikkal pedig a mezőben is elveszti a nyomatóki teherbírást.

Hogy mégsem szakadt le, annak az az oka, hogy **a nyomatóki teherbírás elvesztése után a trapézlemez húzott lepelként dolgozott tovább kötél-moddellel**. Ez a fényképeken is jól látszik. Itt van jelentősége a szokásosnál jóval erősebb lerögzítésnek, amely lehetővé tette jelentős oldalirányú támaszerők felvételét. **A tűzvédelmi teljesítményt deklaráló minősítő iratból nem derül ki a statikai modell megváltozása, a végek rögzítésére semmilyen előírás nincs. Nem derül ki belőle, hogy a végeknél vízszintes támaszerők keletkeznek.** Az alábbi fénykép 60 perces vizsgálat után készült, de a 30. percben is hasonló készülhetett volna, mert a lehajlás a képen látható végső lehajlás 64%-a volt.



A kísérleti és a számítási eredmények összehasonlítása

Az 1. mellékletben a hőelemzést végeztük el különböző lemezvastagságokra és időtartamokra. Megvizsgáltuk, hogy a profiltényező számítási módja, ill. a hőszigetelés felé történő hőleadás elhanyagolása vagy figyelembe vétele milyen hatással van a számítási eredményre.

A hőelemzés azt mutatja, hogy a trapézlemez hőmérséklete nagyon közel van a levegő hőmérsékletéhez, az acéltömegnek kicsi a fékező hatása. Az idő előre haladtával a légtér és a trapézlemez hőmérséklet-különbsége csökken, a lemezvastagságtól függően a különbség 15 percnél 21-31 °C között van, 30 percnél már csak 8-10 °C közötti. A kis lemezvastagságok miatt a számítási módszerben nem lehet nagyot tévedni, az eredmények igen közel vannak egymáshoz. Gyakorlati esetben a hőszigetelés irányába történő hőleadás elhanyagolható, a hőfelvevő felület pedig számolható a kiterített szélességgel, így a profiltényező a lemezvastagság reciprokának 1000-szerese.

A 2. mellékletben meghatároztuk a keresztmetszet ellenállásait (határ-igénybevételeit) különböző lemezvastagságokra és időtartamokra. Normál hőmérsékleten a számított és a terhelési tesztekben nyert határ-igénybevételek között érezhető különbség van az utóbbiak javára, ezért ajánlják a gyártók a terhelési tesztek eredményeit. Ez azzal magyarázható, hogy a teherbírás kimerüléséhez közel a trapézlemez alkotó lemezeiben horpadások jelennek meg. Ezek területét a számításban kivesszük a keresztmetszetből, a valóságban viszont még van tartalékuk. Ez a jelenség ugyanúgy játszódik le magas hőmérsékleten is. Ezért **nagyon közel áll egymáshoz a terhelési tesztekben számított tűzeseti ellenállás és a tűzvizsgálati eredmény**, az eltérés 6% alatti az utóbbi javára. Ez a kétfajta eredmény elvi különbségével jól magyarázható, a folyáshatár hőmérséklettől függő csökkentése nagyon jól működik. Szintén rendkívül közel van egymáshoz a normál hőmérsékleten számított inercia és a terhelési tesztekben nyert használati állapotról vonatkozó inercia. A kihasználtság növekedésével a horpadások rontják az inerciát, ezért a tűzeseti lehajlásokat a teherbírás inerciával célszerű számolni.

A 3. mellékletben egy mintapéldán néztük meg a leggyakoribb beépítési módot. Ennek tanulságai:

A szokványos 6 m-es gerendatávnál **statikai számítással a T150x0,88 trapézlemezre 15 perc tűzállósági teljesítmény igazolható.**

A szokványos 6 m-es gerendatávnál **statikai számítással 30 perc tűzállóságot csak a legerősebb T150x1,50 trapézlemezre lehet igazolni**, azt is nehezen; 16 cm közetgyapot hőszigeteléssel és max 20 kg/m² függesztett, ill. rátett teherrel.

A szokványos 6 m-es gerendatávnál **statikai számítás szerint az 1,50 mm-nél vékonyabb trapézlemezek a nyomatóki teherbírásukat 30 percnél hamarabb elvesztik. Szerencsés körülmények között húzott szerkezetként kötél-modell szerint dolgoznak tovább. Az ilyen alkalmazásnál körültekintően kell elemezni a beépítési körülményeket, a fogadó szerkezetet és a trapézlemez lerögzítő elemeit a keletkező húzóerőre méretezni kell.**

Megvizsgáltam számítással az előbbieken példaként hozott tűzvizsgálatot. A vizsgálatban alkalmazott terhelésből számított hajlítónyomaték (3,12 kNm/m) igen közel áll a szokványos alkalmazásokban előforduló terhelésből keletkező hajlítónyomatékhoz (a példánkban ez 3,17 kNm/m). A fellépett igénybevétele és a számított ellenállás között akkora eltérés van, amely semmiképp nem magyarázható a számítás és a kísérlet közötti elméleti különbséggel. A lehajlást tekintve az eltérés még sokkal markánsabb. A szerkezet hajlított tartóként 30 perces tűzterherre nem felel meg. A mért és a kötélmodellel számított belógás viszont nagyságrendileg stimmel.

A leggyakrabban alkalmazott T150x0,88 trapézlemez viselkedése 30 perces tűzterher esetén sokkal közelebb van a kötélmodellhez, mint a kéttámaszú (1 mezős) modellhez. A valóságos viselkedés a kétfőt között van. A hajlítási ellenállás nagy, 10 cm nagyságrendű lehajlás mellett merül ki, amely nem rideg töréssel, hanem az anyag megfolyásával jár. Ez a tartó közepétől indul, majd egyre nagyobb hosszra terjed ki. A hajlítási ellenállás nem szűnik meg teljesen, a trapézlemez nem teljesen hajlékony kötélként működik. A fenti megjegyzések mellett **a vizsgálati eredmény kötél-modellként a szokványos 6 m körüli fesztávra kiterjeszhető.** A támasznál a szögelfordulás ugyanakkora, a belógás a fesztávval egyenesen

arányos. Nagyobb fesztáv és azonos normál hőmérsékleti hajlító-nyomaték esetén a kötélmodellből számított vízszintes erő kisebb.

A tűzvizsgálaton alapuló minősítő iratokból általában nem derül ki, hogy a minta a tűz során hajlított tartóként viselkedett, vagy inkább a kötélmodell követte. Ez hiányosság, és bizonyos alkalmazásoknál veszélyes is lehet, pl. ha a trapézlemezt az acél tartó felső övének oldalirányú megtámasztására vették figyelembe.

A ***kiterjesztést*** eltérő fesztávra és eltérő megtámasztási viszonyokra (pl. 2 támaszú vizsgálati minta eredményét 3 támaszú tartóra) azon az ***alapon végzik, hogy ugyanakkora igénybevételek keletkezzenek, mint a mintán.*** Ezt formális logikával végzik, magát a kísérletet fekete dobozként kezelve, a kísérlet során történtek elemzése nélkül. ***Az ilyen kiterjesztés azt jelenti, hogy normál hőmérsékleten ugyanakkora igénybevételt engednek meg, mint amilyen a mintában föllépett a tűzkísérlet megkezdése előtt.*** Nem jelenti azt, hogy ezek az igénybevételek a tűzterhelés során is fennálltak, mert a minta belső erőjátéka a tűz hatására átrendeződhetett. Az erőjáték átrendeződése veszélyes is lehet, különösen akkor, ha eltérő típusú erők jelennek meg.

A kihasználtságon alapuló ellenőrzéssel is vigyázni kell. Pl.: Szoftverrel meghatározzuk a kísérleti minta erőjátékát, amely kiírja, hogy a maximális kihasználtság 43%. A valós körülményekre úgy tervezzük a szerkezetet, hogy ott is a 43% kihasználtság alatt maradjunk. Ha nem vagyunk körültekintőek, előfordulhat, hogy a minta kihasználtsága a szélső támaszerőnél volt; és tűz során ez már rég tönkrement, de a minta nem esett be a támaszok közé. Lehet, hogy emellett a minta kihasználtsága hajlító-nyomatéokra csak 29%-os volt, és a 43%-ra méretezett tartónk a tűzben hajlító-nyomatéokra tönkremegy, és be is szakad. A statikai szempontból különböző típusú tönkremenetelnek nem azonos a hatása a leszakadásra nézve.

Ne feledjük:

A statikusnak méreteznie kell a trapézlemezes tetőszerkezetet tüzesetre is, akkor is, ha van tűzvizsgálati minősítés. Ugyanis az csak a benne szereplő terhekre vagy igénybevételekre igaz, amelyeket a konkrét beépítési körülményekre ellenőrizni kell; különös tekintettel a hőzugokra. Ellenőrizni kell azt is, hogy a tűzvédelmi tervező jól sorolta-e be a szerkezetet, mert a hőszigetelés vastagodásával a tetőfödém a rátett és a függesztett terhekkal együtt hamar átlépi a 60 kg/m²-es határt, ahonnan már az OTSZ szerint is tartószerkezetnek minősül, esetenként eltérő követelménnyel.

Székesfehérvár, 2017.07.10.

Sas Viktor
okl. építőmérnök

1. melléklet: T150 –es tetőfödém trapézlemeznének hőmérséklete tűzben
2. melléklet: T150 –es trapézlemez határ-igénybevételei
3. melléklet: T 150/280 trapézlemezes tetőfödém mintapélda

1. melléklet

T150 –es tetőfödém trapézlemezének hőmérséklete tűzben

A keresztmetszet hőmérséklet-eloszlása egyenletesnek tekinthető. Csak az alsó oldalról kap hőt, a felső oldalról hőszigetelés határolja. A számítást több tényező befolyásolja, ezek egyrészt műszaki megfontolásból eredő közelítő tényezők, másrészt a szabvány által megengedett pontossági tényezők.

A számítás menete az, hogy 20°C-ról indulva kis időlépcsőket alkalmazva kiszámoljuk a légtér hőmérsékletét az időlépcső végére, a légtér és az acél hőmérséklet-különbségétől függően kiszámítjuk a felvett hőmennyiséget. Ezután megnöveljük a légtér hőmérsékletét a következő időlépcső végére, az acél hőmérsékletét pedig annyival, amennyivel a felvett hőmennyiség megemeli azt.

A szabvány által előírt időlépcső 5 sec, így 15 perces időtartamot 180 lépésben tudunk elérni. Ilyen számítást nyilvánvalóan csak számítógéppel lehet elvégezni.

A légtér hőmérséklete a szabványos tűzgörbét alkalmazva: $q_g(t) = 20 + 345 \cdot \log(8t + 1)$

Az acél hőmérsékletének emelkedése a fölfelé történő hőleadás figyelembevétele nélkül:

$$\Delta q_a = \frac{AV_{sh}}{r_a \cdot c_a(q_a)} \cdot \left[a_c (q_g(t) - q_a) + \Phi e_m e_f s \left[(q_g(t) + 273)^4 - (q_a + 273)^4 \right] \right] \cdot \Delta t$$

ahol: θ_a az acélszerkezet hőmérséklete, °C

AV_{sh} a profiltényező, 1/m

t_{fi} a tűz-időtartam, perc

$c_a(\theta_a)$ az acél fajhője [2] 3.4.1.2 pont szerint a hőmérséklettől függő szakaszos függvény

$\rho_a = 7850$ az acél sűrűsége, kg/m³

$\alpha_c = 25$ a konvekciós hőátadási együttható, 1/°C

θ_g a levegő hőmérséklete [1] 3.2.1 pont szerinti függvénnyel (szabványos tűzgörbe, az idő percben helyettesítendő be), °C

$\Phi = 1$, elrendezési tényező [1] G melléklet G1., G2. pont

$\epsilon_m = 0,7$, $\epsilon_f = 1$, emissziós tényezők

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ W/m²K⁴ a Stefan-Boltzmann állandó

Δt a számítási ciklus időlépcsője, 5 sec.

A profiltényező számítása:

A trapézlemez fedési szélessége 840 mm, kiterített szélessége 1500 mm. Feltételezzük, hogy a hőfelvétel az alapterülettel arányos. 0,88-as trapézlemezre:

$$AV_{box,0,88} = \frac{A}{V_{0,88}} = \frac{0,84}{1,50 \cdot 0,00088} = 636,4 \frac{1}{m}$$

Az acél fajhője, J/(kgK):

$20^\circ\text{C} \leq q_a < 600^\circ\text{C}:$	$c_a = 425 + 0,773q_a - 1,69 \cdot 10^{-3}q_a^2 + 2,22 \cdot 10^{-6}q_a^3$
$600^\circ\text{C} \leq q_a < 735^\circ\text{C}:$	$c_a = 666 + \frac{13002}{738 - q_a}$
$735^\circ\text{C} \leq q_a < 900^\circ\text{C}:$	$c_a = 545 + \frac{17820}{q_a - 731}$
$900^\circ\text{C} \leq q_a \leq 1200^\circ\text{C}:$	$c_a = 650 \text{ J/kgK}$

$$q_{box,0,88} = q_{box,0,88} + \frac{0,08107}{c_a(q_a)} \cdot \left[25(q_g(t) - q_a) + 3,969 \cdot 10^{-8} \cdot \left[(q_g(t) + 273)^4 - (q_a + 273)^4 \right] \right] \cdot 5$$

$q_0 = 20^\circ\text{C}$ hőmérsékletről indulva, $n = 60 \cdot t_{fi} / 5 = 180$ lépés után:

$$q_{15,box,0,88} = 724,4^\circ\text{C} \quad \text{Ugyanígy kiszámolva az 1,00 mm-es trapézlemezre: } q_{15,box,1,00} = 722,8^\circ\text{C}$$

A hőszigetelés irányába történő hőleadás hatása:

Ehhez egy nagyságrenddel bonyolultabb számítást kell végrehajtanunk. Feltételezzük, hogy a trapézlemez keresztmetszetén belül a hőmérséklet állandó, a hőszigetelésben pedig egy dimenziós hőmérséklet-eloszlás van. Ez a valóságban persze nem így van, de a feltevés egy jó közelítést eredményez. A trapézlemez felső övénél az acéllemez közvetlenül adja át a hőt a hőszigetelésnek. Az alsó öv fölött egy levegő-zárvány van, amelyet három oldalról a trapézlemez, a negyedik oldalról a hőszigetelés határol. E légzárvány hőmérséklete igen gyorsan követi a trapézlemez hőmérsékletét, tehát a légzárvány és a hőszigetelés közötti hőátadás nem sokkal marad el a trapézlemez és a hőszigetelés közötti hőátadástól. Az acél hőmérséklete szempontjából a hőleadás elhanyagolása felső közelítést eredményez, az egydimenziós hőeloszlás feltételezése pedig alsó közelítés.

A szigetelőanyagban belül a hőmérséklet egy kétváltozós függvény, függ az időtől és a helytől. A belső felületén a hőmérséklet megegyezik az acél hőmérsékletével, külső felületén pedig a PVC vízszigetelés hőmérsékletével. A szigetelőanyagban belül a hő a hővezetés törvényét követve áramlik kifelé:

$$h = -k \cdot A \cdot \frac{dq}{dx}$$

ahol h a hőáram, W
 k a hővezetési tényező, az alkalmazott hőszigetelésre 0,045 W/mK
 A az áramlási keresztmetszet,
 x a távolság.

Mivel a határoló lapokon átáramló hőmennyiség nem azonos, az anyag kénytelen hőmérsékletének emelkedése árán a különbözetet tárolni:

$$\frac{dh}{dx} = -r \cdot V \cdot c \cdot \frac{dq}{dt} \quad \text{ahol: } \rho = 145 \text{ kg/m}^3 \text{ a sűrűség}$$

$$V \text{ a térfogat}$$

$$c = 1050 \text{ J/kgK a fajhő}$$

A két egyenletből: $-k \cdot A \cdot \frac{d^2q}{dx^2} = -r \cdot A \cdot dx \cdot c \cdot \frac{dq}{dt}$

$$\frac{dq}{dt} = \frac{k}{r \cdot c} \cdot \frac{d^2q}{dx^2} \quad (\text{ez a hővezetés differenciálegyenlete - Fourier, 1822})$$

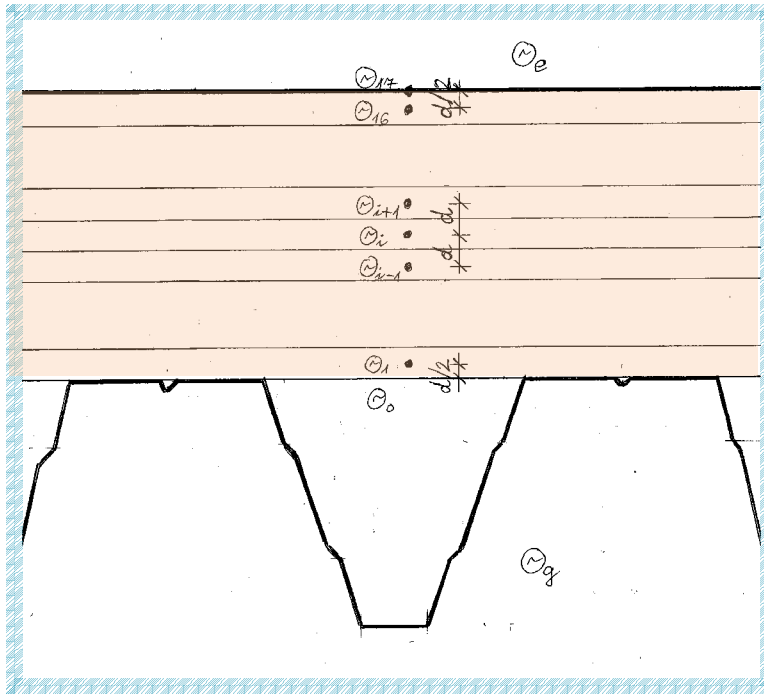
A peremfeltételek:

belül: $\frac{dq_a}{dt} = \frac{A_m \cdot h_{net,d} - h_0}{r_a V_a c_a} = \frac{AV_{sh}}{r_a c_a} \cdot \left(h_{net,d} - \frac{dq_0}{dx} \right)$

kívül: $\frac{dq_{PVC}}{dt} = \frac{h_d - h_e}{c_{PVC} \cdot r_{PVC} \cdot V_{PVC}} = \frac{1}{c_{PVC} \cdot r_{PVC} \cdot d_{PVC}} \cdot \left[k \cdot \frac{dq_d}{dx} - a_e (q_d - q_e) \right]$

ahol h_0 a hőáram a hőszigetelésben, a belső felületnél
 h_d a hőáram a hőszigetelésben, a külső felületnél
 θ_0 a hőmérséklet a hőszigetelésben, a belső felületnél (egyenlő az acélével)
 θ_d a hőmérséklet a hőszigetelésben, a külső felületnél (egyenlő a PVC vízszigetelésével)
 c_{PVC} a vízszigetelés fajhője
 ρ_{PVC} a vízszigetelés sűrűsége
 d_{PVC} a vízszigetelés vastagsága
 $\alpha_e = 24$ a külső hőátadási tényező
 θ_e a külső hőmérséklet, ez az időjárástól függ, 20°C-nak fogjuk venni.

A feladatot véges-elem módszerrel oldjuk meg. A hőszigetelést $d=1\text{cm}$ vastagságú rétegekre osztjuk fel. A rétegek középpontjában a hőmérséklet rendre $\theta_1 \dots \theta_{16}$. A belső trapézlemez θ_0 és a külső PVC vízszigetelés θ_{17} hőmérsékletével együtt 18 ismeretlenünk van.



A számítás elején mind a 18 hőmérsékletet 20°C-ról indítjuk. A hőmérsékletek emelkedése:

$$\Delta q_0 = \frac{AV_{sh}}{r_a \cdot c_a(q_a)} \cdot \left[a_c(q_g(t) - q_0) + \Phi e_m e_f s [(q_g(t) + 273)^4 - (q_0 + 273)^4] - \frac{2k}{d}(q_0 - q_1) \right] \cdot \Delta t$$

$$\Delta q_1 = \frac{k}{r \cdot c} \cdot \frac{2q_0 - 3q_1 + q_2}{d^2} \cdot \Delta t$$

$$\Delta q_i = \frac{k}{r \cdot c} \cdot \frac{q_{i-1} - 2q_i + q_{i+1}}{d^2} \cdot \Delta t \quad i = 2 \dots 15$$

$$\Delta q_{16} = \frac{k}{r \cdot c} \cdot \frac{q_{15} - 3q_{16} + 2q_{17}}{d^2} \cdot \Delta t$$

$$\Delta q_{17} = \frac{1}{r_{PVC} \cdot c_{PVC} \cdot d_{PVC}} \cdot \left[k \cdot \frac{2 \cdot (q_{16} - q_{17})}{d} - a_e \cdot (q_{17} - q_e) \right] \cdot \Delta t$$

A hőmérsékletek 15 percnél
többfajta vastagságra:

15 perc	t _N =0,88	t _N =1,00	t _N =1,25	t _N =1,50
A/V	636,4	560	448	373,3
θ ₁₇	20,0	20,0	20,0	20,0
θ ₁₆	20,0	20,0	20,0	20,0
θ ₁₅	20,0	20,0	20,0	20,0
θ ₁₄	20,0	20,0	20,0	20,0
θ ₁₃	20,0	20,0	20,0	20,0
θ ₁₂	20,0	20,0	20,0	20,0
θ ₁₁	20,0	20,0	20,0	20,0
θ ₁₀	20,0	20,0	20,0	20,0
θ ₉	20,1	20,1	20,1	20,1
θ ₈	20,5	20,5	20,4	20,4
θ ₇	21,9	21,8	21,6	21,5
θ ₆	26,4	26,1	25,6	25,2
θ ₅	39,5	38,9	37,6	36,5
θ ₄	73,8	72,3	69,5	66,8
θ ₃	151,0	149,0	143,7	138,7
θ ₂	303,1	299,6	292,3	284,9
θ ₁	551,1	548,2	541,6	534,6
θ ₀	717,2	715,5	711,6	707,3
ΔL/L	0,0104	0,0104	0,0103	0,0102

A hőmérsékletek különböző időpontokban
0,88 mm-es lemezvastagságra:

t _N =0,88	15 perc	30 perc	45 perc
A/V	636,4	636,4	636,4
θ ₁₇	20,0	20,0	20,0
θ ₁₆	20,0	20,0	20,0
θ ₁₅	20,0	20,0	20,2
θ ₁₄	20,0	20,0	20,4
θ ₁₃	20,0	20,1	21,0
θ ₁₂	20,0	20,2	22,3
θ ₁₁	20,0	20,7	24,9
θ ₁₀	20,0	21,8	30,0
θ ₉	20,1	24,5	39,5
θ ₈	20,5	30,7	56,5
θ ₇	21,9	43,7	84,9
θ ₆	26,4	69,4	130,3
θ ₅	39,5	115,9	198,6
θ ₄	73,8	193,9	295,6
θ ₃	151,0	314,1	425,9
θ ₂	303,1	484,1	590,6
θ ₁	551,1	704,1	787,0
θ ₀	717,2	833,7	897,2
ΔL/L	0,0104	0,0110	0,0117

A hőszigetelés irányába történő hőleadás figyelembevétele 15 percnél 7-8°C csökkenést eredményezett. Ez a csökkenés 30 percnél már csak 5 °C.

A fenti eljárás az "I" kritérium számítással való igazolásának elve. A hőszigetelő táblák közötti résképződés és a hőszigetelő anyag hővezetési tényezőjének magas hőmérsékleten való esetleges eltérése miatt a hőszigetelés belsejében a hőmérsékleti értékek bizonytalanok. Ennek ellenére az "I" kritériumot számítással bizonyítottan tekinthetjük az következők miatt: 45 perc után 5 cm-es magasságban a hőmérséklet még mindig csak 200°C. Ha alul két 5 cm vastag közetgyapot réteg van eltoltszerűen, és feltételezzük, hogy két tábla között rések keletkeznek, a 200°C-os hőmérséklet akkor is csak 10 cm-ig terjed föl, a vízszigetelésnél pedig a 11 cm-nél számított 25°C-os hőmérséklet van. Ha a hővezetési tényezőt a duplájára emelnénk, 5 cm réssel számolva a vízszigetelésnél a hőmérséklet akkor sem haladná meg az 50°C-ot.

A profiltényező hatása:

$$AV_{sh} = AV_{m,0,88} = \frac{A_m}{V_{0,88}} = \frac{1,50}{1,50 \cdot 0,00088} = 1136 \frac{1}{m}, \text{ a többi tényező az előző számítás szerinti.}$$

$$q_{15,m,0,88} = 722,8^\circ C \text{ ugyanígy elvégezve a számítást: } q_{15,m,1,00} = 721,9^\circ C$$

A különbség 15 percnél lemeztavagságtól függően 6-10 °C. 30 percnél a különbség már csak 2-3 °C. A továbbiakban úgy tekintjük, hogy a hőfelvevő felület az alapterület.

Hőtágulás:

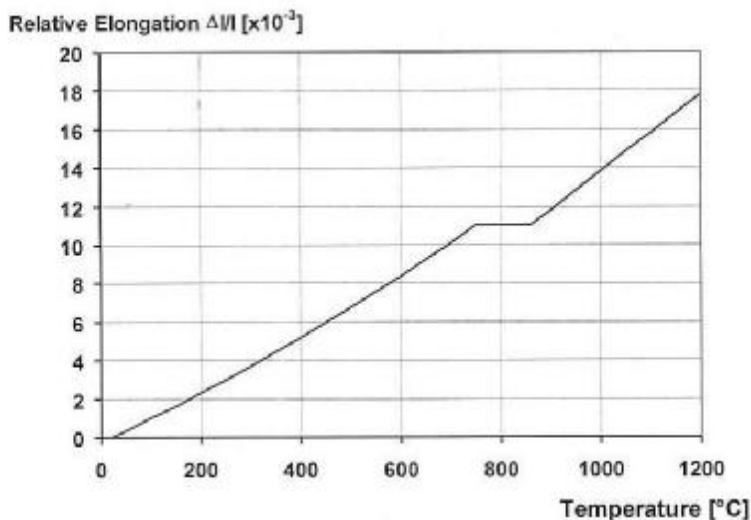
A hőmérséklet-változás közvetlen hatása a hőtáguláson keresztül érvényesül.

[2] 3.4.1.1 szerint a relatív hosszváltozást a következő szakaszos függvény írja le:

$$20^\circ C \leq q_a < 750^\circ C: \quad \Delta l / l = 1,2 \cdot 10^{-5} q_a + 0,4 \cdot 10^{-8} q_a^2 - 2,416 \cdot 10^{-4}$$

$$750^\circ C \leq q_a < 860^\circ C: \quad \Delta l / l = 0,011$$

$$860^\circ C \leq q_a < 1200^\circ C: \quad \Delta l / l = 2 \cdot 10^{-5} q_a - 6,2 \cdot 10^{-3}$$



A 2. melléklet táblázataiban megadjuk a trapézlemezek hőmérsékleteihez tartozó relatív hosszváltozást.

A számításra vonatkozó szabvány:

[2] MSZ EN 1993-1-2, Acélszerkezetek tervezése tűzterhelésre

Székesfehérvár, 2011.02.12.
 átdolgozva: 2017.07.03.

Sas Viktor
 okl. építőmérnök
 matematikus szakmérnök

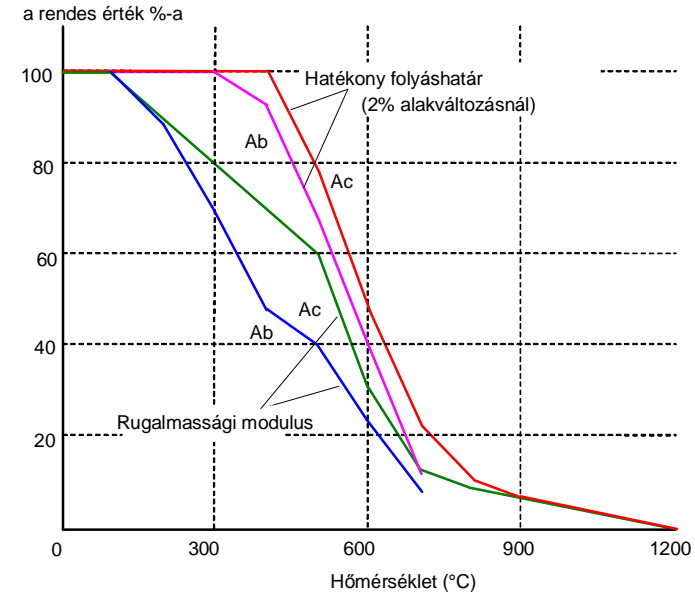
2. melléklet

T150 –es trapézlemez határ-igénybevételei

Csökkentő tényezők emelt hőmérsékleten:

A folyáshatárt, az arányossági határt és a rugalmassági modulust a hőmérséklet függvényében az alábbi tényezőkkel kell szorozni:

θ_a	$k_{y,\theta} = f_{y,\theta} / f_y$	$k_{p,\theta} = f_{p,\theta} / f_y$	$k_{E,\theta} = E_{a,\theta} / E_a$
20 °C	1,000	1,000	1,000
100 °C	1,000	1,000	1,000
200 °C	1,000	0,807	0,900
300 °C	1,000	0,613	0,800
400 °C	1,000	0,420	0,700
500 °C	0,780	0,360	0,600
600 °C	0,470	0,180	0,310
700 °C	0,230	0,075	0,130
800 °C	0,110	0,050	0,090
900 °C	0,060	0,0375	0,0675
1 000 °C	0,040	0,0250	0,0450
1 100 °C	0,020	0,0125	0,0225
1 200 °C	0,000	0,0000	0,0000



A táblázat szerkezeti acélokra vonatkozik, a grafikonon Ac a szerkezeti acélokat jelenti, Ab a hidegen húzott betonacélokat.

A normál hőmérsékletre tartozó ellenállás-értékeket a gyártók tervezési segédleteiből vehetjük. Tűzhatás esetén ugyanazokat az effektív keresztmetszeti jellemzőket használjuk, ezért a határ-igénybevételek a folyáshatár korrekciós tényezőjével szorozódnak.

Határ-igénybevételek tűzhatás esetén, kísérlettel:

A tűzvizsgálatban kéttámaszú, 0,88-as trapézlemez vizsgáltak 4 m fesztávval. Az önsúly 0,38 kN/m², az alkalmazott terhelés 1,6 kN/m² volt. A szabályosan elvégzett vizsgálatban 1 mezős tartóként REI 15 Tűzállósági teljesítményt igazoltak.

Az összes terhelés:

$$p_{4,0,Rd} = p_{\text{öns}} + p = 0,38 + 1,6 = 1,98 \text{ kN} / \text{m}^2$$

A kísérlet során a tartóban az alábbi igénybevételek léptek föl, amelyeket az ellenőrzés során határ-igénybevételeként kell tekinteni:

$$M_{F,Rd} = \frac{p_{4,0,Rd} \cdot L^2}{8} = \frac{1,98 \cdot 4,0^2}{8} = 3,96 \text{ kNm} / \text{m}$$

$$R_{A,Rd} = \frac{p_{4,0,Rd} \cdot L}{2} = \frac{1,98 \cdot 4,0}{2} = 3,96 \text{ kN} / \text{m}$$

Az ellenállásokat lemezvastagságoként az alábbi táblázatokba foglaltuk:

T 150 x 0,88 trapézlemez	jel	normál hőm.		tűz 15 perc, légtér 738°C			tűz 30 perc, $\theta_g=842^\circ\text{C}$	
		számított	terhelési teszt	számított		tűzvizsgálat	számított	
				számítottból	terh. tesztből		számítottból	terh. tesztből
trapézlemez hőmérséklete	θ_a	20 °C		717,2 °C			834,2 °C	
relatív hosszváltozás	$\Delta L/L$	0,00000		0,01042			0,01100	
rugalmassági mod. korr. tényező	$k_{E,\theta}$	1,000		0,123			0,082	
rugalmassági modulus	E	21 000 kN/cm ²		2 583 kN/cm ²			1 728 kN/cm ²	
folyáshatár korrekciós tényező	$k_{y,\theta}$	1,000		0,208			0,0929	
folyáshatár	$f_{y,k}$	32,0 kN/cm ²		6,66 kN/cm ²			2,97 kN/cm ²	
mezőnyomaték	$M_{F,Rd}$	14,2 kNm/m	18,0 kNm/m	2,95 kNm/m	3,74 kNm/m	3,96 kNm/m	1,32 kNm/m	1,67 kNm/m
támasznyomaték	$M_{B,Rd}$	12,8 kNm/m	16,4 kNm/m	2,66 kNm/m	3,41 kNm/m		1,19 kNm/m	1,52 kNm/m
nyíróerő	V_{Rd}	44,2 kN/m	22,1 kN/m	9,19 kN/m	4,59 kN/m	3,96 kN/m	4,11 kN/m	2,05 kN/m
szélső támaszerő	$R_{A,Rd}$	8,62 kN/m	17,8 kN/m	1,79 kN/m	3,70 kN/m	3,96 kN/m	0,80 kN/m	1,65 kN/m
közbenső támaszerő, $b \geq 160\text{mm}$	$R_{B,Rd}$	42,8 kN/m	44,1 kN/m	8,90 kN/m	9,17 kN/m		3,98 kN/m	4,10 kN/m
Inercia használati állapotban	$I_{eff,S}$	440 cm ⁴ /m	446 cm ⁴ /m	440 cm ⁴ /m	446 cm ⁴ /m		440 cm ⁴ /m	446 cm ⁴ /m
Inercia teherbírási állapotban	$I_{eff,U}$	375 cm ⁴ /m		375 cm ⁴ /m			375 cm ⁴ /m	

T 150 x 1,00 trapézlemez	jel	normál hőm.		tűz 15 perc, $\theta_g=738^\circ\text{C}$		tűz 30 perc, $\theta_g=842^\circ\text{C}$	
		számított	terhelési teszt	számított		számított	
				számítottból	terh. tesztből	számítottból	terh. tesztből
trapézlemez hőmérséklete	θ_a	20 °C		715,5 °C		833,7 °C	
relatív hosszváltozás	$\Delta L/L$	0,00000		0,01039		0,01100	
rugalmassági mod. korr. tényező	$k_{E,\theta}$	1,000		0,124		0,082	
rugalmassági modulus	E	21 000 kN/cm ²		2 604 kN/cm ²		1 722 kN/cm ²	
folyáshatár korrekciós tényező	$k_{y,\theta}$	1,000		0,211		0,0931	
folyáshatár	$f_{y,k}$	32,0 kN/cm ²		6,75 kN/cm ²		2,98 kN/cm ²	
mezőnyomaték	$M_{F,Rd}$	16,7 kNm/m	23,0 kNm/m	3,52 kNm/m	4,85 kNm/m	1,55 kNm/m	2,14 kNm/m
támasznyomaték	$M_{B,Rd}$	15,4 kNm/m	21,1 kNm/m	3,25 kNm/m	4,45 kNm/m	1,43 kNm/m	1,96 kNm/m
nyíróerő	V_{Rd}	64,8 kN/m	29,0 kN/m	13,67 kN/m	6,11 kN/m	6,03 kN/m	2,70 kN/m
szélső támaszerő	$R_{A,Rd}$	11,4 kN/m	24,1 kN/m	2,41 kN/m	5,09 kN/m	1,06 kN/m	2,24 kN/m
közbenső támaszerő, $b \geq 160\text{mm}$	$R_{B,Rd}$	55,4 kN/m	57,9 kN/m	11,69 kN/m	12,22 kN/m	5,16 kN/m	5,39 kN/m
Inercia használati állapotban	$I_{eff,S}$	515 cm ⁴ /m	510 cm ⁴ /m	515 cm ⁴ /m	510 cm ⁴ /m	515 cm ⁴ /m	510 cm ⁴ /m
Inercia teherbírási állapotban	$I_{eff,U}$	446 cm ⁴ /m		446 cm ⁴ /m		446 cm ⁴ /m	

$$\gamma_{M0} = 1,0 \quad \gamma_{M1} = 1,0 \quad \gamma_{M2} = 1,25 \quad \gamma_{Mfi} = 1,0$$

T 150 x 1,25 trapézlemez	jel	normál hőm.		tűz 15 perc, $\theta_g=738^\circ\text{C}$		tűz 30 perc, $\theta_g=842^\circ\text{C}$	
		számított	terhelési teszt	számított		számított	
				s számítottból	terh. tesztből	s számítottból	terh. tesztből
trapézlemez hőmérséklete	θ_a	20 °C		711,6 °C		832,7 °C	
relatív hosszváltozás	$\Delta L/L$	0,00000		0,01032		0,01100	
rugalmassági mod. korr. tényező	$k_{E,\theta}$	1,000		0,125		0,0826	
rugalmassági modulus	E	21 000 kN/cm ²		2 633 kN/cm ²		1 735 kN/cm ²	
folyáshatár korrekciós tényező	$k_{y,\theta}$	1,000		0,2161		0,0936	
folyáshatár	$f_{y,k}$	32,0 kN/cm ²		6,92 kN/cm ²		3,00 kN/cm ²	
mezőnyomaték	$M_{F,Rd}$	21,8 kNm/m	29,4 kNm/m	4,72 kNm/m	6,35 kNm/m	2,04 kNm/m	2,75 kNm/m
támasznyomaték	$M_{B,Rd}$	21,4 kNm/m	33,5 kNm/m	4,62 kNm/m	7,24 kNm/m	2,00 kNm/m	3,14 kNm/m
nyíróerő	V_{Rd}	125,8 kN/m	42,9 kN/m	27,19 kN/m	9,26 kN/m	11,77 kN/m	4,01 kN/m
szélső támaszerő	$R_{A,Rd}$	18,3 kN/m	35,4 kN/m	3,95 kN/m	7,65 kN/m	1,71 kN/m	3,31 kN/m
közbenső támaszerő, $b \geq 160\text{mm}$	$R_{B,Rd}$	85,6 kN/m	85,7 kN/m	18,50 kN/m	18,52 kN/m	8,01 kN/m	8,02 kN/m
Inercia használati állapotban	$I_{eff,S}$	654 cm ⁴ /m	642 cm ⁴ /m	654 cm ⁴ /m	642 cm ⁴ /m	654 cm ⁴ /m	642 cm ⁴ /m
Inercia teherbírasi állapotban	$I_{eff,U}$	596 cm ⁴ /m		596 cm ⁴ /m		596 cm ⁴ /m	

T 150 x 1,50 trapézlemez	jel	normál hőm.		tűz 15 perc, $\theta_g=738^\circ\text{C}$		tűz 30 perc, $\theta_g=842^\circ\text{C}$	
		számított	terhelési teszt	számított		számított	
				s számítottból	terh. tesztből	s számítottból	terh. tesztből
trapézlemez hőmérséklete	θ_a	20 °C		707,3 °C		831,6 °C	
relatív hosszváltozás	$\Delta L/L$	0,00000		0,01025		0,01100	
rugalmassági mod. korr. tényező	$k_{E,\theta}$	1,000		0,127		0,0829	
rugalmassági modulus	E	21 000 kN/cm ²		2 669 kN/cm ²		1 741 kN/cm ²	
folyáshatár korrekciós tényező	$k_{y,\theta}$	1,000		0,2212		0,0942	
folyáshatár	$f_{y,k}$	32,0 kN/cm ²		7,08 kN/cm ²		3,01 kN/cm ²	
mezőnyomaték	$M_{F,Rd}$	27,1 kNm/m	35,5 kNm/m	5,99 kNm/m	7,85 kNm/m	2,55 kNm/m	3,34 kNm/m
támasznyomaték	$M_{B,Rd}$	26,6 kNm/m	40,4 kNm/m	5,88 kNm/m	8,94 kNm/m	2,51 kNm/m	3,81 kNm/m
nyíróerő	V_{Rd}	194,7 kN/m	51,5 kN/m	43,07 kN/m	11,39 kN/m	18,34 kN/m	4,85 kN/m
szélső támaszerő	$R_{A,Rd}$	26,60 kN/m	42,7 kN/m	5,88 kN/m	9,45 kN/m	2,51 kN/m	4,02 kN/m
közbenső támaszerő, $b \geq 160\text{mm}$	$R_{B,Rd}$	121,2 kN/m	103,0 kN/m	26,81 kN/m	22,78 kN/m	11,42 kN/m	9,70 kN/m
Inercia használati állapotban	$I_{eff,S}$	790 cm ⁴ /m	775 cm ⁴ /m	790 cm ⁴ /m	775 cm ⁴ /m	790 cm ⁴ /m	775 cm ⁴ /m
Inercia teherbírasi állapotban	$I_{eff,U}$	742 cm ⁴ /m		742 cm ⁴ /m		742 cm ⁴ /m	

$$\gamma_{M0} = 1,0 \quad \gamma_{M1} = 1,0 \quad \gamma_{M2} = 1,25 \quad \gamma_{Mfi} = 1,0$$

3. melléklet

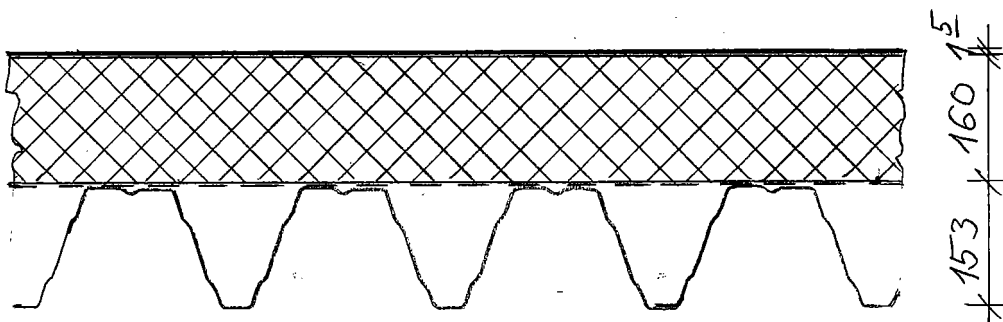
T 150/280 trapézlemeztes tetőfödém mintapélda

E példában azt szeretnénk bemutatni, hogy a szokványos alkalmazási körülmények között milyen tűzállóságra számíthatunk, és hogy a szerkezetünk hogyan viselkedik a tűzben, mi történik vele a nyomtatéki teherbírás kimerülésekor.

A tetőfödém szerkezete

A trapézlemez egymástól 6 m tengelytávolságra levő, 40 cm széles vasbeton gerendákra fekszik föl. A trapézlemez fölött párazáró fólia, 16 cm lépésálló hőszigetelés, majd 1,5 mm vastag lágy PVC csapadékvíz-szigetelés van mechanikai rögzítéssel. A trapézlemez alapanyaga S320 GD + Z200 (MSZ EN 10326) tűzihorganyzott acéllemez.

A középső gerendánál az elméleti támaszvonala a gerenda tengelye, a trapézlemezek toldásánál a szélső támaszvonala a gerenda szélétől 5 cm-re vesszük föl, így a fesztáv $2 \times 5,85$ m.



Terhek:

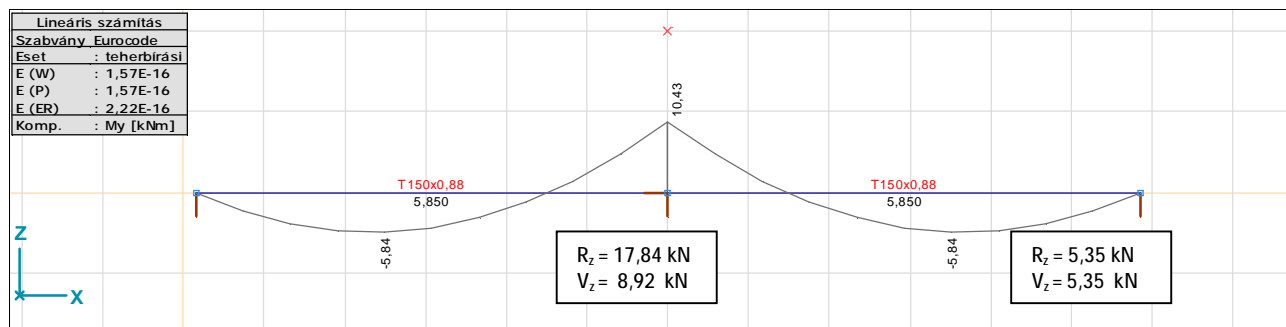
- önsúly:
 - PVC vízszigetelő fólia $1,1 \times 1320 \text{ kg/m}^3 \times 0,0015 \text{ m} = 0,022 \text{ kN/m}^2$
 - hőszigetelés $145 \text{ kg/m}^3 \times 0,16 \text{ m} = 0,232 \text{ kN/m}^2$
 - $d_N = 0,88$ trapézlemez $1500/840 \times 7850 \text{ kg/m}^3 \times 0,00088 \text{ m} = 0,123 \text{ kN/m}^2$
 - $d_N = 1,00$ trapézlemez $1500/840 \times 7850 \text{ kg/m}^3 \times 0,001 \text{ m} = 0,140 \text{ kN/m}^2$
- önsúly összesen $d_N = 0,88$ trapézlemezzel: $q_{G,k} = 0,38 \text{ kN/m}^2$
- önsúly összesen $d_N = 1,00$ trapézlemezzel: $q_{G,k} = 0,40 \text{ kN/m}^2$
- függesztett teher: $q_{Q,k} = 0,20 \text{ kN/m}^2$
- hóteher a tetőfelületen: $q_{s,k} = 1,00 \text{ kN/m}^2$
- szélnyomás: $q_{w,k} = 0,14 \text{ kN/m}^2$
- rendkívüli hóteher: $q_{sA} = 2,00 \text{ kN/m}^2$
- tűzteher, mint rendkívüli hőmérsékleti teher: az anyagjellemzők megváltoztatásán kívül hőtágulást okoz. Az időtartam függvényében értékei a határ-igénybevételek táblázatában szerepelnek.

terhek típusa		állandó	esetleges			rendkívüli		q_{Ed} kN/m ²
tehercsoport		önsúly	függeszt	hó	szélny.	RND hó	tűz	
biztonsági és egyidejűségi tényezők	γ_u	1,35						
	γ_l	1,00						
	γ		1,5	1,5	1,5			
	Ψ_0		1,0	0,5	0,6			
	Ψ_1		1,0	0,2	0,2			
	Ψ_2		1,0	0,0	0,0			
teher-kombináció	1 teherbírasi	1,35	1,5	1,5	0,9	0	0	2,44
	2 használati	1	1	1	0,6	0	0	1,66
	3 rendk. hó	1	1	0	0,2	1	0	2,61
	4 rendk. tűz	1	1	0,2	0	0	1	0,78
q_k kN/m ²		0,38	0,20	1,00	0,14	2,00		

Rugalmas tartományban a leggyengébb pont a középső támasz fölötti keresztmetszet. A két irányú hajlítási ellenállás nem sokban különbözik, a támasz fölötti negatív hajlítónyomaték viszont sokkal nagyobb, mint a mezőben levő pozitív nyomaték, ráadásul a támasz fölött a nyomaték és a reakcióerő együttállásával is számolni kell. Ha a középső támasz fölötti keresztmetszet tönkremegy, az a keresztmetszet gyűrődésével jár, de nem okozza a szerkezet leszakadását; a tartó két kéttámaszú tartóvá válik. Ezen lokális tönkremenetelt csak rendkívüli terheknél engedjük meg.

Az igénybevételeket és lehajlásokat számítógépes szoftverrel határozzuk meg.

Ellenőrzés normál hőmérsékleten teherbírasi állapotban:



$M_{F,Ed} = 5,84 \text{ kNm} < M_{F,c,Rd} = 14,2 \text{ kNm}$, a mező hajlításra megfelel.

$R_{A,Ed} = 5,35 \text{ kN} < R_{A,c,Rd} = 8,62 \text{ kN}$, a tartó szélső támaszerő szempontjából megfelel.

$$\frac{M_{B,Ed}}{M_{B,c,Rd}} + \frac{R_{B,Ed}}{R_{B,c,Rd}} = \frac{10,43}{12,8} + \frac{17,84}{46,8} = 1,20 < 1,25$$

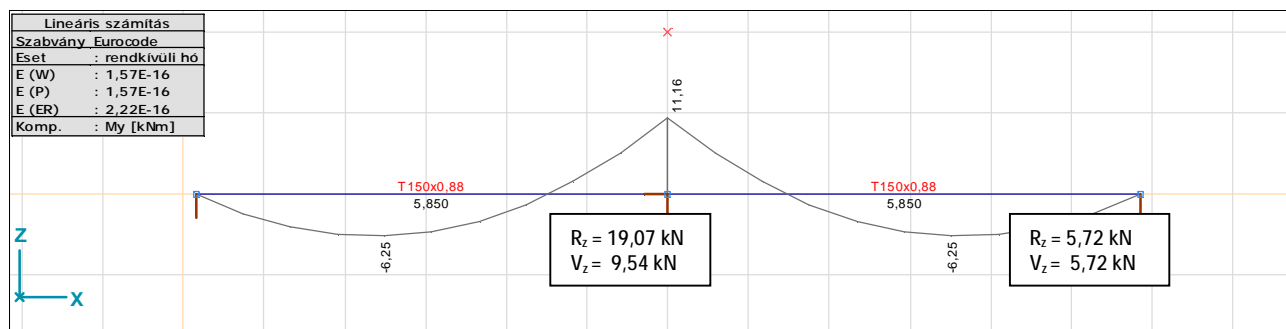
a támasz fölötti keresztmetszet hajlítónyomaték és támaszerő együttállására megfelel.

$$V_{Ed} = 8,92 \text{ kN} < 0,5 \cdot V_{Rd} = 22,1 \text{ kN}$$

A támasz melletti keresztmetszet nyírásra megfelel, és hajlítónyomaték - nyíróerő interakciót sem kell számolni.

Normál hőmérsékleten teherbírasi állapotban a trapézlemez a számított ellenállások szerint is minden pontban megfelel.

Ellenőrzés normál hőmérsékleten rendkívüli hóteherre:



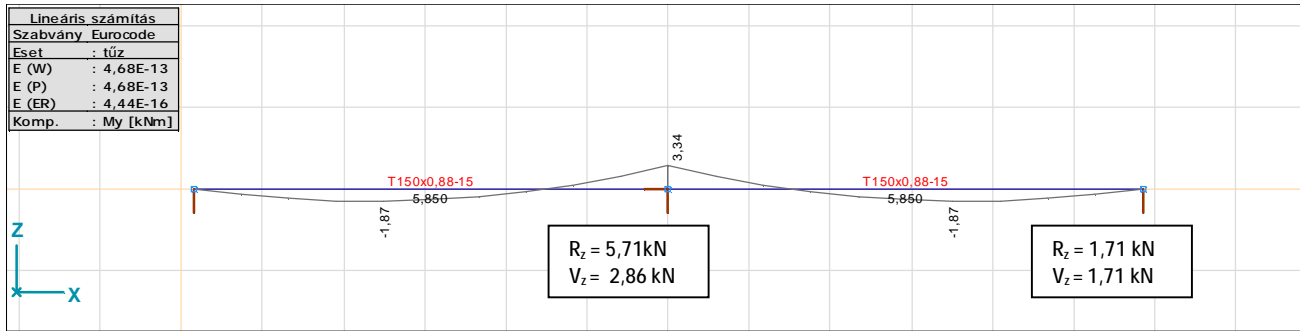
$$\frac{M_{B,Ed}}{M_{B,c,Rd}} + \frac{R_{B,Ed}}{R_{B,c,Rd}} = \frac{11,16}{12,8} + \frac{19,07}{42,8} = 1,32 > 1,25$$

$$\frac{M_{B,Ed}}{M_{B,t,Rd}} + \frac{R_{B,Ed}}{R_{B,t,Rd}} = \frac{11,16}{16,4} + \frac{19,07}{44,1} = 1,11 < 1,25$$

A támasz fölötti keresztmetszet hajlítónyomaték és támaszerő együttállására számított ellenállásokkal nem felel meg, a terhelési tesztből nyert ellenállásokkal megfelel. Ha számított ellenállásokkal dolgozunk, az ellenőrzés arra vezet, hogy a támasz fölötti keresztmetszet megroppan, a statikai modell átalakul. Két db egy mezős tartóként a 0,88-as trapézlemez számított ellenállásokkal is megfelel (ezt itt nem mutatjuk be).

15 perces tűzhatás

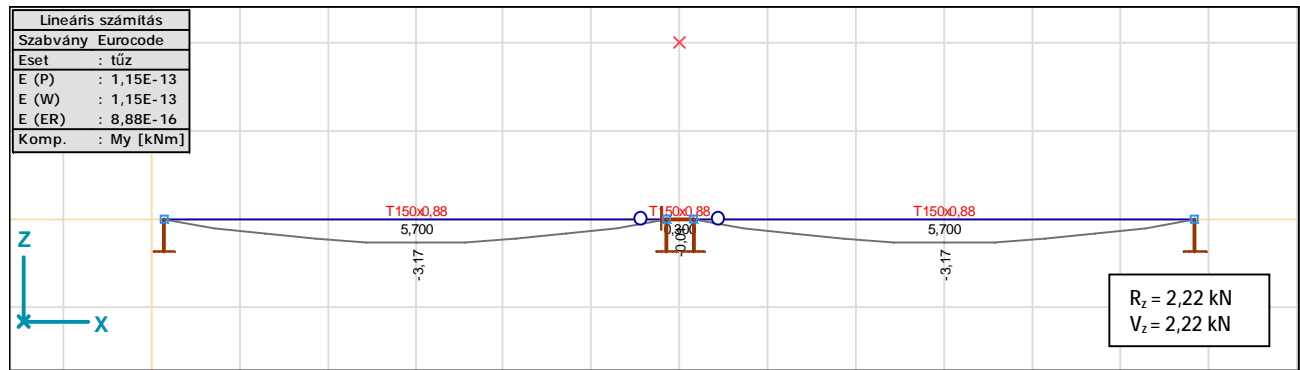
A 3 támaszú tartó nyomatékai ábrája a tűzzel egyidejű terhelésből:



$$M_{B,Ed} = 3,34 \text{ kNm} > M_{F,c,fi15,Rd} = 2,66 \text{ kNm}$$

$$\frac{M_{B,Ed}}{M_{B,t,fi15,Rd}} + \frac{R_{B,Ed}}{R_{B,t,fi15,Rd}} = \frac{3,34}{3,41} + \frac{5,71}{9,17} = 1,60 > 1,25$$

A támasz fölötti keresztmetszet nem felel meg sem a tisztán számított, sem a terhelési tesztből számított ellenállásokkal. Nézzük a megváltozott statikai modellt! A vasbeton támaszgerenda 40 cm szélességű, átrendeződéskor figyelembe vehetjük, hogy a gerenda két oldalán két csukló alakul ki, így a fesztáv lecsökken 5,7 m-re.:



$$M_{F,Ed,fi15} = 3,17 \text{ kNm} > M_{F,c,fi15,Rd} = 2,95 \text{ kNm}$$

$$R_{A,Ed,fi15} = 2,22 \text{ kN} > R_{A,c,fi15,Rd} = 1,79 \text{ kN}$$

$$M_{F,Ed,fi15} = 3,17 \text{ kNm} < M_{F,t,fi15,Rd} = 3,74 \text{ kNm}$$

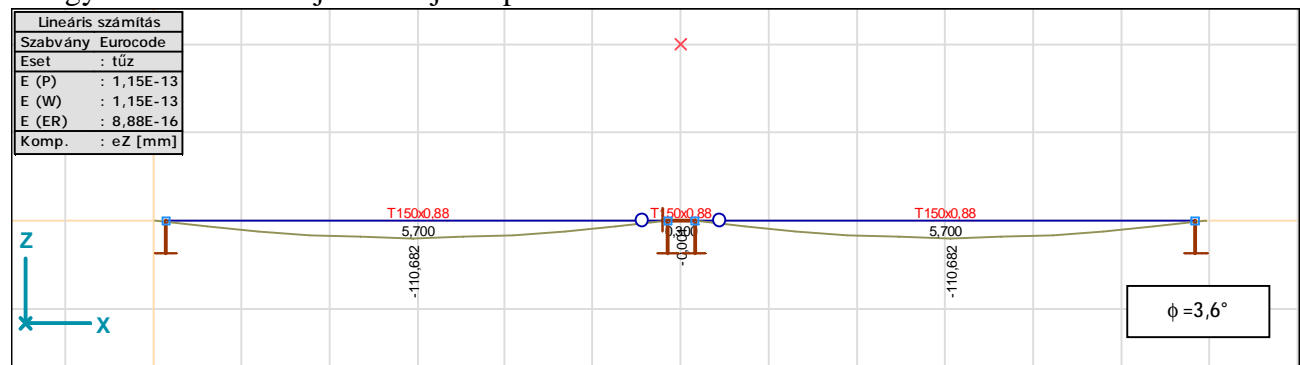
$$R_{A,Ed,fi15} = 2,22 \text{ kN} < R_{A,t,fi15,Rd} = 3,70 \text{ kN}$$

$$M_{F,Ed,fi15} = 3,17 \text{ kNm} < M_{F,f,fi15,Rd} = 3,96 \text{ kNm}$$

$$R_{A,Ed,fi15} = 2,22 \text{ kN} < R_{A,f,fi15,Rd} = 3,96 \text{ kN}$$

A 0,88-as trapézlemez a tisztán számított ellenállást tekintve nem felel meg (1,00 mm-es kellene), a terhelési tesztből számított és a tűzvizsgálatból nyert ellenállással megfelel.

Az egy mezős tartó lehajlási ábrája 15 percnél:



A lehajlás $e_{fi15} = 11,1 \text{ cm} = L/52$. A trapézlemez alakját parabolának tekintve és a húrhozott kiszámolva azt kapjuk, hogy a lehajlásból adódóan 6 mm-es rövidülés jelentkezik (a számítást itt mellőzzük). A hőtágulásból keletkező hossznövekedés: $\Delta L = (\Delta L / L) \cdot L = 0,01042 \cdot 5850 = 61 \text{ mm}$

Ha az egyik támasz fix, a másik támasznál összességében 61-6=55 mm vízszintes elmozdulás jelentkezik. A valós esetekben a trapézlemezt mindkét végén lerögzítik (vasbeton gerendák esetén a leggyakoribb a beütőék). Nem lehet tudni, hogy valós esetben mit csinálna a trapézlemez. Vagy elnyíródnának a kötőelemek, vagy a kötőelemeknél meggyűrődne a lemez, vagy a vízszintes

nyomóerő következtében megnövekedne a lehajlás, vagy a gerendák mozdulnának el. A legvalószínűbb, hogy ezek kombinációja következne be.

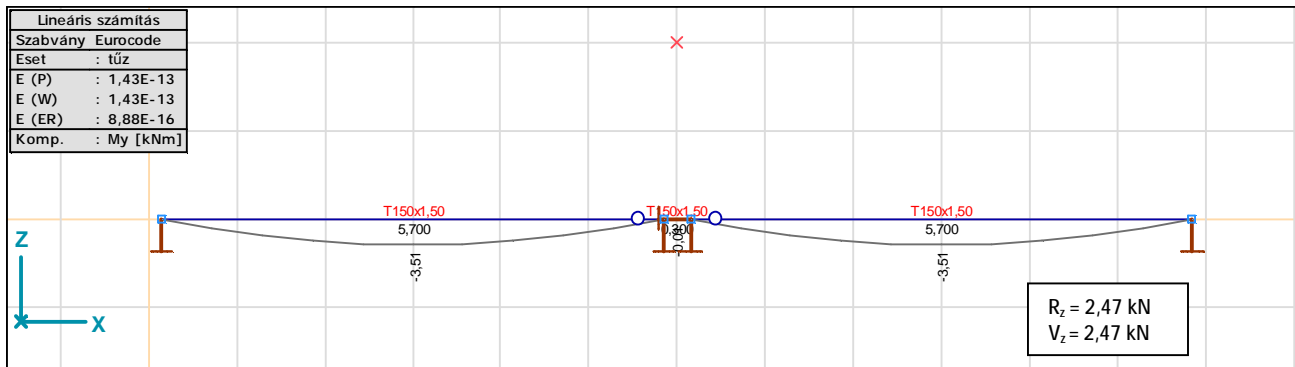
30 perces tűzhatás

A 3 támaszú tartót nézzük meg a legerősebb 1,50-es lemezvastagsággal:

$$\frac{M_{B,Ed}}{M_{B,t,fi30,Rd}} + \frac{R_{B,Ed}}{R_{B,t,fi30,Rd}} = \frac{3,34}{3,81} + \frac{5,71}{9,70} = 1,47 > 1,25$$

A támasz fölötti keresztmetszet a legerősebb lemezzel sem felel meg a terhelési tesztből számított ellenállásokkal.

Az 1,50-es trapézlemez önsúlya 0,09 kN/m²-rel több, mint a 0,88-as trapézlemezé, ezzel meg kell növelni a terhelést. A tető önsúlya 0,47 kN/m² lesz, az önsúly + függesztett teher 0,67 kN/m².

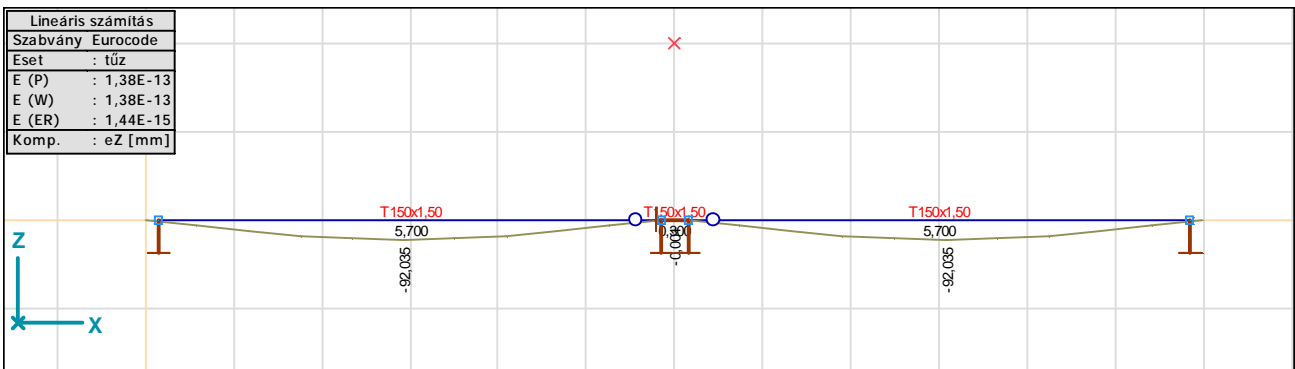


$$M_{F,Ed,fi30} = 3,51kNm \approx M_{F,f,fi30,Rd} = 3,34kNm \quad R_{A,Ed,fi15} = 2,53kN < R_{A,t,fi15,Rd} = 4,02kN$$

A 0,88-as trapézlemez tűztesztjén 6%-kal magasabb igénybevétel keletkezett, mint a terhelési tesztből számolható. 1,50-es trapézlemezre nincs tűzteszt, de ha a terhelési tesztből számított ellenállást ilyen arányban megnöveljük, akkor a tartó megfelel:

$$M_{F,Ed,fi30} = 3,51kNm < M_{F,f,fi30,Rd} = 3,54kNm$$

A T 150x1,50-es egy mezős tartó lehajlási ábrája 30 percnél:



A lehajlás $e_{fi30} = 9,2 \text{ cm} = L/62$. A trapézlemez alakját parabolának tekintve és a húrhozott kiszámolva azt kapjuk, hogy a lehajlásból adódóan 4 mm-es rövidülés jelentkezik (a számítást itt mellőzzük).

$$\text{A hőtágulásból keletkező hossznövekedés: } \Delta L = (\Delta L / L) \cdot L = 0,0110 \cdot 5850 = 64 \text{ mm}$$

Ha az egyik támasz fix, a másik támasznál összességében 64-4=60 mm vízszintes elmozdulás jelentkezik. A valós esetekben a trapézlemezt mindkét végén lerögzítik, tűzeseti viselkedésére ugyanazt írhatjuk, mint a 0,88-asra 15 perc után.

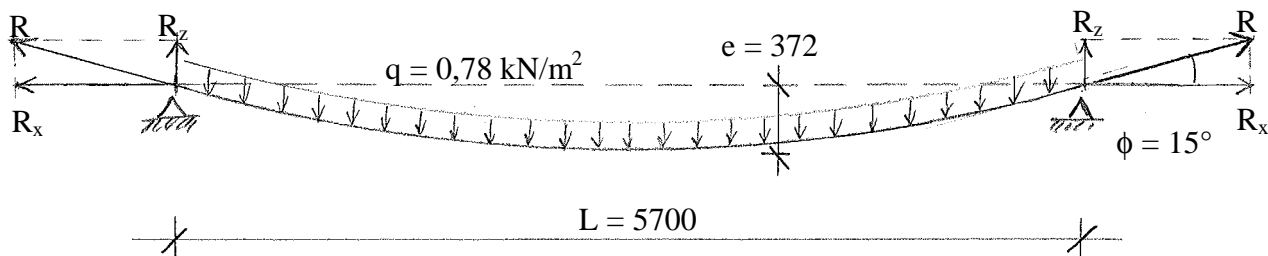
Kötél-modell a hajlítási merevség elvesztése után

Nézzük meg, hogy parabola alakot feltételezve mekkora a 0,88-as trapézlemez belógása, ha a támaszok nem mozdulnak el!

A lerögzítések távolsága 5850 mm, a fesztáv 5700 mm.

A hőtágulásból keletkező hossznövekedés: $\Delta L = (\Delta L / L) \cdot L = 0,0110 \cdot 5850 = 64 \text{ mm}$

Az $L=5700$ mm-es vízszintes távolságon a hőtágulás miatt $L_p=5764$ mm hosszú lesz a trapézlemez.



A parabola egyenlete: $z = \frac{4 \cdot e}{L^2} x^2$

A meredekség a tartó szélén:

Az ívhossz: $L_p = \int_{-L/2}^{L/2} \sqrt{1 + z'^2} dx = \int_{-L/2}^{L/2} \sqrt{1 + \frac{8 \cdot e}{L^2} x} \cdot dx$

$tg(j) = z' \left(\frac{L}{2} \right) = \frac{8 \cdot e}{L^2} \cdot \frac{L}{2} = \frac{4 \cdot e}{L}$

A számítást elvégezve a belógás közepén 372 mm, a végeknél a szögelfordulás 15° .

Hajlított tartóként a behajlás 165 mm lenne, tehát a kötélmmodell szerinti behajlás felét sem érné el (a számítást itt mellőzzük).

A függőleges erők egyensúlyából:

$$2 \cdot R_z = q \cdot L$$

$$R_z = \frac{q \cdot L}{2} = \frac{0,78 \cdot 5,70}{2} = 2,22 \text{ kN / m}$$

$$R_x = \frac{R_z}{tg(j)} = \frac{2,22}{tg(15^\circ)} = 8,58 \text{ kN / m}$$

Ekkora vízszintes erő fogja terhelni a szélső gerendát, és ezt az R_x vízszintes erőt kell felvennie a kötőelemeknek. Olyan kötőelem szükséges, amely 0,5 órás tűzállóságra minősítve van. Ha hullámonként 2 db kötőelemet alkalmazunk, akkor a kötőelemek sűrűsége és az egy kötőelemre jutó erő:

$$n = \frac{1000}{280 \cdot 2} = 7,14 \text{ db / m}$$

$$V_{Ed,fi} = \frac{R_x}{n} = \frac{8,58}{7,14} = 1,20 \text{ kN / db}$$

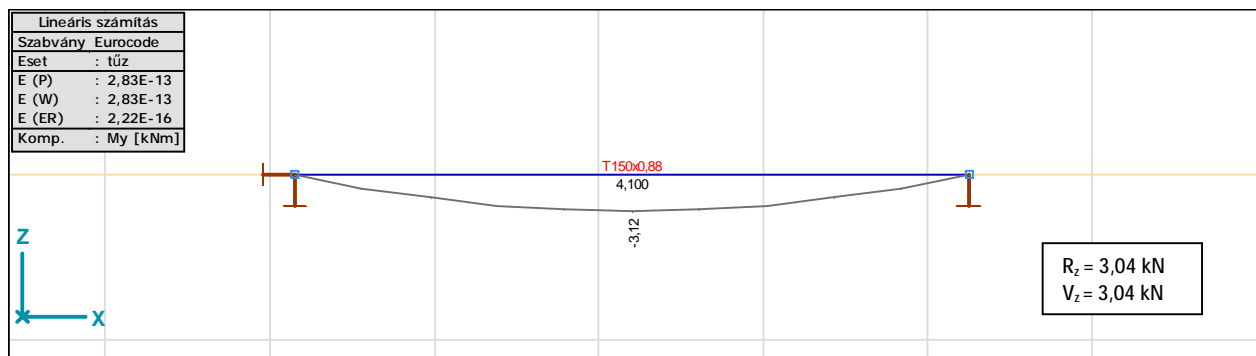
Ez egy elméleti fejtegetés, amelyet célszerű lenne valós méretű mintán tesztelni. Több körülménynek teljesülnie kell ahhoz, hogy a számítás szerinti végeredmény beálljon. A tűz kezdeti fázisában, amikor még a nyomatéki ellenállás megvan, a hajlításból eredő lehajlás még kicsi, a hőtágulás viszont gyors. Ebben a kezdeti fázisban a trapézlemezben nyomóerő keletkezik. Ahhoz, hogy a kötőelemek ne nyíródjanak el, vagy a trapézlemeznek kell nagyobb lehajlást produkálva engednie a hajlítónyomaték és a nyomóerő együttes hatására, vagy a gerendáknak kell távolodniuk. Ez utóbbi is lehetséges, ha pl. az épület magas, és az oszlopok alul befogottak.

A tűzesetben kötélmmodellként való alkalmazáshoz körültekintően elemezni kell a konkrét épület adottságait, a keletkező vízszintes erőkre méretezni kell a fogadó szerkezetet és a trapézlemez rögzítő elemeit.

A feszítáv hatása kötél-modellnél

Megnézzük számítással a már említett külföldi laborvizsgálatot. A jegyzőkönyv szerint a feszítáv 4,36 m volt, de csak 4,1 m-rel számolunk, mert egyrészt a konzolos oldalon a képlékeny csukló a támasz szélén alakul ki, másrészt a fénykép alapján az elvileg csuklós támasznál is részleges befogás alakult ki. Az önsúly $0,335 \text{ kN/m}^2$, a rátett teher $1,15 \text{ kN/m}^2$ volt.

30 perces tűznél az igénybevételek:

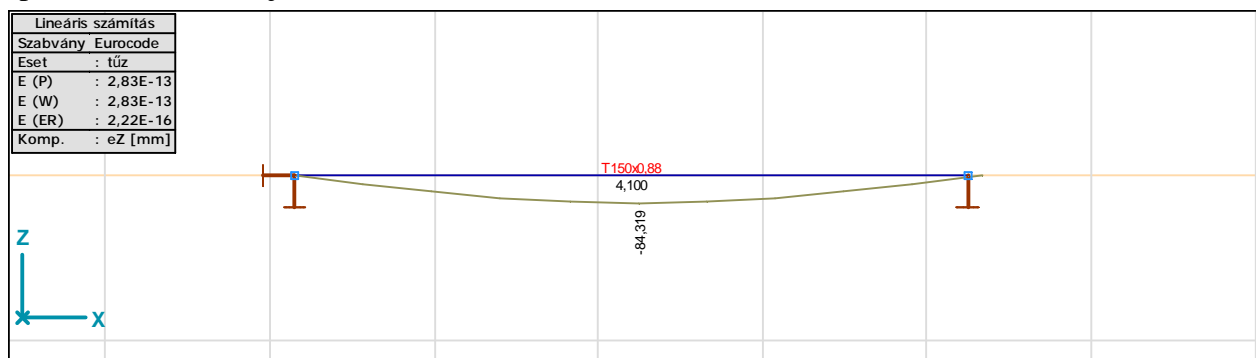


$$M_{F,Ed,fi30} = 3,12 \text{ kNm} > M_{F,c,fi30,Rd} = 1,32 \text{ kNm} \quad R_{A,Ed,fi30} = 3,04 \text{ kN} > R_{A,c,fi30,Rd} = 0,80 \text{ kN}$$

$$M_{F,Ed,fi30} = 3,12 \text{ kNm} < M_{F,t,fi30,Rd} = 1,67 \text{ kNm} \quad R_{A,Ed,fi30} = 3,04 \text{ kN} < R_{A,t,fi30,Rd} = 1,65 \text{ kN}$$

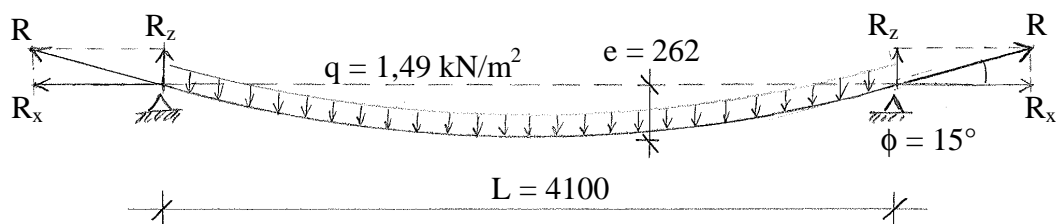
A hajlítónyomaték 87%-kal túllépte a normál hőmérsékleti terhelési tesztből számított tűzeseti határnyomatékot.

30 perces tűznél a lehajlás:



A jegyzőkönyv szerint a mért lehajlás 204 mm, ez 2,4-szerese a számított eredménynek.

A kötél-modell szerinti eredmény:



$$R_z = \frac{q \cdot L}{2} = \frac{1,49 \cdot 4,10}{2} = 3,04 \text{ kN/m} \quad R_x = \frac{R_z}{\text{tg}(j)} = \frac{3,04}{\text{tg}(15^\circ)} = 11,3 \text{ kN/m}$$

A mért belógás a kötélmodellből számított belógás 78%-a.

Székesfehérvár, 2017.07.10.

Sas Viktor
okl. építőmérnök
matematikus szakmérnök