

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Építészmérnöki kar, Csonka Pál Doktori Iskola
Építészettörténeti és Műemléki Tanszék

Jobbik Eszter

KÉSŐ GÓTIKUS HÁLÓBOLTOZATOK GEOMETRIAI ELEMZÉSE,
SZERKESZTÉSTECHNIKÁJA ÉS ÉPÍTÉSI MÓDJAI

Tézisfüzet



Témavezető: Dr. Krähling János

Budapest, 2025

A doktori értekezés témája

A kutatás elsődleges célja a késő középkori hálóboltozatok pontos geometriai leírásokon alapuló építés- és szerkesztéstechnikai vizsgálata, valamint az esettanulmányok, továbbá geometriai és építéstechnikai szükségszerűségek alapján a hálóboltozatok szerkesztés- és építéstechnikai tipologizálása volt. A középkori hálóboltozatok szerkesztéstechnikájáról szóló ismereteinket a mai napig erősen meghatározza a téma főként 19. században keletkezett szakirodalma, hiszen a szerkezetek építésével egyidejű forrás csak nagyon kis számban maradt fenn. Ezeket az írott és rajzi forrásokat – keletkezési idejüktől függetlenül – alapvetően jellemzi egyfajta egyszerűsítés: a boltozatszerkesztés kiinduló geometriai peremfeltételeinek (a boltozandó tér kontúrjának) szabályos meghatározása – mely szükségszerű következménye a hagyományos felmérési módszerek várható pontatlanságainak (különösen fej fölötti szerkezetek estében). Kutatásomban az így kialakult kép árnyalására tettem kísérletet a modern, pontosnak tekinthető felmérési módszerek alapján megismert háromdimenziós hálóboltozat-geometriák elemzésével és értelmezésével.

A kutatás a geometriai leírások módszertanán és a késő gótikus hálóboltozatok bordaháló-süvegfelület kapcsolatának, illetve a bordaháló globális geometriájának tipologizálásán túl a hálóboltozatok egymással való kapcsolatainak témájában is új irányokat vet fel. Két hálóboltozatnak a kutatásban meghatározott, a térbeli geometria elemzésén alapuló jellemzők figyelembe vételével való összehasonlító elemzése a két szerkezet egymással való (potenciális) kapcsolatának a korábbi módszereknél pontosabb indikátora lehet.

A kutatás kérdései és célkitűzései

A kutatás két kiindulási alapját a téma szakirodalma, a szakirodalomban megjelenő szerkesztési elvek, és az ezeket reprezentáló ábraanyag elemzése, valamint a kutatásom során földi lézerszkenneléssel felmért esettanulmányok geometriai elemzése jelentették. Célul tűztem ki, hogy az alapvető szakirodalmi források geometriai egyszerűsítések felé mutató tendenciáját a pontos, háromdimenziós geometriai adatok alapján felülvizsgáljam, és a késő középkori hálóboltozatok pontos geometriai leírásának modern, pontfelhő alapú felmérési módok alkalmazásához igazított módszertanát felállítsam. A kutatás kérdései voltak, hogy meghatározható-e a pontos geometriai leírás, valamint a geometriai és építéstechnikai szükségszerűségek alapján a bordaháló és süvegfelületek szerkezeti kapcsolatának, valamint a bordaháló csomópontjainak térbeli pozícióját alapul véve a bordahálók szerkesztéstechnikájának tipológiája – az egyes típusokhoz a valószínűsíthető építéstechnikák definiálásával. Arra is kerestem a választ, hogy a bordahálót alkotó egyes bordák¹ pontosan felmért egyedi geometriájának vizsgálata alapján – különös tekintettel a bordák görbületi sugarára – a vezérgörbe szerkesztés elvének alkalmazása milyen arányban bizonyítható a megvizsgált esetekben. Ezen kívül vizsgáltam azt is, hogy a pontos, háromdimenziós geometria alapján elkészíthető elméleti rekonstrukciók egy-egy szerkezet eredeti szerkesztés- és építéstechnikájáról hogyan befolyásolhatják a kutatás korábbi állását egyes épületek egymással való építőmester-, építőműhely- vagy egyéb leszármazási kapcsolatainak tekintetében.

Források

A késő középkori hálóboltozatok ma is általánosan és széleskörben használt szakirodalma túlnyomórészt a 19-20. századból származik. Igen kis számban ismerünk csak a háló- és csillagboltozatok szerkesztés- és építéstechnikájára vonatkozó, a szerkezetek építésével azonos időből

¹ Dolgozatomban “borda” alatt a bordaháló csomóponttól csomópontig tartó részeit értem. A bordákat alkotó egyes építőelemekre “bordaelemekként” utalok.

származó forrásokat. A kutatásom során áttekintett, középkorból származó források a következők voltak:

- a Wiener Bauhütte boltozattervei
- Rodrigo Gil de Hontañon térgörbe bordás csillagboltozat-rajza
- a Spanyol Nemzeti Könyvtár Ms. 12686 számú kézirata
- WG mester vázlatkönyve

A vizsgált korszakot követő korokból származó, a téma szakirodalmának gerincét jelentő források:

- Ranisch, Bartel. 1695. Beschreibung aller Kirchengebäude der Stadt Dantzig... Dantzig: Raths und Gymnasii Buchdruckern.
- Hoffstadt, Friedrich. 1840. Gothisches ABC-Buch: Vorlegeblätter zum gothischen A-B-C-Buche... Frankfurt a. M.: Siegmund Schmerber.
- Ungewitter, Georg Gottlob. 1901. Lehrbuch der gotischen Konstruktionen. Neue bearbeitet von K. Mohrmann. Leipzig: Chr. Herm. Tauchnitz.
- Meckel, Carl Anton. 1933. Figurierte Gewölbe der deutschen Spätgotik. Architectura: Jahrbuch für Geschichte der Baukunst 1:107-121. <https://doi.org/10.11588/diglit.19241#0011>

A doktori értekezés szakirodalomra vonatkozó fejezete a forrásokból nyert ismereteket foglalja össze és értékeli, mind saját szempontjaim, mind az e kulcsforrásokat alapul vevő más szerzők munkáinak alapján.

A szakirodalmi források szöveges és ábraanyagain túl a kutatásom legfontosabb forrását a feldolgozott esettanulmányok hálóboltozatainak részletes geometriai adatai jelentették. Az esettanulmányok kapcsán további szakirodalmi adatokat is feldolgoztam, egyrészt a vizsgált épületek építéstörténete, másrészt az egyes épületek között fennálló potenciális építőmester, építőműhely, vagy egyéb genealógiai kapcsolatok tekintetében.

Kutatásmódszertan

A doktori kutatás alapját az elméleti háttér megismerése és az esettanulmányok elkészítése jelentette, melyek eredményeit a geometriai és építéstechnikai szükségszerűségeket alapul véve bővítettem ki a felállított tipológiákká. Az elméleti háttér egyrészt a hálóboltozat szerkesztésre és építésre vonatkozó szakirodalom megismeréséből és kritikai elemzéséből, másrészt az egyes esettanulmányokra vonatkozó szakirodalom áttekintéséből állt össze. Az esettanulmányok konkrét késő gótikus hálóboltozatokkal fedett épületek felmérését és geometriai vizsgálatát jelentették. Az emlékek kiválasztása során fontos szempontot jelentett a boltozat építési ideje, valamint az egyes boltozatok szakirodalom alapján feltételezhető kapcsolatai, melyeket az összehasonlító elemzések megalapozott elvégzése miatt vettem figyelembe, de az emlékek felmérésének esetleges akadályoztatása is befolyásolta a válogatást. Így végül 9 épület 15 boltozatát elemeztem:

- Szászbogács, erődtemplom, hajóboltozat
- Segesvár, Hegyi templom, déli és északi mellékhajók és a főhajó boltozatai
- Medgyes, erődtemplom, hajó-, szentély- és sekrestyeboltozatok
- Landshut, Szt. Márton templom, főhajóboltozat
- Szeged-Alsóváros, Havas Boldogasszony templom, hajó-, szentély és sekrestyeboltozatok
- Nyírbátor, Szent György templom, templomboltozat
- Andocs, Nagyboldogasszony bazilika, szentélyboltozat
- Siklós, várkápolna, szentélyboltozat
- Gyulafehérvár, Lázói kápolna boltozata

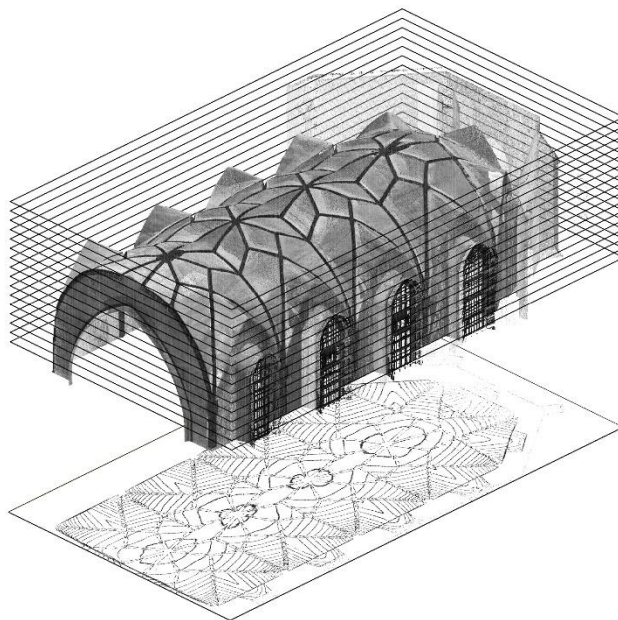
Ezek közül a szakirodalom a dél-erdélyi templomokat egy csoport elemeiként kezeli, és ezeknek a landshuti késő gótikus építőműhelyekkel való szoros kapcsolatát kiemeli (különösen Landshut-Segesvár vonatkozásában). Egyes kutatók a szeged-alsóvárosi templomot is e csoporthoz kötik. A

szeged-alsóvárosi hajóboltozat és a nyírbátori Szent György templom boltozata szintén egységes elvek szerint készült szerkezetekként váltak általánosan ismertté. Az andocsi és siklósi boltozatok a mai Magyarország területén megmaradt térgörbe bordás emlékek ritka példáit jelentik, mely okán gyakran együtt említik őket. A feltételezett kapcsolatrendszer egyik rétegét jelenti az az elmélet, miszerint a hálóboltozatok genealógiája a boltozatok bordahálójának alaprajzi vetületei alapján levezethető. Utóbbi elmélet alapján többek között a vizsgált sekrestyeboltozatok Lázói kápolnával való összevetése is értelmet nyerhet.

A hálóboltozatok szerkesztés- és építéstechnikájának meghatározó, alapvető szakirodalma nagyrészt a 19-20. században keletkezett, és a kor felméréstechnikájának korlátai miatt nem a boltozatok pontos geometriájából indult ki, sok helyen csak közelítésekre támaszkodhatott. Kutatásom során a modern, pontfelhő alapú felmérési módszerek nyújtotta lehetőséget, a pontos boltozatgeometria ismeretét használtam fel az esettanulmányok elemzésekor. A felméréseket Leica BLK 360 térszkennerrel végeztem el, és a pontfelhőket Leica 360 Cyclon Register programmal dolgoztam fel. A szkennerek 20 méter távolságban ± 4 mm névleges pontossággal dolgozik, így figyelembe véve a felmért terek méreteit, a várható pontatlanságok 0,5-1 cm között mozoghatnak. A késő gótika korszakának építéstechnikája esetében ennél legalább egy nagyságrenddel nagyobb kivitelezési pontatlanság tételezhető fel, így az épületekről készült pontfelhők alkalmasak a szerkesztéstechnikai összefüggések feltárására.

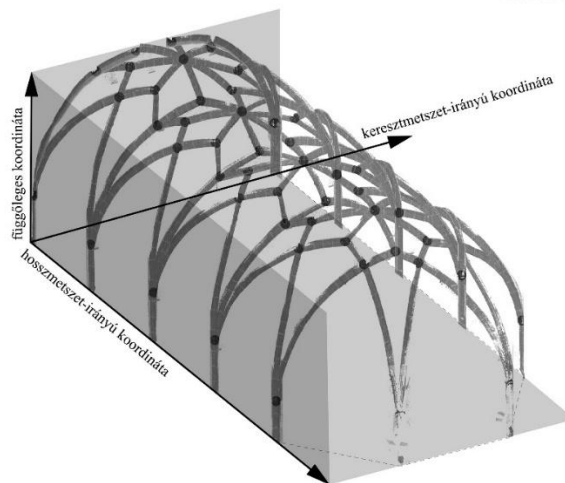
A doktori kutatásom során alkalmazott módszertan azon a feltevésen alapszik, hogy a boltozatok geometriája visszatükrözi az eredeti szerkesztéstechnikát, így a pontos geometria ismeretében az visszafejthető. A boltozatok geometriájában megjelenő szabálytalanságok tehát segítenek az eredeti technika rekonstrukciójában, hiszen teljesen szabályos geometriát többféle módszerrel meg lehet szerkeszteni, ám a “szabályos szabálytalanságok” ezek közül kizárnak opciókat. Ugyanakkor ahhoz, hogy ezt az ötletet valóban kihasználhassam a kutatás során, elsődleges fontossággal bírt az építéstörténet megismerése, mely alapján azonosítani lehet a geometria azon torzulásait, melyek az építés ideje óta bekövetkezett elmozdulások eredményei lehetnek.

A hálóboltozatok vizsgálatának első lépését kutatásom során a boltozatok szintvonalas ábrázolásának elemzése jelentette. Ez alapján a bordaháló és a süvegfelület kapcsolatára, valamint a süvegfelületek építésmódjára lehet következtetni, továbbá előzetes megállapításokra juthatunk a bordaháló globális geometriája tekintetében is.



1. ábra Szintvonalas ábrázolás elve. (Szeged-Alsóváros, szentélyboltozat)

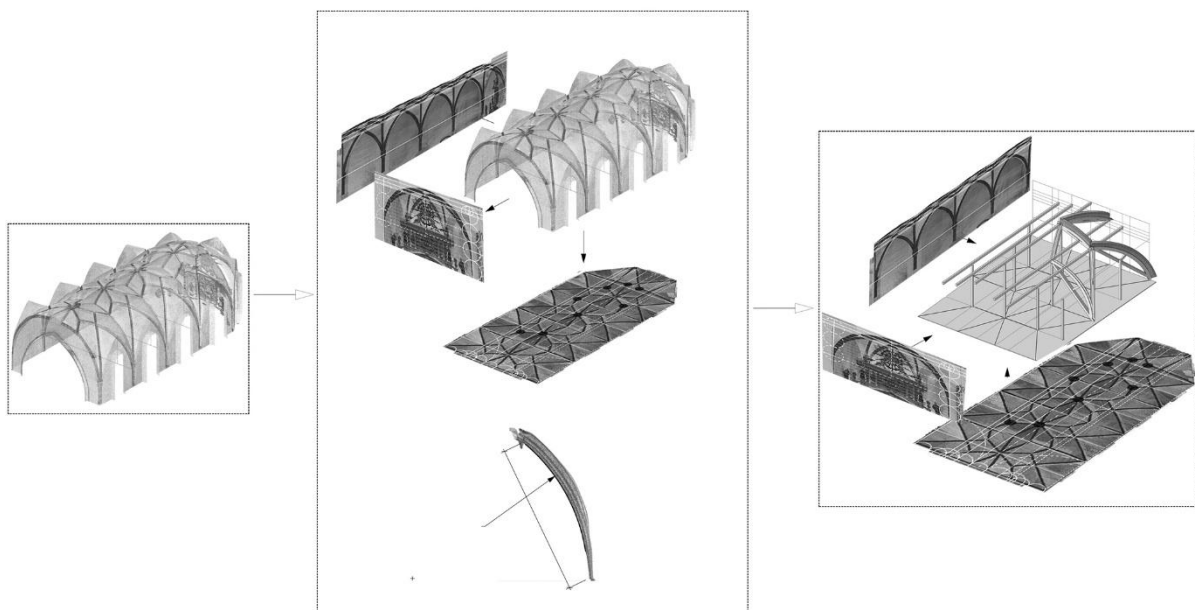
A hálóboltozatok elemzésének második lépése a bordaháló izolálása, és a bordacsomópontok térbeli helyzetének vizsgálata egy virtuális koordináta-rendszerben, mely tengelyei a boltozat hossz- és keresztirányát, illetve a függőleges irányt követik. Az elemzés eredményeként az adott boltozat építéskori felszerkesztésének kiindulási síkját (a bordacsomópontok elsőként meghatározott két koordinátáját), a kiindulási síkon végzett szerkesztések logikáját, valamint a csomópontok pozícióját meghatározó harmadik koordináta meghatározásának módjára születhetnek elméleti rekonstrukciók.



2. ábra Hálóboltozat bordahálójára illeszthető virtuális koordináta-rendszer (Szeged-Alsóváros, szentélyboltozat)

Az elemzés következő lépése a bordahálót alkotó bordák egyedi geometriájának elemzése, különös tekintettel a bordák görbületi sugaraira, mely célja annak azonosítása, hogy alkalmaztak-e vezérgörbe szerkesztést (vagy annak valamilyen változatát) a boltozat építői.

A kutatásom során végül az itt felvázolt boltozatelemzési lépések eredményei alapján a szakirodalmi forrásokban egymással összefüggésben említett vizsgált boltozatokat összevettem. Ennek eredményeként e boltozatok kontextusában először a teljes, pontos geometriájukat alapul véve születtek összehasonlítások, melyek esetenként erősítették, más esetekben viszont cáfolni látszottak a korábban, részgeometria (általában a bordaháló alaprajz rajzolata, vállkialakítások vagy bordaprofilok) alapján tett megállapításokat.



3. ábra Kutatási módszer a bordahálókra vonatkozóan: pontfelhő; geometriai elemzés vetületeken és bordákon; geometriai szabályosságok értelmezése szerkesztés- és építéstechnika formájában

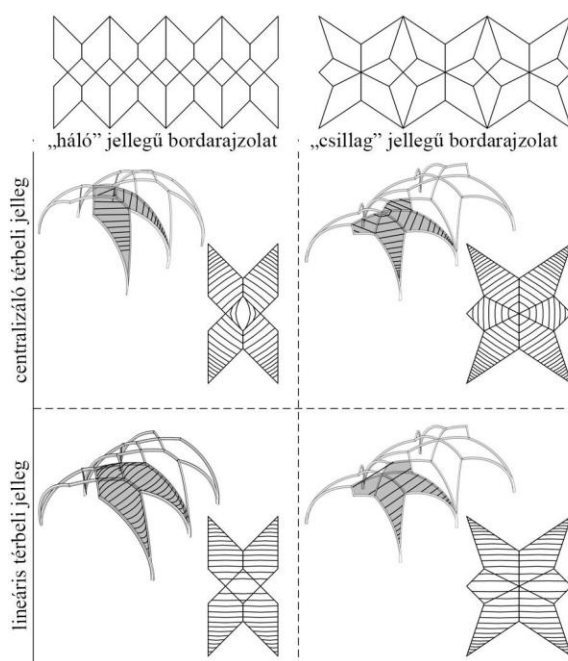
Tézisek

1. A késő gótikus hálóboltozatok esetében a centralizáló vagy lineáris jelleg független a boltozat bordahálójának rajzolatától, a bordaháló térbeli geometriájából vezethető le. Így ez a kérdéskör minden esetben külön vizsgálendő attól, hogy a boltozatot “csillagháló” boltozatnak tekinthetjük-e. [1] [4] [8]

Valódi hálóboltozatok esetében a kutatásom eredményei alapján a boltozatok globális geometriáját tekintve definiáltam a lineáris és centralizáló jellegű hálóboltozatokat. Lineáris hálóboltozat alatt azokat a hálóboltozatokat értem, melyek bordahálójában és a bordahálócsumópontok magassági pozíciói nem tükrözik a boltozat által fedett tér téregységeinek ritmusát. Centralizáló hálóboltozatok esetében a bordacsomópontok magassági pozíciói, és így a bordaháló globális geometriája, igazodnak a lefedett tér egységeihez, a téregység középpontjához képest centralizáló jellegűt vesznek fel. A megvizsgált esettanulmányaim alapján megállapítottam, hogy ez a lineáris vagy centralizáló jelleg független a bordaháló rajzolatától.

Egy adott boltozaton belül akár mindkét jelleg megjelenhetett. A két jelleg kombinációja mind a boltozat hossza mentén, mind a boltozat függőleges tengelye mentén váltva megjelenhet. (A medgyesi erődtemplom hajóboltozata esetén, ahol a bordaháló rajzolata alaprajzi vetület tekintetében egységesen szerkeszthető – és Parler boltozat típust képvisel – a boltozat keleti két travéja centralizáló, a nyugati travék lineáris jellegűt mutatnak. A segesvári Hegyi templom hajóboltozatai esetén a záradékon átforduló süvegek lineáris, míg a többi süveg centralizáló jellegűt mutat.)

Ezáltal a hálóboltozatok lineáris és centralizáló jellegének problémája a “csillagháló” boltozatok problémakörétől külön kezelendő. A csillagháló boltozatok esetében a centralizáló jelleg meglétének túl a bordaháló rajzolata tekintetében is megköveteljük (csillag-rajzolat), mely alapján a csillagháló boltozatokat a centralizáló jellegű hálóboltozatok alkategóriájaként értelmezhetjük.



4. ábra A bordarajzolat típusa és a süvegfelület globális jellege

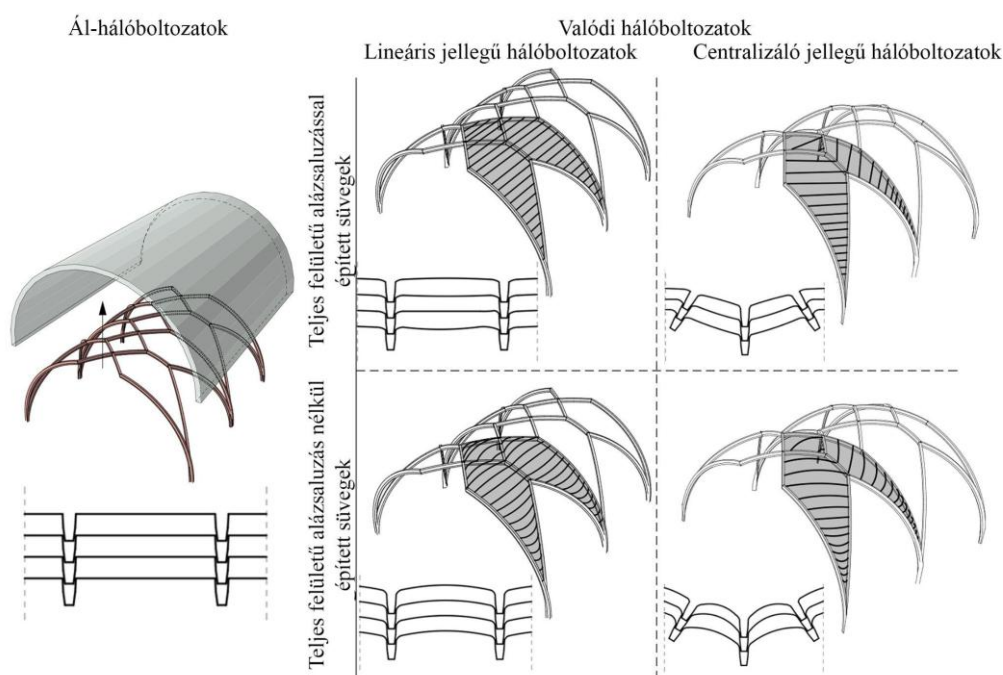
2. A kutatás során kidolgoztam a késő gótikus hálóboltozatok boltsüveg-bordaháló kapcsolatának geometria alapú, szerkesztés- és építéstechnikai tipológiáját. A tipológia megkülönbözteti a valódi hálóboltozatokat az ál-hálóboltozatoktól, valamint valódi hálóboltozat esetén a süvegfalazási technikákat (teljes felületű zsaluzattal vagy teljes felületű zsaluzat nélkül épített süvegek) az 1. tézisben megfogalmazott, térbeli bordaháló-geometriát érintő lineáris vagy centralizáló jellegekhez rendeli. [1] [4] [8] [10]

A kidolgozott tipológia alapját a hálóboltozatok pontos geometriája jelenti, melyből a bordaháló és süvegfelület kapcsolata szempontjából releváns adatokat a boltozatok szintvonalas ábrázolása alapján értelmeztem. A tipológia kategóriáit saját kutatási eredményeim, geometriai szükségszerűségek és szakirodalmi források alapján állítottam fel.

A hálóboltozatok a süvegfelület és bordaháló kapcsolata és geometriája alapján lehetnek valódi hálóboltozatok – mely esetben a bordaháló a süvegfelület előtt készült el, és a süvegfelületek építésekor “benmaradó zsaluzatként” szolgált – vagy ál-hálóboltozatok – mely esetben a süvegfelület a bordahálótól függetlenül, szerkezeti és építéstechnikai értelemben dongaboltozatként épült.

A valódi hálóboltozatok süvegfelületei építéstechnika tekintetében készülhettek teljes felületű zsaluzattal, vagy zsaluzat nélkül, kézből falazva. Előbbi esetben a zsaluzat formáját követve lapos süvegek alakulnak ki, melyek esetenként át is pattanhatnak, homorú ívet felvéve, állékonyságuk megőrzése mellett. Utóbbi esetben a süveg egyes téglasorai jelentős görbülettel rendelkeznek.

Valódi hálóboltozatoknál a bordacsomópontok relatív magassági pozíciói alapján elkülöníthetőek a centralizáló és lineáris jellegű hálóboltozatok (ld. 1. tézis), melyek bármelyik építéstechnikai megoldás esetében készülhettek. A bordaháló térbeli geometriája alapján megkülönböztethető jellegek a falazás irányát befolyásolják mind a teljes felületű zsaluzattal, mind az anélkül épített boltozatok esetében.



5. ábra A süvegfelületek globális jellege és a süvegfalazás módja

3. A bordaháló-alaprajz szerepe a hálóboltozatok szerkesztésében

A késő gótikus hálóboltozatok szerkesztéstechnikájának vonatkozásában a bordaháló-alaprajz felszerkesztése, mint a boltozatszerkesztés első lépése, valamint a bordaháló alaprajz a teljes boltozatgeometria tekintetében meghatározó volta, melyek a vonatkozó szakirodalom alapvetéseit jelentik, eredményeim alapján nem fogadhatók el általános jelenséggként a magyar emléktanyag tekintetében. [7] [3] [6] [9] [13]

A hálóboltozatok szerkesztés- és építéstechnikájának szakirodalmában általában alapvetésként jelenik meg az, hogy a boltozatot szabályos kontúrokkal rendelkező tér fölé (tehát a boltozat alaprajzát szabályos befoglaló formába) szerkesztik meg, valamint az, hogy a hálóboltozatok bordahálójának megszerkesztésekor az első lépés az alaprajzi vetület felszerkesztése. Ezen módszer – melynek alkalmazására gyakorlati bizonyítékokat is ismerünk (pl. Wells katedrálisában, vagy Lorenz Lechler fiának szóló traktátusában leírva) – doktori kutatásom alapján nem tekinthető kizárólagosnak. A megvizsgált esettanulmányok között azonosítottam olyan példákat (Szászbogács, Segesvár), melyeknél az alaprajzi síkról, tehát a kereszt- és hosszirányú koordinátákból kiinduló szerkesztés helyett a keresztmetszettel párhuzamos síkból, vagyis a keresztirányú és magassági koordinátákból kiinduló szerkesztés valószínűsíthető az eredetileg használt módszerként.

A megvizsgált példák, az azonosított szerkesztési logika és építéstechnikai szükségszerűségek alapján azt feltételezem, hogy az ilyen nem alaprajzi síkból kiinduló bordaháló szerkesztések alkalmazásának az volt az oka, hogy a beboltozandó tér alaprajzi kontúrja igen szabálytalan volt, és általában több építési periódus eredményeként állt elő. Ilyen esetekben a szabálytalan alaprajzi kontúrba szabályosan megszerkesztett bordaháló-alaprajz kétféle problémát idézhet elő. Amennyiben a szerkesztést a középvonaltól (záradék) kezdjük a falakhoz érkező bordák vállpontjai különböző magasságokba esnének. Ha viszont a szerkesztést a falaktól kezdjük, a záradékhoz két oldalról érkező bordák különböző magasságba érkeznek, így egymáshoz való csatlakoztatásuk, illetve a vízszintes záradékvonal létrehozása problémás. Természetesen ezekben az esetekben a pontatlanságok pontszerűen korrigálhatóak lennének a falaknál, illetve a záradéknál, ám egy ilyen korrekció vizuálisan kedvezőtlen megoldásokhoz vezetne. Míg ha a szerkesztést az alaprajzi sík helyett egy keresztmetszet irányú síkról kezdik meg, az alaprajzi kontúrok szabályostól vett eltérései – az azonosított példák tanúsága szerint is – több kis korrekcióval vehetőek fel a boltozat hossza mentén, mely vizuálisan egységesebb megoldást eredményez.

4. A késő gótikus hálóboltozatok bordahálójának tipológiája

A kutatás során kidolgoztam a késő gótikus hálóboltozatok bordahálójának geometriai alapú, szerkesztéstechnikai tipológiáját. Az így megállapított négy szerkesztéstechnikai alaptípus

- az egymástól függetlenül szerkeszthető csomóponti koordinátákon alapuló szerkesztéstechnika,
- az alaprajzi síkból kiinduló szerkesztéstechnika,
- a keresztmetszet irányú vetületből kiinduló szerkesztéstechnika
- valamint a hosszmeteszeti irányú vetületből kiinduló szerkesztéstechnika.

[7] [5] [6] [9] [11] [12]

A kidolgozott tipológia alapját a hálóboltozatok pontos geometriája jelenti, és elsősorban geometriai és építéstechnikai szükségszerűségeken alapul. A megvizsgált esetek az egyes definiált kategóriák példaként szolgálnak. A kidolgozott tipológia keretét egy virtuális koordinárendszer jelenti, melynek tengelyei a boltozat hosszirányának, keresztirányának és a függőleges irányának felelnek meg, és melyben az adott bordaháló csomópontjainak térbeli pozícióit vizsgálom. A vizsgálat célja annak a síknak – koordinátpárnak – az azonosítása, mely esetében a bordacsomópontok vetületi képei szabályos módon kiserkeszthetők, így a bordaháló felszerkesztésének kiindulási síkját jelenthette. Vizsgálati eredményeim, valamint geometriai és építéstechnikai szükségszerűségek (mint az, hogy a boltozatnak az építés minden fázisában állékonyan kell lennie) alapján négy elméleti kimenetele lehet ennek a vizsgálatnak. Ezek megfelelnek a felállított tipológia négy kategóriájának.

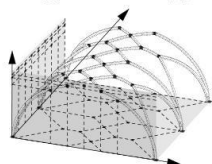
Az első az a kategória, mikor a bordacsomópontok pozícióját leíró mindhárom koordináta egymástól függetlenül szerkeszthető, tehát bármelyik koordináta kiserkeszthető anélkül, hogy a másik kettőt ismernénk. Az ebbe a típusba sorolható hálóboltozatok geometriai értelemben igen szabályosak (pl. Nyírbátor, templomboltozat; Szeged, sekrestyeboltozat; Gyulafehérvár, Lázói kápolna boltozata). Ez azzal jár, hogy a szerkesztés és építés valós eredeti sorrendjéről pusztán a geometria alapján nem lehet következtetéseket levonni.

A második kategóriába azok a hálóboltozatok tartoznak, melyek esetében az alaprajz (kereszt- és hosszirányú koordináták) szerkesztése megelőzte a magassági dimenzió meghatározását, vagyis amikor a csomópontok magassági pozíciója nem független alaprajzi pozíciójuktól. (Például azok az esetek, amikor a csomópont térbeli helyzete az alaprajzi pozíciójának adott felületre történő felvetítésével – mint a szegedi hajóboltozatnál –, vagy a “leghosszabb út elvén” való szerkesztéssel adódik.)

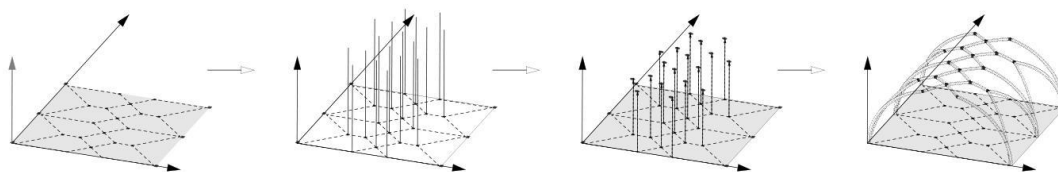
A harmadik kategória azokat a boltozatokat tartalmazza, melyek esetében a szerkesztés kiinduló síkját nem az alaprajz, hanem a keresztmetszetekkel párhuzamos sík (tehát a keresztirányú és magassági koordináták) jelentette. Ilyenkor a boltozat hossza mentén egymásnak megfeleltethető csomópontok olyan egyenesekre esnek, melyek a hosszmeteszeti irányából nézve párhuzamosak, de az alaprajzi vetületük nem párhuzamos egymással. Ezeken a térben definiált egyeneseken, melyek a csomópontok keresztirányú és függőleges koordinátáját meghatározzák, a csomópontok harmadik, hosszirányú koordinátája az általam azonosított esetekben (Szászbogács, hajóboltozat; Segesvár, Hegyi templom hajóboltozatai) az egyes bordatípusok húrhosszainak felhasználásával vált szerkeszthetővé.

A negyedik kategória azokra a boltozatokra vonatkozik, melyek szerkesztésének kiindulási síkja a hosszszeltekkel párhuzamos sík, tehát a hosszirányú és függőleges koordináták. Ez a kategória a feldolgozott esettanulmányok között nem jelent meg, így egyelőre csak elméleti lehetőségként említhető. Feltehetőleg ennek az az oka, hogy a módszer alkalmazásának ugyanaz lehetne az előnye, mint a harmadik kategória esetén, ám itt a korrekciók végrehajtására a boltozat hossza helyett csak a szélességének megfelelő hossz állna rendelkezésre, így összességében ez a megoldás kevésbé előnyös.

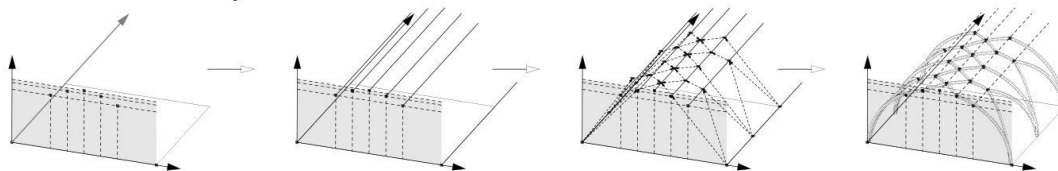
1. Egymástól függetlenül szerkeszthető csomóponti koordinátákon alapuló szerkesztéstechnika



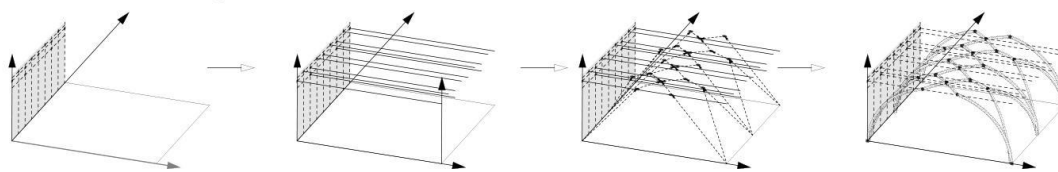
2. Alaprajzi síkból induló szerkesztéstechnika



3. Keresztmetszet irányú vetületből induló szerkesztéstechnika



4. Hosszszeltek irányú vetületből induló szerkesztéstechnika



6. ábra A bordaháló globális geometriájának szerkesztési módjára vonatkozó elméleti kimenetek szerkesztési logikája

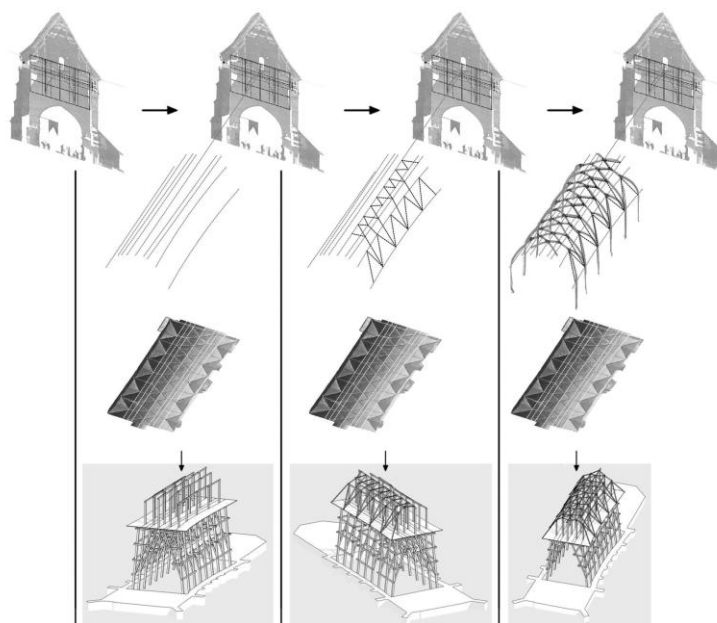
5. Kutatásom során esettanulmányaimat az 1., 2. és 4. tézisekben bemutatott tipológiák és geometriai szabályszerűségek alapján vizsgáltam. Ez egyes emlékek esetén az adott épület tekintetében jelentős eredményekre vezetett.

5.1. A szászbogácsi erődtemplom hajóboltozata esetén a boltozat bordahálójának részletes geometriai elemzése alapján elkészíttem a boltozat kitzúzési és építési folyamatának elméleti rekonstrukcióját, mely a bordaháló-geometria nagy fokú szabálytalansága, és az így pontosan azonosítható mögöttes szabályos rendszer azonosítása által volt lehetséges. [12]

A szászbogácsi hajóboltozat bordahálóját valószínűleg a keresztmetszet irányú vetületből induló szerkesztésmód példáját jelenti. A bordacsomópontok keresztirányú koordinátái alaprajzon jól definiálható egyenesekre esnek (kivéve a legdélibb csomópont-sor). Ezek az egyenesek viszont csak a hosszmetset irányú vetületben párhuzamosak egymással: alaprajzi értelemben az északi és a déli oldal egyenesei sem a másik oldal egyenesével, sem a záradékvonallal nem párhuzamosak. Alaprajzi értelemben azt állapítottam meg, hogy az északi oldali egyenesek az északi hajófal, míg a déli oldaliak a déli hajófal keleti végével párhuzamosak (a hajófalak nem egyenesek a boltozat magasságában).

Az azonosított egyenesek keleti fallal vett metszéspontjai esetében mind a keresztmetszet irányú, mind a magassági koordináták szabályosan szerkeszthetőnek adódtak. Így feltételezésem szerint ezek a „térben definiálható” egyenesek jelentették a boltozat kitzúzésének alapját, és valószínűleg fizikai értelemben is megjelentek építés közbeni segédszerkezetek formájában.

A bordacsomópontok harmadik, hosszirányú koordinátáját eredményeim alapján a bordák bordatípusonként (az adott boltozatban azonos szerepet betöltő bordák) vett igen egységes húr hosszértékei segítségével szerkeszthették meg. A húr hosszértékek típusonként vett kis szórása azért is kiemelkedő, mert a bordák alaprajzi hosszai esetében ugyanilyen szabályosság nem figyelhető meg. Az egyes bordatípusokhoz tartozó húr hosszértékek szórásának mértéke alapján a kitzúzés pontos sorrendjére is következtetni tudtam.



7. ábra A szászbogácsi hajóboltozat rekonstruált szerkesztéstechnikájának építés közbeni segédszerkezetként való megjelenése. Elméleti rekonstrukciók

5.2. A szeged-alsóvárosi Havas Boldogasszony templom hajóboltozata esetén a boltozat bordahálójának és süvegfelületének részletes geometriai elemzése alapján elkészítettem a boltozat szerkesztés- és építéstechnikájának elméleti rekonstrukcióját, mely ellentmond a szakirodalomban e szerkezet kapcsán gyakran felmerülő ál-hálóboltozat elméletnek. [10]

Vizsgálataim során megállapítottam, hogy a bordacsomópontok alsó síkja (nem pedig a süvegek alsó síkja) tűnik a magassági értelemben meghatározott pontok halmazának: A hajó keresztmetszetébe a járószint és a záradéki csomópontok alsó síkjának távolságával mint átmérővel meghatározható kör írható. Ez a körív határozza meg a többi bordacsomópont magassági pozícióját is.

A boltozat szintvonalas ábrázolásán a süvegfelületek vízszintes metszetszonalainak alakja a boltozat alsó zónájában (a falaktól számított második sor fallal párhuzamos borda alatt) lényegében függetlennek tűnik a boltozati bordák pozíciójától, kivéve a vállak és a fiókok közti mezők alsó, fiókokhoz kapcsolódó részén, ahol a metszetszonalak először a fallal szöveget zárnak be, és a fiókok csúcsának eléréséig fokozatosan a fallal párhuzamos helyzetbe fordulnak be. A boltozat felső zónájában a metszetszonalainak alakja nem független a boltozati bordák elhelyezkedésétől. A metszetszonalak az alsó zónában egyenesek, a felső zónában alapvetően egyenesek, de esetenként konkáv módon ívelté válnak.

A boltozat déli oldalán a boltozat majdnem teljes hosszában „horpadás” jelenik meg (melyet korábban is megfigyeltek már). Vizsgálataim alapján hajófalak függőlegesek, így nem azok mozgása okozta a deformációt. Ez, valamint az, hogy a “horpadás” sok boltmezőn keresztül az egész boltozaton fokozatosan jelentkezik arra enged következtetni, hogy a deformáció már a boltozat építése közben bekövetkezhetett, majd ez az állapot rögzült. Az, hogy a bordaháló és a süvegfelületek ezen a részen azonos módon idomulnak a deformált boltozatformához arra utal, hogy a boltozat két része egyszerre vette fel ezt a formát, feltehetőleg az építés közbeni segédstruktúrák deformációi nyomán.

Véleményem szerint először a bordaháló zsaluzata készülhetett el, feltehetőleg teljes felületű zsaluzatként, majd felépült a bordaháló. (A boltozat déli oldalán megfigyelhető deformáció e lépés során keletkezhetett.) A bordaháló elkészülte után megkezdődhetett a süvegfelületek építése. Ez a falak melletti szakaszon még történhetett zsaluzat nélkül, ám feljebb a teljes felületű zsaluzatok alkalmazását tartom valószínűnek. A boltozat alsó zónájának feltűnő dongajellege miatt azt is elképzelhetőnek tartom, hogy itt a boltozat dongaboltozatként épült, a falaktól soronként konzolosan kinyújtva. Az, hogy a boltozat alsó és felső zónájának határa kicsivel a boltozat keresztmetszeti szegmensívének harmadolópontja elé esik, tehát oda, ahol a lapos ívek tönkremenetele elsőként megtörténik, szintén emellett az elmélet mellett szólhat. A két zóna határának elérése után a boltsüvegek építése alázsaluzott technikával folytatódhatott.

6. **A hálóboltozatok egymással való műhely- vagy építőmester-kapcsolatait a boltozatoknak a három dimenzióban értelmezett geometriai jellemzői alapján nagyobb valószínűséggel ítéltük meg, mint a szakirodalomban bevett, bordahálók rajzolatának azonosságán vagy hasonlóságán alapuló módszerekkel. Ennek oka az, hogy a háromdimenziós geometria alapján a dolgozatomban használt módszertan alkalmazásával a boltozatok szerkesztés- és építéstechnikai módszereire is következtethetünk. E tézis alkalmazását több, a szakirodalomban rendszerint egymással összefüggésben említett emlékpár vagy emlékcsoport esetén is bemutattam. Az összehasonlító elemzések egyes esetekben a feltételezett kapcsolat mellett, míg más esetben az ellen szóló érveket eredményeztek. [2] [3] [4] [7] [9] [10]**

A kutatás során feldolgozott esettanulmányok közül többenél is felmerült a szakirodalomban az egymással való szorosabb építéstörténeti kapcsolat (tehát: műhelykapcsolat vagy azonos építőmester) lehetősége. Ugyanakkor ezt általában nem írott forrással, hanem a boltozatok „hasonlóságával” (pl. bordaháló hasonló kialakítása) támasztották alá. Az új, pontos felmérési technikáknak köszönhetően lehetőség nyílik a formai hasonlóságokon túl mélyebb összefüggések vizsgálatára is.

Az 1-4. tézisekben ismertetett tipológiák alapját jelentő vizsgálatok alkalmazásával megállapítottam, hogy noha a szakirodalom a szeged-alsóvárosi ferences templom hajóboltozata és a nyírbátori templom boltozata kapcsán még ugyanannak a „János testvérnek” a működését is elképzelhetőnek tartotta, a két boltozat szerkezete egymástól határozottan eltérő: A szegedi boltozatnál a boltsüveg és a borda kapcsolata tekintetében ál-hálóboltozatokra, illetve lineáris, teljes felületű zsaluzatra épített süvegekkel készült valódi hálóboltozatokra utaló jelleg figyelhető meg a szintvonalas ábrázoláson, míg a nyírbátori boltozat esetében a zsaluzat nélkül épített valódi hálóboltozat jelleg dominál, és alapvetően centralizáló egységekből épül fel. Továbbá a szegedi boltozat bordahálójának globális geometriája alaprajzi síkból kiinduló szerkesztésre utal, ahol a magassági koordináták nem függetlenek a csomópontok kereszt- és hosszirányú koordinátáitól, míg a nyírbátori boltozat esetében a bordacsomópontok pozícióját leíró három koordináta egymástól függetlenül szerkeszthető. Tehát a két hálóboltozat esetén mind a geometriai jellemzők, mind az azokból kikövetkeztethető szerkezeti megoldások és rekonstruálható építési módszerek különbözőek. Így a szakirodalomban megfogalmazott szoros formai kapcsolat gondolata megkérdőjelezhető, bizonyíthatósága szerkezeti szempontból felülvizsgálandó.

Azonos módszerrel vizsgálva a szászboágcsi erődtemplom hajóboltozatát és a segesvári Hegyi templom északi mellékhajójának boltozatát – melyek esetén a műhelykapcsolat megléte szintén felmerült a szakirodalomban – arra láthatunk példát, hogy a feltételezett kapcsolatot a formai hasonlóságon túl a szerkesztési elvek, és a rekonstruálható építési módszerek is alátámasztják. A geometriai szerkesztés részletei ugyan mutattak kis eltéréseket, de a szerkesztés alapvető stratégiája azonosnak bizonyult (a keresztmetszettel párhuzamos síkból indított szerkesztések esete). Így ebben az itt az esetleges kapcsolat fennállásának elméletét a szerkesztés- és építéstechnikai elemzés inkább megerősítette.

Összefoglalás és a kutatás további irányai

A kutatás során a késő középkori hálóboltozatok pontos geometrián alapuló szerkesztés- és építéstechnikai elemzése, geometria alapú tipologizálása, és a vizsgált esettanulmányok esetében a fentiek alapján a korábban feltételezett építőműhely-, építőmester-kapcsolatok összehasonlító geometriai elemzés alapján való felülvizsgálata történt meg. Meghatároztam a pontfelhő alapú felméréssel feldolgozott boltozatok geometria alapú szerkesztés- és építéstechnikai elemzéséhez használható faktorokat és javaslatot tettem azok vizsgálatának gyakorlati megvalósítására. A pontos geometriai leírások alapján, szerkesztés- és építéstechnikai szükségszerűségek figyelembe vétele mellett felállítottam a késő gótikus hálóboltozatok boltsüveg-bordaháló kapcsolatainak, valamint a bordaháló globális geometriájának tipológiáját. Az összehasonlító elemzések eredményei alapján nemcsak olyan példák kerültek elő, melyek esetében a szakirodalom korábbi feltételezései az épületek esetleges kapcsolatáról a pontos geometria ismeretében is alátámaszthatóak, hanem olyanok is, melyek esetében a feltételezett szoros kapcsolat fennállásának valószínűségét kutatásom eredményei jelentősen csökkentették.

A kutatás további irányát jelentheti egyrészt az esettanulmányok körének bővítése, és ezzel az összehasonlító elemzések sorának folytatása a disszertációban alkalmazott módszertan és tipológia felhasználása segítségével. A kutatás másik lehetséges folytatása 19. században épült háló- és csillagboltozatok elemzése azonos módszerrel, mely lehetőséget ad egyfelől ezek “eredeti”, középkori megfelelőikkel való összevetésére, másfelől pedig a 19. századi elmélet és gyakorlat egymással való viszonyának tisztázására. (Utóbbi irányba az EKÖP-24 pályázat keretein belül a kassai dóm hajóboltozatainak vizsgálatával már elindultam.)

Tézisekhez kapcsolódó publikációk

- [1] Jobbik Eszter, Halmos Balázs: Point cloud-based geometric net vault analysis and the question of ‘stellar-net vaults’, discussed apropos of the vault of the Lázói chapel in Alba Iulia. – *ACTA HISTORIAE ARTIUM* – elfogadva, megjelenés alatt
- [2] Jobbik Eszter, Daragó László: Geometry-based ‘building archaeology’ and comparative analysis of the curvilinear ribbed net vaults in Siklós and Andocs. *MATERIALI E STRUTTURE* – elfogadva, megjelenés alatt
- [3] Jobbik Eszter: Terrestrial laser scanning as a tool for geometry-based building genealogy research: St Martin’s in Landshut and two South-Transylvanian Saxon Churches. *STUDIA UBB HISTORIA ARTIUM* – elfogadva, megjelenés alatt
- [4] Jobbik Eszter, Krähling János: Mapping rib-webbing connections in Late Gothic net vaults: A geometry-based typology. *DIGITAL APPLICATIONS IN ARCHAEOLOGY AND CULTURAL HERITAGE* 35 (2024)
<https://doi.org/10.1016/j.daach.2024.e00388> - Scopus
- [5] Jobbik Eszter, Budaházi Fanni: ‘Building Archaeology’ with Laser Scanning: Geometry-Based Architectural Analysis of the Franciscan Church of Szeged-Alsóváros. *ANNALES UNIVERSITATIS APULENSIS. SERIES HISTORICA* 27 (2023) Online first publication.
<https://doi.org/10.29302/auash.2023.27.1> - Scopus
- [6] Jobbik Eszter, Krähling János: The Geometric System of the Nave Vault of the Church on the Hill of Sighișoara. *STUDIA UBB HISTORIA ARTIUM* 68 (2024) pp. 7-43.
[10.24193/subbhistart.2023.01](https://doi.org/10.24193/subbhistart.2023.01)
- [7] Jobbik Eszter, Krähling János: A Methodological Approach and Geometry-Based Typology of Late-Gothic Net Vaults’ Rib Systems. Presented on Case Studies from Historic Hungary. *NEXUS NETWORK JOURNAL* 27 (2024). pp. 95-117.
<https://doi.org/10.1007/s00004-024-00780-1> - WoS, Scopus
- [8] Jobbik Eszter: Linear and Centralised Net Vaults. Geometry-Based Building Archaeology Presented on the Net Vaults of the Fortified Church of Mediaș. *ÉPÍTÉS-ÉPÍTÉSZETTUDOMÁNY* 52 (2024) 1-2 pp. 25-47.
<https://doi.org/10.1556/096.2024.00118> - Scopus
- [9] Jobbik Eszter, Krähling János: Approaching Building Connections Based on Net Vaults’ Geometric Analysis. The Vaults of the Church on The Hill of Sighișoara and the Church of Băgaciu. *BRUKENTHAL. ACTA MUSEI* 18 (2023) 1 pp. 49-68. - Scopus
- [10] Jobbik Eszter, Krähling János: Real Net Vault or Pseudo-Ribbed Net Vault? Geometry, Construction and Building Technique of the Vault of the Reformed Church of Nyírbátor and the Nave Vault of the Franciscan Church of Szeged-Alsóváros. *ÉPÍTÉS – ÉPÍTÉSZETTUDOMÁNY* 51 (2023) 3–4 pp. 229–256.
<https://doi.org/10.1556/096.2023.00100> - Scopus
- [11] Jobbik Eszter, Krähling János: Remodelling a medieval net vault construction. Case study: the apsis vault in the catholic church of Andocs. *ÉPÍTÉS-ÉPÍTÉSZETTUDOMÁNY* 50 (2022) 3-4 pp. 317-349.
<https://doi.org/10.1556/096.2022.00077> - Scopus
- [12] Jobbik Eszter, Krähling János: Late Mediaeval Net Vault Construction Method Rediscovered by Geometric Analysis. A Case Study of the Fortified Church of Băgaciu (Bogeschkdorf). *BRUKENTHAL. ACTA MUSEI* 17 (2022) 2 pp. 179-201. - Scopus

Egyéb, tézisekhez nem kapcsolt publikációk a doktori képzés időszakából:

- Jobbik Eszter: Vezérgörbe és a leghosszabb út, avagy hogyan szerkesszünk hálóboltozatot? In: Nagy Gergely Domonkos (szerk.): *FIATAL MŰEMLEKVÉDŐK FÓRUMA 2022*. Budapest: ICOMOS Magyar Nemzeti Bizottság (2022) pp. 15-40 ISBN:9786158209922
- Jobbik Eszter, Krähling János: A Self-contained Stellar Vault Construction Method. The Vault of the Matthias Oratorio in the Inner City Parish Church of Budapest, *PERIODICA POLYTECHNICA ARCHITECTURE* 54 (2023) 1 pp. 73–85.
<https://doi.org/10.3311/PPar.21454>
- Jobbik Eszter, Krähling János: A Cross-Vault System's Relative Periodisation Based on Geometric Analysis. The Vaulting System of the Apse of the Inner City Parish Church of Budapest. *ÉPÍTÉS-ÉPÍTÉSZETTUDOMÁNY* 51 (2023) 1-2 pp. 115-137.
<https://doi.org/10.1556/096.2023.00091> - Scopus
- Jobbik Eszter, Daragó László: Charnay-les-Macon - 2016. In: Daragó, László Attila: *Románkori templomok Burgundiában 2. : Műemléki felmérések a BME Építészettörténeti és Műemléki Tanszékén 2016-2022*. Budapest, Magyarország : Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építészmérnöki Kar, Építészettörténeti és Műemléki Tanszék (2023) pp. 12-31.
- Jobbik Eszter, Daragó László: Igé (Domange) - 2017. In: Daragó, László Attila: *Románkori templomok Burgundiában 2. : Műemléki felmérések a BME Építészettörténeti és Műemléki Tanszékén 2016-2022*. Budapest, Magyarország : Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építészmérnöki Kar, Építészettörténeti és Műemléki Tanszék (2023) pp. 32-51.
- Jobbik Eszter, Daragó László: Laizé - 2017. In: Daragó, László Attila: *Románkori templomok Burgundiában 2. : Műemléki felmérések a BME Építészettörténeti és Műemléki Tanszékén 2016-2022*. Budapest, Magyarország : Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építészmérnöki Kar, Építészettörténeti és Műemléki Tanszék (2023) pp. 52-71.
- Jobbik Eszter: Analysing Construction and Building Techniques of Neogothic Stellar Vaults. The Case of the Cathedral of Košice. *ÉPÍTÉS-ÉPÍTÉSZETTUDOMÁNY* 53 (2025) 1-2. pp. 21-54.
<https://doi.org/10.1556/096.2025.00140> - Scopus