

TRANSPARENS TEHERHORDÓ SZERKEZETEK: A 21. SZÁZAD ÜVEGÉPÍTÉSZETE*

BÖLCSKEY ELEMÉR**

„Az egységes egész jóval több,
mint részelemeinek összege.”
(Pythagoras, Kr. e. 560–480)

1. BEVEZETÉS – A FÉNY TÖRTÉNELMI SZEREPE A TERMÉSZETTUDOMÁNYBAN ÉS AZ ÉPÍTÉSZETBEN

Vallásos és tudományos elképzeléseikben már a legősibb emberi kultúrák is foglalkoztak a fényvel mint szimbólummal és mint az élet alapfeltételével.

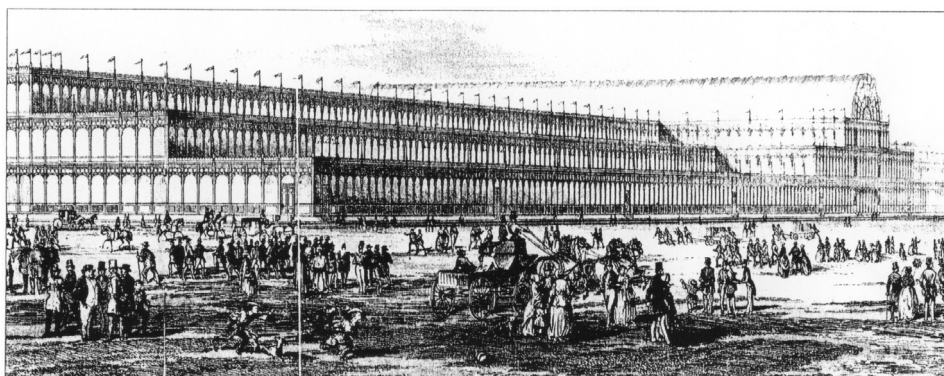
A fény sokféle hatásával és megjelenési formájával foglalkozó kutatásokat a klasszikus fizika kezdetei döntően befolyásolták. E kutatások eredményeit a 17., a 18. és a 19. század legnagyobb fizikusai (Christian Huygens, Isaac Newton, James Clerk Maxwell) hozták nyilvánosságra [1]. Ezek a kutatások megalkották klasszikus természettudományos világképünket, és ezek az ismeretek hatással voltak a mérnöki tudományok (pl. statika, szilárdságtan stb.) megalapozására is [2].

Nagy valószínűséggel a fény tudományos kutatása adta az üvegépítészeti kezdeteknek az első impulzusokat [3]. Ennek a fényprezentációnak a legszebb kifejeződése Joseph Paxton 1851-ben felépült – s a maga idején hatalmas méretű – kiállítási csarnoka, a Kristálypalota volt (1. ábra). Kereken 150 évvel később nyugodtan állítható, hogy ezzel a komplex épületóriással – az összefüggéseiben kezelt építéstechnológiai, statikai, konstrukciós és épületfizikai problémamegoldásokat tekintve – a modern high-tech építészeti prototípusa született meg (2. ábra).

A klasszikus fizika elveit a 20. század fizikusai, a Nobel-díjas Planck és Einstein [4] megkérdőjelezték. Érdekes, hogy éppen a fény vizsgálata és magyarázata [5] vezetett oda, hogy – mint Planck mondta – „az első lépéseket a klasszikus fizika világán kívül” megtehesük. Az irányváltó fejlődést Einstein első publikációja indította el, melynek a következő címe volt: „Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt” (A fény elő-

* A cikket németből fordította és szakmailag lektorálta dr. Széll Mária egyetemi tanár, okl. építészmérnök.

** Okl. építőmérnök, egyetemi tanár. A-1130 Wien, Wlassakstrasse 70-74/1/4. Tel./Fax: (+43 1) 879 6283; e-mail: dr.boelcskey@members.debis.at



1. ábra. A londoni Kristálypalota (világkiállítás, 1851); Paxtonnak sikerült a szerkezet és a forma harmóniáját megteremtenie, a transzparencia és a teherhordó képesség összhangját megvalósítania (Forrás: Werner, F.; Seidel, J.: *Der Eisenbau, vom Werdegang einer Bauweise*. 20–21. oldal, 2.12. kép)

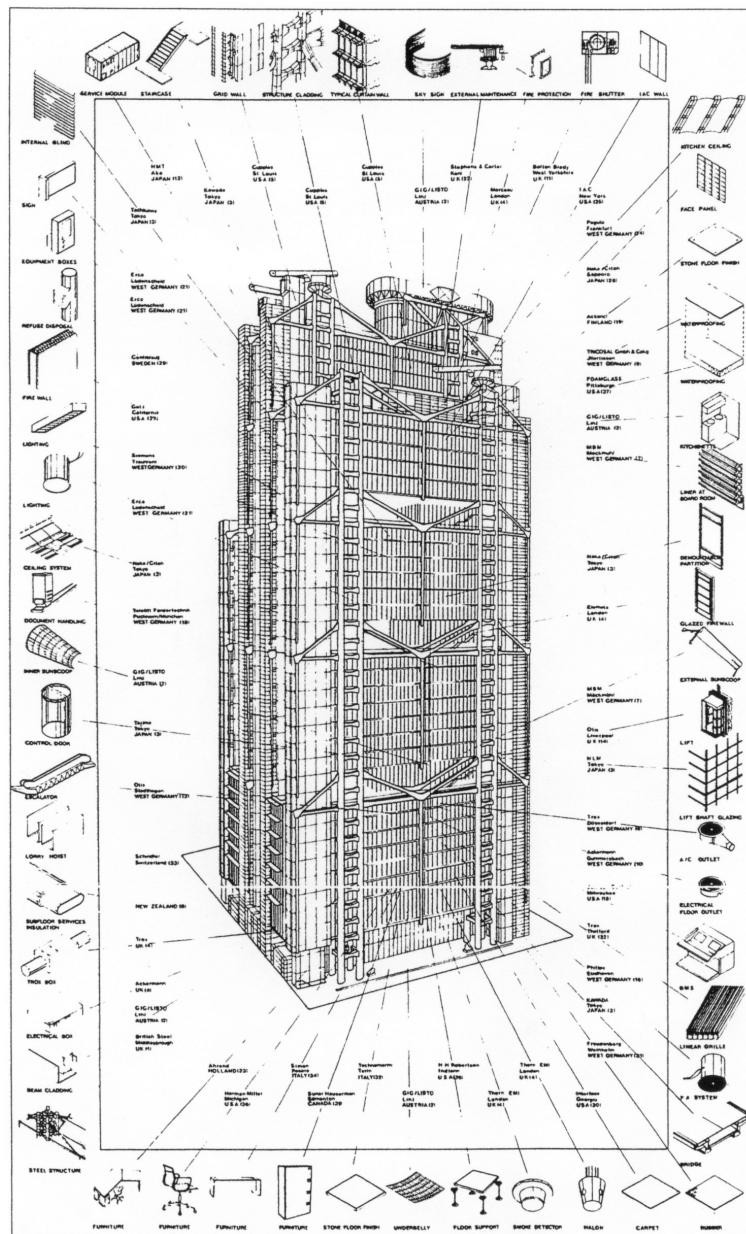
állításának és átalakításának heurisztikus megközelítéséről). Ez vezetett a modern mérnöki tudományok alapelemének, a kvantummechanikának megalkotásához.

Az építészek – logikus reakcióként minderre – bírálták az építőanyagok alkalmazási kliséit [6], s ezzel összefüggésben a konstruktív építészet régi vágya teljesült. A kutatás, ami egy olyan építőanyagra irányult, mely nem csupán közvetíti a fényt, hanem azt teherhordó funkciója keretében maga is képes kisugározni – a szerkezeti (egyretegű edzett, réteges ragasztott, valamint részlegesen előfeszített biztonsági) üvegek kifejlesztésével – eredménnyel járt. Az üveg tartószerkezeti anyaggá vált (3. ábra).

2. AZ ÜVEGELEMENK FUNKCIÓI – ÉRVEK, MELYEK AZ ÜVEG ÉPÍTŐANYAG VÁLASZTÁSA MELLETT SZÓLNAK

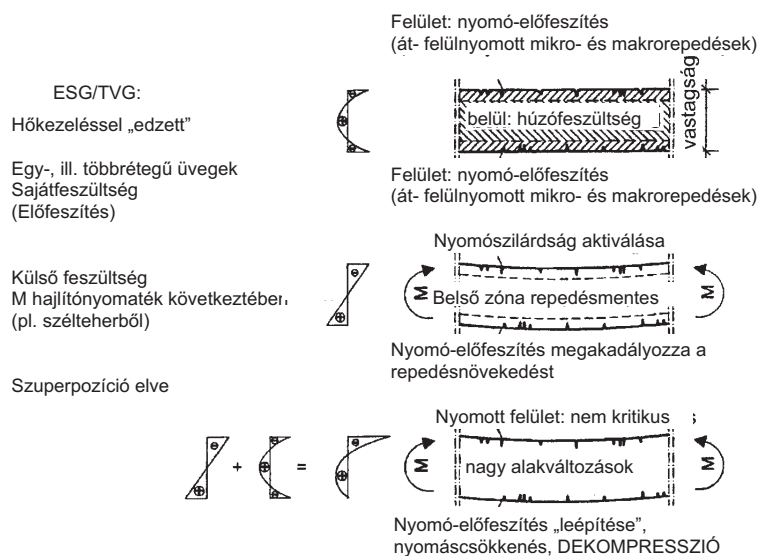
A magasépítésben az üveg teherhordó és merevítő (együttdolgozó) szerkezetként egyaránt beépíthető. A teherátadás módja szerint teoretikusan az alábbi változatok különböztethetők meg:

- Teherhordó elemek (valamennyi teherhordó szerkezetnél, mint gerendák, oszlopok, aláfeszített tartók, rácsostartók, keretek, ívek stb.).
- Önhordó elemek (általában támaszkodó vagy függesztett üvegezések, valamint fej fölötti üvegek, az igénybevételeknek megfelelően, értelemszerűen kibicsaklás ellen biztosítva).
- Merevítő elemek (karcsú teherhordó elemek vagy nagy üvegfelületek stabilizálására például üveg-svertek formájában. A merevítő hatást szerkezetileg már Joseph Paxton is kihasználta a Kristálypalotánál, 1. ábra).



2. ábra. Hongkong és Shanghai Bank, Hong Kong (Építészet: Forster Associates, épült: 1983–1986). A modern acél–alumínium–üveg homlokzati szerkezet példája az épületszerkezeti elemek áttekintésével

(Forrás: Brookes, A. J.; Grech, Ch.: *Das Detail in der High-Tech-Architektur: Analyse von 33 Bauten und ihrer Fassadentechnik*, 137. oldal)



3. ábra. A belső feszültségeknek az üvegtábla edzése következtében fellépő jellegzetes átrendeződése

(Forrás: Glasbau-Seminar, *Möglichkeiten und Grenzen bei Verwendung von Glas im Bauwesen*. Vorwort von Dr. Ch. Schaur, A. MBT Innsbruck, am 26. Apr. 2001.)

- Másodrendű elemek (főként síkbeli teherhordó szerkezetek, de görbült, sőt térben görbült héjszerkezetek is).

Üveggel fedett épületrészeknél (új épületeknél és hozzáépítéseknél) a mindennapi üvegpítészetben három jellegzetes forma különböztethető meg:

- Passzázsok, üveggel fedett utcák, melyek átellenes hosszoldalaikon épületekkel határosak.
- Integrált területek (pl. télikertek), melyeknél az üveggel fedett rész három oldalról zárt.
- Üveggel fedett belső udvarok (átriumok), melyek négy oldalról körülzárt felületek.

A télikertek és az üvegezett, azaz üveggel fedett terek legfontosabb tervezési és dimenzionálási szabályai az alábbiakkal foglalhatók össze:

- A függőleges és ferde üvegfelületeket lehetőleg délre kell tájolni.
- A mélyebb és keskenyebb épületformák energetikailag kedvezőbbek, mint a széles és lapos formák.
- Lehetőleg nagy üvegfelületeket kell tervezni (a peremkötések hőhídjai miatt) megfelelő hővédelmű üvegezéssel és keretekkel.

- A belső terekben – az abszorpció mérséklése érdekében – világos színeket célszerű alkalmazni.

A magánépítkezéseknél a tervezés nagyvonalúságának gyakran az anyagi lehetőségek szabnak korlátokat. A ferde üvegfalak, a szögtörésekkel kialakított fal–tűtő szerkezetek nemcsak építészeti szempontból igényesek [14], hanem a megvilágítás és az energiamegtakarítás szempontjából is kedvezőek. A statikai aspektusok figyelembevételére karcsú, elegáns szerkezeti megoldásokat tesz lehetővé [12]. Ugyanakkor azonban a bonyolult üveg térhatárolók – a szükséges napvédelem miatt is – igen drága szerkezetek.

3. SAJÁTOS STATIKAI-KONSTRUKCIÓS PROBLÉMÁK AZ ÜVEG TARTÓSZERKEZETKÉNT TÖRTÉNŐ ALKALMAZÁSOKOR – JAVASLAT EUROCOD-KOMPATÍBILIS MODELLALKOTÁSRA

„A boldogság – akárcsak az üveg – törékeny ...”

Ez a régi szólás azt mutatja, milyen kevésbé bízunk az üvegben. A mérnöki üvegszerkezetek iránti bizalmatlanság mint esetleges tönkremeneteli valószínűség tükröződik az Eurocod méretezési alapelveiben: egy mechanikai tulajdonságaiban „rideg”, plasztikus deformációra, feszültségátrendeződésre nem képes (üveg) építőanyagtól igen magas törési megbízhatóságot, illetve – a szilárdsági anyagjellemzők/valószínűségi anyagváltozók szórásának figyelembevételével – nagyon alacsony tönkremeneteli valószínűség teljesítését kell megkövetelnünk. Az Eurocod modern méretezési koncepciójának nagy előnye, hogy a biztonság/tönkremenetel valószínűségét tekintve – a terhek/igénybevételek és az anyagtulajdonságok/igénybevehetőség szórását figyelembe véve – a biztonság úgy definiálható, hogy a különböző építési módú (például a vasbeton, az acél, a fa, sőt az üveg) épületeknél azonos megbízhatósági színvonal érhető el [8].

Jóllehet a jelenlegi építőgyakorlatban az üvegszerkezetek méretezése még a megengedett feszültségek hagyományos módszere alapján történik (1. táblázat), a modern (egyrétegű, ragasztott és részben előfeszített biztonsági) üveganyagok esetében a fejlődés – az új Eurocod-előírásoknak megfelelően – abba az irányba mutat, hogy a karakterisztikus anyagjellemzőket/szilárdsági értékeket és a (mellérendelt) részleges biztonsági tényezőket rögzítsék/definiálják [9].

Az üveghez igazodó tartószerkezeti modellezésnél (statikai-konstruktív vizsgálatnál) figyelembe kell venni az üveg sajátos tulajdonságait, a rideg anyagszerkezeti viszonyokat (a felületen kialakuló mikrorepedéseket). A teherhordás biztonságára, a használhatóságra, tartósságra kiterjedő, speciális biztonságelméleti megfontolások felállítására van szükség.

1. táblázat. Vonal menti megtámasztású, fej fölötti és függőleges síkú üvegezés megengedett hajlító-húzó feszültségei

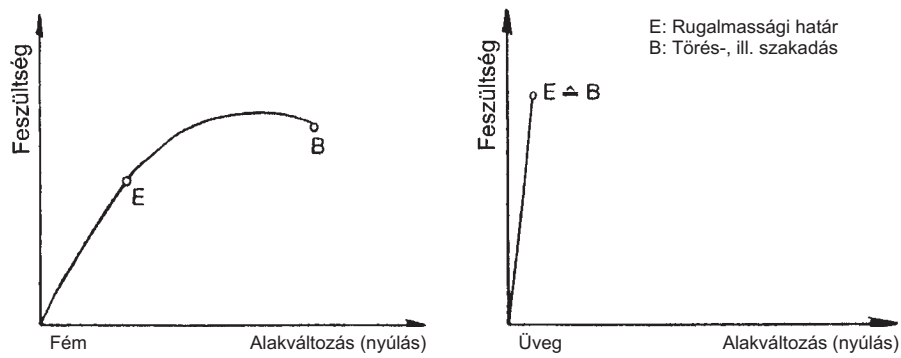
Vonal mentén megtámasztott fej fölötti üvegszerkezetek		Vonal mentén megtámasztott függőleges üvegszerkezetek	
Üvegtípus	$\sigma_{\text{megengedett}}$ N/mm ²	megjegyzés N/mm ²	$\sigma_{\text{megengedett}}$
Egyrétegű, edzett biztonsági üvegek	50		50
Zománcozott (bevonatos) biztonsági üvegek	30	Bevonat a húzott oldalon	30
Ragasztott, réteges biztonsági (tükör) üvegek	15 25	Szigetelő üveg esetén csak az alsó üvegrétegre vonatkozik. Rácsó teher esetén a felső üveg tönkremegy.	
Tükörüveg	12		18
Huzalháló betétes üveg	8		10

(Forrás: Schneider, U.; Bruckner, H.; Bölcsey, E.: *Aluminium/Glas. Baustoffe und ihre Anwendungen*, 2.5. táblázat [7])

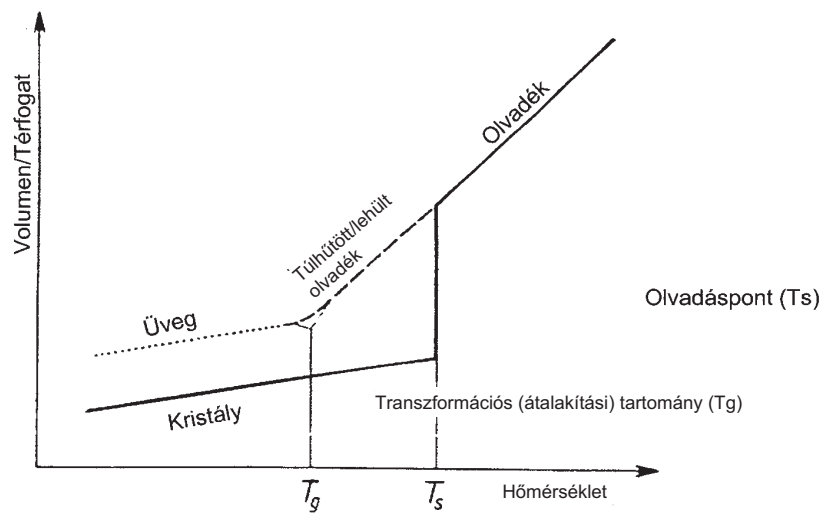
A fenti problémamegközelítés értelmében a modern üveganyag jellegzetes tulajdonságainak legjobb magyarázatát az üveg feszültség-alakváltozási diagramja adja (4. ábra), összefüggésben a hőmérséklet-változás hatására bekövetkező hosszváltozás bemutatásával (5. ábra). Az 5. ábra tudományosan tekintve a termodinamikai egyensúlyi állapotot mutatja: egyszerűen fogalmazva az „üveg építőkövei” szabálytalan (térhibás) hálószerkezetet alkotnak. Ez a struktúra a megfagyott, illetve kihűlt folyadék állapotának felel meg. Scholze szerint [10] termodinamikailag az üveget az jellemzi, hogy nincs egyensúlyi állapotban. A strukturális rendezetlenség miatt az üveg megdermedt, szilárd aggregát állapotában erős és gyenge kötések léteznek egymás mellett, ami egyrészt megmagyarázza a rideg anyagviselkedést, másrészt lehetővé teszi a tényleges előállítási technológiát, illetve az üvegmegmunkálási eljárásokat (például a húzást, a sajtolást, a hengerlést).

A feszültség-alakváltozási munkagörbéből (4. ábra) az üveganyag ridegsége (az említett mikrorepedésektől függően) közvetlenül leolvasható. A plasztikus tartomány hiánya adott esetben spontán töréshez, illetve a szerkezet előjelek nélküli tönkremeneteléhez vezet. A szerkezeti tervezés számára mindebből a legfontosabb következtetés az, hogy a helyi feszültségi csúcsokat különlegesen kell kezelni, illetve lehetőleg el kell kerülni. Az igénybevételek túllépése, még nagyon kis felületekre kiterjedően (például lyukak peremén) sem engedhető meg.

Az üvegkonstrukciók fent bemutatott, más építőanyagoktól eltérő, szerkezetfüggő sajátosságai – Rice [19] (14. ábra) és Sedlacek [9] szerint – a teherhordó



4. ábra. Az acél és az üveg jellemző feszültség-alakváltozási diagramja
(Forrás: Schnauffer, D.: *Glas im konstruktiven Hochbau* [11], 51. oldal)



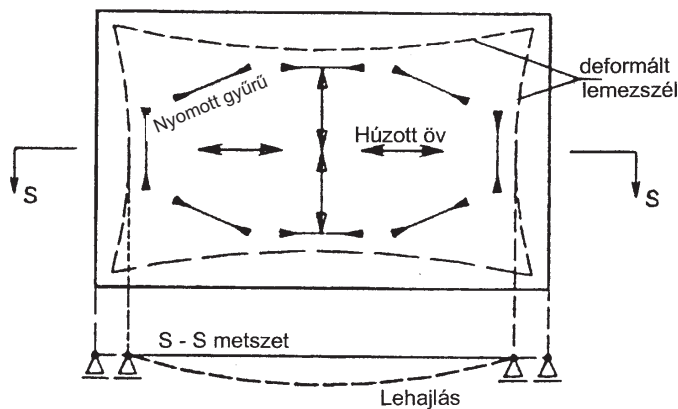
5. ábra. A termikus alakváltozás sematikus ábrázolása, az üveg hőmérsékletfüggő volumene.
A termodinamikai egyensúlyi állapot sematikus ábrázolása
(Forrás: Schnauffer, D.: *Glas im konstruktiven Hochbau* [11], 48. oldal)

szerkezeti tervezést, illetve az építészeti kialakítást tekintve az alábbi következtetések megfogalmazását teszik szükségessé:

- A tartószerkezeti tervezés számítási modelljeihez (az igénybevételek számításához) a helyi feszültségi csúcsoakat nagy pontossággal, a valóságnak megfelelően kell megállapítani. A statikai számítások pontosságára vonatkozó elvárások tehát az üvegnél – más anyagokhoz képest – magasabbak.

- Az építészeti-konstruktív kialakítással a pontszerű erőbevezetések kényszerből keletkező „feszültségi csúcsokat” (amelyek a számítási lehetőségekkel nehezen követhetők) kerülni kell, illetve plasztikus vagy elasztikus ütköző elemekkel azokat szét kell osztani.
- Az üvegyanyagú tartószerkezeteket, különösen a fej fölötti, többrétegű tetőket, a hidakat és a lépcsőket a redundancia (építőipari értelemben: biztonságot adó felesleg) alapelveinek figyelembevételével kell tervezni és kivitelezni. A redundáns, tehát normális üzemeltetés esetén feleslegesnek látszó szerkezeti elem, mely veszélyhelyzetben a szerkezet biztonsági sémájába bekapcsolódva, a meghibásodás káros következményeit nagymértékben kiküszöböli. Ez a technika más területein (gépészet, elektrotechnika, informatika stb.) ismert eszköz, az építőiparban eddig – gazdasági megfontolásokból – csak különlegesen indokolt esetben (például atomerőművek sugárzás elleni nehézbeton védőpalástjánál) került alkalmazásra.

Az üvegszerkezetekben ébredő feszültségek számítására az építési gyakorlatban jelenleg még gyakran alkalmazott konvencionális közelítő eljárás a lineáris lemezelméletből indul ki. A mérnöki gyakorlat számára ez a közelítés az igénybevételek azon mértékéig fogadható el, amíg a hajlított üveglemez lehajlása vastagságánál kisebb [9]. Nagy üvegfelületek esetén (amennyiben a maximális lehajlás az üvegvastagságot meghaladja), a hajlítófeszültségekre „rárétegződött” membránfeszültségek megváltoztatják a lemez teherviselésének jellegét. A maximális feszültségek a lemezközepétől az átlók mentén a sarkok irányába „vándorolnak el”, a lineáris lemezelmélet érvényét veszti (6. ábra). Téglalap alakú (középfelületű)



6. ábra. Nagyméretű, hajlításra igénybevett üvegek membrán-feszültségi állapotának sematikus ábrázolása. A maximális lehajlások meghaladják a lemezvastagság nagyságrendjét
(Forrás: Sedlacek, G.: *Glas im konstruktiven Ingenieurbau* [9], 126. oldal)

hajlított üveglemezek feszültségeloszlásának a valóságot jól közelítő, nem-lineáris vizsgálatát – a lemezegyenlet megoldását – hatványsorokkal (például Fourier-sorokkal) vagy differenciaegyenletek felhasználásával (FE-módszer) végezhetjük el. Nagy üvegfelületek esetén mindenképpen ajánlatos egy olyan „pontosabb” számítási módszert, illetve statikai modellt alkalmazni – például a membránelmélet figyelembevételével –, mely az üveglemez alakváltozásának és a beépítés, csatlakoztatás kiviteli adottságainak (a kerületi peremfeltételeknek) a legjobban megfelel.

Másodlagos, de a szakma számára különösen fontos méretezési feltétel a megengedett alakváltozás (lemezlehajlás) korlátozása. A határérték betartása biztosítja – egyebek mellett – az üvegtáblák és a határos teherhordó szerkezet közötti „kompatibilitást”, így az üvegtáblák felfekvésének biztonságát az acél- vagy alumíniumszerkezetre. A szabad peremek lehajlásának korlátozása egyrészt a táblaperemek feszültségének minimalizálása érdekében szükséges, másrészt a hőszigetelő üvegek peremkötéseinek tartósságát szolgálja.

A 2. táblázat a vonal mentén megtámasztott, fej fölötti és függőleges síkú üvegezések megengedett lehajlási (alakváltozási) értékeit foglalja össze.

2. táblázat. Vonal menti megtámasztású, fej fölötti és függőleges síkú üvegezések lehajlási/alakváltozási határértékei

		Vonal mentén megtámasztott fej fölötti üvegszerkezetek	Vonal mentén megtámasztott függőleges üvegszerkezetek
Üvegtípus	Felfekvés	Maximális lehajlás	Maximális lehajlás
Egyrétegű biztonsági üvegek		$f \leq l/100$ l: üveglemez feszítávolsága a főirányban	$f \leq l/100$ l: üveglemez feszítávolsága a főirányban
Hőszigetelő üvegek	Négy oldalon	$f \leq l/100$ és $f \leq d$ d: üveglemez (névleges) vastagsága ragasztott többrétegű biztonsági üvegek esetén: $d = (\sum d_i)^{0,33}$	$f \leq l/100$ l: üveglemez feszítávolsága a főirányban a gyártó adatainak figyelembevételével
	Két vagy három oldalon	$f \leq l/200$ $f \leq l/d$ $f \leq 1/8 \text{ mm}$ l: a szabad peremszél hossza	$f \leq l/200$ és $f \leq 1/8 \text{ mm}$ l: a szabad peremszél hossza

(Forrás: Schneider, U.; Bruckner, H.; Bölskey, E.: *Aluminium/Glas. Baustoffe und ihre Anwendungen*, 2.6. táblázat [7])

4. ALÁFESZÍTETT ÜVEGGERENDA SZERKEZETEK TEHERVISELŐ KÉPESSÉGÉNEK KÍSÉRLETI VIZSGÁLATAI

Az üveg teherhordó szerkezetek építészeti igézete a szabályozható transzparenciában s a modern üveganyagok, új üvegekapsolati rendszerek nagy nyomószilárdságában rejlik. Az utóbbi években üvegből, alumínium, illetve acél alkalmazásával egyre karcsúbb és mindinkább transzparens szerkezeti rendszereket fejlesztettek ki, melyeknél az üveganyag fokozódó mértékben vesz át primer teherhordó funkciókat. Ezáltal a belső és külső tér közötti klasszikus térelválasztás megszűnt, illetve feloldódott. Richard Lucae építészkritikusnak – a Kristálypalota épülete és tervezője csodálójának – szavai szerint: „a sorompó, mely minket környezetünkötől elválasztott, kinyílt”.

A modern építészetben az „üvegor” a 19. századi üveggel fedett passzázsokkal kezdődött, s manapság, a beköszöntő 3. évezred elején második – konstrukciós szempontból tovább fejlesztett – reneszánszát éli. A tényleges különbség abban áll, hogy az üveg építőelemek többé már nemcsak mint a teherhordó szerkezetek közötti felületalkotó elemek működnek, hanem nagyfokú anyagellenállással, szilárdságukkal és stabilitásukkal felveszik és továbbítják az igénybevételeket (terheket).

A nagy teherbíró képességű tiszta-üveg szerkezetek megvalósításakor a statikai tervezés és a konstrukciós kialakítás számára elvileg két lehetőség van:

- A modern üveganyag anyagspecifikus alkalmazása és optimalása a rendszer-tartalékok kihasználásával, mint például a nagyobb hajlító igénybevételek elkerülése, s a tartóelemek normálerők felvételére történő tervezése. Figyelemre méltó aspektus, hogy terheléskor – a teljesen különböző anyagszerkezeti struktúra ellenére – hasonlóság mutatkozik a masszív betonépítési módhoz. Így az üveg húzási igénybevétele (húzószilárdság 30–90 N/mm²) is csupán a lehetséges nyomó-igénybevétel (nyomószilárdság 300–900 N/mm²) 10 %-ára tehető.
- A rideg üveg építőanyag teherhordási tartalékainak anyagspecifikus (az anyag nem rendelkezik a plasztikus deformáció kiegyenlítő képességével) kihasználása megfelelő részletképzésekkel (így például ellenőrzött teherbevetéssel, a feszültségi csúcsok egyidejű elkerülésével/mérséklésével).

A mai építési gyakorlatban az épületszerkezetek építészeti, statikai-konstrukciós, épületfizikai és építőanyag-technikai követelményei többnyire oly sokrétűek, hogy csak az építőanyagok – integrált rendszerként működő építési mód formájában történő – összekapcsolása ad optimális megoldást. Társított rendszerhez – a teherhordó szerkezet megerősítésére – az újat úgy kell megválasztani és beépíteni,

hogy egymás gyengéit kölcsönösen kiegyenlítsék, és váltakozva mindketten hasznosak legyenek egymás számára. Mindez a természetben régóta létezik, a jelenséget – Jugbluth megfogalmazása szerint – szimbiózisnak nevezik.

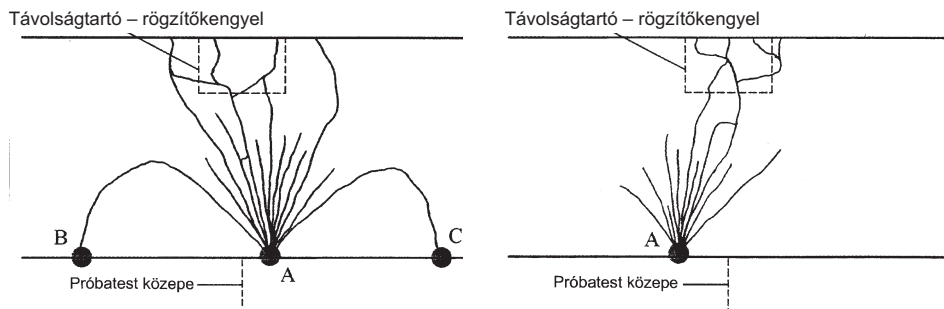
Az építéstechnikában évtizedek óta számos alkalmazási példa ismert a fenti elv szerinti szerkezeti kialakításra, mint például az acél–beton öszvértartók, normál és feszített vasbeton konstrukciók, a faépítésben az acélszál–betonnal erősített csapos és borított gerendás fafödémek [15], vagy az összetett acél–fataratok, aláfeszített gerendák, feszítőműves szerkezetek [16].

Ennek megfelelően a társított szerkezetek további lehetőségeket kínálnak karcsúbb, még inkább transzparens üvegtartók és teherhordó üveg épületelemek (sík és térbeli tartószerkezetek) megoldására, mint például az aláfeszített huzallal erősített üveggerendák és falszerű üvegtartók (üvegtárcsák). Így az aláfeszített fataratok (feszítőművek), a feszített beton tartók és különösen a külső előfeszítés analógiaként szolgálhatnak a feszített huzalerősítésű üvegszerkezetek számára. E megoldás további előnye az, hogy a saját feszültségi állapot, illetve a belső erők kedvező átrendezésével az üveganyag alapvetően „rideg” viselkedését, a repedési/törési mechanizmust – bizonyos fokig – kedvezően befolyásolja (8. ábra) [7].

A történelmi és modern épületelemek szerkezet-releváns építőanyag-jellemzőinek és -paramétereinek vizsgálata során megállapítást nyert, hogy az üveg „gyakorlati szilárdságát” – más befolyásoló tényezők mellett – erősen befolyásolja az erőbevezetés módja, a terhelt felület nagysága, a terhelő hatás időtartama, valamint az időjárási viszonyok változása. Ebből következik az, hogy a laboratóriumi kísérletek kiértékelése sok esetben nem tartalmaz bizonyos reális, a gyakorlati méretezést befolyásoló paramétereket (például a klimatikus változásokból adódó járulékos igénybevételeket). A „gyakorlati szilárdságot” – mely megközelítőleg csupán 1 %-a az elméleti, „molekuláris” szilárdságnak – a ridegség, illetve az üvegfelületen megjelenő mikrorepedések határozzák meg [17].

A Bécsi Műszaki Egyetem Építőanyagtani, Épületfizikai és Tűzvédelmi Intézetének Építőlaboratóriumában a fenti megfontolások alapján a következő tervezési elveket fogalmaztuk meg:

- A cél a feszítávolság transzparens áthidalása, ezért az üveggerendák, illetve tárcsák terhelhetőségének fokozására csak karcsú, vonal menti vagy pontszerű megerősítő elemek alkalmazhatók.
- Az üveg szerkezeti problémáinak kiküszöbölése csak az üvegben ébredő húzófeszültségek – külső elő-, illetve aláfeszítő szerkezetekkel történő – csökkentésével lehetséges.
- A kísérletek folyamán szükség van a feszültségeloszlás előfeszítéssel történő befolyásolásának – különösen a változó terhelésű erőbevezető és támasz helyeken – feszültségoptikai felvételekkel történő láttatására, dokumentálására.



8. ábra. Fönt: aláfeszítés nélküli üvegtartó jellegzetes törésképe (kísérlet száma: 10/n₁); lent: külső aláfeszítéssel rendelkező üvegtartó jellegzetes törésképe (kísérlet száma: 8/n₂) (Forrás: Schneider, U.; Bruckner, H.; Böleskey, E.: *Aluminium/Glas. Baustoffe und ihre Anwendungen* [7], 1. kötet, 2.14. ábra)

nem lépnek fel, kialakulásukat az aláfeszítés tehát nyilvánvalóan akadályozza, illetve „áthidalja”.

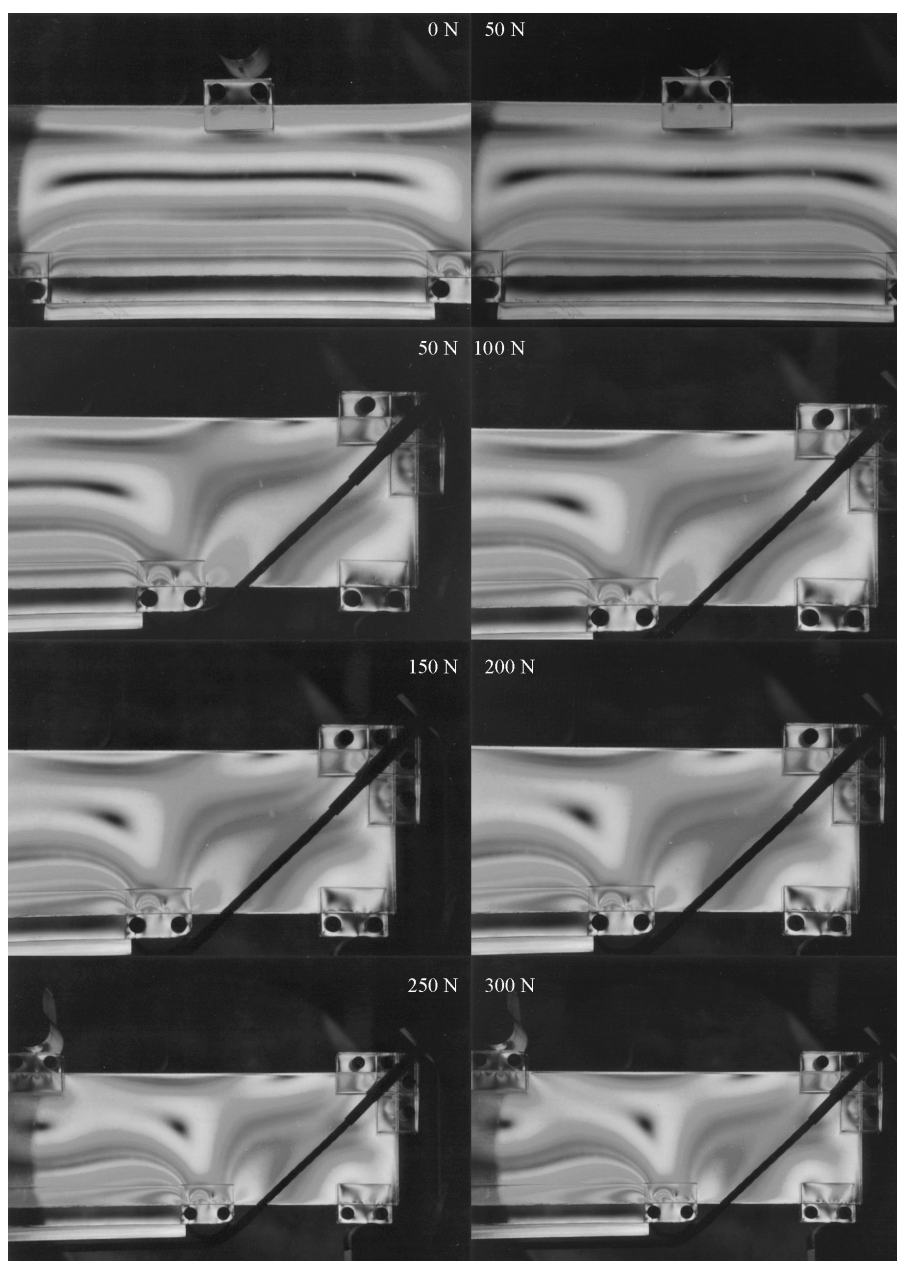
A repedési mechanizmus tisztázása feszültségoptikai vizsgálattal (feszültséganalízissel) történik, láthatóvá tett feszültségi trajektóriák (és polarizált fény) segítségével, az üvegtárcsákat helyettesítő, fénytörő műanyag (Araldit-B) elemeken. A feszültségoptikai kísérletsorozat araldit modelljén (különösen a támaszok és a koncentrált erők környezetében) polarizált fény segítségével láthatóvá tett izokróm vonalak (az azonos nyírófeszültségek vonalai) optikai változása (az azonos színű sávok alakjával és sűrűségével) grafikusán dokumentálja a terhelés függvényében változó feszültségállapotot (9. ábra).

Mint az a 9. ábra felvételein látható, a linearizált fényhullám a deformált araldit tartómodellbe történő belépésekor – a feszültségi, illetve deformációs állapot főirányainak megfelelő – két hullámkomponenssé válik szét. Mivel a két hullám a modellanyagban eltérő sebességgel terjed, ebből fázisdifferencia (Δ) keletkezik, amely növekvő terhelés, illetve növekvő modellvastagság esetén egyre nagyobb lesz. Ez az optikai effektus jellemzi az aktuális feszültségi állapotot.

Az analizátoron látható izokróm vonalsereg állandó (Δ) fáziseltolódása, a mechanika hasonlósági törvényszerűségei alapján, a hidrosztatikus feszültségállapot összetevőinek figyelembevételével, a következő képlettel fejezhető ki [18]:

$$\Delta = \text{prop } dx (\delta_1 - \delta_2) = \text{prop } dx \tau_H.$$

(Az arányossági tényezők pontos értékeit a modellanyagon végzett hitelesítő kísérletekkel lehet megállapítani. A matematikai képlet kifejezi azt a fizikai ténytet, hogy feszültségoptikai módszerekkel csak a nyírási feszültségeket, illetve deformációkat lehet láthatóvá tenni.)



9. ábra. Aláfeszített tartó feszültségoptikai vizsgálata; az izokróm (azonos nyírófeszültségű) vonalak változása a terhelés növelése esetén
(Forrás: Schneider, U.; Bruckner, H.; Bölskey, E.: *Aluminium/Glas. Baustoffe und ihre Anwendungen* [7], valamint Schnauffer, D.: *Glas im konstruktiven Hochbau* [11])

A teherbíró képesség vizsgálatának eredményeit (feszítáv: $l_{st} = 50$ cm) – az EN 124 szabványra támaszkodva – a 3. táblázat foglalja össze.

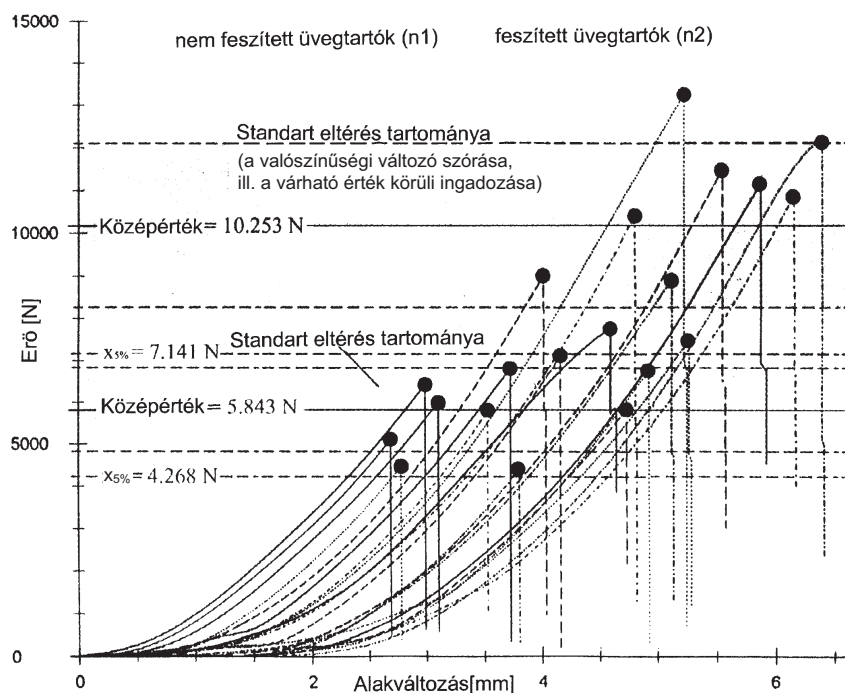
3. táblázat. A teherhordó képesség vizsgálatának mérési eredményei; n_1 és n_2
1. kísérleti sorozat: feszítés nélküli üvegtárcsák; 2. kísérleti sorozat: aláfeszített üvegtárcsák

Teherbírás/törőerő [N] értékei				
Megjegyzés	Szám	Kísérletsorozat n_1 nem feszített üvegtartó	Szám n_2 feszített üvegtartó	Kísérletsorozat
	1	6 786,26	1	7 772,53
	2	7 080,15	2	9 016,35
	3	4 451,30	3	13 245,33
	4	5 768,41	4	10 419,67
	5	4 386,79	5	8 909,67
	6	6 421,51	6	11 151,27
	7	5 812,21	7	11 485,92
	8	6 732,23	8	7 524,37
	9	5 956,83	9	10 859,45
	10	5 044,21	10	12 151,63
Összeg	Σn_1	58 439,90	Σn_2	102 538,19
Középérték	K_1	5 843,99 N	K_2	10 253,82 N
Küszöbérték	X_1 5%	4 268,00 N	X_2 5%	7 141,00 N

(Forrás: Schneider, U.; Bruckner, H.; Bölskey, E.: *Aluminium/Glas. Baustoffe und ihre Anwendungen* [7], valamint Schnauffer, D.: *Glas im konstruktiven Hochbau* [11], 89. oldal, 17. táblázat)

A kísérletsorozatot valószínűségelméleti megfontolások alapján összefoglalva, illetve kiértékelve (10. ábra) megállapítható, hogy az statisztikailag szignifikáns, és a normál eloszlásnak messzemenőkéig megfelelő. Az aláfeszített üvegtárcsák próbaelemei ténylegesen magasabb törőerő értékeket érnek el, mint az alá nem feszített üvegek mintasorozata. A 10. ábrán látható, hogy az aláfeszített üvegek törőerő középértéke 75 %-kal nagyobb, mint az alá nem feszítetteké.

Figyelembe véve a kísérleti mérési adatoknak a várható törőerő, tönkremeneteli érték körüli ingadozását (a normális eloszlásra jellemző valószínűségi változó szórást) megállapítható, hogy az aláfeszített üvegtartók teherviselő képességének 5 %-os küszöbértéke is hasonló nagyságrenddel (>67 %-kal) magasabb a feszítés nélküli üvegtárcsákénál. Ez annál inkább figyelemre méltó, mivel a szórás értéke nem független a feszítőmű statikai-konstruktív vázától, és annak elkerülhetetlen kialakítási/szerelési pontatlansága a szórás értékét megnövelheti [13].



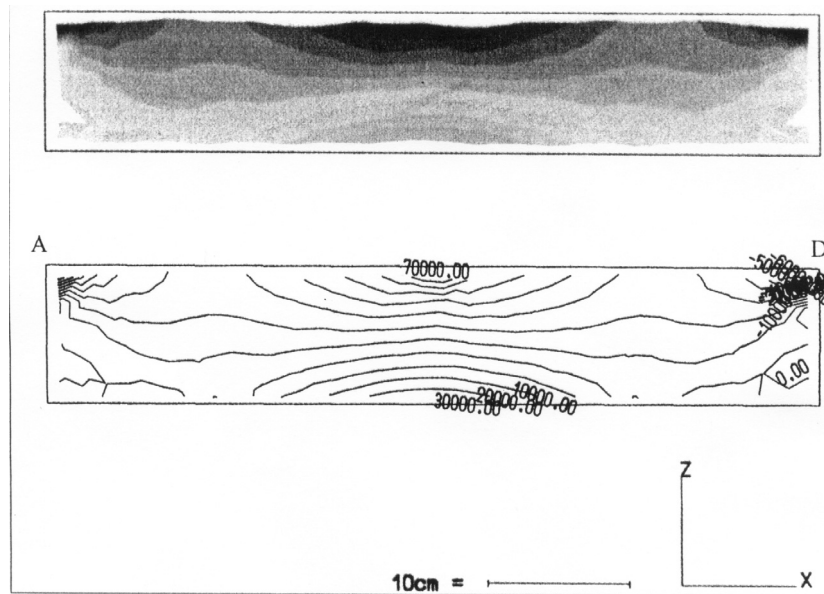
10. ábra. Feszültség-alakváltozási diagramok, a statisztikai kiértékelés eredményének grafikus bemutatása

(Forrás: Schneider, U.; Bruckner, H.; Bölskey, E.: *Aluminium/Glas. Baustoffe und ihre Anwendungen* [7], 2.16. ábra)

Az aláfeszített üvegek feszültségi állapotának és teherbírásának (illetve törőerőinek) számítása a Nemetschek programozó iroda FE végelem programrendszerével készült. Megtörtént a számított, illetve grafikusan dokumentált eredményeknek a kísérleti vizsgálatok és a feszültségoptikai felvételek eredményeivel való kritikus összehasonlítása is (11. ábra).

Az eredményekből látható, hogy egy megfelelő bontású, finom hálóelosztású FE-modell a kísérleti eredményekkel, illetve a feszültségoptikai vizsgálatokkal jó összhangot mutat. Ugyanakkor megállapítható, hogy a koncentrált erőhatások (támaszok, sarkok) közvetlen környezetében fellépő – s különösen a ridegtörésre hajlamos anyagok, mint például az üveg esetében problematikus – szingularitási problémák megítélésére és ellenőrzésére a feszültségoptikai módszer kiválóan alkalmas [18].

Figyelemre méltó, hogy az egyszerű, „kézi” számítás – mely az aláfeszített fa-gerenda építési gyakorlati analógiáján alapul – az előszámítások számára jól használható eredményt ad, s az FE-számítással megfelelő összhangban van [16].



11. ábra. Az aláfeszített üvegtartó feszültségállapotának és teherbírásának végelem program-rendszerű FE-vizsgálata. (A méretek és a terhelési kép a 7. ábrán látható.) Maximális teher: $F_{\max} = 10$ kN; aláfeszítő erő: $f_{\text{vsp}} = 15$ kN az A és D sarokpontokban
(Forrás: Schneider, U.; Bruckner, H.; Bölcskey, E.: *Aluminium/Glas. Baustoffe und ihre Anwendungen* [7], 2.17. ábra)

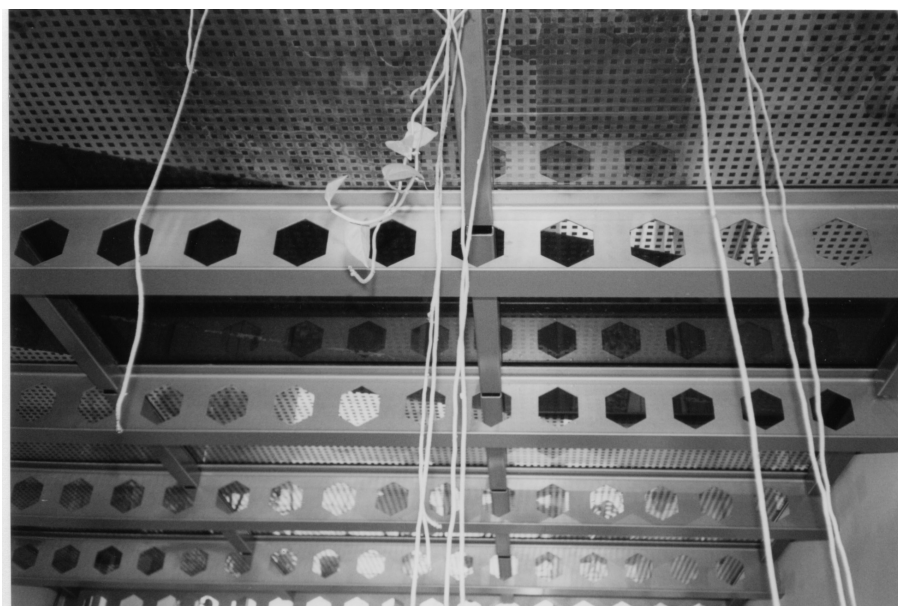
5. ÖSSZEFOGLALÁS ÉS KITEKINTÉS

Az üvegek rideg-elasztikus anyagok, melyek az elasztikus határ-teherbíróképesség elérésekor – előzetes „figyelmeztetés”, plasztikus deformáció nélkül – spontán törnek. E problematikus építőanyag-technikai tulajdonságok ellenére a szerkezeti magasépítésben jelenleg az üveg előretörése, alkalmazásának gazdagodó sokszínűsége figyelhető meg (12. és 13. ábra).

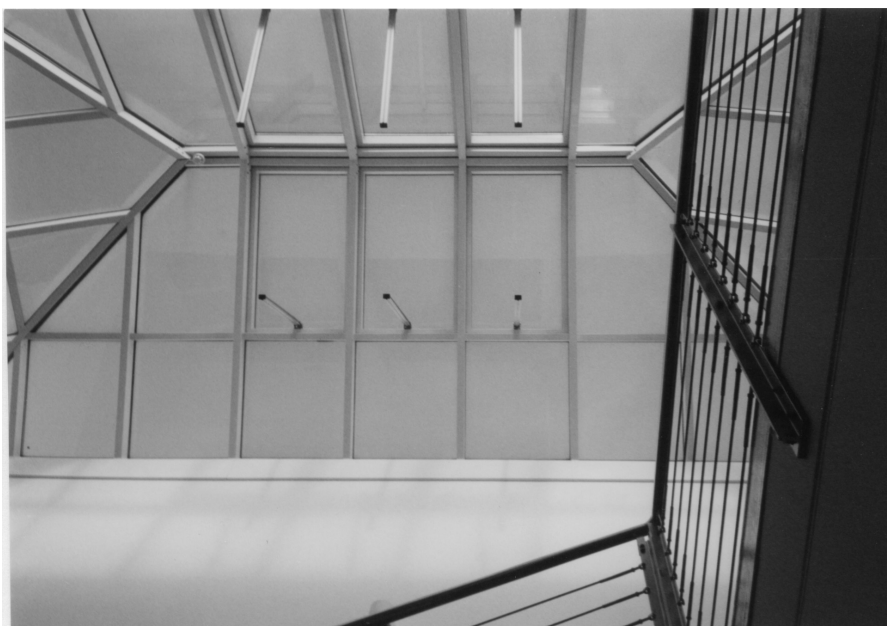
Az üvegtárcsák feszítómű jellegű, filigrán aláfeszítésével sikerült a transzparens tartó teherbírását (teherviselő képességének 5 %-os küszöbértékét) közel 70 %-kal megemelni.

A Bécsi Műszaki Egyetemen elvégzett és statisztikailag kiértékelt kísérleti vizsgálatok a szerkezeti üvegpítés számára újszerű alkalmazási lehetőséget mutattak. A kísérleti elrendezés és a modellezés léptéke olyan volt, hogy figyelembe vette a későbbi alkalmazást, egy gyalogos híd aláfeszített üvegtartójaként.

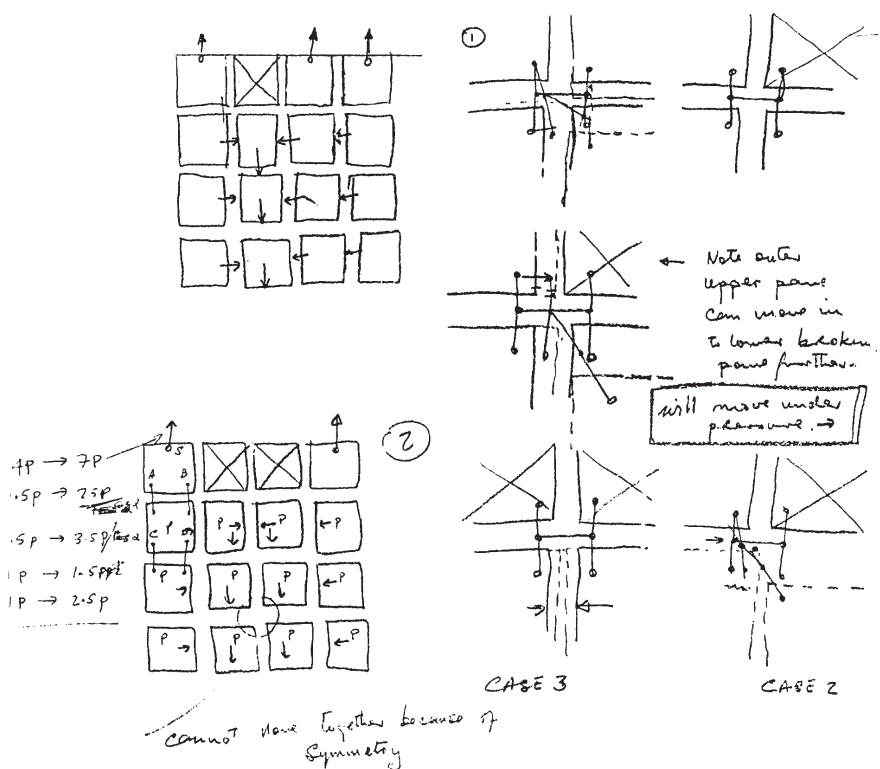
Az előméretezésként elvégzett „kézi” számítás statisztikai kiértékeléssel összekapcsolt és végelem módszerrel kibővített ellenőrzése eredményeként külső aláfeszítésű üvegtartó született, mely hasonló célú, illetve terhelésű, aláfeszített üveg-



12. ábra. Üveghíd mint transzparens összekötő szerkezet a Bécsi Műszaki Egyetem Építőanyagtanai, Épületfizikai és Tűzvédelmi Intézetének laboratóriumi és intézeti épülete között (a szerző felvétele)



13. ábra. A laboratórium lépcsőháza feletti acél–alumínium szerkezetű, hőszigetelő üvegezésű tető (a szerző felvétele)



14. ábra. Peter Rice építómérnök vázlata a párizsi Pompidou Center-ben 1983-ban kiállított önhordó üvegfal-modelljének működési elvéhez. A szerkezet a redundancia elvén működik (Forrás: Rice, P.; Dutton, H.: *Transparente Architektur. Glasfassaden mit struktural glazing* [19])

hidak lehetséges főtartójaként alkalmazható. A kivitelezésre alkalmas változat (12. ábra) kidolgozása során a tartószerkezeti tervező, az építész, az üvegyártó, az építési hatóság és az építető együttműködött az optimális üvegyanyag megválasztásában, illetve az eddig alkalmazott szerkezeti (ragasztott, edzett stb.) üvegekből alkotott, speciális, új üvegtermék kifejlesztésében.

A számítással történő ellenőrzés érdekében kívánatos lenne a fél-valószínűségi biztonsági koncepció bővítése, illetve anyagspecifikus adaptálása, az anyagellenállás oldalán – megfelelően levezetett – részbiztonsági tényezők meghatározásával.

IRODALOM

- [1] Newton, I.: *Sir Isaac Newton's Optik oder Abhandlung über Spiegelungen, Brechungen, Beugungen und Farben des Lichts* (1704). 1. Buch. Hrsg. von Abendroth. Oswalds Klassiker Nr. 96. Leipzig, 1898.
- [2] Werner, E.: *Technisierung des Bauens: geschichtliche Grundlagen moderner Bautechnik*. Düsseldorf, Werner-Verlag GmbH, 1980.
- [3] Schild, E.: *Zwischen Glaspalast und Palais des Illusions: Form und Konstruktion im 19. Jahrhundert*. Braunschweig, Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft m.b.H., 1983.
- [4] Strathern, P.: *Einstein & Relativity*. 1997.
- [5] Einstein, A.: Theorie der Lichterzeugung und Lichtabsorption. *Ann. Phys.* 20 (1906), 199–206.
- [6] Asendorf, Ch.: *Ströme und Strahlen: Das langsame Verschwinden der Materie um 1900*. Werkbund-Archiv, Bd. 18. Gießen, Anabas-Verlag, 1989.
- [7] Schneider, U.; Bruckner, H.; Bölskey, E.: *Aluminium/Glas. Baustoffe und ihre Anwendungen*. Bd. 1. Wien, New York, Springer Architektur-Verlag, 2001.
- [8] Mehlhorn, G. (Hrsg.): *Der Ingenieurbau: Grundwissen*, Bd. 8. *Tragwerkszuverlässigkeit – Einwirkungen*. Berlin, Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH, 1997.
- [9] Sedlacek, G.: *Glas im Konstruktiven Ingenieurbau*. Berlin, Ernst & Sohn Verlag, 1999.
- [10] Scholze, H.: *Glas-Natur, Struktur und Eigenschaften*. Berlin, Heidelberg, Springer Verlag, 1988.
- [11] Schnauffer, D.: *Glas im konstruktiven Hochbau*. Diplomarbeit an der TU Wien, Institut f. Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz. Wien im Oktober 2000.
- [12] Bölskey, E.; Riell, A.: Tragende Strukturen des Lichts. *Technopress Bau Magazin* 6/99, 11–14.
- [13] Mistéth E.: *Méretezéselmélet*. Budapest, Akadémiai Kiadó, 2001.
- [14] Seregi Gy.: *Fém szerkezetű üvegtetők, üvegfalak és télikertek*. Budapest, Magyar Építőanyagipari Szövetség Építésügyi Tájékoztatói Központ Kft., 1998.
- [15] Bölskey E.: Régi fafödémek öszvértartó jellegű felújítása acélszál-erősítésű nyomott betonövel. *Építés-felújítás*, 1995. 5. sz.
- [16] Rónai F.; Somfalvi Gy.: *Fa tartószerkezetek*. Budapest, Műszaki Könyvkiadó, 1982.
- [17] Palotás L.: *Mérnöki szerkezetek anyagtana 1. Általános anyagismeret*. Budapest, Akadémiai Kiadó, 1979.
- [18] Wolf, H.: *Spannungsoptik*. Berlin, Springer Verlag, 1976.
- [19] Rice, P.; Dutton, H.: *Transparente Architektur. Glasfassaden mit structural glazing*. Birkhäuser Verlag, Basel, Berlin, Boston, 1995, az eredeti francia kiadás címe: *Le Verre Structurel*, Paris, Le Moniteur, 1990.

TRANSPARENTE TRAGSTRUKTUREN: GLASARCHITEKTUR
IM 21. JAHRHUNDERT

Zusammenfassung

Die Glaswerkstoffe gehören zu den (ideal) spröde-elastischen Werkstoffen, die nach dem Erreichen der elastischen Grenztragfähigkeit – ohne plastische Verformungsanteile – plötzlich versagen. Trotz dieser problematischen Baustoffeigenschaft spielt die Glasanwendung im konstruktiven Ingenieurbau eine immer grössere Rolle.

Als Resümee der Vorbemessung gekoppelt mit der statistischen Versuchsauswertung und erweitert mit der Finite-Element-Berechnung wurde im Baulabor des Institutes für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz an der TU Wien ein Balken in Form eines vorgespannten Glasbinders entwickelt.

Die Ergebnisse der durchgeführten Versuche zeigen, dass der Mittelwert der Höchstlast/Prüflast (Bruchlast) für vorgespannte Glasscheiben um mehr als 75% höher liegt als der Mittelwert der nicht vorgespannten Gläser.

Mit diesen Versuchsuntersuchungen wurde eine neuartige Anwendungsmöglichkeit für den konstruktiven Glasbau aufgezeigt.

Schlüsselwörter: Architektur der gläsernen Träger, Transparente Tragkonstruktion, Unterspannte Glasbrücke, Spannungszustand des unterspannten Glasträgers