Dr. Pongrácz Pál
A hegedűről ma
Hagyományok, tévelygések, távlatok
Budapest, 2009.

Dr. Pongrácz Pál

A hegedűről ma

Hagyományok, tévelygések, távlatok

Budapest, 2009.

A HEGEDŰRŐL MA

dr. Pongrácz Pál

A HEGEDŰRŐL MA

HAGYOMÁNYOK, TÉVELYGÉSEK, TÁVLATOK

tanulmányok

Budapest, 2009.

A HEGEDŰRŐL MA

tanulmányok

A tanulmányokat szakmailag véleményezték:

I.	A hegedű formavilága és kialakulása	Temesvári Péter hegedűkészítő mester
II.	A hegedű analóg statikai elemzése	dr. Matuscsák Tamás † okl. építészmérnök, egyetemi tanár és Semmelweis Tibor hangszerkészítő mester
III.	A hegedűgerenda mai szemmel	Szabó István építőmérnök, hangszerész mester
IV.	A húrlábról – ahogyan ma játjuk	Temesvári Péter hegedűkészítő mester
V.	A hegedűépítés régi-új dilemmái	Temesvári Péter hegedűkészítő mester

A szöveget gondozta: Újlaki Pongrácz Zsuzsánna
A rajzokat készítette: dr. Pongrácz Pál
A borítót tervezte: Szabó Borka

© dr. Pongrácz Pál

Minden jog fenntartva.
Jelen könyvet, illetve annak részeit a szerző előzetes írásos engedélye nélkül tilos reprodukálni, adatrögzítő rendszerben tárolni, bármilyen formában vagy eszközzel – elektronikus vagy más módon – közölni.

Felelős kiadó: Ad Librum Kft.ügyvezetője
1107 Budapest, Mázsa tér 2-6., info@adlibrum.hu www.adlibrum.hu

ISBN 978-963-9934-18-4

A könyvvel kapcsolatban további információ: http://adlibrum.hu/Pongracz-Pal

Tartalom

Ajánlás 9

I. A HEGEDŰ KIALAKULÁSA ÉS FORMAVILÁGA 11
Bevezetés 13
1. A hegedű – a hegedűforma – kialakulása 13
2. Társadalmi, gazdasági és szellemi áramlatok Európában a hegedű kialakulásának idején 19
3. Képzőművészeti stílusirányzatok a 16-17. századi Itáliában 23
3.1. Reneszánsz képzőművészet 23
3.2. Barokk képzőművészet 28
4. Forma a művészetben – a hegedű formavilága 33
4.1. A képzőművészet formaelemei 33
4.2. A hegedű formajegyei 35
4.3. A hegedű formavilága és a reneszánsz alkotószemlélet 39
4.4. A hegedű barokk formajegyei 47
5. Hatástendenciák 49
Töprengés (utószó helyett) 55

II. A HEGEDŰ ANALÓG STATIKAI ELEMZÉSE 57
Bevezetés 59
1. A hegedűben fellépő erőhatások 61
1.1. A húrokban lévő feszítőerők 61
1.2. A húrokban keletkezett húzóerők hatására a hegedűtestben kialakuló erők 65
1.3. A nyakban fellépő erők 72
1.4. A korpuszban ható erők 81
1.5. Az eltérő alaphangú húrokban keletkező erők és hatásaik 89
1.6. A korpuszban kimutatható nyíróerők 100
1.7. A lábban kialakuló belső erők 103
1.8. A kulcsok csavaró igénybevétele és a kulcsház hasítószilárdsága 107
1.9. A hegedűtestben a terhelhető erők hatására bekövetkező lassú alakváltozás 111
2. A hegedű használata közben fellépő külső erőhatások 115

III. A HEGEDŰGERENDA MAI SZEMMEL 119
Bevezetés 121
1. A gerenda és a hegedűszerkezet viszonya 123
1.1. A gerenda és a húrnyomás 123
1.2. A gerenda és a mechanikai rezgés 137
2. A gerenda beillesztésének a módjai 144
2.1. Befeszítés nélküli gerenda 149
2.2. Két végén befeszített gerenda 149
2.3. Középen befeszített gerenda 151
2.4. A különböző beillesztési módok célszerű alkalmazásai 153
3. Az anyag rugalmassága és fáradása 155
3.1. A faanyag korróziója 155
3.2. A tartós terhelés és a lassú alakváltozás 156

IV. A HÚRLÁBRÓL – AHOGYAN MA LÁTJUK 161
Bevezetés 163
1. A húrláb szerepe és jelentősége 163
2. Korábbi vélekedések a húrlábról 168
3. A húrban keletkező erők és mechanikai rezgések hatása a húrlábra 169
3.1. A húr felhangolása során fellépő erők 169
3.2. A húr mechanikai rezgéséből létrejövő erők 172
4. A húrláb szerepe a húrokban keletkező mechanikai rezgések továbbításában 175
5. A mechanikai rezgések, mechanikai hullámok kialakulása és terjedése a hegedűtestben 183
Utószó 190

V. A HEGEDŰÉPÍTÉS RÉGI-ÚJ DILEMMÁI 191
Bevezetés 193
1. A klasszikus hegedűépítés kora 193
1.1. A kialakulás és a tökéletesedés időszaka 193
1.2. A hegedű térhódítása a zenevilágban 196
2. Zavaró jelenségek a hegedűépítésben 200
2.1. Hiedelmek, tévelygések 200
2.2. Áltudományok, ellentmondások 206
2.3. Önelvűség, retrográd jelenségek 209
3. A hegedűépítés dilemmája napjainkban 212
3.1. A programozott, gyári hegedűgyártás kihívásai 212
3.2. Az egyedi, alkotó hegedűépítés reformlehetőségei 214
Utószó 217

Mellékletek 219
1. A hegedű kialakulásának és a művészeti stíluskorszakoknak időrendi összehasonlítása 219
2. A számítások során alkalmazott hegedűméretek 220
3. A hegedűépítésben használt fafajták átlagos statikai értékei 221
4. A tanulmányban alkalmazott statikai alapfogalmak 222
5. A belső és a külső erőhatások következtében a hegedűtestben leggyakrabban bekövetkező sérülések és okozói 226

Irodalom 227

A tanulmányokban szereplő képek forrásjegyzéke 231

Jegyzetek 232

Ajánlás

A hegedűről könyvtárnyi szakirodalom jelent már meg. Ennek többsége a hangszernek mint zeneeszköznek a zeneéletben betöltött szerepét taglalja, de sok közülük mint tárgyi alkotásnak a kialakulásával, fejlődésével, készítésével, esztétikai értékeivel foglalkozik. Úgy tűnik, mindent megírtak róla már, amit mondani lehet.

Vagy mégsem?

A valóság erre utal. Összevetve a korábbi tanulmányokban megfogalmazott vélekedéseket a mai ismeretekkel, esetenként kételyek támadnak bennünk a fellelhető megállapításokkal, következtetésekkel szemben.

Értelemszerű, hogy a közel öt évszázaddal ezelőtt intuíció alapján megalkotott hegedű, ugyanúgy, mint kiteljesedése után a vele foglalkozó elméleti munkák magukban hordozzák keletkezésük korának szemléletét, ismereteit. A hegedű kialakulásának idején még általánosan hitték, hogy a Nap forog a Föld körül, ma pedig az ember kilépett a világűrbe! A mechanikai rezgésről, a hanghullámról a tapasztaltakon kívül még nem létezett fogalom. Ismeretlen volt az anyag szerkezeti felépítése, alkotó részecskéinek mozgástörvénye. Igaz a kő akkor is „lefelé esett", de még csak nem is sejtették az energiaátalakulás és az energia-megmaradás következő korok gondolkodását és cselekvését befolyásoló szerepét.

Napjaink ismeretanyaga kiszélesedett és elmélyült. Az alkotó munkában a tapasztalatok mellett élre tört a tudomány és a különböző tudományterületek integrálódása új alkotóerővé vált, és visszahat a korábban megfogalmazott következtetésekre.

Ezeknek a viszonyoknak az összevetésével, elemzésével foglalkozik e tanulmánygyűjtemény, mint például:

- *a több évszázaddal ezelőtt kialakult, napjainkban is alkalmazott hegedű-szerkezet állékonysága tapasztalatban már jól ismert, de milyen eredménnyel bizonyítható elméletben – a mai fizikai ismeretekkel – az igénybevétellel szembeni statikai ellenálló képessége?*

- *elfogadott nézet a zenevilágban, hogy a hegedű életkorának növekedése (anyagának öregedése) előnyökkel jár. Miért kell akkor mégis egyik beépített szerkezeti elemét, a gerendát időnként újra kicserélni?*

- *igazolható-e elméleti összefüggésekkel, hogy a „bejátszás" eredményezi a hegedű hangzásának kiteljesedését, avagy az állandó húrfeszültség, a tartós terhelés hatására a hangszer anyagában lejátszódó folyamat, a molekuláris erők konstellációjának módosulása járul hozzá a mechanikai rezgés előnyös kibontakozásához?*

- *s végül rámutat azokra az összefüggésekre, amelyek a korszerű ismeretek felhasználásával az évszázadokon keresztül megőrzött hegedűkonstrukció „rejtett" lehetőségeinek hatékonyabb, szabad érvényesülését segíthetik elő.*

I.

A HEGEDŰ KIALAKULÁSA ÉS FORMAVILÁGA

Bevezetés

A fejlődéstörténeti, művészettörténeti kutatások egyaránt tanúsítják, hogy a használati tárgyak szinte kivétel nélkül hűen tükrözik létrehozó koruk technikai fejlettségét, jellemző formajegyeit. Különösen, ha a kialakításukat nemcsak a célszerűség, hanem ezzel együtt külön díszítőszándék is motiválta (bútorok, kerámiák, üvegtárgyak, fegyverek stb.). Ennek mindenkori serkentője az ösztönös alkotói képzelőerő és az ismertté vált formaalakító művészet szellemi kisugárzása. A vizuális művészetek hatása régtől kimutatható a különböző használati tárgyak formáiban, formaelemeiben.

A hegedű mint használati tárgy – zeneszerszám – ugyanúgy magán hordozza kialakuláskori társadalmának technikai fejlettségét, formáló készségét. S mivel a hangszer a szellemi világ tárgyi eszköze, megjelenésében, mi több formajegyeiben megkerülhetetlenül érvényesül kora mentális szemlélete, művészetének eszmei világa is. Növeli ennek hitelességét, hogy a hegedűt szinte kialakulása óta műalkotásnak tekintették. De honnan s miből ered ez a megítélés, milyen bizonyítható tények támasztják alá? E mögött nagy valószínűséggel a vizuális művészetek és a hegedű formavilága között rejlő kapcsolat sejlik. Olyan viszony ez, amely a művészetek között egyetemlegesen jellemző, s a hegedű kialakulásának idején meghatározó művészeti stílusszemlélet hatásában kereshető.

A tanulmányban áttekintjük azokat az összefüggéseket, amelyek a hegedű sajátos formavilága és kialakulása idején meghatározó társadalmi jellemzők, szellemi irányzatok, illetve a vizuális művészetben kibontakozó stílusfelfogások között kimutathatók.

1. A hegedű – a hegedűforma – kialakulása

A hangszertörténeti kutatások a bizonyító erejű dokumentumok gyér száma miatt csak megközelítő pontossággal és jelentős eltéréssel jelölik meg a hegedű kialakulásának idejét. Egyes források a 16. század elejére helyezik. J. H. van der Meer *A hangszerek* című művében írja: „... a hegedű keletkezését nagy valószínűséggel legkésőbb a 16. század húszas éveire tehetjük.[1]

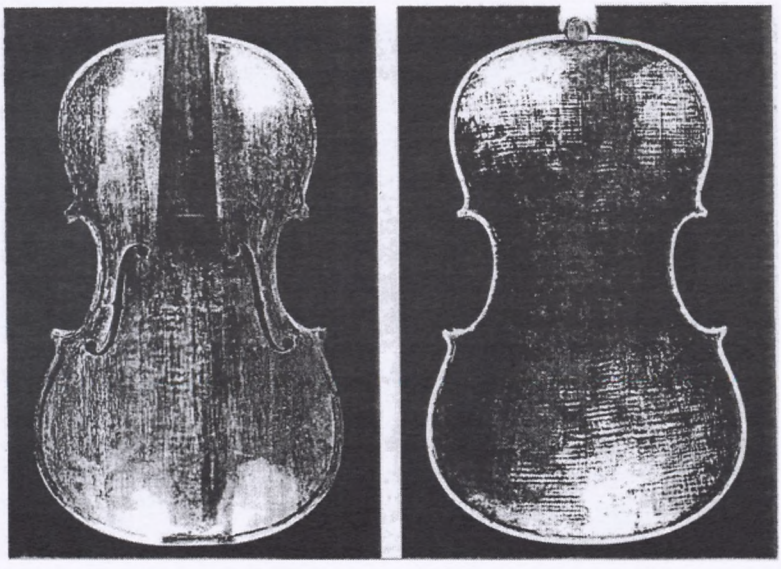
A *Hangszerek Enciklopédiája* szerint a hegedűcsalád legkisebb tagja, a violin, 1550 táján alakult ki a középkori fidula, rebek és a lira da braccio hangszerekből. Ezek már „négy húrral, oldalállású hangolókulcsokkal, behajló oldallappal és *f*-alakú hanglyukakkal rendelkeztek, és alig különböztek a mai hangszerektől".[2]

Abban is bizonytalan a történetírás, hogy kinek a nevéhez fűződik a hegedű ma is követett formájának kialakítása. Vannak, akik kétségbe vonják, hogy egyetlen alkotóhoz kapcsolható, véleményük szerint hegedűépítő nemzedékek során alakult ki. Ennek ismerete azonban nemcsak hangszertörténelmi szempontból jelentős, hanem közelebb vinne bennünket a hegedű formai kialakulására ható tényezők megismeréséhez, a hegedűforma és a vizuális művészet rejtett kapcsolatához.

Több irodalmi forrás – tudományos hitelességű bizonyítás nélkül – Kaspar Tieffenbrucker (Gaspar Duiffopruggar, 1514–1571) nevéhez kapcsolja a hegedű „feltalálását". A neki tulajdonított hegedűkről azonban később bebizonyosodott, hogy azokat a nála mintegy kétszáz évvel később élő Jean Baptiste Vuillaume (1798–1875) francia hegedűépítő készítette.[3] Mások Bertolotti Gasparo da Salot, illetőleg Andrea Amatit tartják a hegedű megalkotójának. Valójában e két itáliai hegedűkészítőtől ismerünk a legkorábbi időből – a 16. század második felének közepe tájáról – mai, korszerű tudományos vizsgálatokkal bizonyítottan eredeti hegedűt, illetve brácsát. Mindez azonban nem zárja ki, hogy ezek a mesterek az eddig feltárt életrajzi adataikból következtetve nem építhettek már korábban ilyen hangszereket. Nehezíti a valóság megismerését, hogy ezek az adatok sem tekinthetők bizonyosnak. A különböző szakirodalmi forrásokban az egyikmásik mesternél feltüntetett évszámok között eltérések adódnak. Gasparo da Salo születési évét 1537, illetve 1542-re, elhalálozásának időpontját 1609-re teszik.[4] Ez a kismértékű időbeli különbség a születés lehetséges dátumai között vizsgálódásunk során még nem okoz gondot. Andrea Amati esetében azonban már bizonytalanná válhat a korabeli vizuális művészet és az egyéb alkotó tevékenység egybevetésének hitelessége, mivel születési idejét 1500–1538, halálának időpontját pedig 1577–1580 között jelölik.[5] A születés idejének bizonytalanságából több évtizedet átívelő eltérés adódik, s ebből következően a hegedű formai kialakulása és a vele egy időben létező vizuális művészeti stílusszemlélet viszonyítása is torz következtetéshez vezethet. Ha Andrea Amati a 16. század legelején született, kétkedéssel fogadhatjuk, hogy formaalakító készségét, alkotó-szemléletét a század második felében – élete vége felé – kibontakozó eszmei és művészeti stílusirányzat alakította ki.

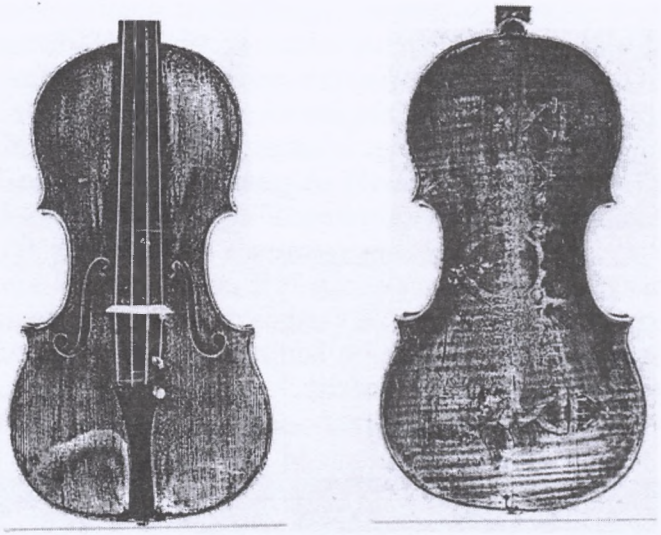
Az eddig ismert életrajzi adatok, amint érzékelhető nem bizonyulnak vizsgálatunkhoz meggyőző, hiteles forrásnak. Nézzük meg, hogy a szakirodalom egyéb, dokumentum erejűnek tűnő adatai nyújtanak-e elfogadható támpontot számunkra.

A Gasparo da Saloval foglalkozó irodalom azt bizonygatja, hogy nagy valószínűséggel az 1560-as években már épített hegedűket, „a legkorábbi ismert hegedűit 1564-körül készítette".[6] Erősíti ennek tényszerűségét az a feljegyzés, miszerint „a bresciai hegedűiskola alapítójaként 1560-tól nyilvántartott"[7], és az itteni levéltár adatai szerint 1568-ban már „maestro di violini".[8] O. Möckel *A hegedűépítés művészete* című munkájában bemutat egy „Gasparo Bertolotti di Salo Brescia 1550 körül" készült brácsát[9] (ennek az időpontnak a hitelessége kétséges a mester születési idejét tekintve, mely 1537 és 1542 közé tehető). A pontosítást megnehezíti, hogy a neki tulajdonított fennmaradt, ismert hegedűk tanúsága szerint hangszereit csupán nevével látta el, a készítés évszámát nem tüntette fel. A még létező hegedűi magánkézben vannak, egy brácsáját („bastard viola") a brüsszeli Conservatoriumban őriznek.[10] Vizsgálódásunk szempontjából az építés időpontját tekintve hitelesnek – a korszerű természettudományos és stíluskritikai vizsgálatok alapján eredetinek elfogadott – az 1580 körül készült brácsáját vehetjük alapul (1. ábra).[11]



1. ábra: Brácsa (ibolyántúli fényben). Gasparo da Salo (1580 körül)

Andrea Amati legkorábbi időből ismert, ma is meglévő hegedűje a IX. Károly francia király udvari zenekara megrendelésére készített 38 hangszerének egyike. Ma az Ashmolean Múzeumban található.[12] Építésének idejét 1564–1575 közé teszik. Eredetiségét, minden részének eredeti állapotát több rétegű lakkmetszetének ibolyántúli fényben végzett vizsgálata igazolja (2. ábra). [13]



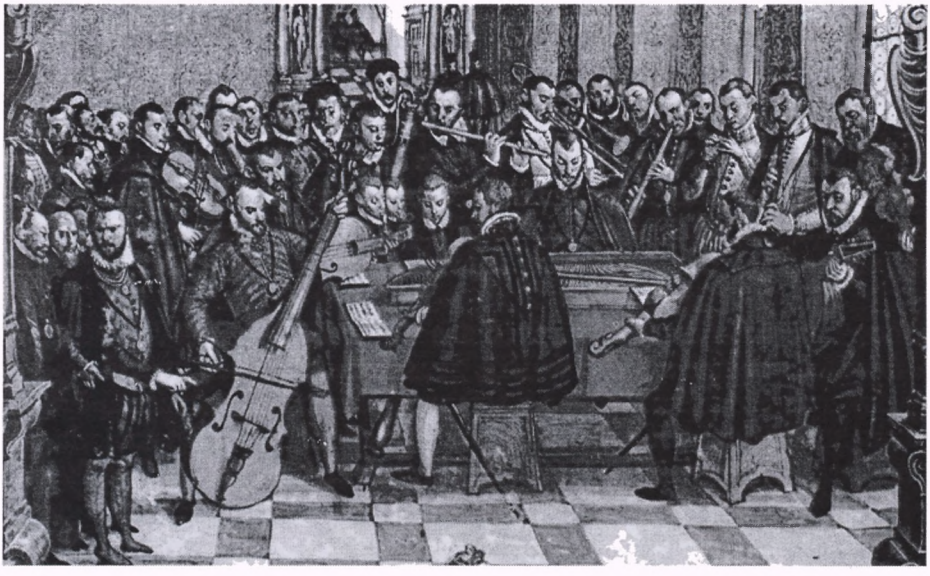
2. ábra: Hegedű. Andreas Amati (1564–1575 között)

Franz Farga *Hegedűk és hegedűsök* című könyvében bemutat még egy további hegedűt Andrea Amatitól, azonban ennek a készítési ideje (1574) egybeesik az előzőekben szereplő hangszerek vizsgálat alapján behatárolt időintervallumával. [14]

Ha Andrea Amati a 16. század elején született, ahogyan az irodalom több helyen említi, feltehetően az előzőeknél már jóval korábban kerülhettek ki kezéből hegedűk. (Nagy valószínűséggel, a francia uralkodó megrendeléséhez is a korábbi hangszerei szolgáltak referenciaként.) Vizsgálatunkhoz azonban csak a viszonyításra hiteles dokumentum vehető számításba.

Valamelyest támaszt jelentenek a korabeli ábrázoló művészet – táblaképek, freskók – hangszerábrázolásai. Bár ez esetben a festmény készítésének időpontja, illetve annak hitelessége vethet fel kételyeket. Még azt is számításba kell venni, hogy a festői ábrázoláshoz a már korábban megvaló-

sult hangszerek nyújthattak ihletet az alkotóknak, így az ábrázolt tárgy kora és a kép készítésének időpontja jelentősen eltérhet egymástól. Nem kisebb bizonytalanságot rejthet a festői ábrázolásokban megszokott alkotói „átértékelés", a formák művészi, egyéni szemlélet hatása alatt átalakított tolmácsolása sem. Mai formájú hegedűábrázolást a legkorábbi időkből csak a 16. század vége felé készült festményekről ismerünk: pl. Hans Mielich *A bajor udvari zenekar kamarazenéje a Szent György teremben* című, 1570-ben festett képén (3. ábra)[15] és Michelangelo da Caravaggio *A lantjátékos* című, 1595-ben készült festményén (4. ábra)[16]. A 16. század elejéről ismert festményeken számos hegedűformájú hangszerábrázolás található. Ezek azonban karakterükben és formarészleteikben eltérnek a később kialakult hegedű napjainkban is alkalmazott formavilágától (a lírákra emlékeztető korpuszívekkel, homorú kulcsházzal, rapszodikus vonalvezetésű hangrésekkel).



3. ábra: Hans Mielich: A bajor udvari zenekar... (1570) (részlet)

Mivel a tanulmányban a hegedű kialakulására ható vizuális művészet formaalakító szerepét szándékozunk megismerni, így nem nélkülözhető e hatásfolyamat időszakának, korának megközelítően pontos meghatározása. A hegedű kialakulásának a különböző irodalmi forrásokból ismert feltételezett idején – a 16. század folyamán – Európában

mozgalmas társadalmi átalakulás, szellemi változás, élénk művészeti stílusváltás zajlott.

Ebből következően alig fél évszázadnyi eltérés is téves következtetésre vezethet a hegedű kialakulása és a vele azonos időben jelentkező művészeti szemlélet között lehetséges viszony megítélése során. Így nem túlzás törekedni arra, hogy a hegedű formavilágának kialakulását és viszonyítását a vele azonos időszakban meghatározó képzőművészet formajellemzői között keressük.

A mai korszerű vizsgálatokkal bizonyítottan hiteles, eredeti, meglévő hangszerek alapján a hegedű kialakulásának idejét, a tényszerűség érdekében a 16. század második felére tehetjük. Nagy valószínűséggel rövidebb-hosszabb folyamat rejlik e mögött. Kétségtelen, hogy kiteljesedett sajátos jellegzetességeit, kifinomult formajegyeit ezt követően Nicola Amati (1596–1684), Jakob Steiner (1617–1683) Antonio Stradivarius (1645?–1737) és Guseppe Guarnerius (del Gesu) (1696?–1744?), valamint kortársaik munkája nyomán nyerte el.

4. ábra: Michelangelo da Caravaggio: A lantjátékos (1595)

2. Társadalmi, gazdasági és szellemi áramlatok Európában a hegedű kialakulásának idején

A hegedű bölcsőjének a hangszertörténet Itáliát – pontosabban Bresciát és Cremonát – nevezi meg. Mivel azonban az itteni társadalmi, gazdasági és világnézeti folyamatok nem függetlenek az európai, főként a nyugat-európai viszonyoktól, célszerű rövid pillantást vetni a kontinensnek ezen a részén zajló változásokra is.

A 16. és 17. században élénk társadalmi-gazdasági átalakulás, szellemi forrongás, kiszélesedő mozgalmak, felkelések, pusztító háborúk tartják lázban Európát. A feudális viszonyok fokozatos háttérbe szorulása mellett a megerősödő ipari és kereskedelmi tevékenység veszi át a vezető szerepet. A növekvő tőkefelhalmozás, a pénzforgalom gyökeresen átalakítja a gazdasági életet. Az árutermelés előretörése új társadalmi viszonyokat teremt. A kézműves műhelyek mellett kialakulnak a munkamegosztáson alapuló manufaktúrák. Dinamikusan növekszik a városi lakosság aránya, és a megújuló szemléletű városi polgárság szembekerül a korábbi társadalmi hierarchiában gyökerező kiváltságokkal. A transzcendentális dogmatikus világszemlélet és a valósághoz vonzódó humanisztikus eszmeiség között fellángol a küzdelem. A szellemi világot egyrészt a vallás körébe tartozó áramlatok, más irányban a valóság megismerésére irányuló törekvések, a reálismeretek növekedése, a természettudományok éledése osztja meg. Két világkép ütközik össze: a skolasztikus elveket valló egyházi gondolkodás és az antifeudális szemléletű reformáció (Luther Márton 1517-ben nyilvánosságra hozza a reformáció téziseit, Kálvin János 1536-ban kiadja a kálvinizmus tanait). Az antifeudális és az egyház elleni mozgalmak erősödésével fokozódik az inkvizíció tevékenysége főként Spanyolországban, Rómában és Németalföldön. Máglyára küldik Giordano Brunót (1548–1600). A terjedő reformációval szemben – a tridenti zsinat (1545–1563) megerősítésével – kialakul az egyház és az abszolút monarchista világi hatalom érdekeit szolgáló ellenreformáció. Az új politikai és szellemi áramlat Európa számos országában felszítja a formálódó világnézet alapján megoszló erők közötti küzdelmet, és jelentős hatást gyakorol a kultúra, különösen a művészet fejlődésére. Ez idő tájt alakult ki a ma is használatos hegedűforma (Gasparo da Salo, Andrea Amati) és bontakozott ki a ma is élő hegedűépítés.

A reformáció és az ellenreformáció között kiéleződött küzdelem több mint egy évszázadon át megosztotta Európa népeit. Következménye éppúgy kihatott a társadalmi előkelőségekre, mint az egyszerű polgárokra.

Jacob Steinerről írja F. Farga: „Brixelben az 1670-es évek során összetűzésbe került a hercegségi egyháztanáccsal. Az ellenreformáció időszakában történt ez, amikor a Halli vásárokon az idegen kereskedők lutheránus írásokat és könyveket terjesztettek. Többek között Steinert is megvádolták, hogy tiltott irományokat vásárolt és eretnek beszédet tartott. Elítélték és börtönbe vetették".

A váltakozó erősséggel folyó ideológiai küzdelem és a tényleges hatalmi harc sem tudta megakadályozni a valóságos világ megismerésére, törvényszerűségeinek a humán célok szolgálatába állítására irányuló törekvéseket. A kor kiemelkedő gondolkodói új utat nyitottak a szellem és a technika fejlődése előtt.

Nicolaus Kopernikus (1473–1543) heliocentrikus világnézetével a realitás felé fordította a gondolkodást. Kortársainak technikai találmányai kitágították az emberi lét javításának, a termelés növekedésének feltételeit. Leonardo da Vinci (1452–1519) felismerte az elmélet és a gyakorlat egységét.

A valóság felé forduló szemlélet, a feltárt technikai lehetőségek számos addig nem ismert eredményekhez vezettek. Az élénkülő kézműiparban, a manufaktúrákban új technikai megoldások, módszerek bontakoztak ki. A termelési folyamatokban az egyirányú mozgást csuklós hajtórúd közbeiktatásával forgómozgássá alakították át, ami a szárnyas orsó fonókerék, az esztergapad és a fazekaskorong meghajtását forradalmasította. Ez már a későbbi gépi technika (gőzgép, robbanómotorok) és az ipari termelés alapját képezte.

Galileo Galilei (1564–1642) felismerte a tudományos mechanika, a mozgás néhány törvényét. Foglalkozott a hang fizikájával. *Discori* című művében (1638) leírja, hogy a hangmagasság arányos a rezgés számával és a rezgésszám fordítottan arányos a húr hosszával. Kimutatja a hang magassága, a húrban lévő feszültség és a húr tömegének viszonyát. Felismerte a rezgések rezonancia útján lehetséges terjedését.

Tanítványa, Martin Mersenne (1588–1648) kidolgozta a rezgésszámok abszolút meghatározását, a rezgés terjedési sebességének mérését, valamint, hogy a húr az alaphanggal együtt annak harmonikus felhangját is megszólaltatja.

Simon Stevin (1548–1620) felismerte a lejtőn kialakítható egyensúly feltételeit, és ezzel megtalálta az erők összetevőinek törvényszerűségét: az erők paralelogramma tételét.

Annak ellenére, hogy ebben a történelmi szakaszban még viszonylag lassú volt a felfedezések, az új ismeretek tovább jutása, végül is a különbö-

ző politikai, gazdasági, kereskedelmi és tudományos központok (egyetemek) közötti kapcsolaton keresztül Európa minden zugát elérték. Az ismeretek terjedésének a személyes kapcsolatokon, külföldi tanulmányokon kívül két útja létezett: a levelek és a könyvek. Rendszeres tudományos ismeretterjesztő nyomtatvány csak a 17. század közepétől említhető: az 1662-ben Londonban alapított Royal Society.[17]

Nem áll rendelkezésünkre semmiféle adat arról, hogy az ez időben élő hegedűépítőkhöz eljutott-e a kor gondolkodóinak a természet törvényeiről feltárt felismerése. A ránk maradt korabeli hangszerek azonban arról tanúskodnak, hogy amit a rezgésről, a rezonanciáról az akkori tudomány elméleti hitelességgel igazolt, a hegedűépítés a gyakorlatban jórészt alkalmazta. Nagy valószínűséggel elősegítette a korszerű ismeretek felhasználását a hegedűépítésben az a körülmény, hogy a hegedűépítők munkájuk révén kapcsolatban álltak a művelt világ ismerőivel. Megrendelőik főként: előkelő polgárok, egyházi és főúri körök jeles személyiségei közül kerültek ki. Jacob Steinerről jegyezték fel, hogy 1648-tól Tirol Karl Ferdinánd főherceg gyakran hívta meg Innsbruckba, és 1658-ban kinevezte udvari hegedűépítővé.[18]

Dinamikus lendületet kölcsönöztek a gazdaság fejlődésének az egymást követő földrajzi felfedezések. Kolumbusz Kristóf (1446–1506) 1492-ben felfedezte Amerikát, Vasco da Gama körülhajózta Afrikát. Fernando Magellan (1480–1521) rátalált az Atlanti és a Csendes-óceán közötti átjáróra. A kiterjedt tengeri hajózás új lehetőségeket teremtett Európában. Új nyersanyagok gazdagították a fellendülő termelést (nemesfémek, gyapot, cukornád, fa-anyagok, elefántcsont, Európában addig nem ismert növények). A különböző kézműves alkotó-tevékenységben felhasználható egzotikus fák,[19] a lakk-készítéshez szükséges oldószerek és a különböző gyanták beszerezhetősége élénkítően hatott a hangszerépítésre.

A 15-16. században kialakuló új társadalmi berendezkedés és gazdasági jellemzők megerősödésében Itália járt az élen. Itáliát ekkor egymással vetélkedő és gyakran egymással háborúzó gazdag kereskedő és iparos városállamok alkották. Északon Genova, Velence, Milánó, Firenze, délen a Nápolyi királyság Szicíliával és Szardíniával, közöttük Róma, a világra kiterjedő hatású Egyházi Állammal. A városállamok egymás közötti rivalizálása mellett itt alakult ki elsőként Európában a nagyipar, a manufaktúrák új formái, az iparos kereskedők és a bankárok – a Sforzák, Gonzagák és a Mediciek – világa, versenyezve egymással és a pápák, egyházi főméltóságok törekvéseivel.

Mivel Nyugat-Európa kereskedelme jórészt Itálián keresztül bonyolódott le, németek, spanyolok, franciák vetélkedtek megszerzéséért. A 16. század elején Velence, Savoya és az Egyházi Állam kivételével egész Itália spanyol uralom alá kerül. Firenze 1532-ben a Mediciek alatt önálló hercegséggé alakul. Lombardiát, és így Cremonát a 17. században az egymást érő háborúk dúlták, pusztították. A Stradivari születésének időpontját őrző dokumentumokra sem bukkant a történelemkutatás mind a mai napig.

A földrajzi ismeretek tágulása, az óceáni hajózás fellendülése átrendezte Európa kereskedelmi útvonalait, s ezek már elkerülték Itáliát, a terület bizonyos értelemben perifériává vált. A gazdasági növekedés az iparilag legfejlettebb Lombardia kivételével megállt. Az északi városok termelő tevékenysége és kereskedelme továbbra is erősebben kapcsolódott a regionális szárazföldi európai áruforgalomhoz. Talán ez az egyik oka annak, hogy a korai hegedűépítés ismert itáliai iskolái közül a legelsők éppen itt, Bresciában és Cremonában alakultak ki.[20]

A 16. század elején Itáliában megerősödő új társadalmi, gazdasági rend új értékítéletet teremtett az eszme, a szellem világában. Kimagasló alkotó egyéniségek hozták közelebb egymáshoz az elméleti ismereteket és a valóságot, a tudományt és a művészetet. A 15-16. század Itáliája válik e kor művészeti stílusainak, a reneszánsznak és a barokknak szülőhazájává, az Európára kisugárzó alkotói gondolkodás központjává.

A tudományos felismerések és földrajzi felfedezések a reális világ megismerhetőségének érzetét erősítették. Az ember bízni kezdett önerejében, képességeiben és abban, hogy a földi lét is nyújthat számára felemelőt, örömöt adó világot. Az új gondolkodás, új szemlélet (humanizmus) merőben újat teremtett a művészetekben: a reneszánszt.

A reneszánsz szétfeszítette a szellem gúzsba kötöttségét, szinte fellélegzést hozott a középkor transzcendens kötöttségeivel szemben. A vallásos átszellemültség és a túlvilági lét utáni vágyakozás helyett a földi hétköznapok és az életöröm visszatükrözése került előtérbe.

A felfedezések és felismerések azonban csak részleges felszabadultságot eredményeztek, az emberi lét múlandóságának és törékenységének érzetét, terhét alig enyhítették: a világ túl nagynak bizonyult, a végtelen túl messzinek, a földi paradicsomot vallásháborúk és szörnyű járványok dúlták, és az élénkülő tudomány sem tudott sok-sok kérdésre választ adni. Az embereket újból a kicsinység érzete nyomasztotta. A változásokra mindig is érzékenyen reagáló művészetben az érett reneszánsszal szemben, attól mintegy elfordulva, merőben eltérő új szemlélet bontakozott ki, a barokk.

Az új stílus szakított valamennyi megelőző kor szemléletvilágával minden alkotói ágban. Szentkirályi Zoltán a barokk építészet kapcsán írja: „...a formálás gazdagításához, bonyolultabb komponálásához, a mozgás szenvedélyességének növeléséhez, az érzelmek megmutatásához..." keresett új kifejezésmódokat, állandóan valami új, váratlan látványra törekedett.

A fejezet elején már utaltunk rá, befejezésül összegezzük, hogy a társadalmi átformálódás, és a művészeti stílusfelfogások alakulása között fellelhető egyfajta áthatás, összefonódás. A reneszánsz szemlélet kialakulása egybekapcsolódik a városi polgárság erősödésével, az ipari jellegű termelés kibontakozásával, a reálismeretek növekedésével. A barokk művészetszemlélet az ellenreformáció ideológiájával kerül közelségbe. Az érzékelhető valóság helyett a lenyűgöző látvány erejével szolgálja a hatalmát visszaszerezni, megerősíteni szándékozó korabeli világi és egyházi érdekköröket. Mindkét művészeti szemlélet az egyetemes kultúra fejlődésén túl sajátos hatást gyakorolt számos szakterületre, többek között a hegedű kialakulására és formájának kiteljesedésére is.

3. Képzőművészeti stílusirányzatok a 16-17. századi Itáliában

3.1. Reneszánsz képzőművészet

A 16. század elején Itáliában még a reneszánsz uralkodott, közepétől kezdve fokozatosan bontakozott ki a barokk stílusszemlélet. A művészettörténet a reneszánsz három jellemző szakaszát különbözteti meg. Az első, a korai reneszánsz (quattrocento) a 15. század első negyedétől a század végéig tart. A második, a virágzó reneszánsz (cinquecento) a 16. század közepéig ível, de már a század harmincas éveitől kezdődően hanyatlani kezd, és a század végéig átadja a helyét a vele egy időben kibontakozó barokknak. A 17. század stílusszemléletét lényegében már a barokk uralja.

A reneszánsz több volt puszta művészeti stílusnál, mint társadalmi gondolkodást alakító tényezőt a reális valóság megismerésére irányuló törekvés, mint művészeti irányzatot a mértéktartó formavilág és az értelemmel követhető ábrázolás jellemezte. Szemléletét az antik görög-római művészet fennmaradt tárgyi és írott emlékanyaga, valamint a természet – az éledező természettudomány – iránt felerősödő érdeklődés inspirálta. S mivel az ókor szemléletében az embert állította az érzékelhető világ középpontjába, a reneszánsz is az ember fizikai és szellemi megismerését tartotta

legfontosabbnak. Még a nem embert ábrázoló művészeti alkotásaiban – az építészetben – is az emberi test látható arányait tekintette mértékadónak. Szellemi forrását Vitruviusnak, az Augustus korabeli római építésznek, hadmérnöknek, írónak fennmaradt tíz könyvéből álló munkája (De architectura) alapozta meg.[21] Vitruvius a természet alkotta arányokat, az emberi test egyes részeinek egymáshoz viszonyított arányát tekintette meghatározónak és követendőnek. „A templomok tervezése... – írja – az arányosságon alapul. Az arányosság minden műben a tagok méretének és az egésznek egymáshoz viszonyítása..., arány híján egyetlen templomot sem lehet ésszerűen tervezni, csak ha pontosan oly arányos, akár a jó testalkatú ember tagjainak szabatos rendje."[22]

A reneszánsz művészetszemléletben felértékelődött az emberi testen felismerhető arány alkalmazásának jelentősége. Leon Battista Alberti (1404–1472) firenzei építész, teoretikus a Medici könyvtárban őrzött Vitruviusi kódex alapján az arányokról kifejtett nézeteit kortársai jó ideig a tökéletes harmónia alaptételeként fogadták el. Leonardo da Vincinek (1452–1519), a reneszánsz szellemi élet vezető egyéniségének 1495–97 között készült aránytanulmányai tovább növelték a természetben fellelhető arányoknak a különböző vizuális művészetekben lehetséges felhasználását. A reneszánsz gondolkodás terjedésével ez a szemlélet a német Albert Dürer (1471–1528) e témájú kutatásaiban is nyomon követhető.

A létező világ megismerésére irányuló törekvés közelebb hozta egymáshoz a művészeket és a tudományos igényű gondolkodást. A ráció alapján élénkülő tudomány nem elégedett meg a természetben előforduló, szubjektíven érzékelhető rész és egész közötti arány elfogadásával. Kereste az arány matematikai összefüggésekkel kimutatható meghatározását. Luca Pacìoli (1445–1517), a páduai egyetem matematika-teológia professzora 1509-ben kinyomtatott, *De Divina proporcione* (Isteni arány) című munkájában már túlmutatott a természetben felismerhető arányokon, és a matematikai viszonyításra irányította a figyelmet.[23]

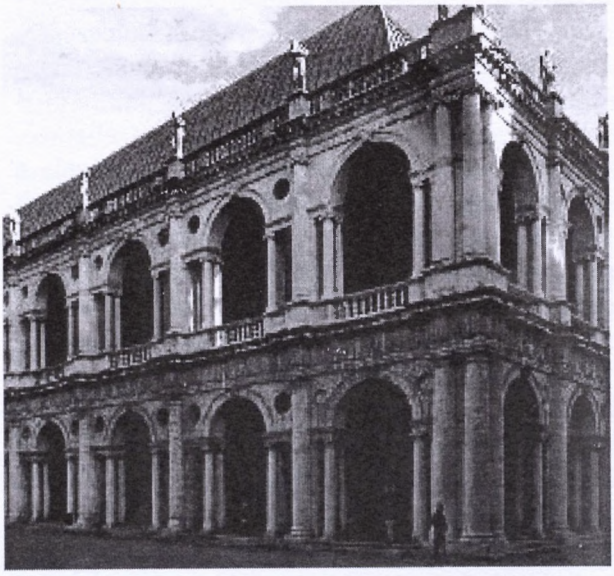
A reneszánsz képzőművészetet alapvetően humanista alkotó szemlélet vezérelte, valamennyi művészeti ágában egyaránt a való élet tolmácsolására törekedett. Építészetben a nyugodt statikus tömegformálás, az egyszerű díszítőelemek alakítása jellemezte. Alkotásaiban felhasználta az antik építészet arány- és formavilágát, s közben a tömegformálásban, felülettagolásban az anyag rusztikus kialakításában létrehozta a maga sajátos stílusjegyeit. A szobrászat és a festészet új premisszákkal egészült ki. Az ábrázolásban kiemelt szerepet kapott a valósághoz közel álló megjelenítés, az anatómiai formák követése. A perspektíva átfogó megismerésével a kétdimenziós ábrázolásban

lehetővé vált a harmadik dimenzió – a térmélység élményszerű érzékeltetése.[24] Mindkét művészeti ágban előtérbe került a belső tartalom kifejezésére irányuló törekvés. A látható valóság ábrázolásában tükröződött az emberi benső érzés, az érzelem megnyilvánulása.[25]

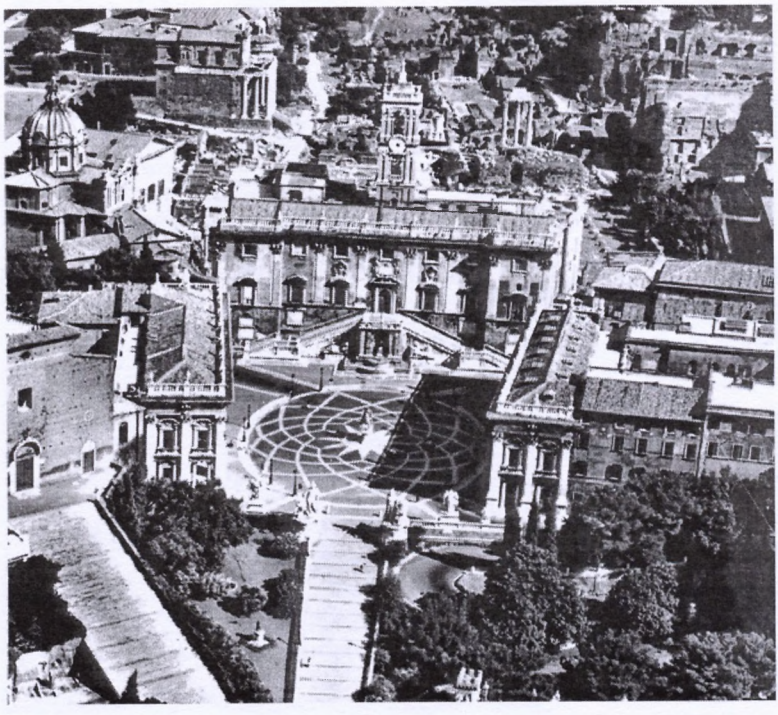
Vessünk futó pillantást a reneszansz vizuális művészet néhány jellemző, kiemelkedő alkotására. Így érzékelhetőbbé válik a szemléletbeli áthatás a különböző térbeli-ábrázoló alkotói tevékenységek között és szembetűnőbbek azok a tényleges forma és aránybeli viszonyok, amelyek között esetenként formarokonság, más esetben azonos formaképzés mutatható ki.

A 16. század elején Donato Bramante (1444–1514) építésznek a római St. Pietro in Montorio templom udvarán emelt Il Tempietto kápolnája tükrözi hűen az újraéledő antik építőművészet szemlélet és a reneszánsz formaképzés ötvöződését (5. ábra).

5. ábra:
Donato Bramante: Tempietto (1502)
Róma

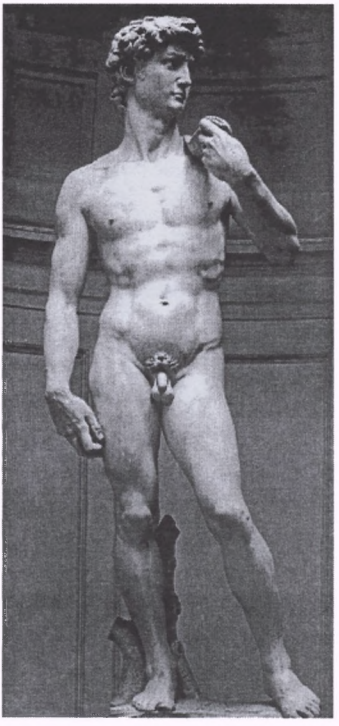


6. ábra:
Andrea Palladio: Bazilica
(1549)
Vicenza



7. ábra:
Capitoliumi tér
(1547)
Róma

8. ábra:
Buonarotti Michelangelo: Dávid (1501)



A kor építészetének stílusát Andrea Palladio (1508–1580) érlelte ki. A század közepe táján épült vicenzai bazilikája hatása nemcsak a közvetlen utána következő nemzedék ízlését formálta, hanem egész Európára kisugárzott (6. ábra).

Buonarotti Michelangelo (1475–1564) szobrász, építész, festő a római Capitolium tér megkomponálásával a reneszánsz vizuális művészet új elemeit, a perspektívát is felhasználta az építészeti hatás, a tér tengelyében álló főépület vizuális szerepének fokozására (7. ábra). Szobrai közül az 1503-ban készített, Firenze jelképévé vált Dávid szobrát említjük csupán (8. ábra).

Mint festő mestere volt a két dimenzióban ábrázolt mozdulatoknak, a szellemi, érzelmi tartalom kifejezésének és az antik szépségeszmény megjelenítésének. A Sixtusi kápolnában festett mennyezetfreskói és az oltár falára készített, 1541-ben befejezett képei a duzzadó reneszánsz szemléletét tükrözik.

A kor kiemelkedő festője Santi Raffaello (1483–1520). A perspektíva tökéletes alkalmazásával valóságnak tűnő térhatást ért el a képalkotásban.

Képein a két dimenzióban kialakított térmélység ábrázolásával – pl. az *Atheni iskola* című képén (9. ábra) – új utat nyitott a festészetben és kitágította perspektíva szerepét a művészetben.

9. ábra: Santi Rafaello: Atheni iskola (1512)

A virágzó reneszánsz alkotásain a 16. század közepe táján már fellelhetők a következő stílusszemlélet, a barokk formavilágának előhírnökei. Így alig lehet csodálkozni azon, hogy az ez időtájban kialakult hegedű formavilága tükrözi a barokk formaalkotó szemléletet és ennek szinte valamennyi stílusjegye felismerhető rajta.

3.2. Barokk képzőművészet

A barokk művészeti stíluskorszak kezdetét éppoly bizonytalansággal jelöli meg a művészettörténet, mint a reneszánsz gondolkodás hanyatlásának idejét. Az átalakulás lassan bontakozott ki, és évtizedeken át tartó fejlődési folyamat után a 16. század végén szorította háttérbe a reneszánsz szemléletet. Kezdetének időpontját többen a tridenti zsinattal kötik össze (1545–1563). Mások az első barokk stílusszemléletben épült római jezsuita

Il Gesu templom alapkőletételével (1568) kapcsolják egybe. „S vannak, akik a századfordulóra helyezik, mondván, hogy a reneszánsz világát a máglya hamvasztotta el, amely a kor nagy gondolkodóját Giordano Brunót (1601) elégette.[26]

A barokk stíluskorszak művészettörténeti megítélése megosztott. Egyrészről a művészetben az eddig soha nem létező szellemi világ érvényesülését, máshol csak a formák öncélú játékát, a hivalkodó, megtévesztő látványosságot, a mesterkéltséget látják benne, „s úgy tekintik, mint valami múló dekadens közjátékot, amely szervetlenül ékelődik be a reneszánsz és a klasszicizmus közé".[27] Való igaz, hogy a 17. század stílusát később a korai klasszicizmus idején nevezték el barokknak.[28]

A barokk formanyelv a reneszánsz nyugalmassága helyett lendületességre, a kimért egyszerűség helyett káprázta tó hatásra törekszik. Formái szenvedélyes mozgást fejeznek ki, s egymással szemben ellenformákat társítanak. Lendületes, íves vonalak, meghajlított felületek konvex és konkáv elemek összekapcsolása a legjellemzőbb jegyei. Az eszmei cél érdekében még az alkotáshoz felhasznált anyag fizikai kötöttségét is figyelmen kívül hagyja, az anyagszerűségből adódó korlátokon is túllép. A törékeny márványból szinte légies formát teremt, a valóságot valószínűtlenséggé varázsolja. A kupolával lezárt teret a festészet eszközével vizuálisan kitágítja, megnyitja, illuzionisztikussá alakítja.

10. ábra:
G. B: Vignola-G. Porta: Il Gesu templom főhomlokzata (1573)
Róma

Az építészetben a barokk formajegyei elsőként a római Il Gesu templom főhomlokzatán valósultak meg 1573-ban (10. ábra). Tervezője: Giacomo Barozzi da Vignola (1507–1573), homlokzatát tanítványa, Giacomo della Porta (1537–1604) fejezte be.

A barokk architektúra teljes kifejlettségében Francesco Borromini (1599–1667) alkotásán, az 1638–1641 között épült római St. Carlo alle Quattro Fontane templomon vált ismertté (11. ábra).

11. ábra:
Francesco Borromini: S. Carlo all Quattro Fontane templom homlokzata (1638-641)
Róma

A szobrászatban a stíluskorszak szellemi világát és formaképzését Lorenzo Bernini (1598–1680) szoborkompozíciói érzékeltetik a tanulmányban vizsgált téma szempontjából legkifejezőbben. Amíg Michelangelo Dávidja a reneszánsz alkotótevékenység kiegyensúlyozott szellemiségét testesíti meg, Bernini bemutatott szobrai a barokk ízlésvilág lendületes, merész, szinte korlátokat nem tűrő (az alkalmazott anyag, a márvány törékenységét figyelmen kívül hagyó) formaalakításáról tanúskodnak (12/a-b ábra).

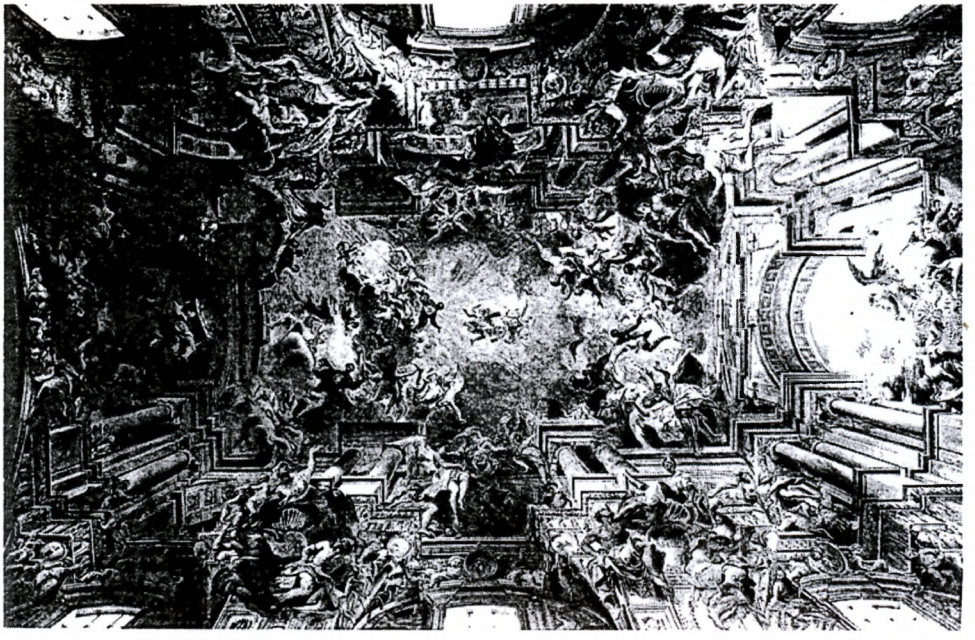
12/a ábra:
Lorenzo Bernini: Dávid
(1623-1624)

12/b ábra:
Lorenzo Bernini: Apollo és Daphne
(1622-1625)

Az itáliai barokk festészetnek – mint a hegedűépítésnek is – több iskolája alakult ki, közös stílusjellemzők mellett markáns eltéréssel. A bolognai festőakadémia legkiemelkedőbb alkotója Michelangelo da Caravaggio (1574–1610). Kora festői hitvallásával szemben alakjait nem

eszményíti, a látott valóság visszaadására törekszik. (Ez a festői tartása *A lantjátékos* című 1595-ben készült képén ábrázolt hegedűforma hitelességét erősíti, ld. 4. ábra). A firenzei iskola kiemelkedő festője Pietro da Cortona (1596–1669).

A Rómában működő iskola vezéregyénisége Andrea Posso (1642–1709) az illuzionista festészet mestere (13. ábra). Mennyezetképein a valóságos építészeti elemek folytatásaként festett látszat-architektúrával a fedett, zárt tér vizuálisan nyitottá válik, és a végtelenség érzetét kelti. Festői szemléletben az előbbiektől eltér a nápolyi iskolakiemelkedő alkotója, Salvatore Rosa (1615–1673). Kora túlfűtött patetikus törekvéseivel szemben a természetábrázolásával – tájképfestészetével – fejezte ki ellenérzését. Sajátos barokk festészet formálódott Velencében. Sebastiano Ricci (1659–1734) hatására, élénk kisugárzással az angol és az osztrák barokk festészetre.



13. ábra: Andrea Posso: S. Ingazio templom mennyezetfreskója (1691–1694) Róma

Nem célja e tanulmánynak, hogy részletesen foglalkozzon az itáliai barokk képzőművészettel. Ez a vázlatos áttekintés pusztán azt szolgálja, hogy

a képzőművészet változó stílusformái és a hegedű-formavilág kialakulása között kimutatható időrendbeli összefüggéseket szemléletesebbé tegye. Érzékeltetni szándékoztam a barokk alkotóművészet időszaka és a hegedűépítés kiteljesedésének folyamata közötti párhuzamot. Rámutatni, hogy Paolo Maggini (1580–1632), Nicola Amati (1596–1684) alkotószakasza egybeesik a korai barokk világával. Jacob Steiner (1621–1683), Antonio Stradivari (1645–1734), Guseppe Guarneri (del Gesu) (1687–1745) pedig a virágzó barokk kortársai.

4. Forma a művészetben – a hegedű formavilága

4.1. A képzőművészet formaelemei

Mivel a tanulmány a hegedű formajegyei és a képzőművészetben alkalmazott formavilág között fellelhető azonosságokat, hasonlóságokat elemzi, nem kerülhető meg a forma fogalmának értelmezése.[29]

A képzőművészetben a valóság megjelenítésére – az ábrázoláshoz – szolgáló elemek: a térbeli *test*, *tömeg*, *hajlított felület* (háromdimenziós elem) a *sík felület*, *folt* (kétdimenziós elem) *a vonal*, *egyenes* (egydimenziós elem) *és a szín*. A térbeli elem a test, a tömeg mint térbeli forma a valóság megszokott jelensége, és magában rejti a többi elemet is. Elmaradhatatlan velejárója a szín, mert színtelen testek nem léteznek, s a szín sem létezik önmagában. A felület pedig a térbeli formához kötődik, annak határoló eleme, ahogyan a vonal is a különböző síkok, felületek metsződése (éle) mentén alakul ki.[30] (A vizuális és az auditív művészet elemei között léteznek közös vonások: a képzőművészetben a pont, a vonal, a sík, a testtömeg az, ami a zenében a hang, a dallam, a „kiszélesedő" dallam és a zenei kompozíció.)

Mindezeket az elemeket a vizuális művészetben további jellemzők egészítik ki. Mivel a tömeg három, a sík két irányban mérhető kiterjedéssel rendelkezik, a különböző irányokba eső térbeli nagysága egymáshoz viszonyítható, közöttük valamiféle *arány* érvényesül. A metrikus eltérések kategorikus különbséget eredményezhetnek (pl. a geometriában azonos határoló vonalak négyzetet, kockát, eltérő hosszúságúak téglalapot, hasábot formálnak). Ugyanúgy szerepet kap az arány a tömegen belül is, ha a tömeget egymáshoz kapcsolódó résztömegek alkotják (pl. épülettömeg-kapcsolatban, szoborcsoportokon, vagy mint később szó lesz róla, a hegedű korpuszán).

Az egyes részek egymáshoz, illetve az egészhez viszonyított aránya esztétikai értéket hordoz.

Plotinos, az i.u. 2. században élt görög filozófus az esztétikáról vallott nézeteiben kifejtette, „a szépség, mint minden másnál, a látható dolgoknál is az arányosságban rejlik."

Az ábrázoló művészetet korokat átívelő messzeségbe nyúlóan foglalkoztatta az arány természetben fellelhető, látható (vitruviusi) és a geometria (szerkesztés), és matematika (számítás) eszközeivel spekulatív úton kialakított meghatározása.

A forma vagy a formák együttesének megjelenésében mérvadó a *szimmetria* vagy az *aszimmetria*. Szimmetrikusság akkor alakul ki – a mai értelemben –, ha a forma egy képzeletbeli tengely körül úgy jön létre, hogy a tengelyhez viszonyított egymásnak megfelelő pontjai a tengelytől egyenlő távolságra vannak, egymás tükörképei. Aszimmetrikus a forma, ha ilyen szabályosság nem képződik.

Több térbeli formának, lehatárolt felületeknek, vonalaknak egymáshoz kialakított elrendezése eredményezi a *kompozíciót*, ami lehet – elemeinek kölcsönös viszonya alapján – egyensúlyban lévő, mozdulatlanságot, nyugalmat sugárzó (*statikus)*, mozgást, lendületet kifejező (*dinamikus)* összhangba rendezett, arányos (*harmonikus)* és ellentéteket hangsúlyozó, a kontraszt érzékelésére törő (*diszharmonikus*, *disszonáns)*.

A formák egymáshoz kapcsolása meghatározott strukturális rendben hasonló a zenei hang és a dallam közötti viszonyhoz. A hangoknak mint egyes formaelemeknek egymás mellé sorolása eredményezi a melódiát. A zene hatása sem az egyes hangok közvetlenül kiváltott érzetére épül, hanem a hangok egymásmellettiségéből létrejövő dallamon keresztül jön létre. A vizuális formálásban is több elem képezhet egy összetett, alapjában új, más hatást keltő kompozíciót. A különböző hangok külön-külön rendelkeznek saját hullámhosszal, egyéb jellemzőkkel (amplitúdó, felhangok stb.). Ha három egyszerre szólal meg, valami új keletkezik, az akkord. Hasonlóan, a térbeli „tagolt optikai egységek mások, mint részeik összege" – írja Kepes György *A látás nyelve* című könyvében – . S így van ez, amint látni fogjuk a hegedűformában, a korpusz kompozíciójában is.

Sajátos helyet foglal el a képzőművészetben a távlat, a tér mélységének érzékeltetését szolgáló *perspektíva*. Kiemelkedő jelentősége a síkbeli ábrázolásban, de még az építészetben is stíluskorszak-jellemző. Valójában a reneszánsz építészetben és festészetben válik gyakorlatilag ismertté. Nélküle nem alakulhatott volna ki a barokk illuzionisztikus festészet. Különlegességét az adja, hogy nemcsak a valóság hitelesnek tűnő ábrázolását segíti elő, hanem

sajátos felhasználásával a látáson alapuló érzékelés befolyásolható, a távolabbit közelebb lévőnek, vagy éppen fordított látszatot keltve, a közelebbit messzebb tűnőnek jeleníti meg. Hatása szélesebb körű, mint amit a vizuális művészetben közvetlen módon kifejt. A perspektíva nemcsak a valóság képi érvényesülését elősegítő ábrázolási módszer, hanem egy adott kompozícióban az alá-fölérendeltség: a kiemelés, vagy éppen a háttérbeszorítás érzetének kifejezésére képes megnyilvánulás. Többsíkú metaforikus jelentőséggel rendelkezik, elvont dolgok, fogalmak közötti viszonyt sajátos kifejező eszközeivel közvetít (pl. az építészetben a római Capitoliumi tér; ld. még *3.1. Reneszánsz képzőművészet* című fejezetben 26. o.).

A képzőművészetben kiemelt jelentőséget képez a *forma és tartalom egysége*. Mértékadó meghatározója annak, hogy az alkotás eszmei célja összhangban van-e a választott vizuális megoldással, hogy az alkotás szellemisége és kifejezését szolgáló megjelenítés között létre jött-e egymást erősítő egység. (Építészetben: az épület rendeltetése, valamint az alkalmazott tömeg és architektúra viszonya, szobrászatban: a forma és az ábrázolt szellemi tartalom kapcsolata, festészetben: az alkotói szándék és a kép szemlélőjére gyakorolt hatásának egybeesése.) A művészi igényű alkotásokban szinte a kortól függetlenül elválaszthatatlanul érvényesül a forma és tartalom egysége, s megtalálható a hegedű formavilágában is (ld. *4.3. A hegedű formavilága és a reneszánsz alkotószemlélet* című fejezetben 39-46. o.).

4.2. A hegedű formajegyei

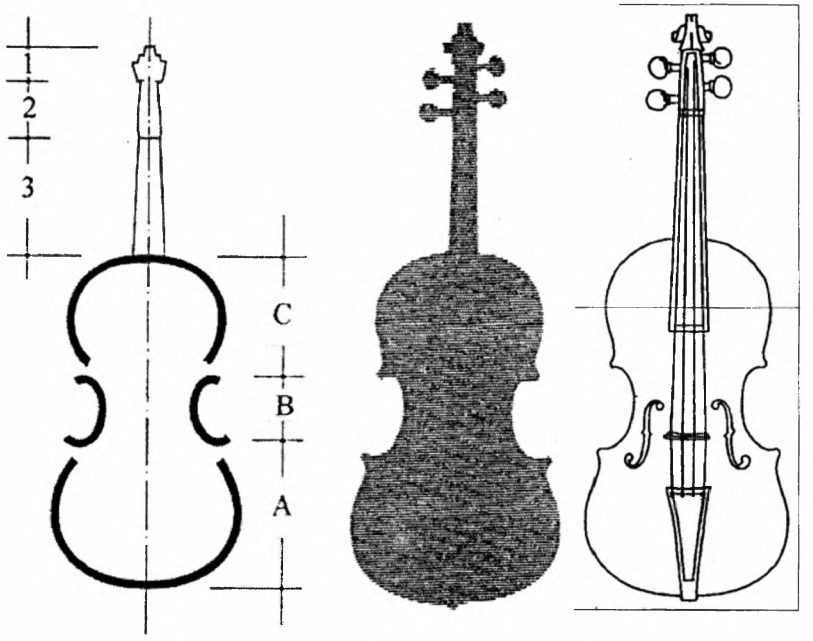
A hegedű egyedülálló formájának – formavilágának – kialakulását a hangszertörténet a viola da gambák és a viola da bracciók formajellemzőiből vezeti le. Gazdag tárházát nyújtják ezek az instrumentumok a vonós hangszerek formaelemeinek. „A ránk maradt korai vonós hangszerek ... igen sokféle korpusz-formát alkalmaztak, legömbölyített ... továbbá felső, középső és alsó hajlattal, a későbbi hegedű módján, a nyakra merőlegesen induló vállakkal és esetleg nagyon erősen kiugró sarkokkal". „lehetnek hullámos, vagy bevágásokkal díszített körvonalúak" „A kulcsszekrény, legalábbis Itáliában mindig csigában végződik." „A hangrések formája szintén sokféle: kifelé vagy befelé forduló C-formájú, lángnyelv alakú, *f*-formájú hangrések." – írja John Henry van der Meer *Hangszerek az őskortól napjainkig* című művében.

Elősegíti az áttekintésünket, ha a hegedű formajegyeit differenciált csoportokba soroljuk. Vizsgálódásunk szempontjából a legjellemzőbbek a hegedű sajátos formáját képező *elsődleges formajegyek*. Ezek együttesen,

de részenként is eltérnek a korábbi vonós hangszereken alkalmazott formajellemzőktől. Összességük eredményezi az egyedülálló hegedűformát, alapformát. A *másodlagos formajegyek* a hegedű egymással összefüggő, de önálló formarészként is vizsgálható karaktert nyújtó – esetenként az alkotó szemléletét tükröző – formaelemei. S végül az előzőekben foglaltakon túl az egyes formaelemeken fellelhető, személyhez fűződő jelként értékelhetők a *harmadlagos formajegyek.*

Az elsődleges formajegyek, formajellemzők a ma is használatos hegedű kialakulása óta lényegében nem változtak (14. ábra):

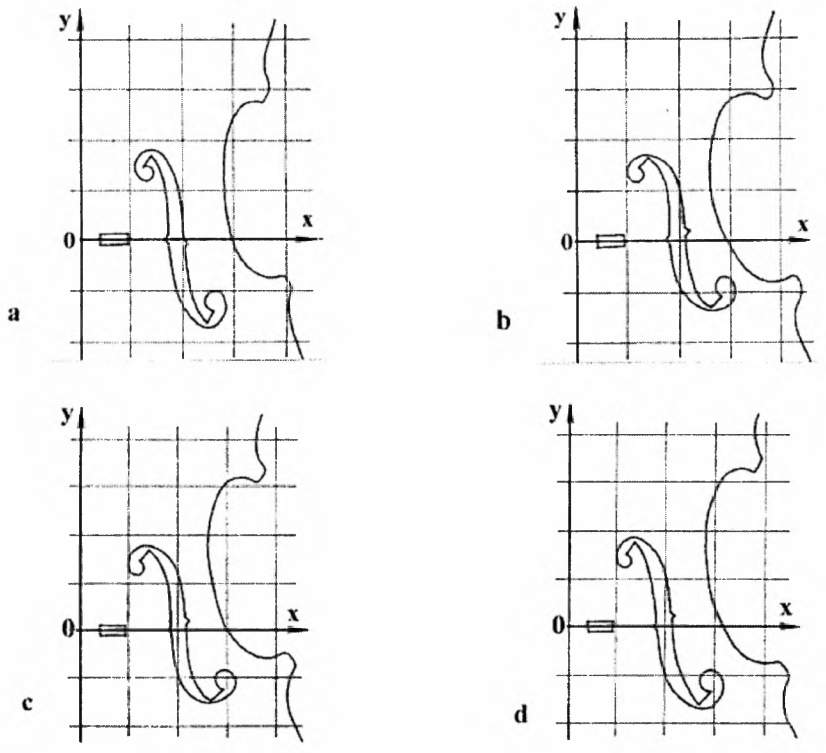
- elöl- és hátulnézetben szimmetrikus tömegkompozíció,[31]
- a csigában (1) és vele egységet képező kontraposztos ívelésű kulcsházban (2) végződő nyak (3),
- a korpuszt alkotó három rész-egységre tagolt íves lehatárolású, egymáshoz arányosan alakított formaelem (A, B, C),
- a kávákon túlnyúló peremmel szegélyezett boltozatos tető és hát,
- az *f*-formájú, egymással szembeforduló hangrések.



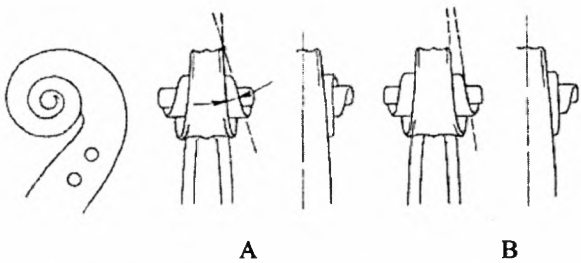
14. ábra: A hegedű elsődleges formajegyei (alapforma)

Másodlagos formajegyek azok a szignifikáns formajellemzők, amelyek a hangszer formai és hangzásbeli tökéletesítésének folyamán váltak érette (15/a-b ábra):[32]

- a korpusz fő méretarányai (nyújtott forma, széles forma),
- az egyes rész-egységek önmagukon belüli és egymáshoz viszonyított arányai,
- a különböző részegységeket határoló ívek jellemzői, sarkok kialakítása (kiugró, illetve tompított),
- a tető- és a hátlemez boltozottságának mértéke és jellege,
- a csiga térbeli karakterének fokozása, a csigavonal tekeredése, a csigaszem nagyságának (átmérőjének), a szemek külső érintői közötti távolság (a csigaszélesség) méret jellemzői,
- az *f*-hangrések sajátos formaalakítása.



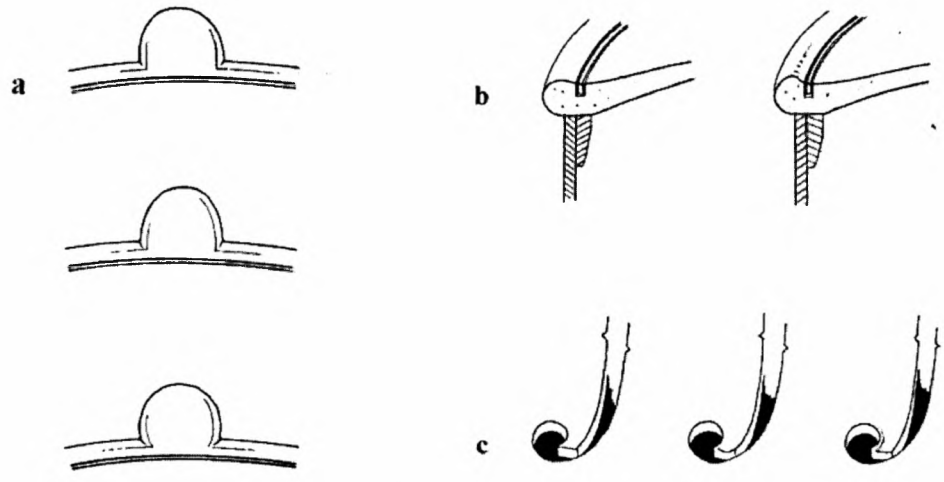
15/a ábra: Másodlagos jellegzetességeket nyújtó formajegyek
a) Paolo Maggini, 1620; b) Nicola Amati, 1663; c) Antonio Stradivari, 1715;
d) Giuseppe Guarneri, 1743 (Alexander Buchner után);



15/b ábra: A csigaforma térbeliségének jellegzetessége (A) Stradivari, (B) Guarneri

A másodlagos formajegyek körébe sorolható tényezők meghatározó társulása eredményezi a hegedű világában kiemelkedő szerepet játszó modell-forma megkülönböztethetőségét (Steiner-forma, Stradivari-forma, Guarneri-forma).

Harmadlagos formajegyeknek tekintjük azokat a kizárólagosan dekoratív szerepet betöltő formamotívumokat, amelyek a hegedű – előzőekben meghatározott – formajegyeit nem változtatják meg, de személyi-alkotói ízléshez kapcsolódó formajellegzetességekkel tovább gazdagítják (16. ábra).



16. ábra: Harmadlagos formajegyek
a) makk-formák; b) peremkialakítás; c) *f*-bevágás; az alsó szem körüli formajegyek

- a makk-forma sajátossága (a),
- a tető-, illetve a hátlemez peremének formai kialakítása (lekerekített ívvel, „v" vagy ellenívekkel képzett él kihangsúlyozásával) (b),
- az *f*-bevágás alsó részén – a szem és a hangrés közötti nyelven alkalmazott „mesterbevágás" jellegzetes kialakítása,
- az alsó szem körül félkörben futó peremezés (c).

4.3. A hegedű formavilága és a reneszánsz alkotószemlélet

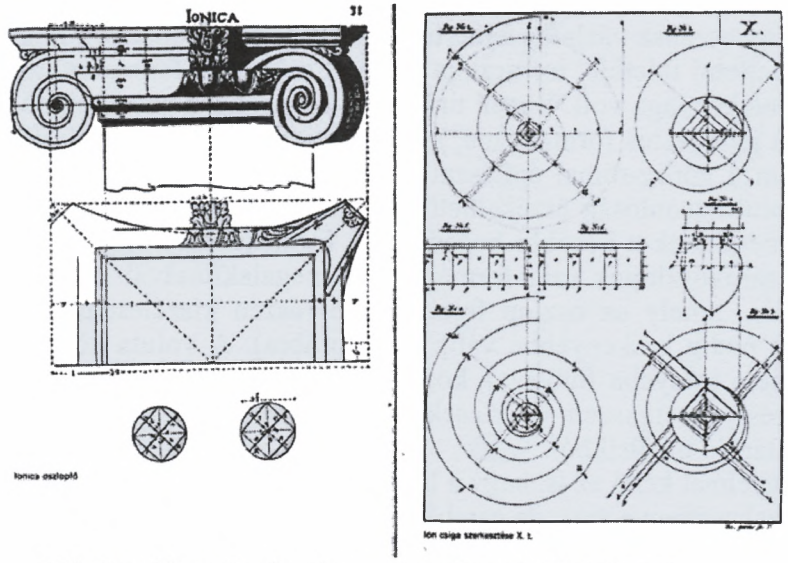
A képzőművészet formavilágának, alkotóelemeinek és a hegedű formajegyeinek áttekintése után mindinkább valószínűnek tűnik, hogy a képzőművészet kimutatható hatást gyakorolt a hegedű formai kialakulására. Az egybevágó dokumentumok alig hagynak kétséget afelől, hogy a reneszánsz és a barokk stíluskorszak-átmenet időszakában kell e viszonyt keresni.

Számtalan összefüggés elemzése bebizonyította már, hogy nem maradhatott rejtve ez időben a formát kereső alkotók előtt a kor ízlésvilága, formaalakító készsége. Mindenki számára a látható valóság, a vizuális művészet, az építészet, köztéri szobrok, világi épületek, templomok táblaképei, freskói közvetítették az alkotói felfogás, formaképzés kialakult rendszerét.

A reneszánsz vázlatos ismertetésénél már szó esett arról, hogy a korszak szellemi ihletője, inspirálója az antik művészet fennmaradt tárgyi és írott emlékanyaga volt. Ennek tudatában még inkább szembetűnő, hogy a hegedű jellegzetes formaeleme, a csiga és egyes építészeti díszítőelemek – főként a görög-római építészet – motívumai (csavart vonalak,) között több mint hasonlóság érzékelhető. A görög ion oszlopfők volutái szinte megismétlődnek a későbbi hegedűcsiga formakompozíciójában. Különösen a sarokoszlopok csigaformájával, tömegalakításával közvetlen ez a rokonság, amely az oszlop felőli, belső részén kiszélesedik, külső íve mentén pedig keskenyebbé válik (17/a-b ábra). A voluta középpontja, a csigaszem irányába futó ívek közötti mező homorúra alakított, és a legbelső rész, a csigaszem csak csekély mértékben emelkedik ki a képzeletbeli határoló oldalsíkból.

Figyelmet keltő az is, hogy a hegedűt megelőző időben a reneszánsz korábbi szakaszában a viola da gambákon alkalmazott csigákon sem emelkedtek ki a csigaszemek „A kulcsszekrény, legalábbis Itáliában, mindig csigában

17/a ábra:
Nike Apterosz templomának egyik sarokoszlopa az Akropoliszon
(i.e. 420 körül)
Athén

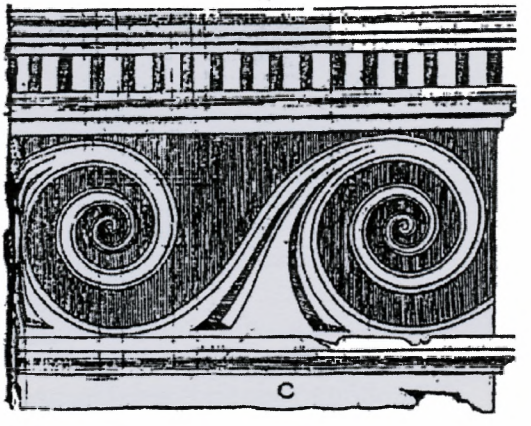


17/b ábra: Ión oszlopfő, csigavonal-szerkesztés Vitruviusnál

végződik, amelyen nem, vagy csak alig állnak ki a szemek" – írja J. H. van der Meer a gambák ismertetése során[33]. Alig valamivel később még Gasparo da Salo, illetve Andrea Amati hegedűin is csak kis mértékben nőnek ki a csigaszemek.

Formahasonlóság mutatható ki a hegedűcsiga és kulcsház egysége, a lendületes csigavonalból folytatódó kontraposztos ívelésű kulcsház és az antik díszítő architektúra jellegzetes „futókutya" motívuma között (18/a-b ábra).

18/a ábra:
Ión párkánydíszítés



18/b ábra:
Dór párkánydíszítés: „futókutya motívum" Vitruviusnál

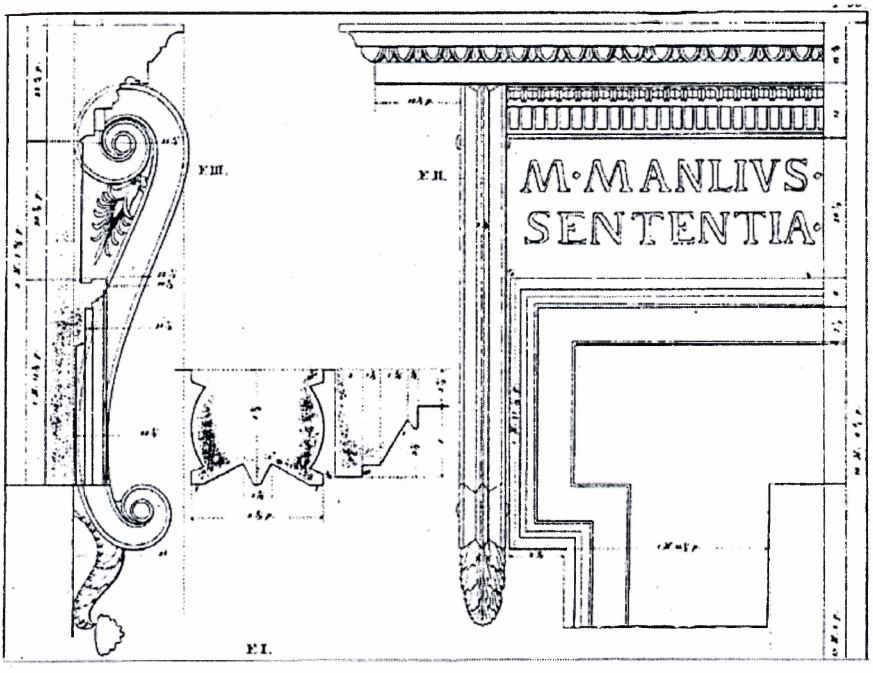
E két antik formaelem kapcsolatát mutatja be Fra Filippo Lippi (1406–1469) reneszánsz festő az 1452-ben készült, *Madonna a gyermekkel* című képén (19. ábra).

Önkéntelenül formarokonság érzékelhető a hegedű *f*-nyílásának kialakítása és a görög-római építészetben a párkány alátámasztására szolgáló, két végén csigában végződő konzol formája között (20. ábra). (Jószerivel ez egyben a csiga és a kulcsház egybefonódó forma alakításának is ösztönzője lehetett.) Mindez annál is inkább utal a képzőművészetben alkalmazott formavilág és a hegedű formajegyei közötti kapcsolatra, mivel a korábbi vonós hangszereken ettől eltérő („C", lángnyelv vagy levélinda formájú) hangnyílásokat alkalmaztak.

19. ábra: Fra Filippo Lippi: Madonna a gyermekkel (1452)

Ami a formák egyszerű összehasonlítása révén nem tűnik szembe, abban az alkotói-szellemi rokonságban kereshető, ami a forma és az arány kapcsolatában ez időben minden művészetben érvényesült. Az alkotó embert a veleszületett arányérzéke ösztönösen vezérelte, s a művéhez kialakított arány ellenőrzéséhez mindig „kéznél volt" az etalon: saját testén – embertársain – a látható részek közötti arány. Vitruvius írja: „...a természet úgy alkotta meg az embert, hogy tagjai arányukkal egész alakjának feleljenek meg."

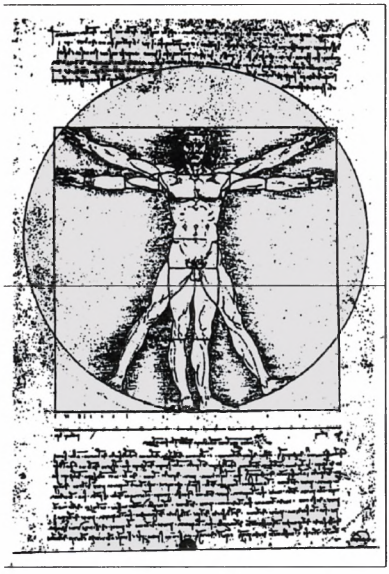
A hegedűformában, illetve formarészei között is valóban fellelhető efféle arányszemlélet tükröződése. Messze áll tőlem annak állítása, hogy a hegedűt alkotó mesterek szabálynak tekintették, de fennmaradt műveik tanúsága szerint szépérzékükből fakadóan gyaníthatóan törekedtek erre.



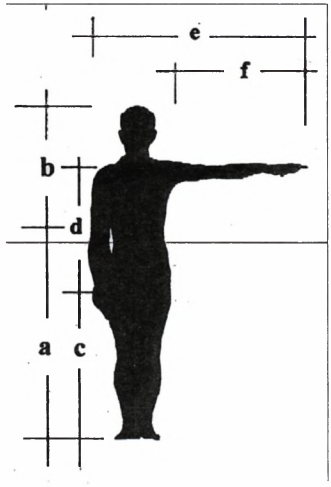
20. ábra: Ajtók Heracles templomáról Vitruviusnál

Herbert Heyde írja *Musikinstrumentum* című művében: „a hangszerek kialakítása során a 16-17. században tudatosan alkalmazták az arányokat, de nem bonyolult formában, hanem egészen kézzelfogható módon."[34]

Nézzük meg, hogy a hanyatló reneszánsz alkotószemlélet időszakában kialakult hegedű és formarészei között fellelhető-e ilyen arányosság. Két tényanyagot viszonyítsunk egymáshoz: a vitruviusi arányábrát és Andrea Amati 1564-1575 között készült hegedűjét. A vitruviusi arányábrán a test magasságát a köldökpont két részre osztja, a talp és a köldök közötti nagyobb (a) és a köldök-fejtető közötti kisebb (b) részre. A két rész egymáshoz viszonyított arányszáma (a:b) 1,54 (21. ábra).[35]



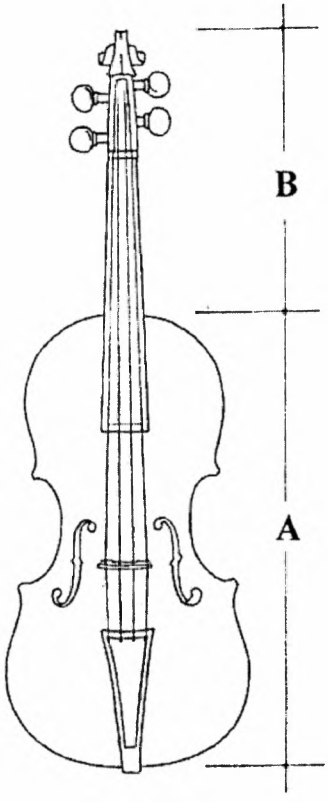
21. ábra: Vitruviusi arányábra



$a : b \approx c : d \approx e : f$

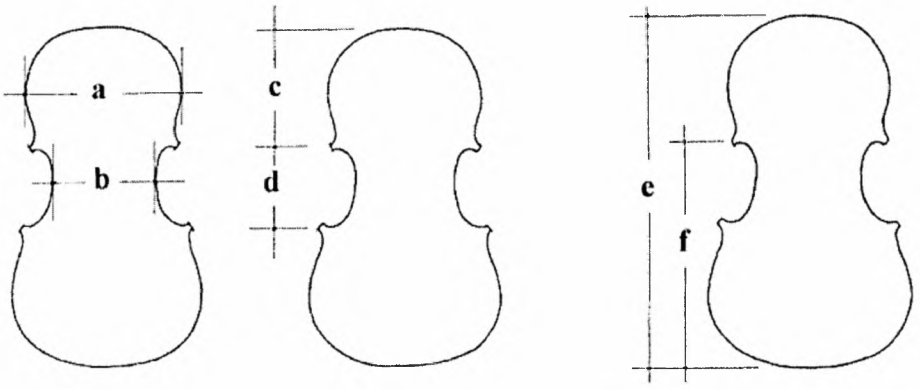
Andrea Amati 1564-1574 között készített, az *Alte Meistergeigen* című műben bemutatott hegedűjének korpusz-hossza 35,10 cm. Építés ideje kori, eredeti nyakhossza nem ismert. Megközelítő pontossággal két forrás alapján határozhatjuk meg. Stradivari 1687-ben készült „Spanyol" hegedűjének – fotókópián mért – eredeti nyakmenzúrája 12,20 cm, 1679-ben épített „Hellier" hegedűjén 12,30 cm.[36] Ehhez adódik a csiga és a kulcsház együttes hossza (ami ugyan koronként és mesterenként kismértékben eltér, de a mérések átlagát figyelembe véve ma is szinte általánosan) 10,50 cm; 12,20+10,50=22,70 cm. Megerősíti ezt a hegedű átépítésével foglalkozó szakirodalom, miszerint az (az „átépítés" utáni) új nyak „hossza mintegy 8 mm-rel nőtt meg elődeihez képes."[37] (Ma a nyakhossz: 10,50+13,0=23,50 cm. Így a feltételezett eredeti nyakhossz: 23,50–0,8=22,70 cm). Ennek

alapján a hegedű teljes hossza: 35,10+22,70=57,80 cm. Ha a tárgyalt arányvizsgálathoz a korpusz hosszát (A) viszonyítjuk a nyakhosszához (B), az arányszám 35,10:22,70=1,54 (22. ábra).



22. ábra: A hegedű alapforma fő arányai (A:B)

Amennyiben a korpusz egyes formarészeinek szélességi méreteit viszonyítjuk egymáshoz, megközelítő eredményre jutunk. A kisívek közötti korpusz-szélesség (a) 16,59 cm, a középső ívek között (b) 11,05 cm. Ebből adódó arányszám 16,59:11,05=1,50. Mindezeken túl a korpusz, illetve a formarészeinek magassági méretei között is kimutatható hasonló arányosság.[38] Reprodukción végzett mérés alapján a kisívek (c) és a középső ívek (d) magasságának viszonyszáma 1,50, a teljes korpuszmagasság (e) és az alsó nagyívek, valamint a középső ívek közötti együttes magasság (f) között 1,53 (23. ábra).



23. ábra: A hegedűkorpusz egyes arányai

A kapott arányértékek matematikailag csaknem pontosak. Tisztában vagyunk azonban azzal, hogy egyrészt a vitruviusi természetbeli arányok nem tekinthetők konstans értéknek, másrészt a vizsgált Amati-hegedű méreteinek egy része viszonyítással került meghatározásra. A reneszánszban alkalmazott antik arány-meghatározás és az ez időben kialakult hegedűn kimutatható arányméretek azonban alig tekinthetőek véletlennek, mindenképpen valamiféle azonos kiindulás, közös szemlélet képezheti forrásukat.

Nézzük meg, hogy egy évszázaddal később – a barokk szemlélet idején – élő mesterek hegedűin alkalmazott arányok mennyire térnek el elődeikétől. Összehasonlításra kitűnő adatokat közöl S. Sacconi *Stradivari titkai* című könyvében a mester különböző alkotó-időszakaiból fennmaradt eredeti sablonméreteinek bemutatásával.

idő	hossz	felső rész szélessége	középső rész szélessége	alsó rész szélessége
1698	34,3	15,6	10,1	19,3
1698	34,6	15,4	9,8	19,5
1703	34,5	15,7	10,2	19,5
1705	34,8	16,1	10,2	20,0

Ha ez esetben is a felső rész szélességét viszonyítjuk a középső elemhez, ahogyan azt Amati hegedűin is tettük, az eredmény csaknem azonos: 15,6:10,1=1,54; 15,4:9,8=1,57; 15,7:10,2=1,54; 16,1:10,2=1,58.

A bemutatott vitruviusi arányviszonyok (21. ábra), valamint az Andrea Amati- és a Stradivari-hegedűkön kimutatott arányok (1,50–1,58 kö-

zötti értékek) közel állnak egymáshoz. Levonható az a következtetés, hogy a hegedűépítés kialakulásának idején a természetben megismerhető arányok – az emberi test arányai – képezték a formaalakítás íratlan szabályait. A később, elméletben is bizonyított egzakt arány ettől csak kismértékben tér el, alig nagyobb; geometriai szerkesztéssel 1,62, matematikai módszerrel 1,62.[39]

Az előzőekben elemzett arányokon túl a hegedűformában tükröződik a reneszánsz kori perspektíva-szemlélet hatása is. A hegedűkorpusz teljes formája összetartó képzelt kontúrok közé fogott, amit oldalnézetben a kávák magasságának csökkentése (hátsó tőkéktől a nyaktőkéig) még tovább hangsúlyoz (a korábbi vonós hangszereken nem jellemző, a gambákon, lírákon egyenlő a körbefutó káva magassága). Rokon törekvés ez azzal, ahogyan az építészet a perspektíva hatásával fokozza a tér-tömeg lendületességét, és sodróan dinamikussá varázsolja a kompozíciót (pl. a római Capitoliumi tér, ld. 7. ábra). A hegedűforma kecsességét növeli a kávamagasság nyak irányába eső csökkentése, hatására a hangszertest minden nézetében – térben is – dinamikus tömegalakítást nyújt.

4.4. A hegedű barokk formajegyei

A hegedű kialakulásának és a művészeti stílusszemlélet formálódásának időbeli összehasonlítása azt igazolja, hogy a hegedűforma a késői reneszánsz korában a vele egy időben kibontakozó kora-barokk stílus kezdetén jött létre. S ami különösen szembeötlő, hogy meghatározó formajegyeit a később kiteljesedett barokk sem változtatta meg. Mindez arról tanúskodik, hogy kialakult formája megfelelt a fejlett barokk esztétikai igényeinek, s mint vele azonosulót, magáénak fogadta. Annál is nagyobb figyelmet érdemel ez, mivel a képzőművészet minden területén, az építészetben, szobrászatban, festészetben markáns változás következett be. A kifejlett barokk új alkotószemléletet hozott létre, s ha felhasznált is a reneszánszban kedvelt formaelemeket (csigavonal, elleníves forma), átértékelte azokat, és a maga ízlésvilágához alakította.

Miben található akkor a barokk stílusszemlélet és a hegedű formavilága közötti kapcsolat? Mindenek előtt a tömegformálás mozgalmas, lendületes kialakításában. A barokk vizuális művészet meghatározó alapelve a dinamikus formaképzés. Az épület tömegét, a homlokzatokat hullámzó domború és homorú felületekkel, íves vonalú párkányokkal varázsolja mozgalmasabbá, festői hatásúvá. Ha párhuzamot vonunk a barokk épité-

szetben meghatározó formaalakítás és a hegedű formavilága között, nemcsak rokon szemlélet, hanem gyökeresen azonos szellemiség fedezhető fel. A barokk kompozícióiban kerülte az egyenes vonalak alkalmazását. A hegedűn sem találni a fogólap felfekvési síkján és az oldalélein kívül egyenes vonalszakaszokat, csupa ív, térbeli hajlított felületekkel határolt test. A barokk térbeli művészet – építészet, szobrászat – a tömeg és a felület plasztikusságának növelésével a fény és árnyék alakító szerepének kihasználására törekedett.

A hegedű formavilága is erre épül, a hajlított felületek: kávák, boltozatok, a csiga, a kontraposztos kulcsház térhatásai a fény-árnyék viszonyok között felfokozódnak. S valamiféle azonos szemlélet tükröződik a forma és az anyag viszonyának megítélésében is. A barokk szobrászat a tömeg és a forma könnyedségének érzékeltetése érdekében az anyagminőségből adódó korlátokat figyelmen kívül hagyja. A nehéz, súlyos kőből légies figurákat formál, s nem riad vissza a törékeny márványból könnyen letörhető formarészek alakításától sem (ld. 12/a-b ábra). A hegedű formaelemein is feltűnik ez. Annak ellenére, hogy a szerkezet sérülékeny vékony falemezből készült, a formaképzés helyenként eltekint a felhasznált anyag fizikai tulajdonságaitól. Érzékelhetővé teszi ezt a kávákon túlnyúló perem, egyes modelleknél különösen merészen kiugró sarkok és az *f*-bevágások konzolosan lebegő nyelvnyúlványai.

Mit változtatott mégis a kiforrott barokk stílusvilág a vele lényegében azonos formaszemléletet tükröző hegedű formajegyein? Karakterisztikusan kifinomultak a formarészletek, lendületesebbé vált a határoló ívek vonalvezetése, érettebb arányviszonyok alakultak ki, s ami legmeghatározóbb, hogy ez időben kristályosodtak ki az egyéni stílusjegyek, Nicola Amati, Jacob Stainer, Antonio Stradivari, Giuseppe Guarneri formavilága. (A hegedűtest kontúrjának személyi ízlést tükröző vonalvezetése, a sarkok merészebb vagy tompább kiszögellése, az *f*-bevágások méretének, formájának kialakítása, a csiga térbeli formajellemzőinek létrehozása.)

Nem kétséges, hogy mindezeket – a forma kecsesebb kialakítására való törekvés mellett – a korább megkonstruált szerkezet hangzásteljesítőképességének fejlesztésére irányuló szándék is ösztönözte (pl. a tető- és hátlemezek formát érintő szélességi méreteinek, a boltozat magasságának, valamint az egyes részelemei között lévő arányviszonyoknak megválasztása).

A korai barokk időszakában a hegedűn kialakult formajellemzők a hangszer fejlődésének további szakaszán sorsdöntők. Nemcsak arról tanúskodnak, hogy eredendően kötődnek a barokk formavilághoz, hanem bizo-

nyítják, hogy a stíluskor alkotó teljében, virágzó pompájának időszakában is megőrizte és továbbfejlesztette azokat. Az igazi tét, hogy ezeken a későbbi stíluskorszakok egyike sem változtatott. Némiképp magyarázatot nyújt erre, hogy a közvetlen utána következő kor, a klasszicizmus eszménye, szellemi példaképe – éppúgy, mint a hegedű kialakulása idején – az antik művészetszemléletben gyökerezett. Így a klasszicizmus sem talált „kivetnivalót" a hegedű formavilágában.

Ez az érvelés azonban eltörpül, ha a radikálisabb, a korábbi korok alkotói szemléletével egyáltalán nem azonosuló – sőt tagadni törekvő – további stílusfelfogások időszakával viszonyítjuk (romantika, a különböző izmusok kora), amelyeken keresztül a hegedű eredeti formáját máig megőrizte.

Némi emelkedettséggel úgy is fogalmazható, hogy a korai barokk kor idején létrejött és a virágzó barokk stílusszemlélet hatása alatt kiteljesedett hegedű kialakult, mint kagylóban a gyöngy és megőrizte eredetiségét, amit az idő tovább nemesített.

5. Hatástendenciák

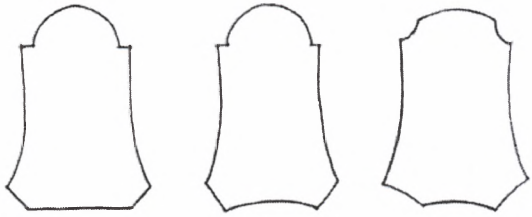
A hegedű és a képzőművészet formavilágának elemzését értelmetlenül beszűkítenénk, ha csak az egyirányú hatásokat – a képzőművészeti alkotásokból a hegedű formavilágának alakítására ható tényezőket – vizsgálnánk. Egyáltalán nem ritkaság a különböző formaalakító művészeti ágak között felismerhető hatás-iteráció. Arra azonban nincs bizonyíték, hogy a képzőművészet és a hegedű formajellegzetességei között kezdettől fogva kölcsönös egymásra hatás érvényesült volna. A dokumentálható tények alapján csupán az rögzíthető, hogy a kialakult hegedű formajellegzetességei és a képzőművészetben ez időre már ismert, alkalmazott formaelemek között közvetlen rokonság mutatható ki, illetve hogy a hegedű megjelenésével egy időben meghatározó vizuális művészet szemlélete tükröződik a hegedű formaalakításában. Sajátos szimbiózis ismerhető fel ebben a viszonylatban; meghatározható ideig tartó egyirányú folyamat.

Az is szembeötlő, hogy ez a kezdetben élénk, intenzív hatás a hegedű teljes kialakulásának idejére szinte teljesen lecseng, s a következő korok dinamikusan pergő formaalakító művészete nem idézett elő változást a hangszer kikristályosodott formavilágában.

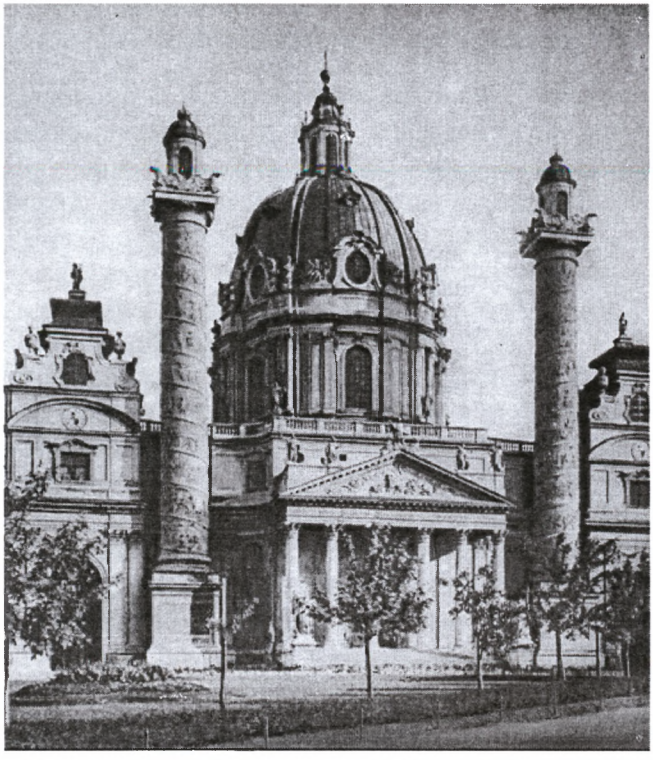
Ami kisebb formamódosulás a 17-18. század fordulón az átépítés folyamán történt (elölnézetben; a nyak és a fogólap hosszának megnövelése,

oldalnézetben; a nyak hátrafelé döntése) nem a képzőművészet hatásának a következménye, hanem a hangszer (eredően fizikai-akusztikai) teljesítőképességét növelő módosítás intuitív eredménye.

Arra is akad példa, hogy a hegedű létrejött, kiforrott formajellemzői visszatükröződnek képzőművészeti alkotásokon. A későbbi korok építészetében – jellegzetesen az osztrák és a magyar architektúrában – használt úgynevezett lant-, illetve hegedűablakok formarokonságról árulkodnak. Bár hasonlóságuk kissé elvontnak, mesterkéltnek tűnik, ám az ablakok befelé forduló oldalívei és a hegedű „C" íveinek egymáshoz viszonyítása alapot nyújt az ilyen irányú hatás feltételezésére (24. ábra).



24. ábra:
Lant-, illetve hegedűablakok



25/a ábra:
Karl Borromeus temploma
(1716-1737)
Bécs

25/b ábra: Savoyai kastély (1701-1702), Ráckeve

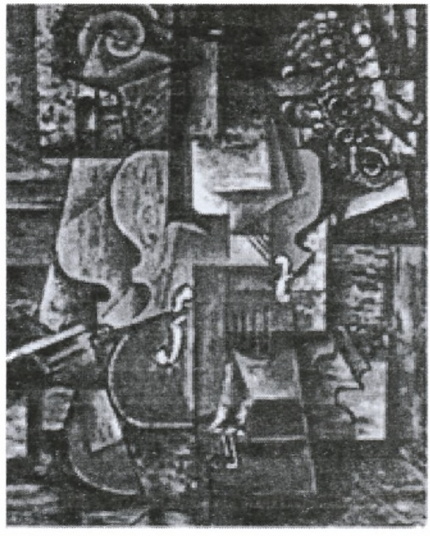
Ilyen ablakformákat egyaránt alkalmaztak egyházi és világi épületeken, templomokon, főúri rezidenciákon. Különleges formájuk egy-egy hangsúlyos épületrész homlokzati kialakításának záró motívuma: pl. Karl Borromeus templom, Bécs, Savoyai kastély, Ráckeve (25/a-b ábra). Máshol még ennél is kiemeltebb szerepet látnak el a főhomlokzat formálásában, pl. Eszterházy kastély, Fertőd, Szt. Anna templom, Budapest (26/a-b ábra).

A hegedű – a hegedűcsalád – ismert formavilága gyakran szerepel a szobrászatban és festészetben is. Gazdag, játékos formakincse, térbeli és sík vonalainak társítása, szétválasztása, tagolása kimeríthetetlen lehetőséget kínál a művészi mondanivaló kifejezésére.

26/a ábra:
Eszterházy kastély (1788-1794)
Fertőd

26/b ábra:
Szent Anna templom (18. század közepe)
Budapest

Számos esetben pusztán csak a hegedű formája ihlette-ihleti a művészeket alkotásra. Szinte minden művészeti stíluskorszakból ismert különböző, a készítés korára jellemző (naturális vagy nonfiguratív) festői szemléletet tükröző hegedűábrázolás (27. ábra).

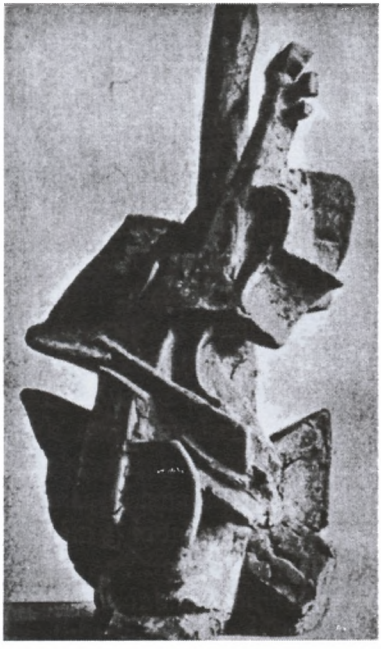


27. ábra:
Picasso: Hegedű és szőlő
(1912)

Nemcsak mint egyedülálló téma, hanem sokszor a művészi alkotás kiegészítő elemeként szerepel (pl. hegedű zenélő alakok között, 28/a-b ábra), más esetben mint az adott alkotás eszmei, művészeti többletjelentésének kiteljesedését szolgáló kompozíciós elem (pl. a muzsikáló ember és a zene eggyé válásának megjelentetése, formába foglalása, 28/c-d ábra).

28/a ábra:
Beck Ö. Fülöp: Vonósnégyes
(1914)

28/b ábra:
P. Renoir: A Catulle-Mendès lányok



28/c ábra: Otto Gutfreund: A zene (1925)

28/d ábra: Berényi Róbert: Csellózó nő (1928)

A hegedű formajegyei és a képzőművészet formavilága közötti viszonyból a műalkotásokra egyetemlegesen jellemző szellemi összetartozás tükröződik. E kapcsolatban rejlik a hegedűnek – mint az auditív művészetnek, a zene eszközének – és a térbeli vizuális alkotásnak – mint hangszernek – az eszmei egysége.

Töprengés (utószó helyett)

A tanulmány befejezése után előbukkan néhány kérdés:

1) Bizonyítható, hogy a hegedű a reneszánsz és barokk stíluskornak átmeneti időszakában alakult ki, és napjainkig fennmaradt formavilágát a virágzó barokkban nyerte el. Miért nevezi akkor a szakirodalom – és alkalmanként a szaknyelv is napjainkban – a 18. században átépített hegedűket „modern" hegedűnek?[40] Általánosan elfogadott, hogy a modern fogalma alatt a legújabb időben létrejött, az utóbbi évtizedben megvalósult újszerű alkotásokat értjük.[41] (A művészettörténet rendszeresen különbséget is tesz az azonos vagy közel azonos stílusjegyeket tükröző korábbi, illetve későbbi alkotások között: pl. érett reneszánsz, hanyatló-reneszánsz, korai barokk, virágzó barokk, késői barokk.) Honnan származik ez a meghatározás? Ennek kiderítésére a hegedűirodalom eredeti műveinek teljes körű ismeretére lenne szükség. Annyi tudott, hogy a Hill-testvérek *Antonio Stradivari* című, 1902-ben Londonban megjelent munkájában már szerepel a „barokk hegedű", „modern hegedű" megkülönböztetés.[42] Amennyiben az „átépítés" közel a 19. század közepéig tartott (ahogyan a szakirodalom máshol említi), akkor még a 19-20. század fordulóján nem tekinthető túlzottan nagyvonalúnak ez a definiálás. Ám azóta több mint egy évszázad telt el!

2) A barokk stíluskorszakot számos eltérő sajátos karakterű művészeti stílus követte: a vele szellemi kapcsolatban álló rokokó, a reneszánsz szemléletével szimpatizáló klasszicizmus, a barokk eszményeket kedvelő romantika és a különböző „izmusok". Előbb a formát elfogadó figuratív (impresszionizmus, expresszionizmus stb.), majd a formabontó nonfiguratív (futurizmus, szürrealizmus stb.) irányzatok. Ezek idejében is létrejöttek olyan alkotások, amelyek valamiféle szellemi vagy marketing érdekből korábbi kor stílusjegyeit öltötték magukra. Ezeket azonban elnevezésben is megkülönböztetik: neobarokk, neoklasszicista stb. Elgondolkodtató, hogy a művészi, iparművészeti indíttatású hegedűépítés nem él ezzel, annál is inkább, mivel a hegedű korhű stílusformájának megőrzése mindenképpen

érdemei közé tartozik és elismerést kiváltó erkölcsi tőke. Ám modernnek nevezni, vagy hallgatólagosan tudomásul venni azt, ami formájában és konstrukciójában megegyezik a történelmivel – kissé – a gondosan őrzött eszmei érték megóvásának részleges feladását is jelenti.

3) Nyilvánvaló, hogy a „modern hegedű" elnevezés a korábbi korai barokk hegedűk és az átépítéssel „korszerűbbé" vált és a továbbiakban így épített hegedűk megkülönböztetésére alakult ki. Talán a 19. században helyénvaló is volt ez a megjelölés, hiszen új követelmények, az akkori korszerűbb igények indokolták a módosítás szükségességét. Ezen kívül a „barokk hegedű" és az átépítés utáni „modern hegedű" között valóban eltérő hangzásbeli különbség van. (Ebből adódóan érthető a zenei interpretálás során szokásos megkülönböztetés: pl. barokk hegedűn játssza... vagy hegedűn előadja...). Csakhogy az előbbi e hangszertípus kialakulásának kezdeti szakaszából ismert *korai hegedű*, a másik, a kiérlelt, a napjainkban is használatos *hegedű*. Mint vizuális alkotás azonban mindkettő – a „modern" hegedű is – barokk stílusjegyeket, formaeredetiséget hordozó kompozíció. Az sem hagyható figyelmen kívül, hogy az átépítés – a „modern" hegedű létrejötte után számtalan próbálkozás történt valamiféle új hegedű kialakítására. Előbb a tradicionális megoldás keretein belül (a húrok rezgéseinek a hangszer-testtel történő felerősítésével), ezt követően merőben más útonmódon. Az újító törekvések sorra hozták létre a hegedűre csupán emlékeztető rezonátor formákkal rendelkező, vagy éppen csak a hangkeltő elemeket – a húrokat – tartó vázszerű instrumentumokat (dzsessz-hegedűket), amelyek elektronikus, korunkra jellemző *modern eszközökkel* érik el a zenei hatást. Végeredményben a hegedű formavilágát és konstrukcióját tekintve megmaradt barokk alkotásnak. Ami modern benne, az az adottság, amely alkalmassá tette a mindenkori megújuló igények teljesítésére a barokk zenétől a kortárs muzsikáig.

II.

A HEGEDŰ ANALÓG STATIKAI ELEMZÉSE

Bevezetés

A hegedűt létezése óta csodálat övezi. Hangja elbűvöl szinte minden zenekedvelőt, alakja, formarészleteinek finomsága pedig lenyűgözi a térbeli művészet iránt fogékony szemlélőt. Aki mindezeken túl betekinthet a hangszer belsejébe, s közelebbről megismerheti a hegedű szerkezetét, önkéntelenül ámulatba esik, hogy ez a légiesen könnyed, alig néhány milliméter vastagságú fából készült instrumentum, hogy képes több évszázadon keresztül épségben megmaradni. S ha még azt is ismerjük, hogy a négy húr felhangolt állapotban (a húr anyagától függően) 285–295 N (28,5–29,5 kp) húzóerővel terheli a hegedűtestet – amiből a lábon keresztül közel 120 N (12 kp-nyi) nyomóerő nehezedik a vékony tetőlemezre –, még izgalmasabb a kérdés: hogyan tud ellenállni a hegedű szerkezete a külső erőhatásoknak? Ez ideig alig található szakirodalmi forrás arra, hogy a tapasztalati úton kialakult konstrukció milyen mértékben alkalmas az elkerülhetetlen terhelő hatások elviselésére. Arról is hiányos információkkal rendelkezünk, hogy a hegedűtestben előforduló meghibásodások, roncsolódások milyen mértékben függnek össze a húrokban lévő feszítőerőkből kialakuló igénybevétellel.

A hegedűről pedig sok könyv és tanulmány jelent már meg. Szembetűnő, hogy milyen széleskörű nemzetközi irodalommal rendelkezik ez az évszázadokon át megkülönböztetett érdeklődéssel és csodálattal övezett hangszer. Ezeknek a szakmunkáknak egy része e zeneszerszám kialakulásával, történelmi, formai fejlődésével, alkotóinak és koruk szellemi világának kapcsolatával; más része a hegedűépítés technológiájával, a kidol-gozás gyakorlati ismereteivel foglalkozik. Nyugtalanítóan nagy számban akad közöttük a korábbi korok hegedűépítésének vélt titkait feltárni szándékozó munka. Kiterjedt azoknak a tanulmányoknak a köre, amelyek a hegedű hangjának sajátosságait, a hangszerben létrejövő mechanikai rezgések hangeffektusainak vizsgálatát tűzi ki célul. Külön csoportba sorolhatók a hegedűnek a zenei világban betöltött szerepét, a hegedűjáték ismereteit boncolgató művek.

Meglepő azonban, hogy a hegedűvel foglalkozó – különböző témaköröket átfogó – szakirodalomban nem található olyan elemzés, amely a hegedű mechanikai szintézisét boncolgatja, vizsgálja a hangszerben fellépő erőket, feltárja a hangszerstatikai problémákat, és a hang képződésének dinamikai elemzésére épül. Akad néhány olyan tanulmány, amely megemlít statikai viszonyokat, sőt még számszerű értékeket is közöl. Ezek azonban a tényszerűnek tűnő megállapításokon alig jutnak túl, és

adósak maradnak az ok és az okozati kapcsolatok, illetve főként az ebből levonható következtetések feltárásával.

E tanulmány ennek a komplex kérdéskörnek elemzésével foglalkozik. Bemutatja a hegedűtestre ható külső erők nagyságát, eloszlását és hatását, valamint a szerkezetben létrejövő belső (húzó-, nyomó-, nyíró-, csavaró- és hajlító-) erőket. Egzakt számításokat végez, hogy az empirikus következtetések felhasználásával – az intuíció hatása alatt, több évszázaddal ezelőtt – kialakult szerkezetben valójában milyen és mekkora nagyságú erők lépnek fel. Okozhatnak-e ezek az erők közvetlenül kritikus igénybevételt? Kimutatható-e összefüggés az esetenként előforduló roncsolódások és az adott szerkezet választott méretparaméterei között?

A mai mechanikai, statikai ismeretek birtokában meglepetésként hat, hogy a 16-17. századi hegedűépítők – minden valószínűség szerint pusztán tapasztalat alapján – a hegedű szerkezeti-erőtani működését tekintve korukat jóval meghaladó megoldást alakítottak ki. Rendkívüli találékonysággal a tető- és a hátlemez térbeli megformálásával a húrokban fellépő feszítőerőt kihasználták a szerkezet teherbírásának növelésére. Ennek lényege abban áll, hogy minél inkább nő a feszítőerő a húrokban felhangolás közben, a hegedűtestben fellépő belső erők egymásra hatása következtében arányosan csökken, a lábon keresztül a tetőlemezre jutó nyomóerő hatása. A mérnöki gyakorlat évszázadokkal később – csak a 20. század közepén – kezdte alkalmazni (az úgynevezett feszített szerkezeteknél) ezt a méretezési elvet. Csupán annyi különbséggel, hogy amíg a mérnöki szerkezetekben a beépítés előtt hozzák létre a terheléssel szemben előnyös feszültséget, a hegedű esetében a felhangolás közben, a terhelés kialakulásával együtt jön létre ez a kedvező belső erőrendszer.

Ez a bravúros konstrukció részleteiben azonban magában hordozza az intuíció következményeit. A számítások azt igazolják, hogy a hegedűtestben előforduló főbb szerkezeti meghibásodások közvetlenül vagy közvetve a terhelésből adódó belső erők hatására jönnek létre (makk-kiszakadás, tető- és hátlemezrepedés, lemezdeformáció, stb.).

Közismert, hogy minden szerkezet terhelés hatására rövid idő alatt megváltoztatja alakját (megnyúlik, összenyomódik), ezt követően relatív egyensúlyi állapot következik be. Az állandó, hosszú ideig tartós terhelésnek kitett szerkezetben azonban további, kismértékű deformáció, úgynevezett lassú alakváltozás folyamatával kell számolni. A hegedű szerkezetében is kimutatható ez a hatás: pl. a nyak dőlésszögének csökkenése, a nyaktengely kifordulása, valamint a tetőlemez torzulása is ennek következménye.

A tanulmány a hegedűt nyugalmi helyzetében, felhangolt állapotban vizsgálja, hogy a kívánt alaphang eléréséhez a húrokban szükséges feszítőerők milyen további erőket és feszültségeket hoznak létre a hangszer különböző pontjain. Analóg statikai módszerrel bemutatja a hegedűtestben kialakuló erőhatásokat, amelyekkel szemben a hangszer egyes szerkezeti elemeinek ellenálló képességén múlik a teljes szerkezet állékonysága, biztonsága. Összehasonlítja a kialakult, ma is alkalmazott hegedűépítési gyakorlat szerkezeti megoldásainak teherbíró képességét a számítással igazolható, egzakt elméleti eredményekkel. Részletezi azokat a viszonyokat, amelyek a hagyományos szerkezet tényleges teherbíró képessége és a korszerű elméletben ismert igénybevétel határértéke között kimutatható.

1. A hegedűben fellépő erőhatások

1.1. A húrokban lévő feszítőerők

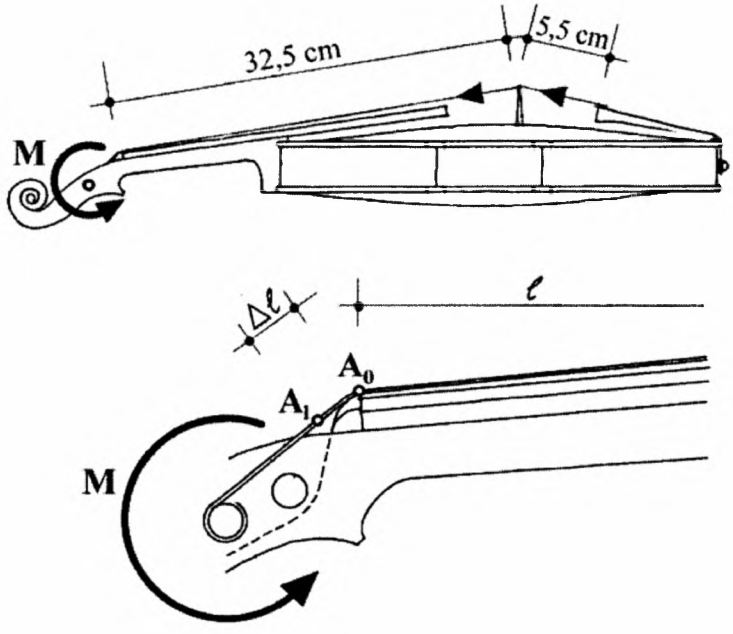
A hegedűtestben felhangolás előtt – nyugalmi állapotban – nincsenek kimutatható erők, mivel a nyak, a kulcsház és a csiga, valamint a tető- és a hátlemezek térbeli kialakítása (boltozat jellegű megformálása) feszültségtől mentes anyagból faragással, a felesleges részek eltávolításával készül. Csupán a kávaelemekben lehetnek a hajlítás következtében elhanyagolható kisebb „látens" erők, de újabb külső hatás nélkül bennük sincs feszültség.

Amikor azonban a hegedűt felhangolják, a húrok a feszítőerő következtében megnyúlnak, s anyagukban a rugalmas alakváltozást előidéző külső erőkkel szemben azonos nagyságú belső erők lépnek fel. Ennek egyszerű fizikai magyarázata, hogy a külső feszítőerő következtében a szilárd anyag kristályrácsaiban lévő részecskék elmozdulnak eredeti egyensúlyi helyzetükből, mialatt a test részecskéi között lévő molekuláris vonzások a testre ható külső erővel szemben ellentétes irányú belső erőket hoznak létre. Szilárd testek nyugalmas alakváltozása során a megnyúlás *(Δλ)* egyenes arányban áll a feszítő (külső) erővel *(F)*, a test eredeti hosszával *(λ)*, fordítottan arányos az anyag rugalmassági modulusával *(E)* és keresztmetszetének felületével *(A)*.

A Hooke-törvény alapján:

$$\Delta\lambda = \frac{F \cdot \lambda}{E \cdot A} \; ; \text{ ebből: } F = E \cdot A \cdot \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$$

Tájékozódásunk érdekében nézzük meg, hogy egy homogén keresztmetszetű acél *e*-húrban 3,0 mm megnyúlást mekkora feszítőerő hoz létre (29. ábra). A húr teljes hossza *(λ)* 38,0 cm (a rezgő húrszakasz 32,5 cm, a láb és a húrtartó közötti rész 5,5 cm). A húr átmérője *(d)* 0,28 mm, rugalmassági modulusa *(E)* = $2 \cdot 10^5$ N/mm^2



29. ábra: A feszítőerő hatására a húr A_o-val jelzett pontja $\Delta\lambda$ megnyúlás következtében az A_1 pontba kerül

Az előbbi összefüggésből számolva $A = \frac{d^2 \cdot \pi}{4} = 0{,}0615$ mm^2, a feszítőerő nagysága: $F = \frac{2 \cdot 10^5 \cdot 0{,}0615 \cdot 30}{38{,}0} = 97{,}10$ N (9,71 kp).

Az előzőekben a teljes húrhosszban fellépő megnyúlás alapján számoltuk ki a feszítőerő nagyságát. Meg kell azonban jegyezni, hogy a két különböző – a rezgő húr és a láb mögötti – húrszakasz vektorparamétereinek különbsége, valamint a lábgerincen fellépő súrlódás miatt (amint a későbbiekben látni fogjuk) az egyes húrszakaszokban kimutatható feszítőerők nagyságrendileg eltérnek egymástól.

Az sem mellékes, hogy csupán egyetlen acélhúrban feltételezett megnyúlás alapján mutattuk ki az alakváltozást előidéző feszítőerő nagyságát. Mivel a hegedűn együttesen alkalmazott húrok *(e, a, d, g)* anyagukban, keresztmetszetükben és a kívánt alapfrekvencia tekintetében különböznek egymástól, a feszítésükhöz szükséges külső erők és a bennük fellépő belső erők is húronként eltérő nagyságúak.

Minden bizonnyal a korábbi időkben alkalmazott bélhúrokban kisebb húzóerő lépett fel, nemcsak a szerves anyag sajátossága miatt, hanem a mainál mérsékeltebb nyakdőlésszög, illetve a korunkban használatos normál *a*-hanghoz képest alacsonyabb frekvencia sem igényelt nagyobb húrfeszítést.[43]

A továbbiakban célszerű áttekinteni az alaphang eléréséhez szükséges frekvencia és feszítőerő összefüggését. Maradjunk is a homogén anyagú *e*-húr vizsgálatánál. Mint ismeretes, a húr vastagsága, anyagsűrűsége és a feszítőerő függvényében meghatározott hullámterjedési sebesség $c = f \cdot \lambda$, ahol f az alapfrekvencia, λ a hullámhossz. A húros hangszerek húrjain kialakuló állóhullámok esetben a két végén rögzített húrban a frekvencia $f = \frac{c}{\lambda}$.

Ismert, hogy az alaprezgésnek két csomópontja van (a húr rögzítési pontjainál): így $\lambda = \frac{\lambda}{2}$, vagyis $\lambda = 2 \cdot \lambda$ pontok A húr hosszának *(λ)* a rögzítési pontok közé eső zengő húrszakaszt tekintjük, ami 32,5 cm. Az *e*-húrban keletkező hullámterjedési sebesség számításához még ismerni kell az alap-frekvencia nagyságát. Ennek mértéke a temperált kromatikus skála szerint: 659,35 Hz.

Az $f = \frac{c}{\lambda}$ összefüggésből $c = f \cdot \lambda$; $c = 659{,}35 \cdot 2 \cdot 0{,}325 = 42858$ m/sec.

A húrban lévő hullámterjedési sebesség és a feszítőerő közötti viszonyt a $c = \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}}$ összefüggés fejezi ki, ahol σ az anyagban fellépő feszültség, ami a feszítőerő *(F)* és az anyag keresztmetszeti felületének *(A)* hányadosa, vagyis $\sigma = \frac{F}{A}$, ρ pedig az anyag sűrűségi mutatója. Az *e*-húr keresztmetszeti felületét már számítottuk: $A = 0{,}0615$ mm^2, (króm-nikkel acél) anyagának sűrűsége 8,3. A fentiekből következően:

$$c = \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}};\ c = \sqrt{\frac{F}{A \cdot \rho}};\ c^2 = \frac{F}{A \cdot \rho};\ \text{vagyis}\ F = c^2 \cdot A \cdot \rho$$

tovább: $F = 428{,}582 \cdot 0{,}0615 \cdot 8{,}3 = 93{,}75$ N (9,37 kp), tehát a feltételezett viszonyok között az *e*-húrban 93,75 N feszítőerő keletkezik. A megismertekből érzékelhető, hogy a különböző húrokban anyaguktól, vastagságuktól és a kívánt alapfrekvenciát biztosító feszítés mértékétől függően eltérő nagyságú erők adódnak, illetve a rugalmas alakváltozás következtében ezekkel egyező belső húzóerők lépnek fel. Az $F = c^2 \cdot A \cdot \rho$ összefüggés szemléletesen igazolja, hogy a kisebb anyagsűrűségű és keresztmetszetű húrokban azonos frekvencia mellett csökken a feszítőerő nagysága.

A hegedűtestre ható erők nagyságának meghatározásához azonban az alkalmazott húrokban ténylegesen fellépő feszítőerőt vehetjük alapul. A 20. század elején használatos húrokban mért feszítőerőkről Otto Möckel *A hegedűépítés művészete* című könyvében[44] közölt adatokat: *e*-húrban 8,965 kg, *a*-húrban 6,875 kg, *d*-húrban 6,325 kg, *g*-húrban 6,255 kg, Összesen: 28,42 kg.

A napjainkban használt húrok széles, tág paraméterekkel rendelkeznek. Az azonos hangtartományba tartozó, csupán fokozatban különböző (lágy, közepes, erős) készítményekben egymáshoz viszonyítva 1,5 kp (15 N) nagyság-renddel is eltér a meghatározott mértékadó feszítőerő. A Thomastik gyártmányokban a húr minőség szerinti feszítőerők nagyságáról a cég bemutatott termékismertetője (a számszerű értékekről kp-ban) nyújt tájékoztatást.

	e			a			d			g			~~e+a+d+g~~
	l	k	e	l	k	e	l	k	e	l	k	e	e
Dominant	7,5	7,8	9,1	4,6	5,5	5,9	4,0	4,5	5,5	3,9	4,5	4,9	25,4 kp
Präzision	7,5	7,8	9,1	5,9	6,5	7,5	5,3	5,9	6,7	5,0	5,5	6,2	29,5 kp
Spirocore	7,2	7,5	8,0	5,6	6,0	6,5	4,5	5,0	5,5	4,0	4,6	5,0	25,0 kp
Superflexible	7,3	7,8	8,0	6,0	6,5	7,0	5,0	5,9	6,3	4,8	5,5	5,9	27,2 kp

l = lágy; k = közepes; e = erős

A hegedű statikai állóképességének vizsgálatához a további számítások során az előfordulható legmagasabb feszítőértéket célszerű alapul venni. A fenti táblázat alapján ilyen a Thomastik Präzision húregyüttes, amelynek „erős" fokozata 29,5 kp (295 N) feszítőerővel terheli a hegedűtestet. Az ennél kisebb húrfeszítőerővel terhelt hegedűkben a feszítőerő mérséklődésével arányosan csökkennek a belső erők, kisebb feszültségek lépnek fel, tehát biztonságosabb a szerkezet ellenálló képessége.

1.2. A húrokban keletkezett húzóerők hatására a hegedűtestben kialakuló erők

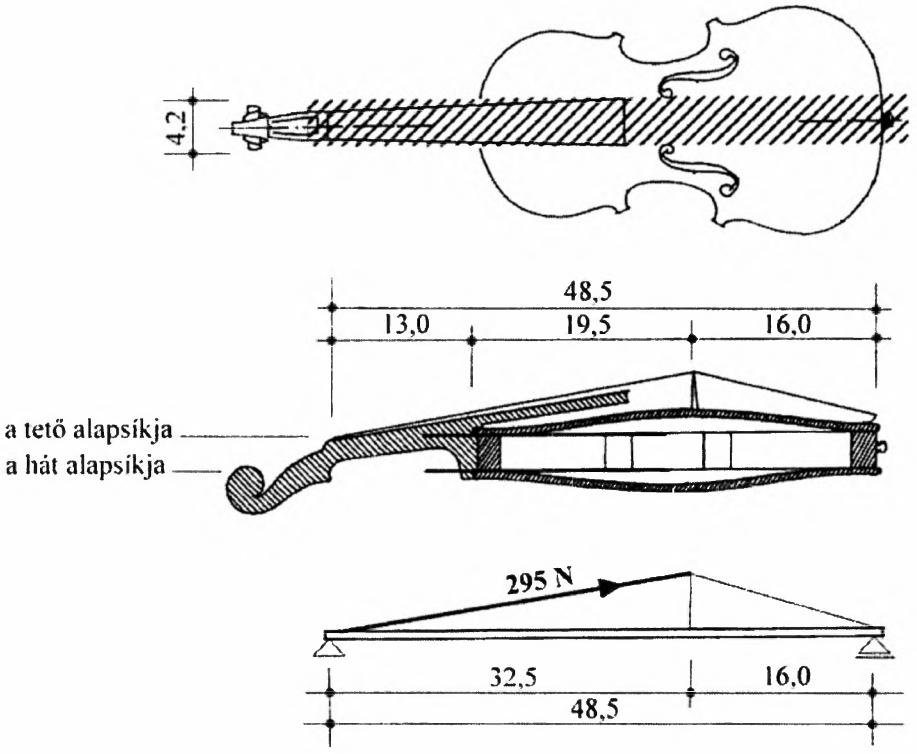
A húrokban keletkezett feszítőerők a felfekvési pontokon – a felső és az alsó nyergen, valamint a lábon keresztül – különböző nagyságú húzó-, nyomó-, nyíróerőket és forgatónyomatékokat hoznak létre a hegedűtestben. A kérdés az, hogy mekkorák ezek az erők, hogyan helyezkednek el, és a fellépő feszültségek mennyivel maradnak alatta az anyagra jellemző határértékeknek, elég biztonságos-e a hangszer statikai stabilitása.

Számításaink során vizsgáljuk meg, hogy a húrokban kialakuló feszítőerővel egyenlő nagyságú, de ellentétes irányú belső húzóerők milyen jellegű és nagyságú további erőket hoznak létre a hegedűtestben. Mivel azonban a hegedű szerkezete összetett térbeli konstrukció – a két irányban hajlított tető- és hátlemezekben, valamint az íves kávákban csakúgy, mint a mérnöki héjszerkezetekben –, bonyolult matematikai és statikai számításokkal követhető az erők alakulása. Ezért a könnyebb áttekinthetőség érdekében előnyös, ha a vizsgálat céljainak megfelelő, egyszerű statikai modellekkel helyettesítjük a hegedűtestet. Képzeletben alakítsunk ki a hegedűtestből a láb méretével megegyező (4,2 cm) szélességű hosszmetszetet. Az így nyert metszet analóg tartószerkezetként fogható fel, aminek segítségével megismerhetők a hegedű metszetében fellépő erők (30. ábra).

Meg kell azonban jegyezni, hogy az előzőekben a hegedűtestből képzett szeleten a tető- és a hátlemez metszete íves vonalú, s ezért a bennük fellépő erők összetett számítást igénylő íves tengelyű tartóként analogizálhatók. E miatt a számítás első szakaszában előnyös további egyszerűsítést alkalmazni.

Ennek alapján előbb a tető és a hát alapsíkjára, valamint a húrláb tengelyvonalára vetítjük a húrokban keltett feszítőerőkből képződő erőket, és

csak az ezt követő számításaink során határozzuk meg a hegedű szerkezetének különböző pontjain: a lemezmetszetekben, a tető- és hátlemezben képződő komponenseit.

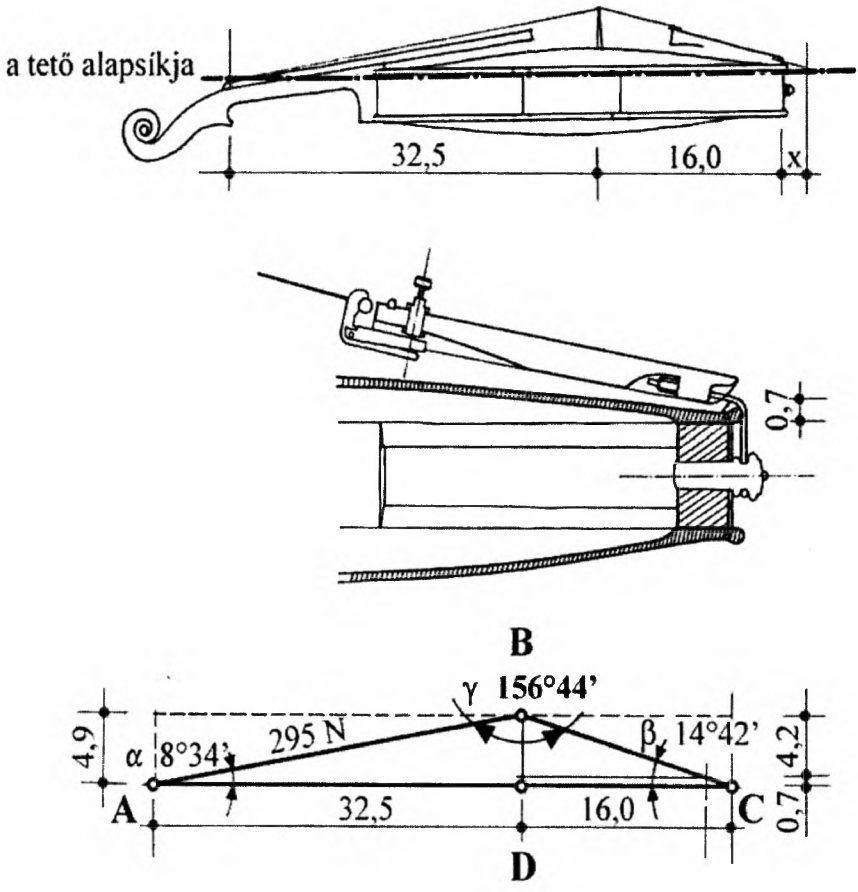


30. ábra

Az előző részben megismertük a zengő húrszakaszban lévő feszítőerők nagyságát. A négy húrban a legmagasabb feszítőértéket alapul véve 295 N (29,5 kp) együttes erővel célszerű számolni, mivel ilyen adottságú húr-együttes veszi leginkább igénybe a hegedű teherbíró képességét. Ezek az értékek azonban a felső nyereg és a húrláb közötti húrszakaszban lévő feszítőerőket mutatják be. A továbbiakban ki kell számítanunk a húrok teljes hosszában, a láb és a hátsó nyereg közötti húrszakaszban fellépő erőket is.

A húrok tengelyvonalai nem párhuzamosak, a felső nyereg és a láb gerinc íves kialakítását követve a *g*- és az *e*-húrok kisebb szöget zárnak be a tetőlemez alapsíkjával, mint a *d*- és az *a*-húrok. Azonban az egyes húrok

és az alapsík által bezárt szögek között olyan kicsiny az eltérés, hogy számításaink során nagyságrendi különbségeket nem eredményeznek, így a négy húr tengelyvonalát egy síkban elhelyezkedőnek tételezhetjük fel. Amíg azonban a húrok felfekvési pontjai a felső nyergen csaknem pontosan egybeesnek a tetőlemez alapsíkjával, a hátsó nyeregnél 0,7 cm-rel e felett helyezkednek el. Mivel ez az adottság befolyásolja a húrok tengelyvonala és az alapsík között, valamint a lábnyereg fölött kialakuló szögek értékét, s ebből következően az erők nagyságát is, ezért a számításaink során nem hagyhatók figyelmen kívül (31. ábra).



31. ábra

A húrokban lévő feszítőerők, illetve húzóerők a hegedűtestre a felfekvési pontokon terhelő erőket adnak át. Az ábrából szembetűnik, hogy a két egymáshoz kapcsolódó – *ABD* és a *BCD* pontok által meghatározott – háromszögek egyben erőháromszögekként kezelhetők. Ezek segítségével a húrok zengő hosszában már ismert feszítőerők összességéből (295 N) a szögek alapján kiszámíthatók a rövidebb húrszakaszban fellépő húzóerők, valamint a láb és a tető alapsíkjában keletkező erők nagysága.

Mindenekelőtt a húrok felfekvési pontjainál lévő szögek mértékét kell kiszámítani.

$$\alpha = tg\alpha = \frac{4,9}{32,5};\ 0,1507 = 8^\circ 34'$$

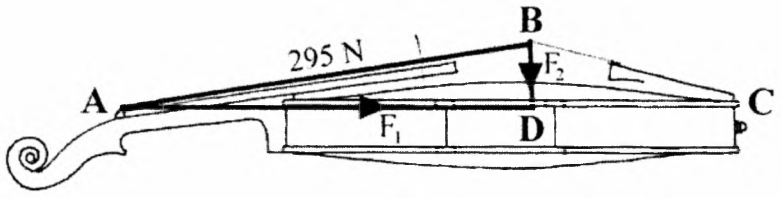
$$\beta = tg\beta = \frac{4,2}{16};\ 0,2625 = 14^\circ 42'$$

Bár a további számításaink során nem lesz szükség a húrlábgerinc feletti húrtengelytörés mértékére, a teljesség érdekében határozzuk meg ennek nagyságát is, mivel a legtöbb tanulmány előszeretettel használja a húrláb fölötti húrtengelytörés szögértékét: $\gamma = 180^\circ - (8^\circ 34' + 14^\circ 42') = 156^\circ 44'$.

A zengő húrszakaszban az *A* és a *B* pontok között a négy húrban ható húzóerők együttes összege 295 N. Ezzel az erővel arányos nagyságú további erők és nyomatékok lépnek fel a hegedűtestben, a hegedű szerkezetének egyes elemeiben. A négy húrban lévő húzóerőkből az alapsíkban az *A és D* pontok között fellépő erő *(F)* irányát tekintve az *A*-ból *D* irányba hat, vagyis nyomóerő (32. ábra):

$$\cos\alpha = \frac{AD}{295} = 0,9888;\quad F_1 = 0,9888 \cdot 295 = 291,69\ \text{N}$$

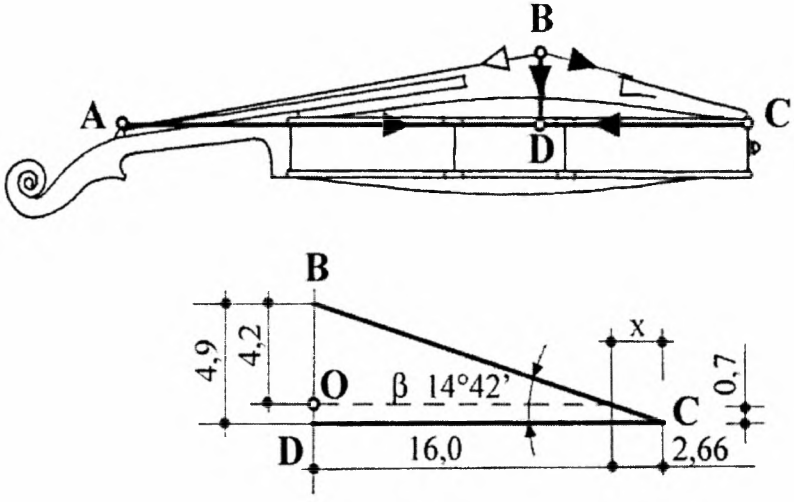
A láb síkjába a *B és D* pontok között fellépő, a tető alapsíkjára merőleges erő: $\sin\alpha = \frac{BD}{295} = 0,1490;\quad F_2 = 0,1490 \cdot 295 = 44,10\ \text{N}$



32. ábra

A láb mögötti húrszakaszban fellépő erő nagyságát erőháromszög trigonometriai segítségével számíthatjuk ki. Már megismertük, hogy a zengő húrszakaszban lévő feszítőerőnek (295 N) az alapsíkban kimutatható vetülete 291,69 N. Az erőegyensúly fenntartása érdekében a láb mögötti húrszakaszban keletkező feszítőerőnek az alapsíkban képződő komponense ezzel azonos nagyságú, ellentétes irányú erő.

Számításunkban nem okoz zavart, hogy a *BCD* háromszögben az elméleti alapsík a hátsó nyeregnél megemelt húrtengely következtében 2,66 cm-rel túlnyúlik a hegedűtesten (33/a ábra). Az alapsík és a húrtengely által bezárt szög azonban változatlan marad (14° 42'). Így ha erőháromszögnek tekintjük a láb mögötti erőrendszert, a *BC* átfogó képezi a vizsgált húrszakaszt. Ennek *DC* komponense a zengő húrszakasz alapsíkban képződő vetületével azonos nagyságú (291,69 N).



33/a ábra

A láb mögötti húrszakaszban kialakuló feszítőerő tehát:

$$BC = \frac{291,69}{\cos \beta}; \frac{291,69}{0,9672} = 301,58 \text{ N (33/b ábra).}$$

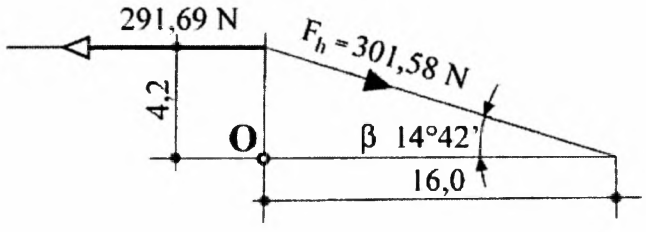
A továbbiakban a *BCD* erőháromszögben is megismerhetők a láb síkjában, illetve a tető alapsíkjában fellépő erők.

A láb síkjában a *B és D* pontok között ható erő:

$$sin\beta = \frac{BD}{301{,}58};\quad 0{,}2537 \cdot 301{,}58 = 76{,}51 \text{ N}.$$

A tető alapsíkjában a *D és C* pontok között lévő erő:

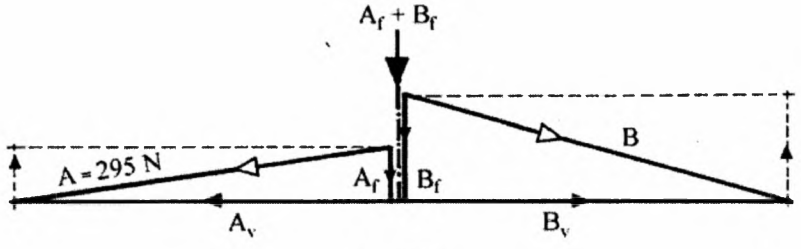
$$cos\beta = \frac{DC}{301{,}58};\quad 0{,}9672 \cdot 301{,}58 = 291{,}69 \text{ N}.$$



33/b ábra

Ezzel az erőháromszög segítségével valamennyi erőt megismertük. Ha az erők vektorait ábrázoljuk irány és nagyság szerint, képet kapunk a hegedűkre ható terhelőerők rendszeréről, ami egyben az előzőekben végzett számításink ellenőrzésére is szolgál.

Nevezzük el a zengő húrszakaszban lévő erőt *A* erőnek, a láb mögötti húrszakaszban fellépő erőt *B* erőnek (34. ábra).



34. ábra

Tudjuk, hogy az $A = 295$ N.

$$A_f = A \cdot sin\ 8^\circ 34' = A \cdot 0{,}1495 = 44{,}10 \text{ N}$$

$$A_v = A \cdot cos\ 8^\circ 34' = A \cdot 0{,}9888 = 291{,}69 \text{ N},$$

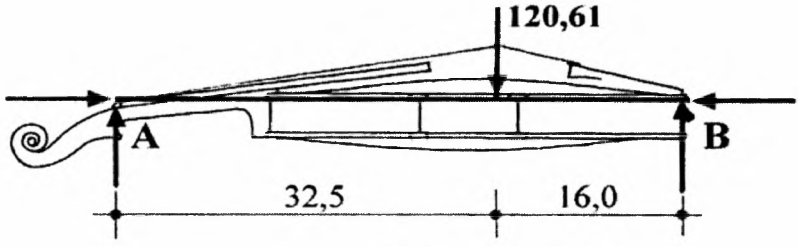
mivel az erőegyensúly fennmaradása érdekében $A_v = B_v$.

B húrvonalban ható erő:

$$291{,}69 = cos\ 14^\circ 42' \cdot B, \text{ ebből } B = \frac{291{,}69}{0{,}9672} = 301{,}58 \text{ N}$$

$$B_f = B \cdot sin\ 14^\circ 42' = B \cdot 0{,}2537 = 76{,}51 \text{ N}.$$

Az előzőekben a hátsó nyereg mögött a húr tengely és az alapsík metszéspontjában kimutatott támaszerő nagyságát (76,51 N) elméleti megközelítés alapján határoztuk meg. A valóságban azonban ez a támaszerő a hátsó nyereg vonalában hat – közelebb a láb síkjába eső terhelő erőhöz –, tehát az előzőhöz képest nagyobb támaszerővel kell számolnunk. Ha azonban a hátsó nyeregnél lévő támaszerő nagysága megváltozik, az erőegyensúly alapján a felső nyeregnél is változik. A tényleges támaszerők nagyságát könnyen meghatározhatjuk a láb síkja és az alapsík metszéspontjára számított nyomaték alapján (35. ábra).

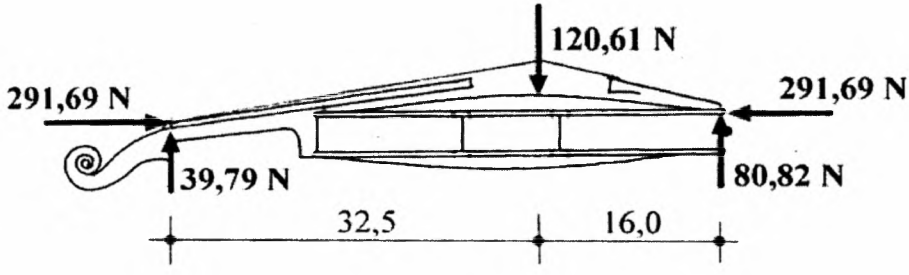


35. ábra

B-re felírva: $120{,}61 \cdot 16{,}0 = A \cdot 48{,}5$ $\quad A = 39{,}79$

A-ra felírva: $120.61 \cdot 32.5 = B \cdot 48.5$ $\quad B = 80.82$

együtt: $\quad 120{,}61$



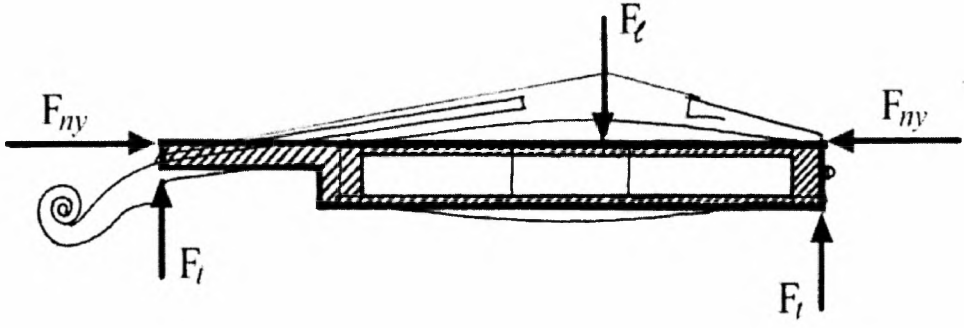
36. ábra

A hegedűtestre ható külső (terhelő-) erők nagyságát és irányát a 36. ábra mutatja be. Ezek azok a meghatározó erők, amelyek a szerkezet különböző pontjain további erőhatásokat váltanak ki.

A számításokból látható, hogy a húrok együttes feszítőerői a lábon keresztül 120,61 N nyomóerővel terhelik a tetőlemezt, és a húrok feszítőerőinek komponensei a hossztengellyel megegyező irányú nyomóerőt gyakorolnak a hegedőtestre, valamint a felső és az alsó nyergeknél a láb síkjában ható terhelőerővel szemben ellentétes irányú támaszerőket képeznek.

1.3. A nyakban fellépő erők

A számításaink megkönnyítése érdekében a hegedűtestből virtuálisan kialakított metszet változó keresztmetszetű, kéttámaszú tartóként feltételezhető, amelyben a kisebb keresztmetszeti rész – a nyak – tömör, a korpuszrész dobozszerkezetnek tekinthető (37. ábra).



37. ábra

Az eddig végzett számításból megismertük, hogy a nyakra (annak) hossztengelyével azonos irányú nyomóerő és a felső nyeregnél erre merőleges támaszerő hat. A szerkezeti metszetből azonban következtetni lehet arra (mivel a nyak konzolos nyúlványként illeszkedik a korpuszhoz), hogy a beillesztésnél, a nyak és a korpusz csatlakozásánál újabb erőhatás: forgatónyomaték lép fel.

Már megismertük, hogy a nyakra – csaknem a hossztengelyével megegyező irányú – 291,69 N nyomóerő hat. Ebből az erőből a nyak legkisebb keresztmetszetében, a felső nyereg közelében adódó feszültség $\sigma = \frac{F}{A}$, (ahol az F a nyomóerővel, az A a nyak keresztmetszetével azonos).

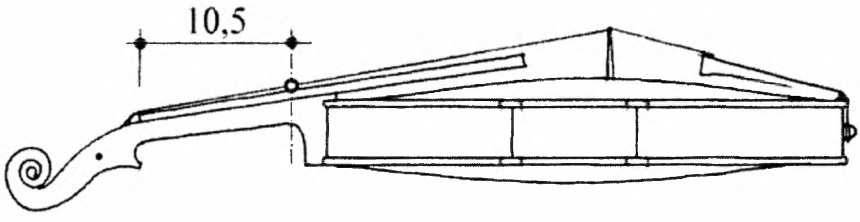
A keresztmetszet számításai során a fogólapot célszerű figyelmen kívül hagyni, mert a felragasztásból adódó pontatlanságok téves eredményekre vezethetnek. A félkör alakú nyak sugara ezen a helyen 1,17 cm (d = 2,34 cm), keresztmetszeti felülete ezek alapján:

$$A = \frac{d^2 \cdot \pi}{8} = 2{,}15 \text{ cm}^2.$$

A keletkező feszültség: $\sigma = \frac{291{,}69}{2{,}15} = 135{,}67 \text{ N/cm}^2$.

A hegyi juharban (Acer pseudoplatan) a szálirányú legnagyobb nyomószilárdság 4900 N/cm^2, tehát a ténylegesen fellépő feszültségi érték sokszorosan alacsonyabb a megengedhetőnél.

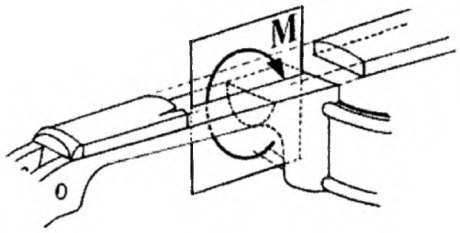
Vizsgáljuk meg a további számításunk során, hogy a felső nyeregnél fellépő támaszerő milyen nagyságú forgatónyomatékot hoz létre a nyak makk felőli részén. Válasszuk ki ennek helyét (*O* pontot) a nyaktuskó előtt, a felső nyeregtől 10,5 cm-re ott, ahol a nyakmetszet még félkör alakú (38. ábra).



38. ábra

A tengelyirányú nyomóerő ebben a metszetben kisebb feszültséget eredményez (mivel itt a keresztmetszet felülete nagyobb), mint az előbb vizsgált nyakmetszetben. Ugyanakkor a felső nyeregnél ható támaszerő

forgatónyomatékot képez erre a pontra, így a nyak ezen a szakaszon nyomásra és hajlításra is igénybe van véve (39. ábra).

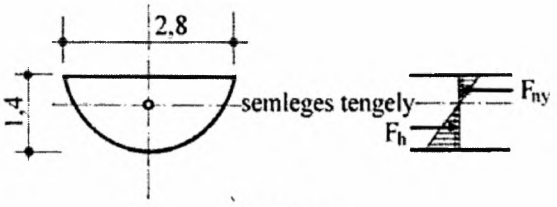


39. ábra

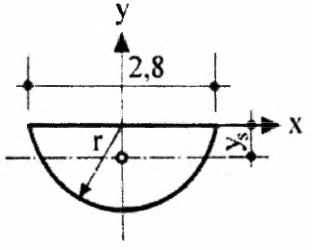
A támaszerő forgatónyomatéka az *O* pontra:

$$F_t \cdot \text{cm} = 39{,}79 \cdot 10{,}5 = 417{,}79 \text{ Ncm}.$$

Nézzük meg, hogy a kiszámított nyomaték mekkora belső erőket hoz létre, és a tényleges igénybevétel milyen mértékben közelíti meg az anyagra jellemző megengedhető határértéket. Hajlítás közben a hajlítás síkjában az anyag alsó szálaiban húzó-, felső szálaiban pedig nyomóerők lépnek fel (40. ábra).



40. ábra



41. ábra

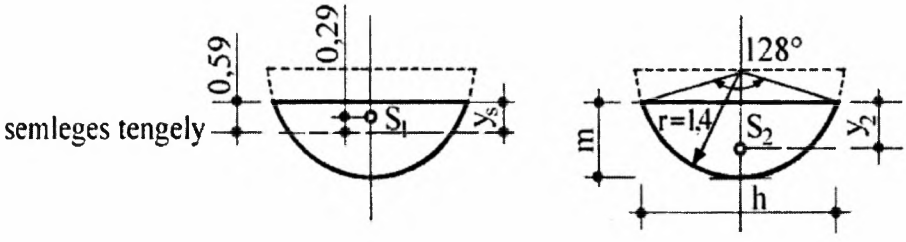
A belső erők meghatározásához a semleges tengelyt – homogén anyagban – a keresztmetszet súlypontjában vehetjük fel (41. ábra). A félkör alakú síkidom súlypontja y_s:

$$y_s = \frac{4r}{3\pi} = 0{,}59 \text{ cm}$$

Nagyobb tévedés nélkül kiindulhatunk abból, hogy a forgatónyomatékot ellensúlyozó két belső erő a semleges tengely feletti nyomott öv és az alsó húzott öv súlypontjában helyezkednek el. A nyomott öv kis eltéréstől eltekintve téglalapalakú síknak tekinthető, így súlypontja a metszetidom semleges tengely feletti magasságában vehető fel:

$\frac{0{,}59}{2} = 0{,}295$ cm, tehát a semleges vonal felett 0,29 cm-re.

A semleges tengely alatt, a húzott övben a körszelet alakú síkidom súlypontját azonban számítással kell meghatároznunk (42. ábra).



42. ábra

A körcikk súlypontja *(S2)*; $y_s = \frac{h^3}{12A}$, ahol h a húr hossza, A a körcikk területe. Mindenekelőtt ki kell számolni az m értékét:

$$m = r - y_s;\ 1{,}4 - 0{,}59 = 0{,}81 \text{ cm}.$$

$$h = 2 \cdot \sqrt{m \cdot (2r - m)} = 2 \cdot \sqrt{0{,}81 \cdot (2{,}8 - 0{,}81)} = 2{,}54 \text{ cm}.$$

A körcikk súlypontjának kiszámításához előbb ismerni kell a körcikk területét (A). Ezt egyszerűen meghatározhatjuk, mivel a semleges tengely a félkör alakú metszetidom súlypontján halad keresztül, vagyis a nyomott öv és a húzott öv két egyenlő nagyságú területéből áll.

A félkör területe $\frac{d^2 \cdot \pi}{8}$, így a szegmens húzott öv területe: $\frac{d^2 \cdot \pi}{16} = 1{,}54 \text{ cm}^2$.

Ennek alapján az y_2 értéke: $y_2 = \frac{h^3}{12A}$; = 0,89 cm.

A körcikkben keresett súlypont a semleges tengely alatt 0,89 – 0,59 = 0,30 cm-re helyezkedik el.

A belső erők nagyságát a metszetre ható külső forgatónyomatékból számíthatjuk ki: $M_{k(külső)} = M_{b(belső)}$,

ahol az $M_k = F_t \cdot 10{,}5$; $39{,}79 \cdot 10{,}5 = 417{,}79$ cmN;

$M_b = F_{ny} \cdot (0{,}29 + 0{,}30)$, és ha $M_k = M_b$,

akkor $417{,}79 = F_{ny} \cdot 0{,}59$, ebből $F_{ny} = 708{,}12$ N.

A megismert belső erők alapján a vizsgált pontban keletkező hajlítófeszültség (σ_h): $\sigma_h = \frac{F_{ny}}{A}$.

A semleges tengely a metszet felületét két egyenlő nagyságú területre osztja. Ennek figyelembevételével (A):

$$A = \frac{d^2 \cdot \pi}{16} = 1{,}54 \text{ cm}^2.$$

Ezek alapján a felső nyeregnél fellépő támaszerőből adódó forgatónyomaték a nyaktő felőli részen $\sigma = \frac{F_{ny}}{A}$; $\frac{708{,}12}{1{,}54} = 459{,}82$ N/cm^2 feszültséget képez.

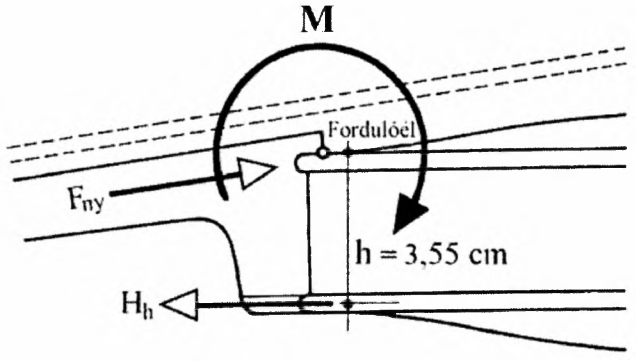
Hasonlítsuk össze a számított feszültség értékét az anyagban megengedett hajlítószilárdság határértékével. Hegyi juharban a megengedett hajlítószilárdság 9500 N/cm^2, vagyis a tényleges feszültség (459,82 N/cm^2) töredéke a határfeszültségnek. Számításaink igazolják, hogy a húrok feszítőerőiből a nyakban keletkező feszültségek nem okozhatnak az anyagban roncsolódást, jóval a rugalmassági határon belül helyezkednek el.

Nem vizsgáltuk még a kulcsház falában a kulcsok közvetítése révén átadódó erőkből keletkező feszültséget. Ennek során válasszuk a legnagyobb húzóerőt felvevő kulcs és a kulcsház között kialakuló erőviszonyok elemzését. Tudjuk, hogy az *e*-húrban lévő feszítőerő 91,0 N. A kulcsszár átmérője 0,7 cm. A kulcsház falának szélessége 0,5 cm. Ezek alapján a kulcsszár $2 \cdot 0{,}7 \cdot 0{,}5 = 0{,}70$ cm^2 felületen adja át a 91,0 N húzóerőt a kulcsházra. A keletkezett feszültség ezeken a pontokon:

$$\sigma = \frac{91{,}0}{0{,}70} = 130{,}0 \text{ N/cm}^2.$$

Az eredmény igazolja, hogy az alkalmazott anyag (a hegyi juhar) a vizsgált igénybevételnek biztonságosan megfelel. A kulcsház falában esetenként bekövetkező repedések minden esetben idegen, külső erőhatás (pl. a kulcs túlzott befeszítéséből adódó palástnyomás) következtében állhatnak elő (ld. *1.8. A kulcsok csavaró igénybevétele és a kulcsház hasító-szilárdsága* című fejezetet 107-111. o.).

Megkülönböztetett figyelmet kívánnak azonban a nyaktőnél kialakuló erők, mert a gyakori makktörések is ezekkel függnek össze. Már ismerjük a nyak hossztengelyével nagyjából azonos irányú, a tető alapsíkjában fellépő nyomóerőt. Ennek szerepe a hegedűtest stabilitását tekintve előnyös, mivel a nyaktőkét a korpuszban erre a célra kialakított fészekbe szorítja. Ugyanakkor problémát okoz a felső nyeregnél ható támaszerőnek a nyaktőke és a tetőboltozat érintkező vonalára – a „fordulóélre" – ható nyomatéka (43. ábra).



43. ábra

Ez a forgatónyomaték ugyanis a hátlemez alapsíkjában a makkra húzóerőt gyakorol (H_h). Ennek nagyága a nyeregnél ható már kiszámított támaszerő (39,79 N), valamint a nyakmenzúra és a nyaktőke (beeresztés) együttes hosszának (λ=13,00+0,35=13,35 cm) szorzata.

$$M_t = 39{,}79 \cdot 13{,}35 = 531{,}20 \text{ Ncm}.$$

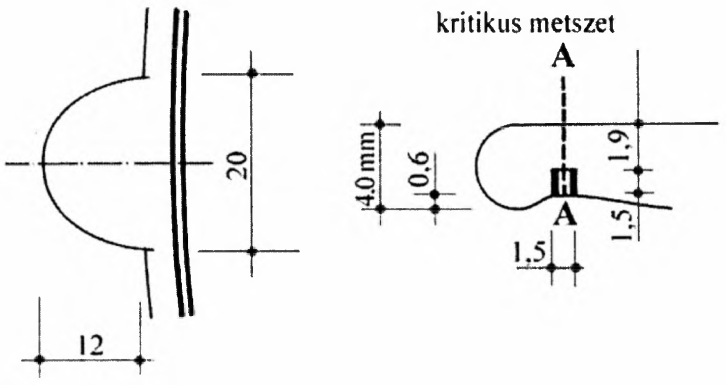
Ebből kimutatható, hogy a makklemez tengelyvonalában mekkora húzóerő *(F_h)* lép fel:

$$M_t = M_h;\ 531{,}20 = F_h \cdot 3{,}55;\ \text{ebből}\ F_h = \frac{531{,}20}{3{,}55} = 149{,}63\ \text{N}.$$

Ez a húzóerő a hát alapsíkjában – ahogyan azt később látni fogjuk – további erőket hoz létre. Ezekkel a korpuszban fellépő erők vizsgálata során foglalkozunk. A makk keresztmetszetén képződő feszültség azonban külön figyelmet igényel, mivel igen kis felületen alakul ki a húzóerőből keletkező feszültség (44. ábra).

A makk szélessége (2,0 cm) és a berakás (intarzia) miatt a lemez terhelhető metszete legfeljebb 0,4–0,5 cm^2. Az itt keletkező feszültség:

$$\sigma = \frac{F_h}{A};\qquad \frac{149{,}63}{0{,}4} = 374{,}22\ \text{N/cm}^2$$



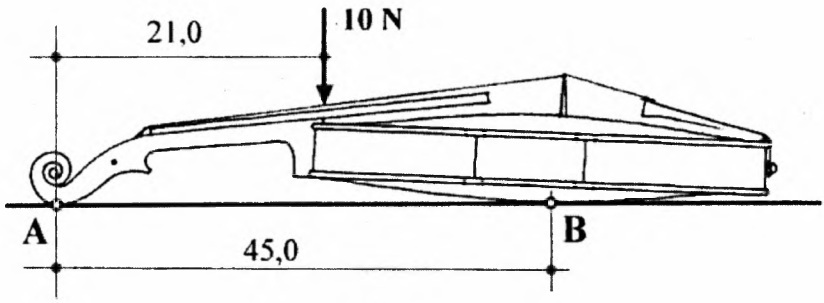
44. ábra

A hegyi juhar szakító szilárdsága szálirányban 8200 N/cm^2. A ténylegesen fellépő feszültség értéke – számításunk szerint – jóval alatta van a megengedhetőnek. Így elméletben (is) igazolható, hogy biztonsággal megfelelő.

Mivel azonban a juharfának a szálirányai általában nem követik a lemez tengelyvonalát, gyakran előfordul, hogy a leszűkült keresztmetszet helyén a szálak iránya a makk síkjával szöget zárnak be, ezzel lecsökkentve a terhelhető keresztmetszet teherbírását. Szélsőséges esetben, amikor a lemez hossztengelyére 60°–80°-os szöget bezáró szálirányok adódnak, a

megengedett határérték jelentősen kisebb, akár az előző 5 %-ára is lecsökkenhet.[45] Veszélyezteti még a terhelhető keresztmetszet méretjellemzőit, ha a berakás árkát metsző véső az intarziaszalag magassági méretét meghaladva mélyebbre hatol be a hát lemezébe, aminek következtében a terhelhető keresztmetszet csökken. A hegedűkészítés technológiájától függetlenül, a hangszer használatának későbbi időszakában is kialakulhat olyan körülmény, (pl. ha a nyaktő beragasztása nem tökéletes, vagy nedvesség hatására felpuhul, s különösképpen, ha a csigát a támaszerő irányával ellentétes irányú jelentősebb külső erőhatás éri), amikor a makk kiszakadása bekövetkezhet.

Kiemelt figyelmet érdemel, hogy a hegedűtest a korpusz és a nyak illeszkedésénél igen érzékeny a külső mechanikus hatásokkal szemben. Nézzük meg, hogy egy nyugalmi helyzetben lévő – sík lapra fektetett – hegedűre a nyaktőke közelében kicsiny, mindössze 10 N nagyságú erő mekkora igénybevételt okoz (45. ábra).



45. ábra

Egyszerű módon, nyomatékszámítással vizsgáljuk meg, hogy a felfekvési pontok *(A és B)* között a nyaktőke tájékán a hegedűre ható – feltételezett – 10 N külső erőhatás mekkora nagyságú húzóerővel növeli meg a makk terhelhető keresztmetszetére már megismert feszültséget: $A_t = \frac{10 \cdot 24}{45} = 5{,}33$ N.

Ebből a makk síkjában fellépő húzóerő (F_h) nagysága:

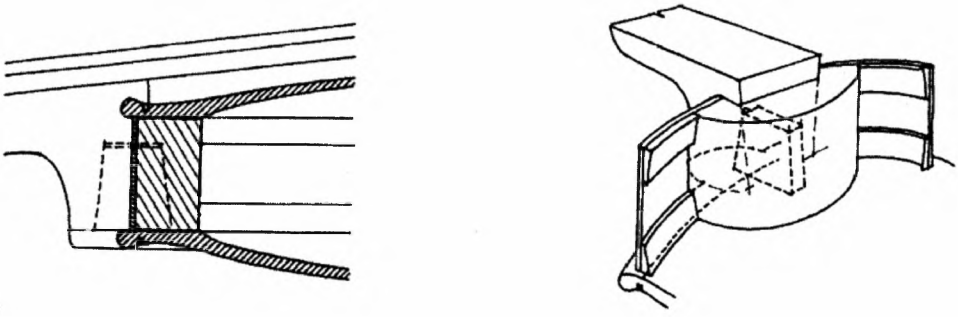
$$F_h = \frac{5{,}33 \cdot 21}{3{,}55} = 31{,}53 \text{ N}.$$

A húrok feszítőerői erre a pontra 149,63 N húzóerőt képeznek. A mechanikus hatással együtt 149,63 + 31,53 = 181,16 N. A makk terhelhető keresztmetszetén kialakuló feszültség ennek alapján:

$$\sigma = \frac{181,16}{0,4} = 452,90 \text{ N/cm}^2.$$

Ha a makk terhelhető keresztmetszetében a szálirány a lemezsíkra közel merőleges, a mértékadó feszültség a megengedett értéknek akár 5%-ára, 410,00 N/cm^2-re mérséklődhet. Ez az érték alacsonyabb a ténylegesen fellépő igénybevételnél, így a makk kiszakadhat.

Ennek a veszélynek csökkentése érdekében ösztönző technológiai megoldásra késztet az angol szakirodalomban található nyaktőkebeillesztési mód[46]. Miszerint a nyaktuskóba 2–3 mm vastag, 16–18 mm magas, a nyak hossztengelyével megegyező szálirányú, 8–10 mm mélyre benyúló trapéz alakú keményfa betétlemezt helyeznek. A kiegészítő betétlemez nyaktuskón túlnyúló része a felső tőkébe vésett fészekbe illeszkedik s így a beenyvezés, – rögzítés után – a nyak és a korpusz kapcsolatának merevségét fokozza. Egyben megnöveli a beragasztás felületét, s miután mélyen benyúlik a nyaktuskó és a felső tőke anyagába, magas páratartalmú levegőben is hathatósan késlelteti a ragasztás felpuhulását, s ebből adódóan a nyak kidőlését. Áthidalja az előbbiekben elemzett intarziabevágás során fellépő kritikus metszetfelületet, sőt a nyak oldalirányú lassú alakváltozását is nagymértékben mérsékeli (46. ábra; ld.: *1.9. A hegedűtestben a terhelő erők hatására bekövetkező lassú alakváltozás* című fejezetet 111-115. o.).

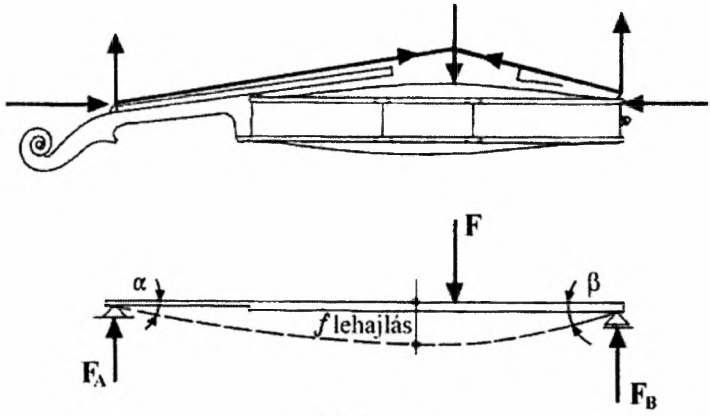


46. ábra

1.4. A korpuszban ható erők

A húrokban keltett feszítőerő hatására a hegedűtestben fellépő erőknek egy részét már megismertük. Vizsgáljuk meg a továbbiakban, hogy a láb síkjában ható terhelő, valamint a nyergeknél kialakuló támaszerők milyen és mekkora további erőket hoznak létre. Számítsuk ki a következőkben a hát alapsíkjában ható erőt, ezt követően pedig a hangszerből képzett virtuális hosszmetszetben a lemezek tényleges tengelyvonalában keletkező erőket.

Mivel a hegedűtest vizsgálatunkban a tartószerkezetek analógiája alapján változó keresztmetszetű, kéttámaszú tartónak tekinthető, benne a tartókra jellemző erők ismerhetők fel, így a húrláb síkjában a tetőre merőleges *terhelőerő,* a felső és az alsó nyergeknél vele ellentétes irányú *támaszerők* asszociálhatók (47. ábra).



47. ábra

A kéttámaszú tartó a terhelő erők hatására meghajlik, tengelye az alátámasztásoknál szögforgást végez, s a tartó felső szálaiban (nyomott övében) nyomóerők, az alsó szálaiban (húzott övében) pedig húzóerők keletkeznek.

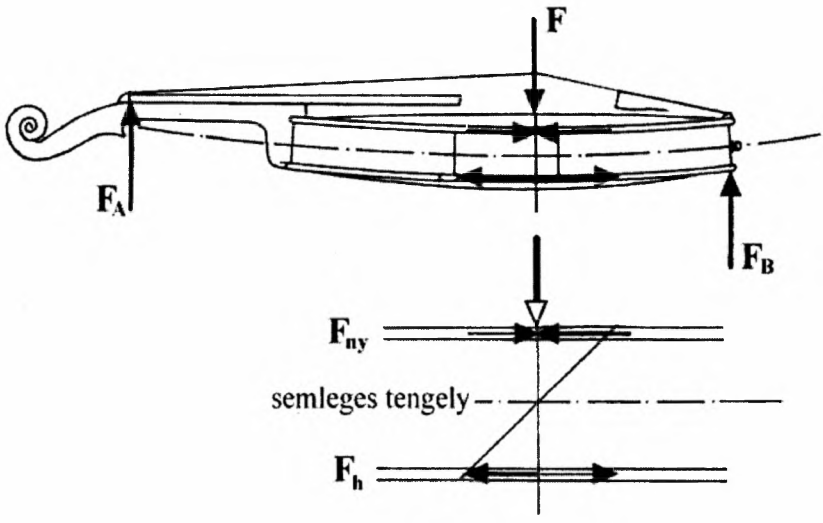
Ha egy tömör keresztmetszetű tartó homogén anyagból készül, semleges tengelye a tartó magasságának felező vonalában helyezkedik el, és a belső erők a tartó teljes keresztmetszetén a szélső szálak felé növekvő nagyságban lépnek fel.

A hegedű virtuálisan kialakított korpuszmetszete olyan tartóként elemezhető, amelynek a metszete nem tömör, úgy is mondhatjuk, doboz-

szerkezet, így csak a semleges tengelytől legtávolabb lévő szálai (valóságban a tető- és a hátlemez) képesek a belső erő felvételére (48. ábra).

A támaszerők nagyságát már ismerjük, *A húrokban lévő feszítőerő* című fejezetben kiszámítottuk:

$$T_1 = F \cdot \frac{b}{\lambda} = 39{,}79 \text{ N, illetve } T_2 = F \cdot \frac{a}{\lambda} = 80{,}82 \text{ N.}$$



48. ábra

A nyomatéki maximum a terhelő erő hatásvonalában képződik, ennek nagysága:

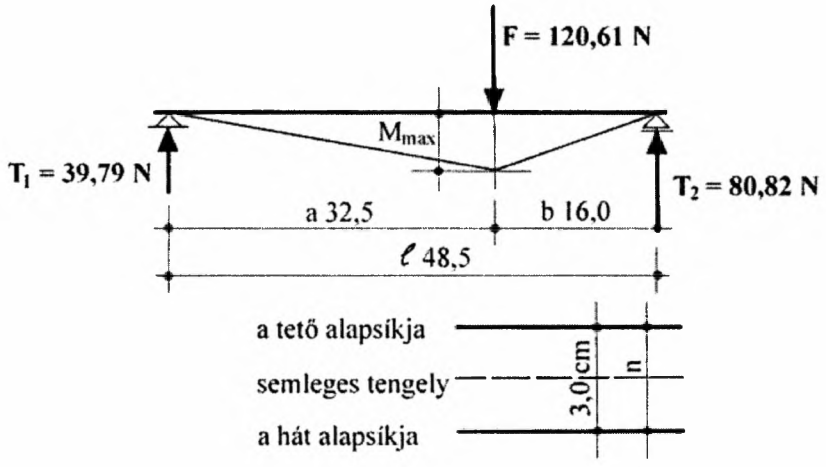
$$M_{max} = \frac{F \cdot a \cdot b}{\lambda} = \frac{120{,}61 \cdot 32{,}5 \cdot 16{,}0}{48{,}5} = 1293{,}14 \text{ Ncm}$$

Már szó volt róla, hogy a vizsgált korpuszmetszet alapján az analóg tartószerkezetben csak a semleges tengelytől legtávolabbi szálakban alakulhatnak ki a külső erőkkel egyensúlyt képező belső erők. A elméletbeli korpuszmetszetben a tető és a hát alapsíkja képezi ezt az övet (49. ábra).

A belső erők kiszámításához abból indulhatunk ki, hogy a külső és a belső erőknek egymással egyensúlyban kell lenniük, tehát a belső erők nyomatéka azonos a tartó nyomatéki maximumával:

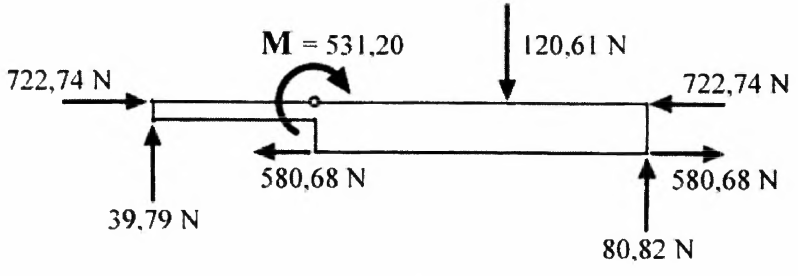
$$M_{max} = F_{belső} \cdot n, \text{ ebből } F_{belső} = \frac{M_{max}}{n}; \quad \frac{1293,14}{3,0} = 431,05 \text{ N}.$$

Már kiszámítottuk a húrokban lévő feszítőerőkből a tető alapsíkjában képződő nyomóerőt (291,69 N). Ehhez hozzá kell adni a hajlításból keletkező 431,05 N belső nyomóerőt: 291,69 + 431,05 = 722,74 N.



49. ábra

A nyakban fellépő erők számítása során megismertük, hogy a hátlemez alapsíkjában a felső nyeregnél fellépő támaszerő forgatónyomatékából 149,63 N húzóerő képződik. Ennek alapján a hát alapsíkjában együttesen 149,63 + 431,05 = 580,68 N húzóerő lép fel. A húrok feszítéséből a hegedűtestben képződő erőket nagyságuk, jellegük, irányuk és hatáspontjuk szerint az 50. ábra mutatja be.



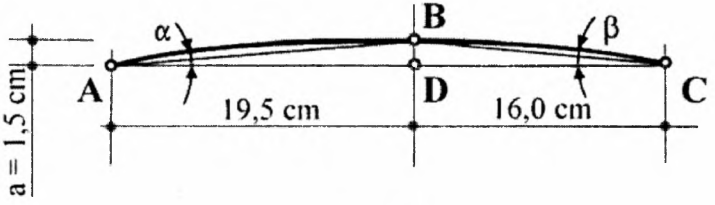
50. ábra

Az ábrából szembetűnik, hogy a húrlábon keresztül ható húrnyomás a hegedűtest – a korpusz – szerkezetében hajlítást idéz elő a hossztengelyével megegyező síkban. A hajlítás valójában az egész hangszertestre, így a korpuszra és a nyakra is kihat. Képletes hasonlattal a hegedűtestet a felhangolt húr, mint íjat a megfeszített ideg, hajlításra kényszeríti.

Arról is szó volt már, hogy a tető és a hát alapsíkjában kimutatott erők hatásvonalai nem esnek egybe a lemezek tényleges tengelyvonalával. A további számítás során meg kell ismernünk a lemezek hosszmetszetében fellépő tengelyirányú erők nagyságát. A felvett korpuszmetszet alapján ezek a lemezek hajlított tengelyű kéttámaszú tartóként analogizálhatók.

A hajlított, íves tengelyű tartók vizsgálata esetünkben újabb akadályt jelent, mivel a bennük fellépő övirányú erők számítása szélesebb körű statikai ismeretet igényel. Így a megközelítés érdekében ismét egyszerűsítésre kényszerülünk.

Az íves tengelyű tartó geometriáját a számítás könnyítése érdekében helyettesítsük két erőháromszöggel. Igaz ugyan, hogy az erőháromszögeknek a befogói kissé eltérnek a helyettesített ívszakaszok tengelyvonalától, kezdő- és végpontjai azonban egybeesnek a tetőlemez tengelyével. A közbenső szakaszon pedig csupán csekély eltérés adódik, amely a várható erők nagyságát nézve jelentős változást nem okoz. Így az íves tengelyű tartót egyenes vonalú tört tengelyű tartónak tekinthetjük (51/a ábra).



51/a ábra

Mindenekelőtt ki kell számítanunk a tört tengelyű tartók és az alapsík között kialakuló szögek nagyságát:

$$\alpha = tg\alpha = \frac{a}{b};\quad \frac{1,5}{19,5} = 0,0769 = 4^{\circ}\,30'$$

$$\beta = tg\beta = \frac{a_1}{b_1};\quad \frac{1,5}{16} = 0,0937 = 5^{\circ}\,20'$$

Az *A–C* alapsíkba eső egyenes vonalán 722,74 N nyomóerő hat. Mivel az *A, B, C* pontokon áthaladó analóg tartótengelyben fellépő erőknek ezt az erőt kell felvennie, a kiinduló pontokon keletkező szögforgás következtében a bennük keletkező erők nagysága megnövekszik. Gondoljunk csak a húrokban keltett feszítőerőkből a tető alapsíkjába és a láb vonalában ható erők számítására. Ott az erőháromszögben az átfogóból számítottuk ki a két befogó vonalába ható erőket, most a nagyobbik befogó felhasználásával határozzuk meg az átfogóval egybeeső erő nagyságát. Mivel az α és β szögek között lévő kicsiny különbség miatt lényeges nagyságrendi eltérés nem adódik az *AB* és a *BC* átfogókban fellépő erők nagysága között, ezért az egyszerűsítés érdekében feltehetjük, hogy $AB = BC$.

Az *AB*, illetve *BC* átfogóban keletkező erők nagysága:

$$\cos\alpha = \frac{AD}{AB};\ \text{ebből}\ AB = \frac{AD}{\cos a},\ \text{vagyis}\ \frac{772{,}74}{0{,}9969} = 775{,}14\ \text{N}.$$

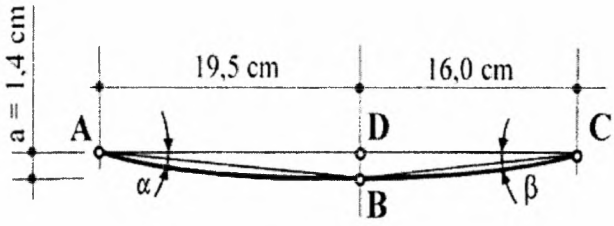
Tehát az analóg tört tengelyű tartóban 775,14 N nyomóerő mutatható ki, ami csak kis mértékben tér el az alapsíkban számított erő nagyságától. Ennek az erőnek azonban, esetünkben külön figyelmet igényel a *B és D* pontok között kimutatható komponense.

Ha az íves tengelyű tartóra tengelyirányú nyomóerő hat, a támaszerők közötti ívszakasz pontjai kitérhetnek eredeti helyzetükből, a vízszinteshez képest megemelkedhetnek. Vizsgáljuk csak meg, hogy milyen nagyságú és irányú erő képződik a *B és D* pontok között. Az *ABC* erőháromszögben az *A és B* pontok között ható nyomóerő:

$$tg\alpha = \frac{BD}{AB};\ \text{ebből}\ BD = 0{,}0787 \cdot 775{,}14 = 61{,}00\ \text{N}.$$

Ez az erő az íves tengelyű analóg tartóra – a két alátámasztási pont között közel felező távolságra – felfelé irányuló nyomást gyakorol. A korpuszmetszeten ez a hely csaknem megegyezik a láb síkjában a tetőlemezre ható nyomóerő vonalával. Így a tetőlemezre a húrok feszítőerőiből adódó 120,61 N nyomóerővel szemben ugyancsak a húrok feszítőerőiből képződő hosszirányú nyomóerő ezzel ellentétes hatású 61,00 N erőt hoz létre, ami jelentősen csökkenti a tetőlemezre jutó nyomóerő nagyságát.

Vizsgáljuk most meg azonos metodikával a hátlemezben keletkező erőket (51/b ábra).



51/b ábra

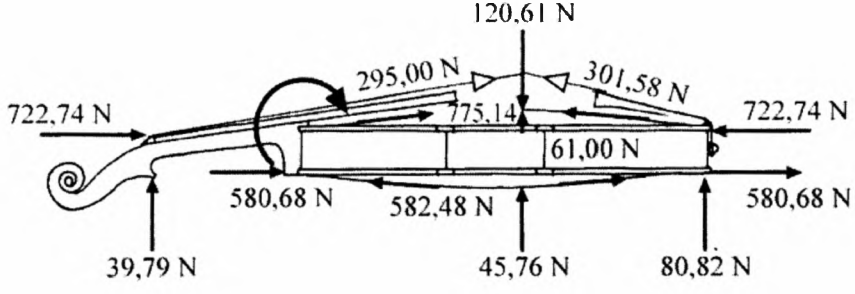
$$tg\alpha = \frac{a}{b};\ \frac{1{,}4}{17{,}75} = 0{,}0788 \approx 4^{\circ}30'$$

$$AB = cos\alpha = \frac{AD}{AB};\ \frac{580{,}68}{0{,}9969} = 582{,}48\ \text{N}$$

$$BD = tg\alpha = \frac{BD}{AD};\ 580{,}68 \cdot 0{,}0788 = 45{,}76\ \text{N}$$

Tehát a hátlemez hosszirányában ható húzóerő – a boltozat magasságát csökkenteni törekvő – felfelé irányuló 45,76 N erőt hoz létre.

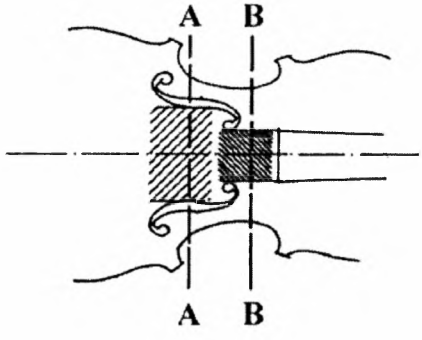
Ezzel teljes áttekintést nyertünk a húrokban keltett feszítőerők együttes hatására a hegedűtestben fellépő erők irányairól és nagyságáról (52. ábra).



52. ábra

Nem hallgatható el az sem, hogy végzett számításaink a tények szám-szerű feltárásán túl a hangszerről eddig ismerteket meghaladó, rejtett esz-mei-gondolati értékekre is rámutatnak. A hegedű szerkezetében a húrok feszítéséből képződő erőrendszer mai ismereteinkkel szemlélve külön figyelmet érdemel, csodálatot ébreszt. Végül is ez az erőjáték napjaink szerkezettervezésében – az előfeszített szerkezetek méretezésénél – kiterjedten alkalmazott, nemrég felismert erőkonstelláció. A 16-17. században, a hegedű kialakulása idején épített és fennmaradt „mérnöki" alkotásokban ennek még alapelve sem fedezhető fel. Aligha lehet feltételezni, hogy a hegedű-építők egzakt ismeretek alapján alkalmazták volna. Feltehetően felhalmozódott, gazdag tapasztalatuk és kifinomult intuíciójuk vezette rá őket erre a korukat jóval meghaladó erő-konstrukció kialakítására. Az elméleti összefüggések ismerete nélkül megalkotott szerkezet bizonyára sok-sok kísérlet eredménye. Erről tanúskodnak azok a szerkezeti jellegzetességek, amelyeket ha a statikai ismeretekkel összevetjük, szembetűnő ellentmondások tárulnak elénk: pl. a tető- és a hátboltozat legmagasabb pontján a lemezvastagság növelése, a gerenda beillesztése során – a tetőlemezre ható húrnyomás ellensúlyozására – alkalmazott „befeszítés", stb.

Eddig megismertük a hegedűtestben fellépő nyomó- és húzóerőket. Most vizsgáljuk meg, hogy az anyagban milyen nagyságú *feszültségek* alakulnak ki. Elsőként nézzük meg, hogy a tetőlemezben az *f*-bevágások (hangrések) közötti boltozatszakaszban mekkora feszültségek keletkeznek. Már szó volt róla, hogy a tetőlemeznek ez a része statikailag a leginkább igénybevett boltozati mező, mivel itt megszűnik az egybefüggő két irányban hajlított lemez oldalirányú alátámasztása (53. ábra).



53. ábra

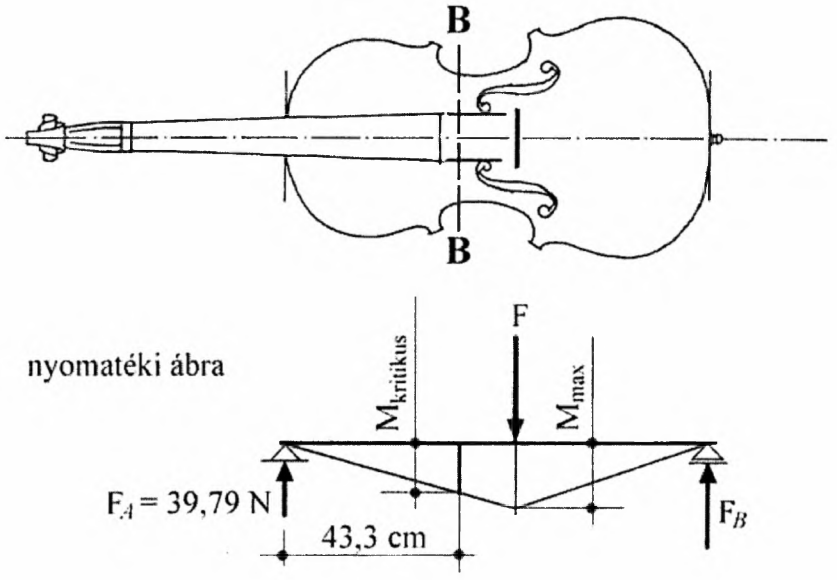
A láb síkjába felvett boltozati metszet *(A–A)* vonalában az analógtartón már kiszámítottuk a nyomatékot (M_{max} = 1293,14 Ncm) és a tetőlemezben fellépő nyomóerőt (775,14 N). Ebből az *A–A* tetőlemezmetszetben keletkező nyomófeszültség:

$$\sigma_A = \frac{P}{F};\ \frac{775{,}14}{7{,}4 \cdot 0{,}3} = 349{,}16\ \text{N/cm}^2.$$

Könnyen felismerhető, hogy a tetőlemez *f*-bevágások felső szem közeli szakasza (*B–B* metszet) a legkritikusabb, mivel a lemez-keresztmetszet itt a legkisebb, és a várható fellépő feszültség itt lesz legnagyobb.

Mindenekelőtt számítsuk ki ebben a metszetben ható nyomóerő nagyságát az ezen a szakaszon fellépő nyomaték felhasználásával (54. ábra): $M = 39{,}79 \cdot 43{,}3 = 1722{,}90$ Ncm. A lemezben ható nyomóerő 775,14 N, ennek alapján a *B–B* metszetben fellépő feszültség:

$$\sigma_B = \frac{775{,}14}{4{,}2 \cdot 0{,}3} = 615{,}19\ \text{N/cm}^2.$$



54. ábra

A tetőlemez vizsgált metszetében fellépő nyomófeszültség alatta marad a lucfenyőben, szálirányban megengedhető maximális 7900 N/cm^2 nyomóerőnek.

Ebből két következtetés vonható le. Az egyik, hogy statikailag indokolatlan a tetőlemez vastagságát a boltozat magasabb részén növelni (3 mm fölé emelni). A másik felismerés, hogy a boltozat „megerősítése" kiegészítő elem beiktatásával szükségtelen, tehát a gerendának nincs statikai szempontból szerepe, még kevésbé a gerenda befeszítésének, amivel külön tanulmányban részletesen foglalkozunk.

A hátlemezben fellépő feszültségek – bár az előzőekből sejteni lehet – nem közelítik meg a megengedhető értékhatárt. A tájékozódás érdekében nézzük meg, milyen nagyságú húzófeszültség lép fel a tetőlemez esetében vizsgált hasonló méretű lemezszelvényben.

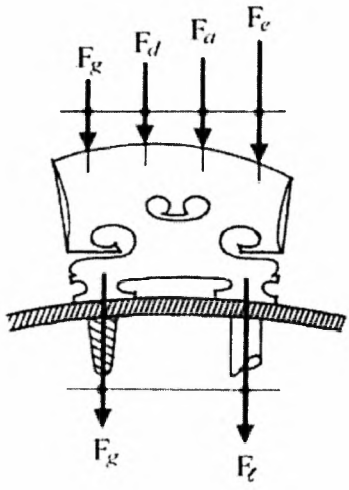
Ha a hátlemezből ugyancsak 4,2 cm széles lemezszakaszt vizsgálunk, a maximális negatív nyomaték: $M = 80{,}82 \cdot 16 = 1293$ Ncm. A hátlemezben ható húzóerő nagysága 582,48 N. A maximális nyomaték helyén, a láb síkjának vonalában a felvett 4,2 cm széles hátlemez tartó metszetén:

$$\sigma = \frac{582{,}48}{4{,}2 \cdot 0{,}3} = 462{,}29 \text{ N/cm}^2$$

Ez végül is alacsonyabb érték a tetőlemez hasonló metszetén mért feszültségértéknél. Egyébként is a juharfában, szálirányban megengedhető húzószilárdság határértéke 8200 N/cm^2, ami jóval magasabb a számított tényleges feszültségértéknél. Tehát a hátlemezben a fellépő belső erők nem idéznek elő káros alakváltozást.

1.5. Az eltérő alaphangú húrokban keletkező erők és hatásaik

Az előző számítások során az egyszerűbb áttekintés érdekében a négy húrban a feszítéssel létrehozott húzóerőket együttesen kezeltük. A hegedű egyes részeiben fellépő erők és feszültségek vizsgálatához azonban foglalkozni kell a húrokból külön-külön átadódó erők hatásával is. Eddig a láb síkjában egyetlen nyomóerőt vettünk alapul. A valóságban azonban a tetőlemezre ható erők nem egy ponton, hanem a láb két talpfelületén adódnak át, és a húrok anyagától, valamint a bennük lévő feszítőerőktől függően egymástól eltérő nagyságú nyomóerőket hoznak létre (55. ábra).



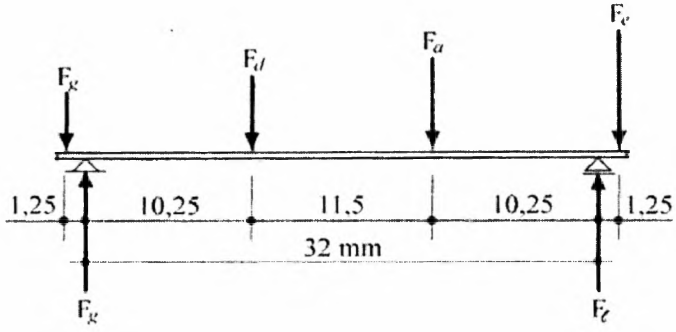
55. ábra

Vizsgáljuk meg, mekkorák ezek az erők. A tanulmány elején szó volt a különböző húrokban lévő húzóerők nagyságáról: $e = 9{,}1$ kp, $a = 7{,}5$ kp, $d = 6{,}7$ kp, $g = 6{,}2$ kp. Ha ezekből – a már ismertetett módon – kiszámítjuk az egyes húrokból a lábra ható erők nagyságát, a következő eredményt kapjuk:

$$
\begin{aligned}
F_e &= 37{,}31 \text{ N} \\
F_a &= 30{,}62 \text{ N} \\
F_d &= 27{,}36 \text{ N} \\
F_g &= 25{,}32 \text{ N} \\
F_{\Sigma e\text{-}g} &= 120{,}61 \text{ N}
\end{aligned}
$$

Nézzük meg, hogy mekkora nyomóerők adódnak ebből a gerenda feletti, illetve a lélek felőli lábtalpra. Számításunkat egyszerű nyomatéki egyenlet segítségével végezzük el. Kezeljük a hegedűlábat analóg – több koncentrált erővel terhelt – kéttámaszú tartóként (56. ábra).

Írjuk fel a gerenda felőli támaszerő és a tartó tengelyvonalának metszéspontjára *(A)* a húrerők nyomatékát *(A_A)*. A nyomatéki egyenlet alapján a húrerők nyomatéka egyenlő a T_L támaszerő A pontra ható nyomatékával:



56. ábra

$M_A = -F_g \cdot 1{,}25 + F_d \cdot 10{,}25 + F_a \cdot 21{,}75 + F_e \cdot 33{,}25 = T_L \cdot 32$; ebből:

$$T_L = \frac{M_A}{32}; \quad \frac{2150{,}91}{32} = 67{,}35 \text{ N}.$$

Ugyanúgy írjuk fel a nyomatéki egyenletet a B pontra:

$M_B = -F_g \cdot 33{,}25 - F_d \cdot 21{,}75 - F_a \cdot 10{,}25 + F_e \cdot 1{,}25 = T_G \cdot 32$; ebből:

$$T_G = \frac{1704{,}12}{32} = 53{,}25 \text{ N}.$$

Tehát a gerenda feletti lábtalpon keresztül 53,25 N, a lélek felőli lábtalpon át 67,35 N nyomóerő hat a tetőlemezre (Σ = 120,60 N), vagyis a gerenda feletti lábtalpon 14,01 N-nal kisebb nyomóerő terheli a tetőlemezt. Joggal vethető fel a kérdés, szemben számos állítással, ha a gerendának erősítő, statikai feladata lenne, akkor miért a kisebbik terhelőerő alatt helyezkedik el?

A számítások eredményeiből kiderül, hogy a tetőlemez kritikus metszetében alátámasztás nélkül képes elviselni a keletkezett feszültséget. Számos esetben megtörténik, hogy a lélek „kidől", és ennek ellenére a lábtalpon átadott nagyobb terhelőerőt a tetőlemez károsodás nélkül viseli. Mindez azt igazolja, hogy a gerendának a hang alakulásában, képzésében van szerepe.

Számításainkhoz eddig alkalmazott módszerekhez viszonyítva a tető- és a hátlemezek összefüggő boltozati szakaszaiban fellépő erők igen bonyolult, a homogén anyagú héjszerkezetekben fellépő térbeli erőrendszer alapján mutathatók ki, illetve a héjszerkezetek számításelméletével ellenőrizhetők. Ezeknek a szerkezeteknek a sajátossága, hogy a bennük keletkezett erők túlnyomó része nyomóerő, csak abban az esetben jöhet létre hajlítónyomaték, ha a felfekvésüknél a peremtartó nem követi a peremhéj membrán feszültségi állapotának megfelelő alakváltozását. Két

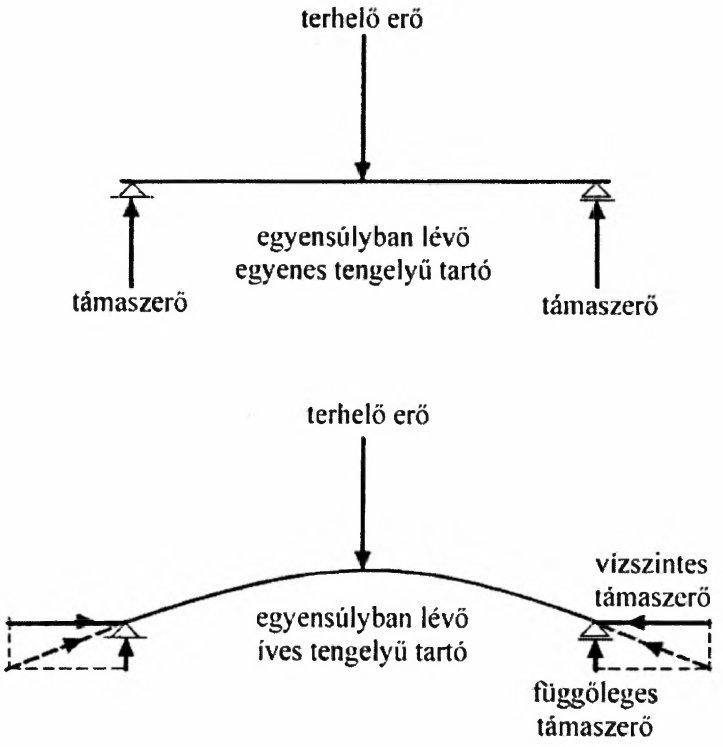
irányban görbült héjaknál a hajlítóerők rendszerint a perem mentére korlátozódnak. A hegedű tető- és hátlemezénél is a kávák és a tető-, illetve hátlemezek érintkezési vonalában, főként a tőkék körül lehet helyenként kimutatni nyomatéki erőket, mivel itt csaknem sarokmerev csatlakozások alakulnak ki. A hegedű tetőlemeze mindemellett nem tekinthető homogén héjszerkezetnek, hajlítónyomatékot főleg a szálakra merőleges síkban alig képes felvenni. A hegedűboltozat sajátos összetett alakzatú formáció, nem analogizálható ellipszis vagy elliptikus parabolid alaprajzú héjakkal, ráadásul a héjak általános hajlításelmélete bonyolult differenciálegyenletekkel követhető. Miután a hegedű szerkezetében legfeljebb a felső és az alsó tőkék zónájában alakulhat ki a lemezekben hajlítónyomaték, ennek vizsgálatát a szélesebb körű matematikai és statikai ismeretek alkalmazásának elkerülésével egyszerűbb analóg módszerrel végezzük el.

A könnyebb áttekinthetőség érdekében előbb célszerű megismerni a hajlított (íves) tengelyű tartók jellemzőit. Íves tengelyű tartók esetében az egyenes tengelyű tartókhoz képest – ahogyan a lemezekben fellépő erők számítása során már megismertük – további erők lépnek fel.

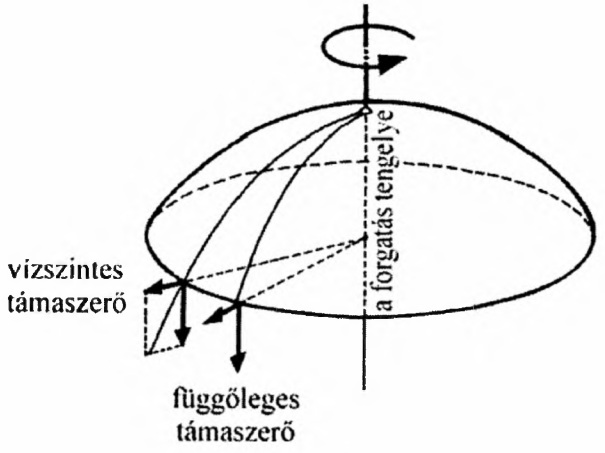
Míg az egyenes tengelyű tartókban a terhelő erővel párhuzamos, ellentétes irányú támaszerők keletkeznek, és nem képződik a tartóban rúdirányú derékerő, íves tartók esetében a támaszerők mellett az ív oldalnyomását ellensúlyozó támaszerők is fellépnek (57. ábra). (Ez a jelenség az építészetben a boltozatok oldalnyomását ellensúlyozó támpillérek alkalmazásában általánosan ismert.)

Íves tartók, boltozatok oldalnyomása egyszerű módon szemléltethető. Ha egy képzeletbeli tengely körül íves tartó tengelyvonalával forgásfelületet képezünk, vagyis virtuálisan boltozatot hozunk létre, a feltételezett terhelés hatására a peremén sugár irányú oldalnyomás ébred, és az egyensúly fenntartása érdekében ezzel ellentétes irányú támaszerők jönnek létre (58. ábra).

A hegedű kialakulásával foglalkozó irodalomból – kultúrtörténeti kutatásokból – tudjuk, hogy a hegedű őse, a fadulon sík tetőlemezzel készült. Bizonyára méretüknél és az alkalmazott húrok anyagától függően a mai hegedűknél kisebb nyomás nehezedett a húrok feszítőerőiből a tetőlemezre. Ennek ellenére nagy valószínűséggel; a húrláb alatt, a húrnyomás hatására a tetőlemez „belapult", a tetőlemez lehajlott. A gyakorlati tapasztalat vezethette az egykori hangszerépítőket arra, hogy a sík tetőlemez vastagságát a húrok alatt megnöveljék. Ma már egzakt ismeret igazolja, hogy a tartók nagyobb nyomatéknak kitett keresztmetszetének növelése nagyobb teherviselést eredményez.



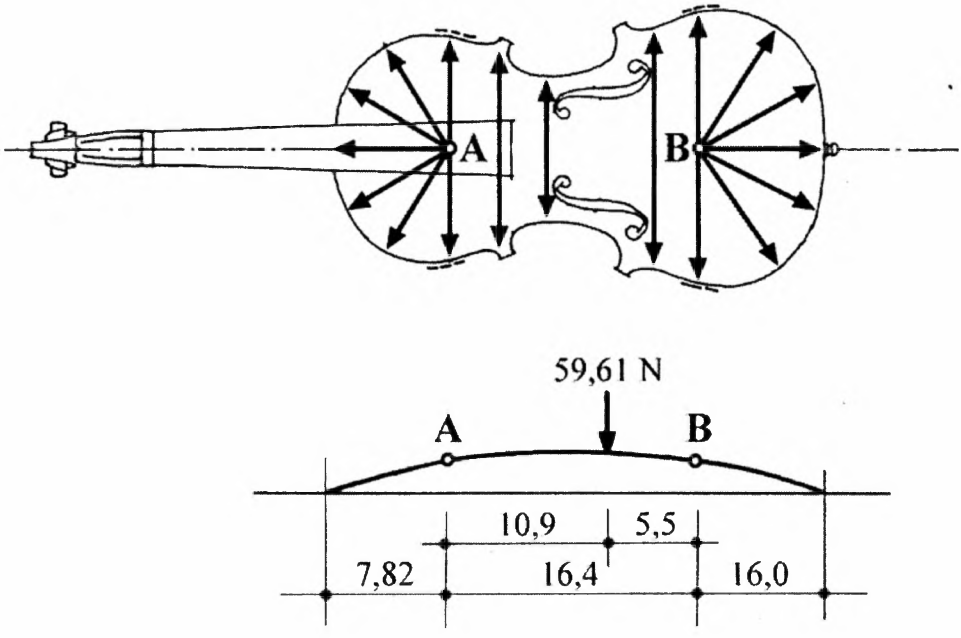
57. ábra



58. ábra

Az is valószínűsíthető, hogy a hegedű tetőlemezének íves kialakításához a barokk idején a művészetekben általánosan alkalmazott könnyed, hajlított felületek és vonalak követésére irányuló inspiráción túl szerepet játszhatott annak felismerése, hogy az íves lemezek teherbíró képessége lényegesen nagyobb, mint az ugyanolyan anyagból való, azonos paraméterekkel rendelkező sík lemezeké.

Mivel a két irányban hajlított héjszerkezetben fellépő erők kiszámítása bonyolult, kíséreljük meg egyszerű modell segítségével megismerni, hogy mekkora nagyságú erők lépnek fel a tetőboltozat lemezében, és ezekből mekkora oldalnyomás adódik a kávákra.



59. ábra

Számításainkhoz a tetőboltozatot helyettesítsük a nagy ív és a kis ív geometriai középpontjából sugarasan kiinduló kávaszakaszokra felfekvő képzelt rúdelemekkel, amelyekre átadódik a hát síkjában ható nyomóerő (59. ábra).

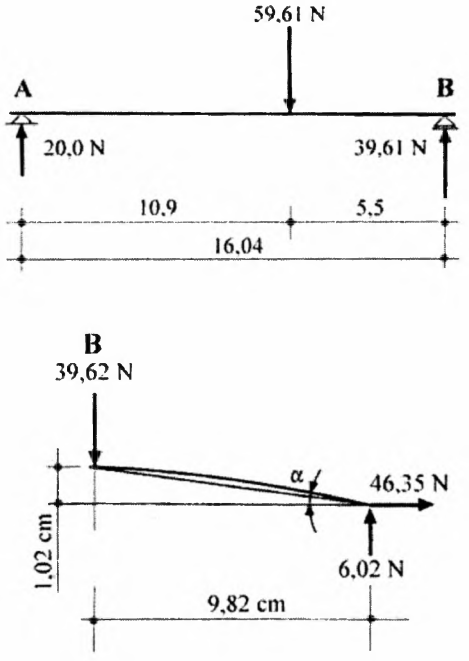
Az *A* és *B* pontra jutó nyomóerők nyomatéki egyenlet alapján:

$$M_A = 59{,}61 \cdot 10{,}9 - B \cdot 16{,}40;\ \text{ebből}\ B = \frac{649{,}75}{16{,}40} = 39{,}62\ \text{N}$$

$$M_B = 59{,}61 \cdot 5{,}5 + A \cdot 16{,}40;\ \text{így}\ A = \frac{327{,}85}{16{,}40} = 19{,}99\ \text{N}.$$

A továbbiakban a nagy ívszakaszban fellépő erőket vegyük szemügyre, mivel itt nagyobb, kétszer akkora nyomóerő nehezedik a tetőre, mint a kis ívben, így a meghatározó, kritikus feszültségek itt alakulhatnak ki. A *B* pontba összefutó – a tetőboltozatot helyettesítő modellünkön radiálisan elhelyezkedő – rudak együttesen viselik, illetve adják át a kávaszakaszokra az ide jutó terhelőerőt (39,62 N).

Az analóg szisztémánk szerint ezek a rudak, mint a tetőboltozatban ható erők hatásvonalai az alapsíkkal és az arra merőleges alkotóikkal erőháromszöget képeznek. Segítségükkel könnyen kiszámíthatjuk, hogy egy-egy rúd milyen nagyságú nyomóerővel támaszkodik fel, és milyen nagyságú oldalirányú erőt gyakorol a kávára (60. ábra).



60. ábra

$$\alpha = tg\alpha \frac{1,2}{9,82} = 0,1221 \approx 7^{\circ}.$$

A *B* pontban ható nyomóerő (39,62 N) hét erőháromszög között oszlik meg, (ezek sugár irányú vetülete eltér ugyan egymástól, de a kismértékű nagyságrendi különbség miatt ettől eltekinthetünk), így egy erőháromszögben 5,66 N erővel számolhatunk. Az alapsíkban ható nyomóerő ennek alapján

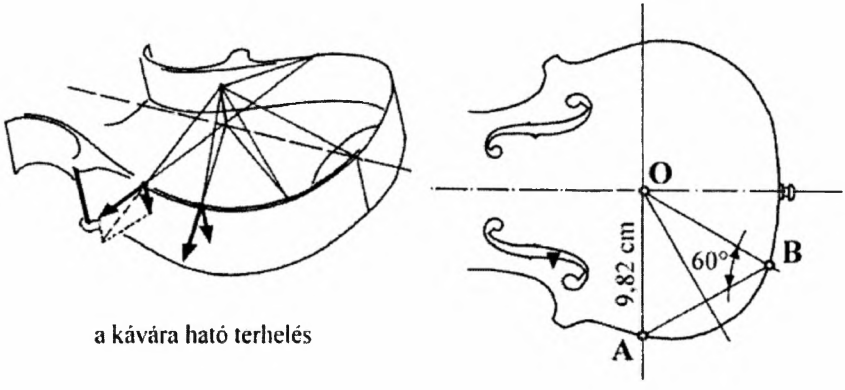
$$tg\alpha = \frac{5,66}{F_r}; \quad \frac{5,66}{0,1221} = 46,35 \text{ N}.$$

A tetőboltozat virtuális analóg rúdelemében fellépő erő:

$$sin\alpha = \frac{5,66}{F_1}; \quad \frac{5,66}{0,1218} = 46,47 \text{ N}.$$

Ebből a rövid számításból megismerhető, hogy a tetőlemezre ható terhelőerők a két irányban hajlított lemezben átadódnak a kávaszakaszokra, s egyben a kávalemezekre radiális irányú nyomóerőket ébresztenek. Ezek a radiális irányú erők pedig a kávalemezben húzóerőket hoznak létre, ugyanúgy, mint a folyadékkal telt hordó abroncsaiban a dongákra nehezedő oldalnyomás. (A kávakeretre ható oldalnyomás és a tetőlemezt terhelő igénybevétel között kimutatott viszony képezi a teljes korpusz rugalmasságát).

Vizsgáljuk meg erőháromszögek felhasználásával, milyen nagyságúak ezek az erők (61. ábra).



61. ábra

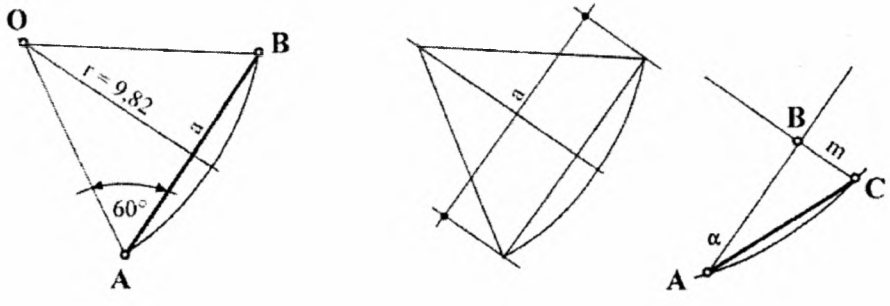
A radiálisan felvett rudak az O pontban 30-30°-os szöget zárnak be. Meg kell azonban jegyezni, hogy hosszuk (az O pont és a káva közötti távolság) nem teljesen egyenlő, mivel a káva íve nem szabályos félkör. Erre tekintettel, hogy a számításunk során minél kisebb pontatlansággal kerüljünk szembe, az O pontot a hátsó nyeregtől ugyanolyan távolságra vettük fel, mint oldalirányban a káva és az O pont közötti méret. Így megközelítően elfogadhatjuk, hogy a két egyforma hosszúságú az O pontban 60°-os szöget bezáró rúd és a kávaív metszéspontjaival meghatározható hosszúságú ívhúr egy egyenlő oldalú háromszöget képez. Ebből két erőháromszög alakítható ki, aminek felhasználásával megismerhetjük a kávalemezben keletkező húzóerőt, más néven palásterőt.

Felismerhető, hogy a két erőháromszög húrirányban eső komponenseinek összege egyenlő a tető alapsíkjában ható oldalirányú nyomóerő nagyságával (oldalirányú nyomóerő 46,35 N). Bár ebből is megállapíthatnánk a kávalemezben fellépő húzóerőt, de a pontosabb eredmény érdekében számítsuk ki a káva-ív és a kávaívet analóg helyettesítő befogó hosszát. Az előzőekben alkalmazott módon határozzuk meg az erőháromszöget (62. ábra).

Az A, B, C pontok által meghatározott háromszöget használjuk fel erre a célra. Az A pontban lévő szög: $tg\alpha = \frac{BC}{AB}$, ebből AB: 4,91 cm. Meg kell ismerni a BC befogó hosszát, ami azonos a körszelet magasságával (m):

$$m = r \cdot \left(1 - \cos\frac{a}{2}\right); \quad 9{,}82 \cdot (1 - 0{,}86603) = 1{,}32 \text{ cm}.$$

Az α szög: $tg\alpha = \frac{BC}{AB}$; $\frac{1{,}32}{4{,}91} = 0{,}2688 \approx 15^\circ$



62. ábra

Már ismerjük, hogy az *A és B* pontok között – az egyenlő oldalú háromszögből képzett erőháromszögek alapján – az alapsíkban ható oldalirányú nyomóerőnek a fele: $\frac{46,35}{2} = 23,17$ N erő hat. Ebből a vizsgált kávaszakaszt analóg helyettesítő *A és C* pontok közötti erő nagysága:

$$\cos\alpha = \frac{AB}{AC} = 0,9659; \quad \frac{23,17}{AC} = 23,99 \text{ N},$$

vagyis a kávalemezben 23,99 N húzóerő lép fel.

Kérdés, hogy mekkora feszültséget idéz elő ez az erő az érzékeny. kávalemezben. A lemezek keresztmetszete 3,0 cm · 0,13 cm = 0,39 cm^2:

$$\sigma = \frac{F}{A}; \quad \frac{23,99}{0,39} = 61,51 \text{ N/cm}^2.$$

Ez a feszültségérték – ahogy már szó volt a makk vizsgálatánál – adott esetben kritikus lehet, ha a kávalemezben a szálak a hosszirányra 90°-ot megközelítő szöget zárnak be.

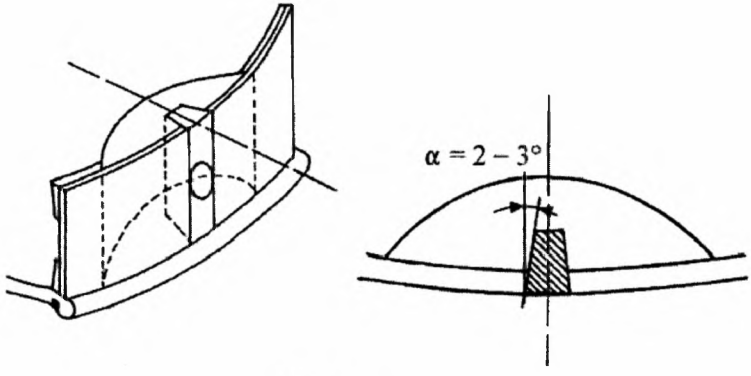
Tény azonban, hogy ez a feszültség (a kávák és a tetőlemez érintkezésénél a ragasztási felület növelése érdekében) a kávákra ragasztott szalagok keresztmetszetének figyelembevételével csökken. A két szalag mintegy 0,2 cm^2-rel növeli a húzóerő felvételében aktív keresztmetszet nagyságát. Szerepük a kávalemezben fellépő feszültség felvételében elsősorban abból adódik, hogy a szálirányú szakítószilárdságuk határértéke igen magas. Lucfenyőben (Picea abies) a szálirányú szakítószilárdság 9000 N/cm^2. Mivel a két szalag keresztmetszete együttesen mintegy 0,2 cm^2, a szalagok 1800 N/cm^2 szakítószilárdság felvételére képesek. Ott, ahol a szalagok folytonossága megszakad (pl. a hátsó tőke és a szalagok csatlakozási pontjainál), a kávalemezben fellépő húzófeszültséget csak a káva keresztmetszete viselheti.

Ha mindemellett a kávalemez szálirányai nagymértékben eltérnek a káva hossztengely irányától, a palásterő hatására bekövetkezhet a szakadás. A kávalemez hátsó tőkére ragasztott része helyén marad, és a tőke széleinél (ahol a szalagok nem vesznek részt a palástirányú húzóerő felvételében) a kávalemez roncsolódik, bereped, vagy teljesen elszakad.[47]

A tetőlemez oldalnyomásához hasonlóan a hátlemez is ad át radiális irányú erőket a kávaívre, ezek nagysága azonban lényegesen kisebb, mivel a hátlemezben kisebb húzó és nyomóerők működnek.

A kávalemezben előforduló sérülések, roncsolódások áttekintése során szólni kell a lemezben lévő látens erő következtében fellépő hatásról. A kávalemez a hajlítás hatására általában maradandó íves alakot vesz fel, ha azonban újabb hőhatás éri, és környezetéből nedvességet vesz fel, a fa molekuláris tulajdonságai következtében eredeti formájának felvételére törekszik. A hátsó tőkénél – játék közben – a test melege és a megnövekedő környezeti páratartalom a látens erőt felszabadítja nyugalmi helyzetéből. Rendszerint ezek együttes hatása a tőke és a kávalemez közötti ragasztás felpuhulását idézi elő, s a kávalemez elválik a tőkétől. Ennek elkerülése érdekében célszerű az alsó tőkébe fecskefarkú lapolással néhány milliméter széles trapéz alakú betétet helyezni és beragasztani (63. ábra).

Így a kávalemezek a ferde élű csatlakozás miatt az előzőekben részletezett kedvezőtlen következmények ellenére sem tudnak a tőkéről leválni, „kidőlni" A tőkébe süllyesztett betét beragasztása pedig – a tőke belsejében a fa jó hőszigetelő tulajdonsága miatt – a viszonylagosan alacsony hőmérsékleti és párahatás következtében nem tud felpuhulni, a ragasztás eredeti szilárdságát megtartja.



63. ábra

Ha a betét színes keményfából (paliszander, rózsa, ében) készül, egyben a tőke hasítószilárdságát is növeli (ld. *1.6. A korpuszban kimutatható nyíróerők* című fejezetet 100-103. o.), és esztétikailag a hátsó nyereggel együtt – a praktikus cél mellett – esztétikus hatást is nyújt.

1.6. A korpuszban kimutatható nyíróerők

Az eddig tárgyalt erőknél jóval nagyobb hatást fejtenek ki a korpuszban fellépő nyíróerők. A tető- és hátlemezben, valamint az alsó tőkében előforduló repedések legtöbb esetben a nagy nyírófeszültségek – a törőfeszültség határát elérő igénybevétel – miatt következnek be.

Vizsgáljuk meg ezeknek a nyíróerőknek a kialakulását és hatását. Mindenekelőtt számítsuk ki a gerenda feletti lábtalp és a lélek közelében kialakuló nyíróerő nagyságát. Tudjuk, hogy a lábtalpak egyenként 53,26 N és 67,35 N, együttesen 120,61 N nyomóerővel nehezednek a tetőlemezre. Ezzel ellentétes irányban, a tetőlemezben a húrfeszítésből fellépő nyomóerő hatására 61,00 N felfelé irányuló erő képződik. Ily módon a lemeznek 120,61 N erő helyett ténylegesen 120,61 N – 61,00 N = 59,61 N nyomóerőt kell ellensúlyozni. A 120,61 N nyomóerő a két lábtalp között 44,16 % és 55,84 % arányban oszlik meg. Vagyis a lélek felőli lábtalp 67,35 N nyomóerővel nehezedik a tetőlemezre. A lélek tengelyvonalában ezzel az erőhatással szemben fellépő támaszerő nyíró hatást gyakorol a lemezre.

A mechanikai igénybevételek között a nyírás olyan esetben lép fel, amikor a szerkezetre ható erők az anyag egymással érintkező felületét egy töréssík mellett elcsúsztatni igyekszenek. A nyíróerők azonban nemcsak nyírófeszültségeket ébresztenek, hanem egyéb csúsztató- és hajlítófeszültségeket is gerjesztenek. Ezek nagysága azonban a fellépő nyírófeszültséghez viszonyítva kicsi, ezért esetünkben figyelmen kívül hagyhatók.

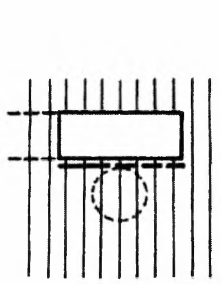
Ennek alapján a nyírófeszültség (τ), ha a nyíróerőnek közvetlenül kitett felület (A) 0,3 cm · 0,6 cm = 0,18 cm^2.

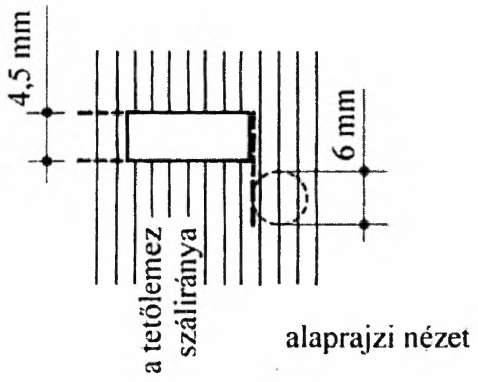
$$\tau_{ny} = \frac{F}{A};\quad \frac{67{,}35}{0{,}18} = 374{,}16\ \text{N/cm}^2.$$

Lucfenyőben a rostokra merőleges síkban a nyírófeszültség átlagos határértéke 670 N/cm^2. Így, mivel az igénybevétel alapján számított nyírófeszültség a megengedhető értéknek közel 50 %-a, a tetőlemez ezen a ponton nagy biztonsággal megfelel (64/a ábra). Azonban a lélek gyakran kerülhet a láb *f*-bevágás felőli talpvonalán kívül. Ez esetben a lemezben keletkező nyírófeszültség a rostokkal párhuzamos metszetben lép fel (64/b ábra).

A nyírófeszültség ez esetben nagyobb felületen oszlik el: 0,3 (0,6 + 0,45) = 0,31 cm^2, de a nyíróerők nagysága változatlan.

Így a keletkező nyírófeszültség: $\tau_{ny} = \frac{F}{A}$; $\frac{67,35}{0,18} = 374,16$ N/cm^2.





64/a ábra 64/b ábra

Annak ellenére, hogy a lélek és a láb ilyen elhelyezkedése mellett csökken a nyírófeszültség, a szerkezet állóképessége mégis kritikussá válik. A rostokkal párhuzamos nyírófeszültség határértéke a fenyőfélékben 3-4-szer kisebb a rostokra merőleges megengedhető nyírófeszültség értékénél. Különböző mérések szerint a rostiránnyal párhuzamos elviselhető nyírófeszültség értéke a merőlegesen ható mértékadó feszültség érték ötödére is lecsökkenhet: $\frac{670}{5}$ N/cm^2 = 134,00 N/cm^2. Ilyen lélek-elhelyezés esetében váratlan, kismértékű külső erő hatására bekövetkezhet a tetőlemez elrepedése, az úgynevezett „lélekrepedés" kialakulása.

Némi biztonságot jelent a tetőlemez vastagságának növelése a lélek várható elhelyezésének zónájában, megközelítően 2,0 cm^2 átmérőjű körben. Az esetben a kritikus nyírófeszültséget viselő lemez-keresztmetszet elérheti 0,42 cm^2-es nagyságot, aminek következtében a τ értéke jelentősen lecsökken:

$$\tau_{ny} = \frac{65,37}{0,42} = 155,64 \text{ N/cm}^2.$$

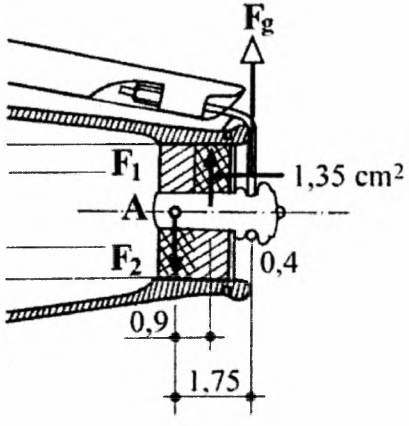
A hegedűépítés gyakorlatában ezzel ellentétben a hátlemez lélektáji vastagságának növelése vált általánossá. Ebben az a meglepő ellent-

mondás, hogy a juharfának még rostokkal párhuzamosan is jóval nagyobb a nyírószilárdsága (lucfenyő τ_{max}= 670 N/cm^2, hegyi juhar τ_{max}= 900 N/cm^2), és a hátlemezben nem alakul ki lélekben fellépő nyomóerővel szemben koncentrált erő. S ami döntő, ennek következtében a kimutatható nyírófeszültség jóval nagyobb metszetfelületen oszlik meg, mint a tetőlemez–lélek illeszkedésénél. Végeredményben a hátlemezben nem alakulhat ki a tetőlemezben fellépő nagyságú nyírófeszültség.

A lélek körüli tetőlemezszakaszon kívül az *f*-bevágásokból, a hangrések peremétől kiindulva következnek be még gyakran a hossztengellyel párhuzamos irányú lemeztörések. Okozói az *f*-bevágásokhoz csatlakozó boltozati lemezszakaszokon esetlegesen kialakuló nyírófeszültségek. Mivel ezek minden esetben rostokkal párhuzamos igénybevételt képeznek, viszonylag már igen kicsiny külső erőhatás előidézheti a lemez elnyíródását, repedését. Igen gyakori még az *f*-bevágások alsó szemíve és a kis káva közötti szakaszon képződő lemezrepedés. Ez azonban kizárólag külső erőhatás következtében lép fel, mivel a korpusznak ezen a pontján nincsenek belső erők.

Szólni kell még az alsó tőkében fellépő – gyakran roncsolódást előidéző – hasító feszültségről. Számos esetben tapasztalható, hogy a gomb felett elreped a tőke, és felette a tetőlemezben is repedés indul el.

A húrokban keltett feszítőerők együttesen a láb mögötti részen közvetlen a gombra terhelődnek. Ismerjük a húrokban lévő – már kiszámított – húzóerőt: 301,58 N, ebből a gombra $F_g = sin\ 14^\circ\ 42' \cdot F$, vagyis 0,2537 · 301,58 = 76,51 N húzóerő hat (65. ábra).



65. ábra

A gomb tőkén kívüli részére ható 76,51 N húzóerő belső erőpárt hoz létre. Ennek felhasználásával meghatározhatjuk a tőke kritikus metszetében keletkező nyomatéki erő nagyságát. Mivel az *A* ponton a külső erő és a belső erő nyomatékának egyenlőnek kell lenni, a belső erő nagysága egyszerű nyomatéki egyenlettel meghatározható:

$$M_K = M_B, \text{ azaz } 76{,}51 \cdot 1{,}75 = F_1 \cdot 0{,}9, \text{ ebből } F_1 = \frac{133{,}89}{0{,}9} = 148{,}76 \text{ N}.$$

Ez a belső erő a tőke gomb felőli felső részén ébreszt hasító feszültséget, ennek értéke:

$$\sigma_h = \frac{F}{A}; \text{ vagyis } \frac{148{,}76}{1{,}35} = 110{,}19 \text{ N/cm}^2.$$

Gyenge, lombhullató fában (a tőkék leggyakrabban ebből készülnek) ha a hasítási sík párhuzamos az évgyűrűk irányával, a hasítószilárdság 51,0 N/cm^2. Mivel a számított érték ennek több mint kétszerese, szinte törvényszerű a tőke elrepedése, különösen fenyők használata esetén mivel az évgyűrűk közötti geszt lecsökkenti az anyag hasítószilárdságának határértékét. A tőkében bekövetkező roncsolódás csaknem minden esetben repedést okoz a tetőlemezben is. A tőke elmozduló részecskéi a ragasztás következtében magukkal ragadják a lemez, velük érintkező részecskéit is.

Az alsó tőke hasító szilárdsággal szembeni ellenállását a szálirány megválasztásával lehet növelni. A gyakorlatban sok esetben a tető szálirányával azonos szálirányú tőkék készülnek. Ha azonban a tőkék száliránya a hegedűtest hossztengelyére közel merőleges, nagymértékben megnő a tőke nyírófeszültséggel szembeni ellenállása, s ezzel együtt biztonságosabb a tető lemezének repedés elleni védelme is.

1.7. A lábban kialakuló belső erők

A tartószerkezetek világában külön fejezetet képez az oszlopok és a nyomott falszakaszok vizsgálata: a nyomófeszültségek alakulása, a külpontos nyomás során fellépő nyomatékok, valamint a kihajtás ellenőrzése. A hegedű szerkezetében két ilyen elem van: a lélek és a láb. A lélek statikai értelemben oszlopként működik, bár amint láttuk, a tető- és a hátlemezben képződő erők számításánál nem igazolódik, hogy szerepe

elsődlegesen a terhek viselésére korlátozódna. Tapasztalható is mindez, hiszen megtörténik, hogy teljes húrnyomás (felhangolt hegedű) esetében kidől a láb, megszűnik az alátámasztás, és ennek ellenére a tetőlemez károsodás nélkül átvészeli ezt az állapotot. A hegedű hangja azonban megváltozik, elveszti jellegét, „lélek-telenné" válik. Ebből az a következtetés vonható le, hogy ez a kiegészítő szerkezeti elem elsősorban a hegedű hangjának kialakulásában játszik szerepet, ami az érintkező testek között átadódó rezgéshullámok terjedésének elemzésével bizonyítható is.

Mindemellett az eddigi számításainkból az is kiderül, hogy a lélek mint oszlop részt vállal a hegedűtestben létrejövő erők viselésében. A kérdés az, hogy mekkora erők hatnak rá, és milyen mértékben felel meg az igénybevételnek. *A korpuszban ható erők* című fejezetben megismerhettük, hogy a láb 120,61 N nyomóerőt gyakorol a tetőlemezre. Ezzel szemben a tetőlemez a benne fellépő hosszirányú nyomóerő következtében – az íves tengelyű tartókra jellemző módon – 60,00 N ellentétes irányú erővel csökkenti a láb síkjában ható nyomóerőt (120,61 N – 61,00 N = 59,61 N). A tetőlemezre tehát 59,61 N nyomóerő jut. Ezt az igénybevételt a két irányban hajlított lemez még a rugalmasság határán belül elviseli, azonban a hátlemezben fellépő húzóerő keltette a láb irányába ható erő (45,76 N) a lélekben nyomófeszültséget ébreszt.

Nézzük meg, milyen nagyságú ez a feszültség: $\sigma_\lambda = \frac{F}{A}$

a lélek átmérője: $d = 0{,}6$ cm;

$$A = \frac{d^2 \cdot \pi}{4}; \quad \frac{0{,}36 \cdot 3{,}14}{4} = \frac{1{,}13}{4} = 0{,}28 \text{ cm}^2$$

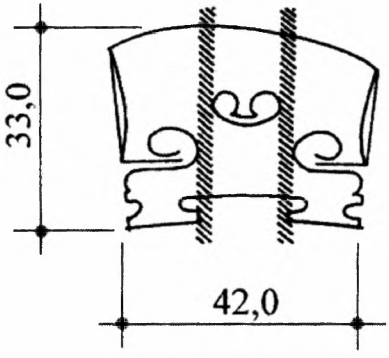
$$\sigma_\lambda = \frac{45{,}76}{0{,}28} = 163{,}43 \text{ N/cm}^2$$

Lucfenyőben szálirányban a legkisebb megengedhető nyomószilárdság határértéke 3500 N/cm^2, többszöröse a tényleges értéknek.

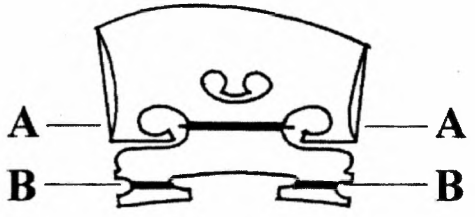
A teljesség érdekében meg kell jegyezni, hogy – a lélek és a lemezek ferde síkú csatlakozása miatt – a nyomóerő iránya nem esik egybe a lélek tengelyével, aminek következtében külpontos nyomás jön létre, s ezzel együtt hajlító nyomaték is fellép. Ennek nagysága azonban elenyészően kicsi, így esetünkben elhanyagolható.

Sokkal problematikusabb a húrláb, annál is inkább, mivel a húrokból adódó nyomóerő következtében gyakran elgörbül, kihajlik.

Vizsgáljuk meg a húrláb síkjában ható nyomóerő hatásait. A húrláb statikai értelemben alátámasztást szolgál, szerkezettervezés fogalma szerint „terhelést hordó falszakasz". Formája miatt egészen sajátságos, mert átmenő függőleges metszete (a gerinctől a talp vonaláig) a kialakult változatos figurális kimetszések miatt jóformán nincs. Olyan alátámasztó szerkezet (66/a ábra), amely egyenes vonal mentén nem közvetít nyomóerőt, hanem ehhez minden szelvényben társul valamilyen nagyságú nyomaték. A húrláb anyagában a legnagyobb nyomófeszültség a két oldalsó bevágás közötti keresztmetszetben *(A–A)* és a két talpnyak keresztmetszetében képződik *(B–B, B–B)* (66/b ábra).



66/a ábra



66/b ábra

Az *A–A* metszetben fellépő feszültség: $\sigma = \frac{F}{A}$,

F = a négy húrból a húrlábra jutó nyomóerő 120,61 N,

A = a keresztmetszet felülete 1,7 cm · 0,35 cm = 0,59 cm^2,

$$\sigma = \frac{120,61}{0,59} = 204,42 \text{ N/cm}^2.$$

Hegyi juharban a legkisebb megengedhető nyomószilárdság 3100 N/cm^2, ezzel szemben a tényleges érték ennél jóval alacsonyabb.

A két talpnyakban eltérő nagyságú feszültségek lépnek fel, mivel a terhelő erők a húrokban lévő különböző nagyságú feszítőerők függvényei.

Már kiszámítottuk, hogy a gerenda felőli lábtalpra 53,25 N, a lélek felőli lábtalpra 67,35 N nyomóerő hat. Ennek alapján a gerenda felőli lábtalpnyakban fellépő feszültség:

$$\sigma_g = \frac{F_g}{A};\ \frac{53{,}26}{0{,}20} = 266{,}30\ \text{N/cm}^2.$$

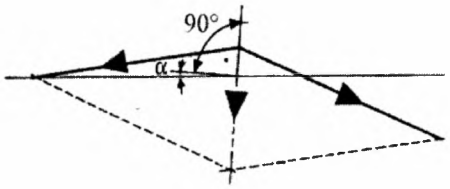
A lélek felőli láb-talpnyakban: $\sigma_h = \frac{F_\lambda}{A};\ \frac{67{,}35}{0{,}20} = 336{,}75\ \text{N/cm}^2.$

A számítás szerint még a legkisebb összefüggő lábnyak-keresztmetszetben képződő nyomófeszültség sem közelíti meg a megengedhető határértéket, így a húrláb a nyomóerő igénybevételének megfelel.

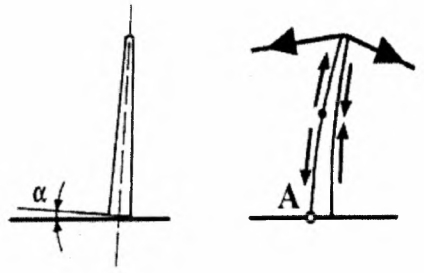
Nyomóerővel terhelt lemeznél kritikus lehet a kihajlás. Karcsú szerkezetek nyomó-igénybevételekor a feszültség növekedése során felléphet a kihajlás. Minden olyan esetben számolni lehet ezzel a jelenséggel, ha a kihajlási hossz *(λ)* és a legkisebb keresztmetszet *(A)* hányadosa nagyobb 12-nél. Esetünkben a húrláb magassága 3,3 cm, a két talpnyak keresztmetszete $A = 0{,}40\ \text{cm}^2$, tehát az $\frac{\lambda}{A};\ \frac{3{,}3}{0{,}40} = 8{,}25$, vagyis kisebb, mint 12, így kihajlás a tényleges karcsúsági tényező miatt nem következhet be.

A meglepő, hogy a láb mégis gyakran meggörbül, látszólag kihajlik a terhelés hatására. Ennek az oka azonban másban kereshető. A hangszerészek és a zenészek a húrláb síkját nem merőlegesre állítják be a tető érintősíkjára, hanem a felső része, a húrlábnyereg a húrtartó irányba 1-2°-kal hátra felé dől. Ezt azzal indokolják, hogy az időszakonként szükséges hangolás során a láb felső része a fogólap irányába elmozdul, ami a rezgő húrszakasz megrövidülésével jár. Ez a tény tagadhatatlan, mivel a húr feszítésével a megnyúlás következtében elmozduló részecskék, leszámítva a csúszásból adódó csökkenést a húrláb felső részét magukkal ragadják, így többszöri hangolás után a húrláb előre „bukik".

A húrláb hátrafelé döntésének azonban statikai következménye van. Vizsgálataink során már megismertük, hogy a húrláb és a húrtartó közötti húrszakaszban nagyobb húzóerő keletkezik, mint a rezgő húrszakaszban, s így a két erő eredője nem merőleges a tetőlemezre. Erről egyszerűen meggyőződhetünk, ha a két ismert erő eredőjét szerkesztéssel meghatározzuk (67/a ábra).



67/a ábra



67/b ábra

Ha a hátrafelé döntött húrláb tetőlemezzel érintkező talpsíkja merőleges a húrláb síkjára, a talp húrtartó felőli része fekszik fel a tetőlemezre. Ennek következtében a nyomóerő lényegesen kisebb felületen (csaknem a talp permén) adódik át, megnő a nyomófeszültség, és a húrláb kihajlását előidéző nyomaték fellépésével kell számolni. A húrláb síkjában ható nyomóerő az *A* pontra – a felfekvő talp élre – nyomatékot képez: $M_A = 120{,}61 \cdot 0{,}22 = 26{,}53$ Ncm. Ez a nyomaték a láb húrtartó felőli síkjában nyomóerőt, a fogólap felőli lábsíkban húzóerőt ébreszt, mivel a lábtalp a tetősíkra teljes felületével felfeküdni törekszik. A fellépő hajlítónyomaték hatására a húrláb síkja deformálódik, meghajlik, elgörbül (67/b ábra).

Ennek elkerülésére a húrláb talpsíkjait a láb hátradöntésével megegyező szögben célszerű kialakítani, hogy a beillesztett húrláb talpak teljes felülete felfeküdjön a tetőlemezre.

1.8. A kulcsok csavaró igénybevétele és a kulcsház hasítószilárdsága

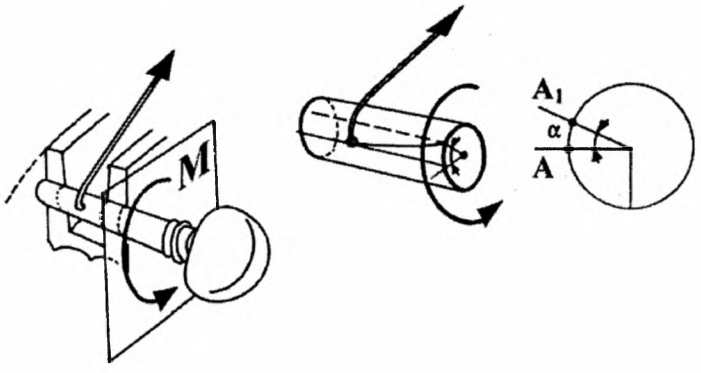
A húrokban a kívánt rezonancia eléréséhez szükséges feszítőerőt a kulcsok csavarása révén lehet biztosítani. Ez a művelet a kulcsszárban csavaró-nyomatékot képez, aminek nagysága függ a húrban fellépő feszítőerőtől és a kulcsszár átmérőjétől. A rugalmas anyagú körszimmetrikus keresztmetszetű rudak tiszta csavarása közben a rúd tengelyére merőleges síkban ható forgatónyomaték a rúd keresztmetszeteiben szögforgást idéz elő (68. ábra).

A szögforgás arányos a τ-feszültséggel. Mivel a legnagyobb feszítőerő az e-húrban képződik, a legnagyobb csavarónyomaték az e-kulcsban jön létre. Ennek nagysága: $M_{cs} = 91{,}00 \cdot 0{,}4 = 36{,}4$ Ncm.

A keresztmetszetben ébredő legnagyobb csavaró feszültség

$$\tau_{max} = \frac{M_{cs}}{I_{polaris}} \cdot r ,$$

ahol M_{cs} a fellépő csavarónyomaték, az $I_{polaris}$ a csavart keresztmetszet poláris inercianyomatékából számított keresztmetszeti tényező.



68. ábra

$$I_{polaris} = \frac{\pi \cdot \tau}{2}; \quad \frac{3{,}14 \cdot (0{,}4)^4}{2} = 0{,}040.$$

Ezek ismeretében $\tau_{max} = \frac{36{,}4}{0{,}04} \cdot 0{,}4 = 364{,}0$ N/cm^2.

Az egzotikus fák szilárdsági értékeit bemutató hazai táblázatok nem tartalmazzák sem az indiai, sem a nyugat-afrikai ébenfa csavarási szilárdságának mért értékeit. Csak viszonyítani tudunk.

Az afrikai vasfa (Cophira procera) térfogatsúlya megközelíti az ébenfa térfogatsúlyát, egyéb jellemzői is hasonlók, csavarószilárdsága 1800 N/cm^2.[48] Az ébenfa csavarószilárdsága is e körüli érték lehet. Mivel a számított csavarófeszültség többszörösen alacsonyabb értékű, a kulcsokban

fellépő csavarónyomaték – a tapasztalatok is igazolják – roncsolódást nem okoz. A ritkán előforduló kulcsfej-, illetve kulcsnyaktörések a kúpos kulcsszár beszorulásának, beragadásának a következményei.

Általános még a paliszander fából készült kulcsok használata. Ez a fa már lényegesen kisebb szilárdsági értékekkel rendelkezik. Térfogatsúlya, nyomószilárdsága, Brinell-keménységi foka alatta van az előbb összehasonlított egzotikus fák értékeinél. Ebből is adódik – tapasztalat szerint a paliszander fából készült kulcsok esetében gyakran előfordul – a fára jellemző határértéket meghaladó csavaró feszültségre utaló roncsolódás.

A kulcsszárban fellépő csavarónyomaték megismerésén túl érdemes foglalkozni a kulcsház statikai problémáival. Gyakran megtörténik, hogy a kulcs „megszalad" – leenged a húr –, ha pedig a szükségesnél erősebben beszorítják a kúpos furatba, repedést okoz a kulcsház falában.

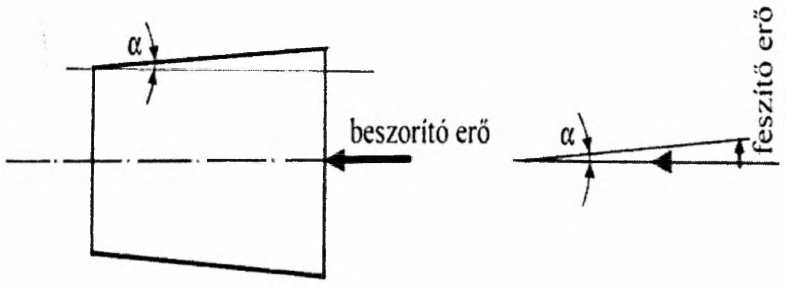
Mivel a felhangolt húrban fellépő feszítőerővel szemben a kulcspalást és a kulcslyuk érintkező felülete között képződő tapadási súrlódás biztosítja a stabilitást, mindenekelőtt át kell tekintenünk a kulcs elfordulását előidéző erő és a súrlódásból adódó erők közötti összefüggést.

Tudjuk, hogy két egymáson csúszó felület között súrlódás jön létre, ami a súrlódást okozó erővel ellentétes irányú súrlódási erőt eredményez. A súrlódási erő (F_s) egyenesen arányos az érintkező felületek anyagi minőségi jellemzővel, súrlódási együtthatójával (μ)[49] és a két felületet egymáshoz nyomó erővel (F_{ny}): $F_s = \mu \cdot F_{ny}$.

A kulcs elfordulása – a palást felületen fellépő csúszás – a húrban keltett feszítőerő hatására következik be. Ez a feszítőerő pl. az *e*-húrban 91,0 N húzóerőt gyakorol a kulcs és a kulcsház érintkező felületeire. A csúszást előidéző húzóerő tehát azonos nagyságú a húrban lévő feszítőerővel.

Abból az igényből kiindulva, hogy a kulcs elfordulása ne következhessen be, egyértelműen következik, hogy a csúszást akadályozó súrlódási erőnek nagyobbnak kell lenni a kulcsra ható feszítőerőnél $(F_s > F_f)$.

A súrlódó felületekre ható nyomóerő a kúpos kialakítású kulcsszárnak a kulcsház falába fúrt fészekbe szorításával jön létre. Ez erőháromszög segítségével könnyen kimutatható. A kúpos kulcsszárat beszorító erő (F_{sz}) felbontható a kúpos felület alkotójával megegyező és a beszorító erő tengelyvonalára merőleges irányú komponens erőkre (69. ábra).



69. ábra

Az erőháromszög alapján $F_{nyomó} = tg\alpha \cdot F_{beszorító}$.

A kúpos felületű kulcs beszorításából a kulcslyuk palástjára radiálisan ható nyomóerők úgynevezett palástfeszültséget hoznak létre. Eddigi számításainkból már ismerjük, hogy a palástfeszültség $\sigma_p = \frac{F}{A}$, vagyis a keletkező palástfeszültség függ a nyomóerőtől, és fordítottan arányos a palást felületével.

Miközben a súrlódási erő alakulásának elemzése során a súrlódó felületekre ható nyomóerőt vizsgáljuk – amit a palástfeszültség növelésével tudunk fokozni –, egyben vizsgálni kell a palástfeszültséggel összefüggő hasítószilárdságot is, mivel a kúpos kulcsszár beszorításával a kulcsház falában hasító igénybevétel is fellép.

A szilárd anyag hasítószilárdsága $\sigma_h = \frac{F_{max}}{A}$ (ugyanakkor a palástfeszültség is $\sigma_p = \frac{F}{A}$!). Ily módon a súrlódó felületekre ható nyomóerő és a kulcsház falában előállható hasítóerő között közvetlen összefüggés mutatható ki. Mind ebből következik, hogy a súrlódási erő ΣF_{ny} nem lehet nagyobb a palástfeszültségben fellépő F_{max}erőnél. Mivel a kulcsház anyaga juhar, benne a szálirányok jelentőseb befolyásolják az igénybevétel határértékét – láttuk a makk teherbíró képességének vizsgálata során – így a kulcs beszorításával létrejövő palásfeszültség korlátozott, csak a súrlódási felület növelése vezethet a kívánt eredmény eléréséhez.

A súrlódó felületek összenyomását képező F_{ny} erő és a palástfeszültségben szereplő F erő figyelembevételével, (mivel $\sigma_p = \frac{F}{A}$, és ebből $F = \sigma_p \cdot A$) a súrlódási erő képlete $F_s = \mu\sigma_p \cdot A$.

Az előbbi összefüggésből látható, hogy a kulcs elfordulását akadályozó súrlódási erőt a súrlódási felület nagysága jelentősen befolyásolja, vagyis a kulcsház falvastagsága és a súrlódási erő között közvetlen hatás mutatható ki.

Ennek ellenére a kulcsház falvastagságát növelni a homlokrészen, részben a húr könnyebb behelyezésének biztosítása érdekében, másrészt esztétikai okokból semmiképpen sem előnyös. Helyette a szokványos homlokvastagság megtartása mellett a kulcsház falát a fenék irányában növekedő vastagsággal célszerű kialakítani. Így elérhető, hogy a kulcs kisebb befeszítéssel megtartja a hangolás során beállított helyzetét, erőtani fogalmakkal: a súrlódási felület növeléséből adódó súrlódási erő a kulcsház falában fellépő hasítószilárdság határértékének megközelítése nélkül kialakítható.

1.9. A hegedűtestben a terhelhető erők hatására bekövetkező lassú alakváltozás

A hegedűre ható erők által okozott következmények számbavétele során említést kell tenni a hegedűtestben végbemenő lassú alakváltozásról is. Minden erőhatásnak kitett szerkezetben a terhelés alakváltozást idéz elő. Tudjuk, hogy az erő hatására az anyag megnyúlik, összenyomódik, meghajlik. A rugalmassági határon belül bekövetkező alakváltozás azonban megszűnik, ha a szerkezet mentesül a terhelő erő hatása alól. Részben vagy egészében visszanyeri eredeti alakját, maradandó alakváltozást nem szenved. Minden alakváltozás azonban egy múló és egy maradandó részből áll. Úgy is mondhatjuk, hogy minden alakváltozás az igénybevétel mértékétől és a szerkezet anyagára jellemző rugalmassági tényezőtől függően tartalmaz elenyészően kicsiny vagy már kimutatható maradandó eltérést a szerkezet eredeti állapotához képest. A hosszú időn át ható tartós terhelés növeli az anyag maradandó alakváltozását.

Megfigyelhető ez a jelenség új hegedűk esetében. A húrokat „gyakrabban" kell felhangolni, s ennek nemcsak az oka, hogy a változó hőmérséklet hatására

megnyúlnak, hanem főként az a tény, hogy a hegedű szerkezetében lassú alakváltozás megy végbe. A hegedűtestben működő belső erők (húzó-, nyomó-, hajlítóerők) az anyag molekuláinak térbeli helyzetét, kohéziós erőviszonyait átrendezik, ami alakváltozást idéz elő (a tetőlemez hosszirányban összenyomódik, a hátlemez megnyúlik, a boltozatok magassága csökken, az illesztési pontok elmozdulnak eredeti helyzetükből).

Ez az alakváltozás a valóságban alig érzékelhető, legfeljebb a felület kisebb torzulásából – a boltozat egyenletességének módosulásából – a káva dőlésszögeinek elferdüléséből érhető tetten. Nagyobb gondot a hegedű esztétikai jellegének megítélésében és használatában nem okoz.

Jóval jelentősebbek azonban azok az alakváltozások, amelyek hosszabb idő alatt alakulnak ki, formai módosulással járnak, és a hegedű használata során funkcionálisan is zavaróan hatnak: pl. a nyak dőlésszögének csökkenése, vagy a nyak és fogólap tengelyirányból történő eltérése. Más esetben kiváltképpen esztétikailag zavaróak: pl. a lélek felőli *f*-bevágás torzulása, a boltozat deformálódása.

Mindezek a kellemetlenséggel járó alakváltozások közvetetten a tartós külső erőhatást és ennek nyomán keletkező belső erők, valamint a környezeti jellemzők változásainak (hő-, páratartalom ingadozás) következményei. Nézzük meg, hogy a kiváltó ok (a húrokban lévő feszítőerők) és a következmény között milyen összefüggés van.

A nyakban fellépő – a hegedűtestre merőleges síkban ható – forgatónyomatékról már szó esett. Kiszámítottuk, hogy a négy húrban lévő együttes feszítőerő a felső nyeregnél 39,79 N támaszerőt hoz létre. A felső nyereg és a nyaktőke fordulóéle között 13,65 cm távolság van. Ennek alapján a fogólapra merőleges síkban állandó nyomaték hat, aminek a nagysága $M = 39{,}79 \cdot 13{,}65 = 543{,}13$ Ncm.

A tartós igénybevétel hatására bekövetkező lassú alakváltozás a nyak eredetileg beállított dőlésszögét csökkenti, és a fogólap láb felőli része közelebb kerül a tetőlemez érintősíkjához. Csökken a húrokból a láb síkjára ható erő, aminek a hang keletkezésében mutatható ki kedvezőtlen hatása. Ezt az előre látható következményt a nyak dőlésszögének beállításakor egyszerűen nagyobb dőlésszög alkalmazásával kívánják a legtöbb esetben elkerülni. Ez azonban a kezdeti a lassú alakváltozás előtti szakaszban a szükségeshez képest nagyobb húrlábmagasságot igényel.

Hatékonyabb technológiai megoldás a nyaktőke és a felső nyereg kapcsolatának erősítése *A nyakban fellépő erők* című fejezetben tárgyalt, összekötő trapéz alakú lemez alkalmazásával. Ez a sajátos rögzítési mód

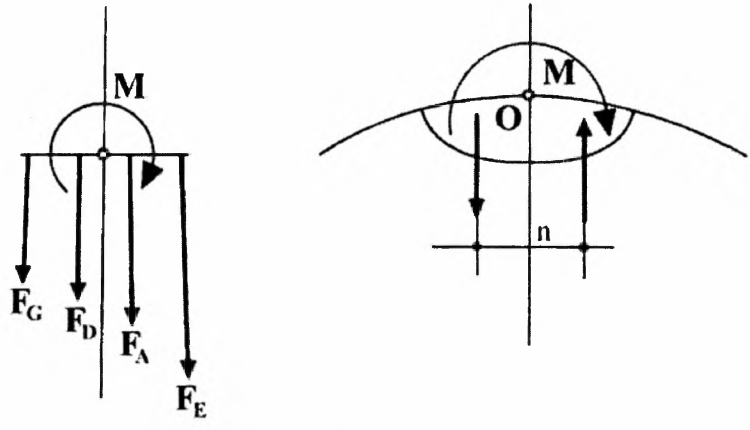
nemcsak a makk kiszakadása ellen nyújt védelmet, hanem egyben a nyak szögforgását is akadályozza.

A húrok aszimmetrikus paramétereiből következő – a tetőlemez alapsíkjára vetített – forgónyomaték már kellemetlenebb, nehezebben korrigálható alakváltozást okoz. A *g*-, *d*-húrokban és az *a*-, *e*-húrokban lévő feszítőerők közötti különbség igen jelentős (*g*: 62 N, *d*: 67 N – Σ = 129 N; *a*: 75 N, *e*: 91 N; Σ = 166 N). Ezeknek a tetősíkban kimutatható komponensei: $g = 61{,}88$ N, $d = 62{,}58$ N, $a = 68{,}02$ N, $e = 88{,}70$ N. Ha a nyaktőke homloklapjának és a hegedűtest tengelyének metszéspontjára kimutatjuk a keletkező nyomatékokat, szembetűnő különbséget kapunk. A *g*- és *d*-húrból számítható nyomaték $M_{g\text{-}d}$:

$M_{g\text{-}d} = 61{,}88 \cdot 1{,}2 + 62{,}58 \cdot 0{,}4 = 99{,}28$ Ncm

$M_{a\text{-}e} = 68{,}02 \cdot 0{,}4 + 88{,}70 \cdot 1{,}2 = 133{,}64$ Ncm

Tehát az *a*- és az *e*-húrok felőli nyakrészt 34,36 Ncm-rel nagyobb nyomaték terheli. Úgy is felfogható, hogy ez a 34,36 Ncm állandóan ható forgatónyomaték a nyak tengelyét a korpusz tengelyvonalától elfordítani törekszik, és a lassú alakváltozás során a nyak elferdülését okozza. Ennek csökkentése a szerkezet forgatónyomatékkal szembeni ellenállásának növelésével lehetséges. Ha a felső tőke hosszát 0,4–0,5 cm-rel megnöveljük, a belső erők nagyobb külső erőhatással szemben képesek a szerkezetet egyensúlyban tartani (70. ábra). (Egyes technológiai, méretezési leírások a felső tőke méreteit nagyobb értékben is határozták meg: felső tőke 50/15 cm, alsó tőke 45/14 cm.)



70. ábra

Ezen az ábrán könnyen követhető, hogy a forgatónyomatékot ellensúlyozó belső erőpár akkor képes nagyobb hatást gyakorolni, ha az *n* erőkar megnövekszik. Mivel az erőpárt alkotó erők a két részre bontható – megközelítően háromszög alakú – tőkemetszet súlypontjában hatnak, az *n* növelése a tőke hosszméretének növelésével érhető el.

A hegedűépítés gyakorlatában és az ezzel foglalkozó irodalomban gyakran találni olyan állásfoglalást, hogy a fogólap elferdülésének megakadályozására, illetve csökkentésére a nyak beillesztésénél gondolni kell. Ezzel számolva „az *e*-húr húzásának ellensúlyozására" a nyak tengelyét a korpusz hossztengelyétől az órajárás irányával ellentétes irányba célszerű kismértékben elfordítani. Ez azonban aligha tekinthető megoldásnak, mivel már az új hangszerek esetében is a hangszer tengelyvonalától eltérő fogólap beállításával kell számolni. Alig több ez annál, minthogy az idő múlásával bekövetkező kellemetlen helyzetet megelőlegezzük, tudatosan, idő előtt létrehozzuk.

A maradandó lassú alakváltozás bekövetkezését azonban ezzel nem zárhatjuk ki. Egyrészt, mert az anyag fizikai tulajdonságaiból ered, másrészt pedig egyéb tényezők is közrejátszanak: pl. a hegedűtestet érő hatások, hő- és páratartalom-ingadozás stb.

Az alakváltozások között említésre került a lélek felőli *f*-bevágás körüli deformáció. Ez főként a lélekben felfelé irányuló nyomóerő – ami esetenként a túlzott befeszítéssel még fokozásra is kerül –, valamint a saroktőkére, a kávára ható ellenirányú boltozati nyomás, és a hátlemezben képződő húzóerő következménye. A boltozat torzulásának mértéke az előidéző erők nagyságától, a tetőlemez anyag jellemzőitől és a boltozat emelkedési szögétől függ. Azonos nagyságú erőhatás esetén, sűrűbb rostozatú tetőlemez torzulása kisebb, mint a szélesebb pásztázattal rendelkező anyag esetében.

Növeli még ennek mértékét az a gyakran bekövetkező körülmény, hogy a *g*- és a *d*-húrok hangjának javítása érdekében a lélek helyét az *f*-bevágáshoz közelebb választják meg. Ez esetben, mivel a tetőlemez folytonosságát az *f*-bevágás megbontja, nem érvényesül a szerkezeti héjakra jellemző erőátadási folyamat, a láb felőli, alátámasztás nélküli lemezszakasz kiemelkedik a boltozatból. Bár ennek a hangra alig, vagy egyáltalán nincs hatása, azonban esztétikailag kellemetlen torzulást eredményez. Kizárni, megakadályozni nem lehet, csak a deformáció mértéke csökkenthető a lélek helyének megválasztásával.

2. A hegedű használata közben fellépő külső erőhatások

Eddig a húrokban lévő feszítőerők – a felhangolt hangszerben állandóan ható passzív erők – által keltett különböző hatásokat vizsgáltuk. Nem esett szó a használat, a zenélés közben fellépő erőkről, amelyek megkerülhetetlenül szerepet játszanak az előző fejezetekben megismert erők alakulásában. A továbbiakban sem foglalkozunk azonban a használattól független külső erőhatásokkal, amelyek esetenként érhetik a hangszert, bár nagyságuktól, ismétlődésük gyakoriságától függően ezek képezik a legnagyobb igénybevételt, és a legtöbb törés, roncsolódás közvetlen okozói. Mivel ezek konkrét előfordulások, a következményeket kiváltó hatásokat csak egyedi esetvizsgálattal lehet feltárni, illetve elemezni.

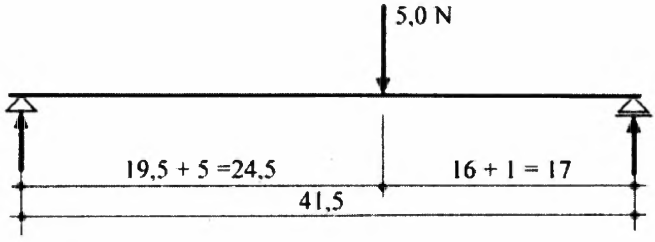
Játék közben a hegedűtest statikailag ugyanolyan igénybevételnek van kitéve, mint egy koncentrált erővel excentrikusan terhelt kéttámaszú tartó, tehát az eddigiekben alkalmazott módon analogizálható. Könnyen belátható ez az állítás: mivel a játékos a vonóval nyomást gyakorol a húrra (F_v), miközben a hegedűtest hátsó íve felfekszik a vállára (T_v), bal keze pedig alátámasztja a nyakrészt (T_{ny}).

Ebben az egyszerűnek látszó összefüggésben a legproblematikusabb kérdés, hogy a vonónyomás milyen nagyságú erőt képez. Ha ezt meg lehet határozni, akkor már könnyen kiszámíthatók a támaszerők, illetve az ezekből következő belső erők.

A vonó nyomása nagyon sok tényezőtől függ. Befolyásolja a vonó tömege (55–66 g), rugalmassági tényezője (Young-modulusa), a vonószőr feszítettsége, a játékos temperamentuma és az előadásra kerülő műben meghatározott artikuláció. Nagy teremben vagy szabadtéren nagyobb hangerőre van szükség. Az pedig – szinte ösztönösen – ismert a játékosok körében, hogy a húr annál nagyobb amplitúdóval rezeg, annál hangosabban szól, minél közelebb helyezkedik a vonó a lábhoz, minél nagyobb a vonósebesség és minél nagyobb a vonónyomás (F_v). Annak ellenére, hogy az előadóművészek általában jobban kedvelik a jó vivőerejű, nagy és tiszta zengésű hangot eredményező nyomásarányos, hosszú, gyors vonókezelést, mint a kemény, ütésszerű vonójátékot, esetenként elkerülhetetlen, hogy a kápa közeli vonószakasszal nagyobb nyomóerőt kell gyakorolni a húrra. Ennek nagysága – mérés alapján – elérheti a 4,0–6,0 N erőt.

Nézzük meg ezek után azt, mekkora támaszerők képződnek (71. ábra).

$$T_v = \frac{5{,}0 \cdot 17}{41{,}5} = 2{,}05 \text{ N} \qquad T_{ny} = \frac{5{,}0 \cdot 24{,}5}{41{,}5} = 2{,}91 \text{ N}$$



71. ábra

Tehát játék közben a hegedűtestben a már meglévő, (120,61 N) passzív erőkkel együtt – 5,0 N-nyi vonónyomást mint aktív erőt alapul véve – (120,61 N + 5,0 N =) 125,61 N nyomóerő, (80,82 N + 2,95 N =) 83,77 N álltartó felőli és (44,10 N + 2,05 N =) 46,15 N nyak felőli támaszerők alakulnak ki. Mivel ezek az aktív erők a passzív erőknek 4,0–4,5 %-át teszik ki, a belső (főként a húzó- és nyomó-) erőket lényegesen nem befolyásolják.

Valamivel nagyobb a hatásuk a hangszertestben fellépő forgatónyomatékra és a nyíróerőkre, de ezek nem lépnek át a hegedű anyagára jellemző megengedhető határfeszültség értékén. A ritkán előforduló ütésszerű, erős vonónyomás esetében legfeljebb a húr pattan el, (mivel a megnyúlás következtében a húrban hirtelen megnövekedő húzóerő a szakítószilárdságot meghaladó feszültséget hoz létre). Inkább figyelmet érdemelnek az aktív erők fellépésének gyakoriságából adódó következmények, amelyek elsősorban a hegedűben végbemenő lassú alakváltozás folyamatát serkentik. Ezek elsősorban a nyak dőlésszögének csökkenése és a fogólap tengelyének elferdülése. *A hegedűtestben a terhelő erők hatására bekövetkező lassú alakváltozás* című fejezetben erről az elkerülhetetlen tényről beszéltünk, és analóg bizonyítottuk a tartós terhelés határára az anyagban kialakuló lassú alakváltozást. A szerkezetek világában ismert jelenség, hogy a dinamikus hatások az állandó terhelés alatt álló anyag molekuláinak átrendeződését serkentik, és a terhelő erőkkel arányos alakváltozás kiala-

kulása rövidebb idő alatt következik be. Itt pedig erről van szó: vagyis a játék közben ismétlődő aktív erőhatások dinamikus igénybevételként lépnek fel. Ennek következtében rövidebb idő alatt következik be a hegedűtest lassú alakváltozása, amiből az említett nyakdőlésszög csökkenés a fogólap leferdülés már zavarokat okoz.

Az aktív erők vizsgálata során figyelmet érdemel az a forgatónyomaték, amit játék közben a hangszert tartó bal kéz, – mint alátámasztó erő – képez a nyaktőkére. Ennek számszerű nagysága éppúgy nehezen határozható meg, mint a vonónyomásból adódó terhelőerő. Függ a játékos kezétől – kisebb kéz nehezebben éri el a húrokon a legfelső lefogási pontokat, s bár ilyenkor a hüvelykujj csupán az ujjheggyel támasztja alá a nyakat, de a támasztást biztosítani kell – és így is létrejön valamilyen nagyságú minimális forgatónyomaték. A passzív erőkből a nyak fordulóélére 530,52 Ncm forgatónyomatékot számoltunk ki. Ebből a nyakra ható húzóerő – kedvezőtlen anyagjellemzők mellett – láttuk, kritikus hatást gyakorolhat. Nem valószínűsíthető, hogy az aktív erőhatásból képződő forgatónyomaték miatt kialakul a szerkezet kritikus igénybevétele. Ismereteim szerint az irodalom sehol sem tart nyilván olyan esetet, hogy játék közben makkszakadással kifordult volna a nyak. Az M_{Δ} forgatónyomaték, ami a legfelső fekvésekben történő játék közben alakul ki, az állandóan ható forgatónyomatéknak elenyésző töredéke. Említése csupán azért indokolt, mert a gyakori előfordulás dinamikus igénybevételt jelent, és hozzájárul a lassú alakváltozás dőlésszög csökkenést eredményező folyamatához.

Az előzőekben végzett számítások azt igazolják, hogy a hegedű empirikus úton kialakított szerkezete megfelel a rendeltetésből adódó külső terhelés (húrfeszítőerők) hatására létrejövő belső erők okozta igénybevételnek. A szerkezeti keresztmetszetekben fellépő feszültségek kisebbek a felhasznált anyagra jellemző határfeszültségeknél. Tehát a korszerű szerkezetméretezési elmélet is alátámasztja a tapasztalat alapján létrehozott konstrukció alkalmasságát. Csupán két csomópontban mutatható ki kritikus jellemző. Egyik a makk teherviselő képessége (amire a gyakorlat is rámutat, hiszen gyakran szakad ki a makk), a másik az alsó tőkében a gomb hasító hatására bekövetkező törés (ami legtöbbször a tetőlemezben is repedést indít el). Ezek előfordulása azonban inkább technológiai okokra vezethető vissza. A makk kiszakadása, ahogyan a számítás során kimutattuk, akkor következik be, ha a berakásárok vágásakor a hátlemezben a teherviselő keresztmetszet a

határfeszültségben megengedhető méret alá süllyed. Ezért helyes, ha a makk alatt a berakás-árkot sekélyebb mélységig vágják ki. A szakirodalomban is találni utalást erre. Otto Möckel *A hegedűépítés művészete* című könyvében írja, hogy Amati ezen az intarziaszakaszon csak bekarcolta a berakás vonalát a keresztmetszet csökkentésének elkerülése érdekében.

Az alsó tőke roncsolódása, repedése a gomb hasító hatására csak akkor következik be, ha a tőke évgyűrűinek iránya megegyezik a gomb hossztengelyével. Ez abból következik, hogy az évgyűrűk lazább szerkezetű korai vagy tavaszi pásztáinak ellenállása a hasító igénybevétellel szemben lényegesen kisebb, mint a cellulózban gazdagabb késői vagy őszi pásztákban. A két pászta keménysége és anyagsűrűsége – egyben szilárdsági jellemzői – nagymértékben különbözik egymástól. Ha a tőke száliránya a gomb tengelyére merőleges vagy nagyobb szöget zár be, jóval nagyobb hasító igénybevételre képes. Mindemellett a tetőlemezt is hatásosabban védi a gomb tengelyvonalára merőleges szálirányú tőke beépítése. A tapasztalat is azt igazolja, hogy azokban a hegedűkben jön létre az alsó tőke repedése, ahol a tőke száliránya és a gomb tengelyvonala megegyezik, párhuzamos.

Végül számításaink alapján összegezhetjük: a hegedű kialakult szerkezetének időállóságát nemcsak a sok évszázados gyakorlati tapasztalat bizonyítja, hanem jelenlegi ismeretekkel – statikai elemzéssel – is kimutatható (igazolható) a hangszer konstrukciójának állékonysága. Amit mai szemlélettel, az általános szerkezetméretezésből vont következtetés alapján hozzátehetünk csupán néhány további biztonságot növelő technológiai megoldás.

III.

A HEGEDŰGERENDA MAI SZEMMEL

Bevezetés

Nincs a hegedűnek még egy olyan szerkezeti eleme, amelynek a rendeltetését annyiféle, többször egymásnak ellentmondó érvekkel próbálták eddig megmagyarázni, mint a gerenda. Szinte valamennyi, a hegedű technikai, technológiai kérdéseivel foglalkozó szakirodalmi munka kísérletet tesz erre. Számos hegedűépítő, zenész, hangszer-akusztikus vállalkozott arra, hogy különböző szemléletű tanulmányokban feltárja ennek a rejtélyesnek tűnő kiegészítő szerkezetnek a szerepét. Az is figyelemre méltó, hogy nincs a hegedűnek még egy olyan eleme, amelyik a hangszer kialakulása óta olyan karakterisztikus (méret-, forma-, szerkezetkapcsolat-) változáson ment volna keresztül, mint éppen a gerenda. S mindemellett a fejlődéssel velejáró szükségszerű módosításokon túl a hegedűnek ez a kicsiny szerkezete volt alanya a hegedűhang javítását célzó legkülönbféle spekulatív, tudománytalan kísérletezésnek. Több esetben elszenvedője a már szabadalmi szintre emelkedett, de rég feledésbe ment, egykor szenzációként napvilágot látott sikertelen „felfedezésnek", mint pl. a francia diszkantgerenda, vagy a nálunk üzleti fogásként megjelent „hangfokozó gerenda". Paul Otto Apian-Bennewitz *A hegedű* című könyvében[50] fél tucat különféle gerendaszerkezetet mutat be, nem kevesebbet sorol fel Otto Möckel *A hegedűépítés művészete* című művének *Módosító kísérletek a vonós hangszereknél* fejezetében. Bár ezek is, számos más hasonló kísérlettel együtt, mint az alkimistáknak a legtöbb erőlködése az aranycsinálásra, az eredménytelenség homályába vesztek. „A gerenda eleinte – írja tovább – még parányian kicsi, vékony és rövid volt, mígnem lassanként a szerzett tapasztalatok alapján elnyerte a mai formáját." Ám sokat sejtetően megjegyzi ugyanott, hogy „a gerenda elhelyezésére, vastagságára, magasságára, hosszára és feszítőerejére vonatkozóan a szakemberek között eltérő vélemények alakultak ki". Karl Fuhr *A hegedű akusztikai rejtélyei* című munkájának *A basszusgerenda* fejezetében írja: „Mivel a tapasztalat azt mutatja, hogy az új gerenda behelyezésével gyarapodott a régi hegedű hangja, ezért számos hegedűépítő nagyos erős gerendát alkalmazott. A hang ezáltal károsult – különösen a *g*-húron, ... mivel a tetőlemez bal oldala, amelynek a jóval nagyobb kitérés (amplitúdó) megtételére kell képesnek lenni – mint a jobb oldalnak – az erős gerenda merevsége akadályozta abban."

Mindennek ellenére azonban még ma sem tekinthető meggyőzően feltártnak, hiteles mérésekkel bizonyítottnak a gerenda valós szerepe. A

gondot azonban nem a terminológiai definiálatlansága okozza, hanem a szakirodalomban és a hegedűépítés gyakorlatában egyaránt meglévő és érvényesülő, több esetben ellentmondásos álláspont a gerenda szerepének megítélésében.

Nézzünk ezek közül néhányat:

1) A szakirodalom számos helyen rögzíti, hogy a 17-18. század fordulóján a hegedű hangterjedelmének jobb kihasználása, a virtuózabb zenei törekvések elősegítése érdekében átépítették a vonós hangszereket: megnövelték a nyak hosszúságát és dőlésszögét. Az ebből adódó húrnyomástöbblet ellensúlyozására a korábban alkalmazott kisméretű gerendák helyett nagyobb, „erősebb" gerendák építésére tértek át. De vajon a zengő húroknak alig 1 cm-t kitevő meghosszabbítása és a nyak dőlésszögének néhány fokkal történő megnövelése eredményezhetett-e akkora mértékű húrnyomás-növekedést, amely a gerenda tömegének csaknem megkétszerezését igényelte? Különösen, ha figyelembe vesszük, hogy ez idő tájt a húrok anyaga nem változott, s a hangolás sem emelkedett mértékadóan, így ezekből jelentős többlet-nyomóerő nem léphetett fel.

2) A gerenda és a tetőlemez kapcsolatára ez ideig három egymástól eltérő beillesztési mód alakult ki. Hogy ezek közül melyik felel meg legjobban a célnak – vagy egyáltalán alkalmas-e mindhárom mód –, az empirikus gyakorlati ismeretek alapján megoszlanak a vélemények. A szakirodalom pedig féligazságokkal érvelve ítéli meg annak függvényében, hogy mit tekint a gerenda tényleges funkciójának. Így a gyakorlatban egyaránt alkalmazzák:

- a tetőlemez belső felületéhez (homorulatához) teljes hosszában pontosan illeszkedő ívelésű gerendabehelyezést,
- a gerenda két végénél a tetőlemeztől 1-2 mm-rel elmaradó – középső szakaszán a tetőlemezzel érintkező – ívelésű, és a beenyvezéskor a végein a tetőlemezhez befeszített gerendát,
- s végül, amikor a gerenda két vége érinti a tetőlemezt, és a középső szakaszán 1-2 mm távolságban követi annak belső ívét, és a beenyvezéskor középütt befeszítéssel illeszkedik a tetőlemezhez.

Összehasonlítva ezeket elkerülhetetlenül felébred bennünk a kétely: hogy a teljesen más – egymással szögesen ellentétes hatású – belső erőrendszert ébresztő megoldások egyenértékűek lennének? A kérdés nem más, minthogy a szubjektíven megítélt, empirikus eredmények ismeretén kívül milyen egzakt érvek sorolhatók fel egyik vagy másik megoldás igazo-

lására. Milyen mértékben lehetséges a műszaki-technikai ismeretek alkalmazásával meghatározni a gerendának a mechanikai rezgés továbbításában betöltött szerepét?

3) Nem sok szó esik ugyan arról, a szakirodalomban alig találkozni vele, hogy míg a hegedű élettartama (a kedvezőtlen külső káros hatások következményeit leszámítva) igen hosszú időt, évszázadokat ívelhet át, a gerendát (főleg a szóló és a zenekari hangszerekben) általában 20–25 évenként cserélni kell. Ennek szükségességéről szűkszavúan csak annyit lehet megtudni (s erről az elméleti elemzések sem mondanak többet), „hogy a gerenda elfáradt, új, rugalmas gerendára van szükség".

Vajon a korszerű műszaki tudományok nyújtanak-e lehetőséget e jelenség fizikai értelmezésére, és nyomon követhető-e az anyagban az idő függvényében végbemenő változást? Lehet-e magyarázatot találni arra, hogy az állandó igénybevétel során ezek a folyamatok miként befolyásolják a gerenda anyagának mechanikai adottságait? S valójában mi okozza az anyag fáradását: csak az idő múlásával az anyag elkerülhetetlen „elöregedése" vagy egyéb mechanikai eredetű okok is közrejátszanak?

A hegedűirodalom nem foglalkozik ezeknek a műszaki jellegű kérdéseknek a fizikai magyarázatával. Keressünk akkor analóg összehasonlítási lehetőséget a hegedűépítésben és a mérnöki szerkezetekben egyaránt alkalmazott anyag vizsgálata során megismert hatások alapján. A technikai (műszaki) tudományok felgyorsult fejlődése alkalmat kínál erre, ha a jellegében rokon szerkezetekben az igénybevétel, illetve az időfaktor hatására végbemenő folyamatokat összehasonlítjuk. Álláspontom szerint nem zárható ki a hegedűépítésben annak közvetlen felhasználhatósága, amit a mérnöki szerkezetek korszerű elmélete és gyakorlata elért.

Vizsgáljuk meg egyenként e témaköröket, és kíséreljünk meg – ok és okozati összefüggések alapján – egzakt magyarázatot adni a kérdésekre.

1. A gerenda és a hegedűszerkezet viszonya

1.1. A gerenda és a húrnyomás

Megközelítően a 17-18. század fordulójáig a hegedű nyaka és a menzúrája rövidebb volt a mainál. A húrok a láb felett tompább szöget zártak be, a láb alacsonyabb, a fogólap lényegesen rövidebb volt. A „nyak-fogólap síkja egy

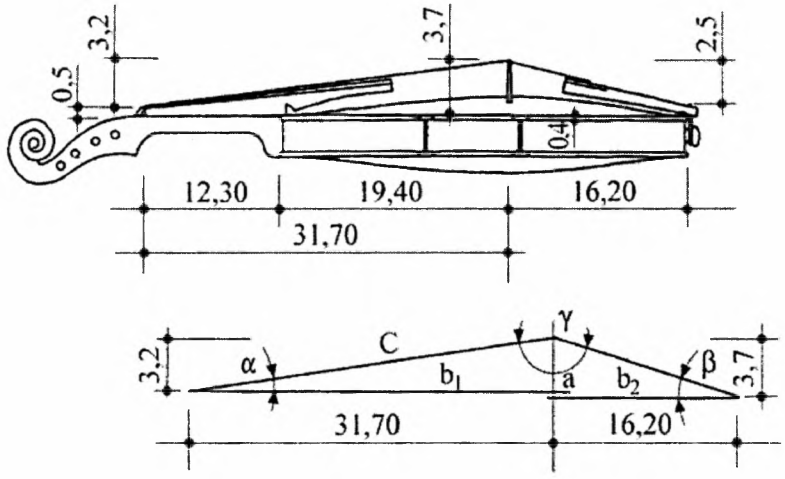
egyenesbe esett a tető síkjával".[51] Az ekkori mélyebb (biztos adattal nem igazolható) hangolás mellett és a felsorolt adottságok következtében rövidebb zengő húrok miatt kisebb nyomás nehezedett a tetőre.

Az ez idő tájt kialakuló zenei műfajok, a szólóhegedű-szonáta és a hegedűverseny elterjedése virtuózabb játéktechnikára alkalmasabb, nagyobb teljesítményt nyújtó hangszert igényelt. A korabeli hegedűművészek: Corelli, Torelli, Verancini, Vivaldi, Albinoni[52] művei még ma is komoly követelmény elé állítják a hegedűsöket.

A korpuszra a korábbinál nagyobb dőlésszögű és valamivel hosszabb nyakat illesztettek. A fogólap ¼-ével megnyúlt, a láb magasabb, a gerenda hosszabb, szélesebb és erősebb lett.[53] Az új hangszereket pedig már jórészt ezeknek az elvárásoknak megfelelően építették. A nagyobb nyakdőlésszög, a megnövelt zengő húr hossza, a nyak- és a korpuszmenzúrák kedvezőbb arányainak kialakítása következtében a tetőre jutó nyomóerő is nagyobb lett.

Tanulságos lenne összehasonlítani a két, eltérő paraméterekkel rendelkező hegedűn a tetőre jutó nyomóerő nagyságát, és megvizsgálni, mennyivel növekedett a húrnyomás az előzőekben felsorolt változtatás után. Mindenképpen nehezíti ezt, hogy az átépítés előtti időben a hegedűk méretei eltérőek voltak, míg a klasszikus itáliai hegedűépítő-mesterek, köztük Stradivari és mások is különböző korpuszhosszúságú hegedűket készítettek. De a menzúraméretek: a nyak- és a testmenzúra aránya sem volt egységes. Az akkori bélhúrok vastagsági méretei és anyagsűrűségi jellemzője nem ismert. A későbbi leírások pedig – jórészt hiányosságaik miatt – nem nyújtanak elégséges és hiteles adatokat, a pontos számításhoz. Annak előrebocsátásával, hogy ezek a számításainkban kisebb-nagyobb pontatlanságot eredményezhetnek, mégis kíséreljük meg a tetőre jutó nyomóerő nagyságát meghatározni egy úgynevezett barokk hegedűn, amely a 17. században alkalmazott, feltételezett méretekkel készült. Válasszunk egy 36,6 cm testhosszúságú, 12,30 cm nyakmenzúrája, 19,40 cm korpuszmenzúrájú, 2,5 cm lábmagassággal rendelkező hegedűt.[54]

Mindenekelőtt meg kell ismerni a számításokhoz szükséges további méreteket, és meghatározni a húrok tengelyvonala és a tetőlemez alapsíkja között kialakult szögek nagyságát (72. ábra). Alapsíknak válasszuk a tetőlemez kávákkal érintkező síkját. Ettől a síktól viszonyítva határozzuk meg a méreteket.



72. ábra: Barokk hegedű és a meghatározó méretei

A tető boltozatának a magassága 1,6 cm (mivel a barokk hegedűknél a nyakszár síkja megegyezik a tetőperem felső szintjével, a szögek kiszámításához a peremvastagságot figyelembe kell venni). Legelőbb számítsuk ki a húrok és a vezérsík között lévő szögeket:

$$\alpha: tg\alpha = \frac{a}{b_1} : \frac{3,2}{31,7} = 0,10094 = 5^\circ 46',$$

$$\beta: tg\beta = \frac{a}{b_2} : \frac{3,7}{16,2} = 0,22839 = 12^\circ 52'.$$

A láb feletti γ szög: $179^\circ 60' - (5^\circ 46' + 12^\circ 52') = 161^\circ 22'$.

A további számításokhoz ismerni kell az ezekből a méretekből meghatározható zengőhúr hosszát *(c)*: $c = \sqrt{31,70^2 + 3,2^2} = 31,86$ cm.

Ezek alapján határozzuk meg a húrokban fellépő feszítőerőt. Igaz, hogy a 17-18. század fordulóján alkalmazott bélhúrok vastagsági méreteit nem ismerjük, de a későbbi időből már rendelkezünk adatokkal. Apian-Bennewitz hegedűről írott könyvében a húrok fejezetében felsorolja az egyes húrok átmérőjét: $e = 0,5$ mm, $a = 0,75$ mm, $d = 1,125$ mm. A *g*-húr átmérőjét 1,0 mm-re veszi. Feltehetően ez a méret fémszállal fonott húrra vonatkozik. Hivatkozik is rá, hogy ekkor már alkalmaztak a *g*-húron fém fonatot.[55] Ugyanitt magyarázatát adja annak, hogy a húrok vastagsága a rezgésszámokkal függött össze:

„Mivel a hegedű minden húrja azonos hosszúságú, és azonos erősséggel feszülnek meg, ezért annál vastagabbak legyenek, minél mélyebb hangot adnak", ... „Egy fémszállal átszőtt mély húrnak nagyobb tömörséget és súlyt adtak és ezzel megkerülték a különben szükséges vastagságot".

Mivel minket a húrban fellépő tényleges feszítőerő nagysága érdekel, el kell tekintenünk a fémszállal bevont *g*-húr alkalmazásától, mert adatok hiányában ez további nehézséget okoz. Írja is Apian-Bennewitz: „Nagyobb nehézséggel jár, ha a vastagságokat a beszőtt és nem beszőtt húrokhoz akarjuk meghatározni, mert ezeknél az alsó rétegek vastagsága, az átszövés abszolút súlya vagy a drót vastagsága és ez utóbbinak az ezüst, réz stb. anyaga, tehát a specifikus súlyuk bír nagyobb jelentőséggel."[56]

Ezért számításaink során maradjunk a tiszta bélhúrok paramétereinek alkalmazásánál. Abból kiindulva, hogy a 3. Mersenni-szabály alapján a bélhúrok átmérőjének egymáshoz való viszonyát két szomszédos kvintbe hangolt húr esetében 3:2 arányban határozták meg, kiszámíthatjuk a sorozathoz tartozó csupasz bélhúr vastagságát. Ennek alapján a *g* tiszta bélhúr átmérője:

$$g = \frac{1{,}125 \cdot 3}{2} = 1{,}68 \text{ mm}.$$

Mivel ismerjük a zengő húr hosszát és a húr átmérőjét, a rezgő húrok frekvenciáját (Hz) meghatározó alapképletből $f = \frac{1}{2\lambda} \cdot \sqrt{\frac{F}{\varphi \cdot q}}$ kiszámíthatók a húrokban fellépő feszítőerők. Az összefüggésben f az alaprezgés frekvenciája (Hz), λ a húr hossza, F a feszítőerő, φ a húr anyagának sűrűsége, q a húr keresztmetszetének felülete.

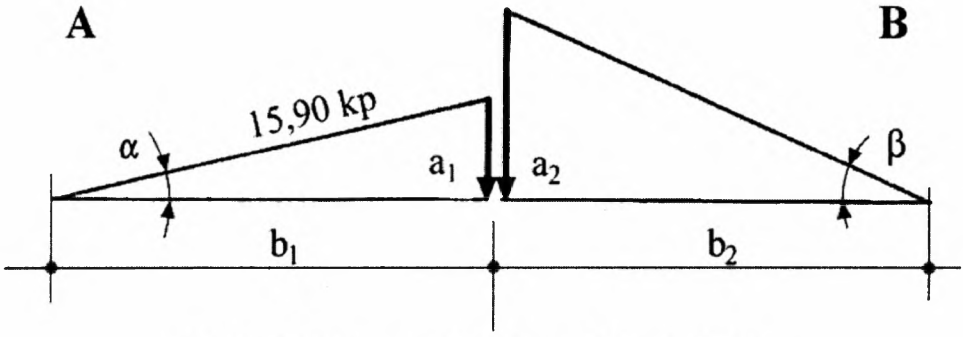
A 18. század elején még nem volt egységesen elfogadott alaphangolás, erre csak 1788-ban került sor, amikor elhatározták, hogy az *a*-hang alaprezgése 409 Hz legyen. Fogadjuk el ezt az értéket számításunk alapjául. Eszerint az egyes húrok alaprezgése:

$e = 612{,}75$ Hz, $a = 409{,}00$ Hz, $d = 272{,}99$ Hz és $g = 182{,}22$ Hz.

Az anyagsűrűség jellemzője nagy valószínűség szerint – bár igen különböző technológiával készültek a húrok – megfelel a bélhúrokra ma ismert anyagsűrűségi mutatónak (1,33 kp/dm^3), vagy legalábbis jól megközelíti azt.

Számításainkhoz tegyük alkalmassá az alapképletet, emeljük ki az F erőt: $F = 4 \cdot \lambda^2 \cdot f^2 \cdot \varphi \cdot q$. Ennek alapján az egyes húrokban fellépő feszítőerő: $e = 3{,}97$ kp, $a = 3{,}98$ kp, $d = 3{,}99$ kp, $g = 3{,}96$ kp. Együtt 15,90 kp (159,0 N).[57]

A következő lépésben két erőháromszög segítségével, amit az alapsík, a felső nyereg, a húrláb és az alsónyereg mentén ható erők alakítanak ki, megállapíthatjuk a húrokban fellépő feszítőerőkből a tetőlemezre jutó nyomóerő nagyságát (73. ábra).



73. ábra: Erőháromszögek a húrnyomás kiszámításához

Előbb számítsuk ki az A erőháromszög b_1 befogójára jutó erőt. Mivel a B erőháromszög b_2 befogóján is azonos nagyságú erő lép fel, a β szög segítségével meghatározhatjuk – ebből a háromszögből – a láb síkjába jutó nyomóerőt $(b_1 = b_2)$:

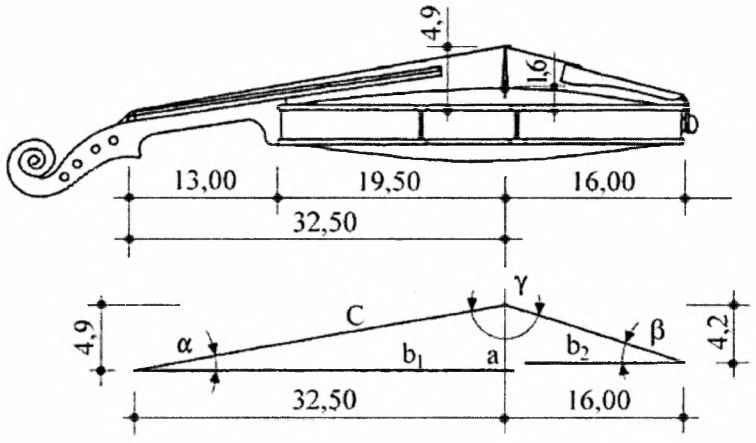
$$b_1 : \cos\alpha = \frac{b_1}{c} : 0{,}9949 \cdot 15{,}90 = 15{,}82 \text{ kp}$$

$$a_1 : \sin\alpha = \frac{a_1}{c} : 0{,}1009 \cdot 15{,}90 = 1{,}60 \text{ kp}$$

$$a_2 : tg\beta = \frac{a_1}{b_2} : 0{,}2284 \cdot 15{,}82 = 3{,}61 \text{ kp}.$$

A két erőháromszögben az $a_1 + a_2$ síkban $1{,}60 + 3{,}61 = 5{,}21$ kp húrnyomás mutatható ki. Tehát a barokk hegedűn a felvett paraméterek alapján 5,21 kp (52,10 N) húrnyomás lépett fel.

Ezek után – ugyanezzel a számítási móddal – nézzük meg, mekkora nyomóerő képződik a nyak méretének, hajlásszögének és a zengő húr hosszának megnövelését követően. Válasszunk egy 18. század elején az olasz klasszikus hegedűépítők által kialakított hegedűméretekkel készült hegedűt: így hossza 35,5 cm, nyakmenzúrája 13,0 cm, korpuszmenzúrája 19,5 cm, lábmagassága 3,3 cm (74. ábra).



74. ábra: Átépített hegedű és a meghatározó méretei

Ez esetben is a húrokban fellépő feszítőerők meghatározásához szükséges erőháromszögek legfontosabb méreteit, szögeinek nagyságát számítsuk ki előbb:

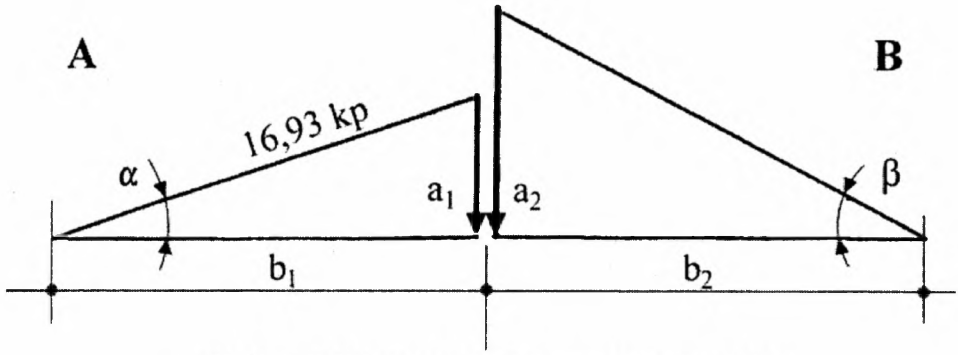
$$\alpha : tg\alpha = \frac{a_1}{b_1} = \frac{4,9}{32,5} = 0,15076 = 8^\circ 34',$$

$$\beta : tg\beta = \frac{a_2}{b_2} = \frac{4,2}{16} = 0,26250 = 14^\circ 42',$$

$$\gamma: 179^\circ 60' - (8^\circ 34' + 14^\circ 42') = 156^\circ 44'.$$

A zengő húr hossza *(c)*: $c = \sqrt{(32,50^2) + (4,9^2)} = 32,86$ cm.

Az egyes húrokban fellépő feszítőerők az előbbiekben alkalmazott húrátmérőkkel számolva: $e = 4,23$ kp, $a = 4,23$ kp, $d = 4,25$ kp, $g = 4,22$ kp. Együtt 16,93 kp (169,3 N).[58] Az erőháromszögekből határozzuk meg a húrnyomást (75. ábra).



75. ábra: Erőháromszögek a húrnyomás kiszámításához

$$b_1 = b_2: \quad \cos\alpha = \frac{b_1}{c} : 0{,}9888 \cdot 16{,}93 = 16{,}74 \text{ kp},$$

$$a_1: \quad \sin\alpha = \frac{a_1}{c} : 0{,}1489 \cdot 16{,}93 = 2{,}52 \text{ kp},$$

$$a_2: \quad tg\beta = \frac{a_2}{b_2} : 0{,}2623 \cdot 16{,}74 = 4{,}39 \text{ kp}.$$

A láb síkjában ($a_1 + a_2$) 2,52 kp + 4,39 kp, összesen 6,91 kp (69,1 N) nyomóerő, illetve húrnyomás nehezedik a tetőlemezre.

Így most már lehetőség nyílik az összehasonlításra: a barokk hegedűn 5,21 kp, a technikailag módosított hegedűn 6,91 kp húrnyomás adódik. A nyomóerő növekedésének a nagysága 1,7 kp.

Ez az mintegy harmadával (32,6 %) megnövekedett húrnyomás még meggyőzőnek tűnne a tetőlemez gyámolítását illetően, de beleütközünk néhány ellentmondásba. Tudvalevő, hogy pl. Stradivari a tetőlemezeit viszonylag vékonyra hagyta. A lemez vastagsága a teljes felületen 2,6–2,8 mm-t vagy annál kevesebbet tett ki, s mindemellett még a későbbi időben is kisméretű gerendákat alkalmazott az új követelményeknek megfelelően épült hegedűiben. „Stradivari még megelégedett 24 cm-es gerendával. Sőt Bagatella kisebbre, csak a testhossz felére, tehát pontosan 18 cm-re vette a gerenda hosszát."[59] Sacconi leírásából tudjuk, hogy Stradivari gerendája „a hangszer hosszától függött, és mintegy 50 mm-re ért el a felső, illetve az alsó szegélyig ". „Gerendáinak szélessége 5 mm volt, s mintegy 6-7 mm közép-

magasságról a végeknél 1-1,5 mm magasságra mentek le."[60] Ez a ma használatos, illetve a sokszor hivatkozott „megerősített" gerenda térfogatának éppen a fele, a régi kis gerenda mintegy 5,1 cm^3, a mai nagyjából 10,31 cm^3.

A vékony tető és a kisméretű gerenda ezek szerint elviselte a megnövekedett húrnyomást. Egyébként is a gerendát csak a baloldali lábtalpon közvetített nyomóerő terhelte, a jobboldali lábtalp alatt csupán a mérsékelt vastagságú tetőlemez állt ellen a többletterhelésnek. Mivel a lélek többször kidőlhetett, a tetőlemez gyámolítás nélkül maradt. Ekkor még ugyan egyforma nagyságú nyomóerőt közvetítettek a lábtalpnak, mivel mindegyik húrban egyazon nagyságú feszítőerőt alkalmaztak. A terhelés eloszlásában ugyan nem érvényesült a mai hegedűkben ismert aszimmetria, de az anyagon belül – a belső erők kialakulásában – igen. Ennek ellenére nem található olyan feljegyzés, irodalmi említés, hogy a húrnyomás növekedésének ellensúlyozására a tetőlemez vastagságának növelése is szükségessé vált volna.

Hogy valójában mikor került sor a 17-18. század fordulója táján alkalmazott gerendák nagyobbra cserélésére, nem lehet e műszaki kérdésekkel foglalkozó tanulmány feladata. Minden ismert adat arra mutat, hogy jóval később, a barokk hegedűkön végrehajtott technikai változtatás után. Erre nemcsak abból lehet következtetni, hogy a klasszikus itáliai mesterek még a 18. században széltében-hosszában alkalmaztak kisméretű gerendákat, hanem néhány irodalmi adat is erre utal. Karl Fuhr írja: „tanulságos Stradivari *Betts* hegedűjének parányi gerendája, amelyet Vuillaume 1859-ben eltávolított és Hill könyvének 192-193. oldalán egy mai gerenda mellett látható."[61] Nem hagyható figyelmen kívül, hogy a húrnyomás növekedését – nagyobb arányú kialakulását – a hegedűn végrehajtott technikai változtatásokon kívül egyéb tényező is befolyásolta. Minden bizonnyal feltűnt, hogy a húrerő kiszámításához alkalmazott képletünkben a húrokban fellépő feszítőerő nagysága *(F)* az alaphangolás értékének a négyzeten lévő szorzatával növekszik: $F = 4 \cdot \lambda^2 \cdot f^2 \cdot \varphi \cdot q$.

Az alaphangolás emelésére, egyben egységesítésére a 19-20. században többször sor került. Eddig számításaink során 409 Hz alaphanggal számoltunk. A 19. század közepén az *a*-hang rezgésszámát 435 Hz-ben határozta meg a párizsi konferencia.[62]

Nézzük meg, hogy az *a*-alaphang 409 Hz-ről 435 Hz-re emelése milyen nagyságú húrnyomás-növekedést okozott. Mivel az alaphang emeléséből adódó húrnyomás növekedését akarjuk megismerni, fogadjuk el, hogy a húrok változatlanul csupasz bélhúrok, és az előzőekkel lehetséges összehasonlítás érdekében azonos vastagságúak. Ismert, hogy ez időben a

húrok vastagsági méretében már történt változás. Apian-Bennewitz írja, hogy Drezdában az előző számításaink során alkalmazott húrvastagságokhoz képest nagyobb húrvastagságot követeltek meg: $e = 0{,}6 - 0{,}76$ mm, $a = 0{,}775 - 0{,}9$ mm, $d = 1{,}05 - 1{,}0$ mm és a $g = 0{,}85 - 0{,}975$ mm (ami feltehetően fonat nélküli tiszta bélhúrra vonatkozik).[63]

Az előzőekben rögzítettek szerint a húrokban fellépő feszítőerők: $e = 4{,}79$ kp, $a = 4{,}79$ kp, $d = 4{,}81$ kp, $g = 4{,}77$ kp. Együtt 19,16 kp (191,6 N). Ebből az együttes feszítőerőből 7,81 kp (78,1 N) nyomóerő adódik a tetőlemezre. Az átépített hegedű esetében 6,91 kp húrnyomást számítottunk ki. Ehhez viszonyítva az alaphangolás emelkedéséből további 0,90 kp (9,0 N) nyomóerő keletkezik, ámde közel másfél évszázaddal később. E témakörben is zavar fedezhető fel a szakirodalomban. Számos szerző a barokk hegedű átépítését követően a magasabb hangolásból adódó húrnyomás növekedésével indokolta a gerenda megerősítését. Friedrich Niederheitmann írja: „... mert a Diapason fokozatos növelése és a magasabb hangolás miatti növekvő húrnyomással a tető ellenállása már nem volt elegendő".[64] Márpedig ahogyan követhető, az alaphangolás emelése a hegedű 17-18. század fordulóján történt átépítése után jóval később következett be. S ha még figyelembe vesszük, hogy a 20. században még tovább emelkedett a normál *a*-hang rezgésszáma (1939-től 440 Hz-re nőtt), ez a növekedés további 0,25 kp (2,5 N) húrnyomást eredményezett. Együttesen a több lépcsőben történt alaphangemelés 1,15 kp (11,5 N) húrnyomás-növekedéshez vezetett. Végül is az alaphang emelkedéséből adódó többletnyomóerő csaknem megközelítette a barokk hegedű átépítésekor alkalmazott nagyobb nyaktörésszög után fellépett 1,70 kp húrnyomás növekményt. További markáns húrnyomás-növekedés a fémhúrok alkalmazásával következett be. Otto Möckel 1930-ban kiadott könyvében[65] a húrokban fellépő feszítőerőt $e = 8{,}965$ kp, $a = 6{,}875$ kp, $d = 6{,}325$ kp, $g = 6{,}255$ kp, összesen 28,42 kp-ban határozta meg. Ezekből a feszítőerőkből 11,60 kp (116,0 N) nyomóerő hat a tetőlemezre. A napjainkban használatos erős fémhúrok esetében ez a húrnyomás elérheti a 12,00 kp-ot (120,0 N).

Meg kell azonban jegyezni, hogy a korszerű húrgyártás a különböző új anyagok felhasználása mellett törekszik a húrokon fellépő nyomóerő csökkentésére. Mindenek előtt azért, hogy új húranyag alkalmazásánál ne emelkedjen a kívánt alaphang eléréséhez szükséges feszítőerő, ami egyben a tetőlemezre jutó húrnyomás növekedését is okozná.

Szenteljünk rövid pillantást a mai húrokból adódó húrnyomásértékek alakulására. Nézzük meg a PIRASTRO: Eudoxa, Chromocor és Chorda (bélhúr), a THOMASTIK: Dominant és a Präzision, valamint a D'ADDARIO: Helicore és a Prelude (közepes fokozatú) húrok jellemző adatait.[66]

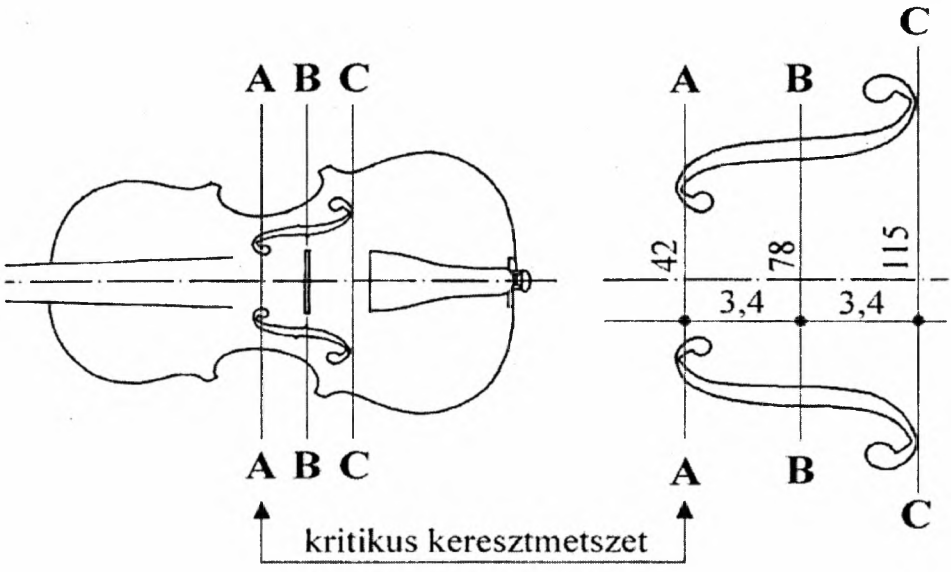
	kp				Σ	húrnyomás
	e	a	d	g		
Eudoxa	7,50	5,10	3,60	3,85	20,05	8,18
Chromocor	7,90	5,85	4,90	4,55	23,20	9,47
Chorda	5,90	4,55	3,75	3,60	17,80	7,26
Dominant	7,80	5,50	4,50	4,50	22,30	9,10
Präzision	7,80	6,50	5,90	5,50	25,70	10,50
Helicore	8,43	5,76	5,21	4,62	24,02	9,81
Prelude	8,43	5,94	5,30	5,17	24,84	10,14

Számításaink során a barokk hegedűtestre 5,21 kp húrnyomást mutattunk ki. A lényegében ugyanolyan méretekkel rendelkező hegedűkorpuszra ma esetenként – az alkalmazott húrok fizikai jellemzőitől függően – 12,00 kp terhelőerő hat. Nem kerülhető meg a kérdés: valójában mekkora nyomóerőt képes elviselni a hegedű tetőlapja? Az erőhatások irányát követve könnyű megállapítani, hogy a húrok feszítéséből képződő terhelőerőt elsődlegesen a térbeli, hajlított lemeztető viseli. A boltozatok pedig lényegesen nagyobb külső erővel szemben képesek ellenállni, mint a sík lemezek. Gasparo del Salo, Amati, Guarneri, Stradivari zsenialitását növeli, hogy empirikus úton felismerték a hegedűtest boltozatos szerkezetének előnyeit. Az építészetben már jóval előbb – több évszázaddal korábban – alkalmaztak íves áthidalásokat, boltozatokat térlefedések építéséhez. A nagyméretű íves lemezszerkezetek ma már széles körben elterjedtek. Nemcsak formailag nyújtanak impozáns tömeghatást, hanem a hártyavékony, viszonylagosan kevés anyagot igénylő térbeli szerkezetek mérsékelt teher viselésére is alkalmasak.

Valójában a hegedű épített szerkezet, olyan konstrukció, amelynek valamennyi alkotó elemét tömegével arányos, jelentős nagyságú külső erőhatás éri. Minden erőltetett viszonyítás, túlzás nélkül formai-szemléletbeli rokonság tűnik fel a hegedűszerkezet és a mai héjszerkezetek között. Érzékelhetjük majd a továbbiakban: több is rejlik e mögött. Szinte csodálatot ébreszt, ahogyan a hegedű megalkotói ráéreztek ennek a szerkezeti megoldásnak az előnyére. Annál is inkább ámulatot kelt, mivel a hegedű lemezboltozatának térbeli kialakításához, a lemezvastagság méretezéséhez az akkori alkotók nem rendelkezhettek mai fogalmaink szerinti mechanikai-statikai ismeretekkel, ami nélkül a héjszerkezetek tervezése lehetetlen. Akkor tudjuk ennek jelentőségét igazán méltatni, ha megismerjük, hogy a hegedűtestre ható külső erők milyen nagyságú belső erőket hoznak létre, s az erők hatását egybevetjük a szerkezet teherviselő képességével.

Kíséreljük meg bonyolult matematikai módszerek nélkül, egyszerű, közelítő számítással, analóg modellek igénybevételével megismerni ezeket.

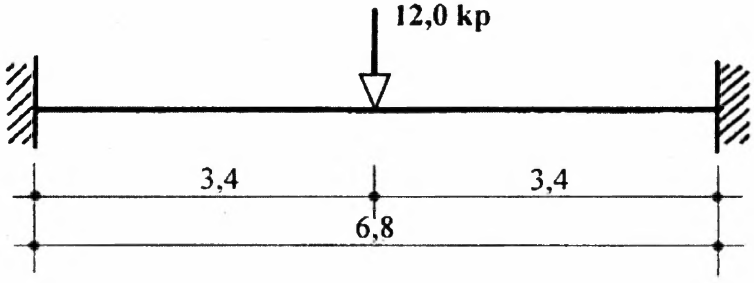
Számításainkhoz virtuálisan alakítsunk ki egyenletesen 2,7 mm vastagságú tetőlemezszeletet, és nézzük meg, hogy a húrnyomás milyen nagyságú belső erőket és feszültségeket hoz létre benne, s végül milyen mértékben felel meg a külső terhelésből fellépő igénybevételnek (76. ábra).



76. ábra: Az *f*-nyílások közötti lemezszakaszban fellépő feszültségek számításához szükséges méretek

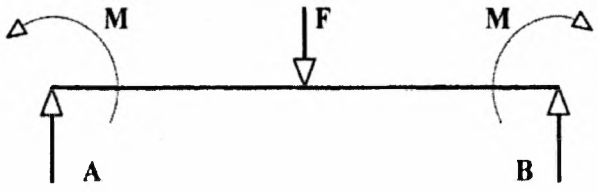
Vizsgáljuk meg a tetőlemez középső, az *f*-bevágások közötti szakaszát, amely csupán az alsó és a felső tetőívekkel képez folyamatos egységet, de nem támaszkodik fel a kávákra. Ebből következően közvetlenül viseli a reá nehezedő húrnyomást. Ez a lemezszakasz hosszirányban alig érzékelhető, keresztirányban pedig kisméretű, mintegy 1-2 mm-es ívelésű boltozottsággal rendelkezik. Ha nagyon pontosak akarunk lenni, akkor tekintetbe kell venni, hogy a kiválasztott modell két irányban hajlított lemez. Viszont ez esetben a létrejövő belső erők számítása komplikált matematikai műveleteket igényel. Mivel azonban a vizsgált lemezszakasz boltozottsága igen kicsi, nagyobb pontatlanság nélkül megközelítően valós eredményekre jutunk akkor is, ha teljesen sík lemezként kezeljük.

Ha ezen a lemezszakaszon felveszünk egy kisebb metszetet, ez a szerkezeti rész – analóg módon – hasonlítható egy koncentrált erővel terhelt, két végén befogott sík lemeztartóhoz (77. ábra).



77. ábra: Az *f*-nyílások között felvett hosszmetszet analóg tartó modellje

Ez a lemeztartónak tekintett modell az *f*-bevágások felső és alsó íveit összekötő érintővonal mentén a lemez folytonosságát megtartva feltámaszkodik a tetőlemez felső és az alsó szakaszára. Ezen a vonalon a terheléssel ellentétes irányú támaszerők, nyíróerők és a lehajlás következtében nyomatéki erők lépnek fel (78. ábra).



78. ábra: Az analóg tartón fellépő erők

A támaszerők nagysága (*A*) (*B*): $A = B = \frac{F}{2} = 6{,}00$ kp (60,0 N).

Az *A* és a *C* lemezkeresztmetszetekben a terhelőerő és a támaszerők hatására létrejövő nyíróerők *(τ)* külön figyelmet érdemelnek, mivel itt a lemez vastagsága csak 2,7 mm, a lemezre ható erők pedig jelentős nagyságúak (12,00 kp terhelőerő, 6,00 kp támaszerők).

A számításba jöhető nyíróerők közül a legkritikusabb az *f*-nyílások felső szemei közötti 42 mm széles lemezszakaszon, illetve a láb vonalában léphet fel.

$\tau = \frac{F}{q}$, ahol F a felületre ható erő, q a tartó keresztmetszete:

$$\tau_A = \frac{60{,}0}{113{,}4} = 0{,}53 \text{ N/mm}^2,\ \tau_B = \frac{120{,}0}{210{,}6} = 0{,}57 \text{ N/mm}^2,\ \tau_c = \frac{60{,}0}{310{,}5} = 0{,}19 \text{ N/mm}^2.$$

A nyírószilárdság határértéke lucfenyőben 0,70 N/cm^2, tehát jóval nagyobb, ami a húrnyomásból a tetőlemez vizsgált pontjain keletkezik. Ebből következően a tetőlemez a benne ébredő nyíróerőkkel szemben biztonságosan megfelel.

A lemezre merőleges erőkből adódó nyírófeszültségen kívül a terhelő és a támaszerőkből fellépő forgatónyomatékok okoznak még gondokat, főként az alacsony, illetve vékony tartószerkezetben.

A lemezszakaszok érintkezési vonalában, a támaszerők és a terhelő támadáspontjában a keletkező nyomatéki erők:

$$M_{max} = \frac{F \cdot \lambda}{8},\quad M_{max} = \frac{120{,}0}{8} \cdot 6{,}8 = 102{,}00 \text{ Nmm}.$$

Ebből a felvett, különböző vizsgált keresztmetszetekben *(A, B, C)* adódó nyomatéki feszültségek a tartólemez alsó és felső szálaiban: $\sigma = \frac{M}{I} \cdot e$, ahol M a vizsgált pontban jelentkező nyomaték, I a keresztmetszet inercianyomatéka, e a szélső szál semleges tengelytől mért távolsága.

$$\sigma_A = \frac{102{,}00}{68{,}89} \cdot 1{,}35 = 2{,}00 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_B = \frac{102{,}00}{127{,}93} \cdot 1{,}35 = 1{,}76 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_c = \frac{102{,}00}{188{,}62} \cdot 1{,}35 = 0{,}73 \text{ N/mm}^2$$

Lucfenyőben a megengedhető hajlítószilárdság 66 N/mm^2. A számított – tényleges – hajlítószilárdság a vizsgált keresztmetszetekben a semleges tengelytől legtávolabb lévő szálaiban is sokszorosan a határérték alatt marad.[67]

Vizsgáljuk meg a húrnyomás hatására kialakuló lehajlás mértékét a láb alatti lemezszakaszban *(f)*: $f = \frac{F \cdot \lambda^3}{192 \cdot I \cdot E}$, ahol F a terhelő erő, λ a tartólemez fesztávja, I a keresztmetszet inercianyomatéka, E rugalmassági modulus (lucfenyőnél 110 000):

$$f = \frac{120{,}00 \cdot (6{,}8)^3}{192 \cdot 127{,}94 \cdot 110000} = 0{,}014 \text{ mm.}$$

Számításainkat gerenda nélküli lemezszakaszra végeztük el. Eddig csak gyanítottuk, hogy a húrnyomás növekedése és a gerenda statikai célú erősítése között nincs közvetlen összefüggés. Most már ki is mondhatjuk, hogy a gerendának nincsen szükségszerű statikai szerepe. Az íves tetőlemez önmaga – gerenda nélkül – biztonsággal képes elviselni a reá ható húrnyomást.[68]

Így annak állítása, hogy a gerendát statikai okból építették be a hangszerbe, kétségbe vonható. A szakirodalomban mégis igen sokan kardoskodnak a mellett, hogy a gerenda a hosszabb zengő húrok, a magasabb láb és a magasabb hangolás következtében megnövekedett húrnyomás miatt kiemelkedően fontos feladatot lát el a hegedűtetőre jutó teher viselésében. Karl Fuhr azt írja, hogy „egy erősre kidolgozott tető sem lenne elég tartós a gerenda nélkül."[69] Vadon Géza pedig a *d*- és a *g*-húr nyomásával szemben" látja szükségesnek a gerenda szerepét.[70] Pap János még karakterisztikusabban fogalmaz: „Mind a gerenda, mind a lélek statikai okból került a hangszerbe beépítésre."[71]

A tanulmányban végzett számítások ellenőrzésére építettem egy 4/4-es, szabványos méretű – egyenletesen 2,7 mm tetőlemezvastagságú – gerenda nélküli hegedűt. Két éven keresztül, rendszeresen felhangoltan (Eudoxa húrokkal 8,19 kp húrnyomás alatt) a számításoknak megfelelően, vizuálisan érzékelhető változás nélkül igazolta a húrnyomással szembeni állóképességet. (A felhangolt hegedű tetőlemeze a felhangolás előtti helyzetéhez viszonyítva – közvetlen a húrláb síkja előtt mérve – *gerenda és lélek nélkül* 0,2 mm-nyit hajlott le, míg a lélek behelyezése után – továbbra is *gerenda nélkül* – ez az érték 0,08 mm-re csökkent.)

Összegezhetjük, hogy a gerendának tulajdonított szerepe a tetőlemez megerősítésében a hegedűnek a 17-18. század fordulóján lezajlott átépítését követően nem igazolható. A számítás eredménye és a gyakorlatban ellenőrzött modellkísérlet után nem maradhat kétely, hogy a gerenda nem tölt be nélkülözhetetlen statikai funkciót.

A teljesség érdekében azonban szólni kell arról, hogy a tetőlemez és a gerenda viszonya mégsem egyszerűsíthető le ilyen sommásan. Mivel a gerenda végeredményben merev, összetett szerkezeti kapcsolatba kerül a tető-

lemezzel, nem szabadulhat, nem mentes a lemezben fellépő belső erők hatása alól. A teherviselésben a tetőlemezzel együtt kényszerül részt venni. Olyan kapcsolat ez, mint amikor egy záró lemezfödém alá a teret kettéosztó, térelhatároló fal épül. A megterhelt födémlemez lehajlása következtében „felfekszik" a térelhatároló falra, s így az alátámasztó elemként is működik, bár eredeti rendeltetése a tér kettéosztása. Ilyen összefüggés alapján a hegedűgerenda is kényszerül részt venni a tetőlemezben fellépő erők megosztott viselésében: így benne létrejönnek mindazok a húzó-, nyomó-, nyíró-, hajlítóerők, amelyek a húrnyomásból a tetőlemezre jutnak. Ezzel együtt azok is, amelyek a húr rezgéséből adódnak (a mechanikai rezgést keltő ΔF erők). Ami a húrnyomásból fellépő erők megosztott viseléséből adódik, a mechanikai rezgések szempontjából nem okoz kedvezőtlen hatást, azonban a hangkeltő ΔF erők hatásfokát már igen érzékenyen csökkentheti.

Ebből következően a gerenda anakronisztikus módon vesz részt a hegedű működésében, mert a belső erők megosztott viselkedésében (amire nincs szükség) részt vesz, viszont a mechanikai rezgés erősítésében (amiben döntő szerep hárul rá) bizonyos esetekben éppen negatív hatást gyakorol.

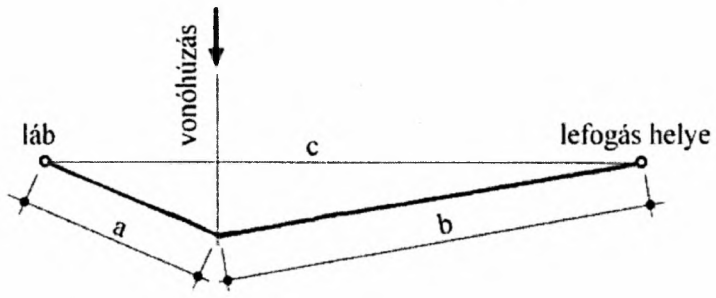
1.2. A gerenda és a mechanikai rezgés

Mivel a gerendának nincs indokolt statikai szerepe, még inkább megerősödött a tetőlemez különböző szakaszain áthaladó mechanikai rezgést transzportáló funkciója. Erről nagyon sok szó esik az irodalomban. „A gerenda egyesíti az *f*-nyílások által teremtett két rezgésterületet..., ismét akusztikai egységgé egyesíti."[72] Még pontosabban, ahogy Pap János akusztikus fogalmazza meg: „a gerenda tulajdonképpen arra szolgál, hogy a teljes tető C_4 modulusnál egy felületként rezegjen, hogy ne alakulhasson ki akusztikai rövidzár."[73]

Ezek az állítások kétségkívül evidensek, mivel a rezgő húrból kiinduló rezgésimpulzusok a korpuszon előbb a tetőlemez középső szakaszát érik, ami önálló mozgásra (rezgésre) képes. A rezgés továbbjutását a teljes tetőfelületre, megosztottsága (nagy ívvel határolt rész, az *f*-hangrések körüli lemezszakasz és a kis ívek közötti lemezmező) miatt külön erre a célra alkalmas szerkezeti elemmel elő kell segíteni.

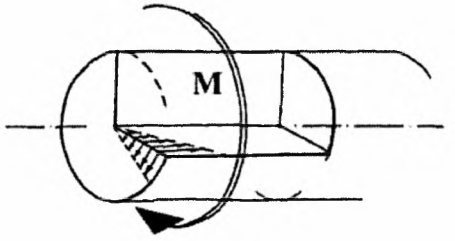
Vizsgáljuk meg, hogyan működik a gerenda az anyagon belüli mechanikai rezgés továbbításában, a különböző paraméterekkel rendelkező tetőfelületek akusztikai kapcsolatának erősítésében.

A hegedű megszólaltatásakor a húr részecskéi kitérnek nyugalmi helyzetükből, ebből következően megnő a húr hossza és benne a feszítőerő (79. ábra).



79. ábra: A kilendülő húr hosszának megnövekedése: $(a + b) > c$

A húr hosszának növekedése vele arányos nagyságú ΔF feszítőerőt hoz létre (Hooke-törvény). Vonóval rezgésbe hozott húrban a hossznövekedésből képződő erőn kívül még további feszítőerő is fellép. Ha egy rudat – húrt – érintőleges erővel megcsavarunk, akkor abban körös-körül nyíróerő keletkezik. A nyírás egyenértékű a tengellyel 45°-os szöget bezáró húzás és nyomás kombinációjával. A hossziránvra merőleges síkban működő csavaró-nyomaték hatására keletkező (τ) nyírófeszültségek a keresztmetszet síkjában és a hossz-, illetve tengelyirányban képződnek (80. ábra).

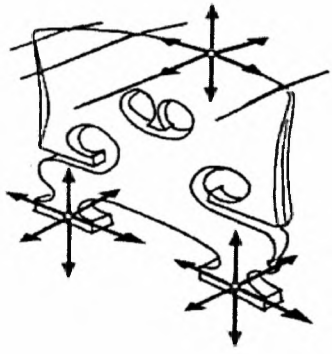


80. ábra: A húrban csavarónyomaték hatására létrejövő nyíróerők

Ezek a tengelyirányú erők egyben növelik a húr kilendítésével együtt járó megnyúlásból adódó erőt. A nyíróerőből adódó tengelyirányú erő (feszítőerő) nagyságrendben jóval kisebb a húr megnyúlásából létrejövő feszítőerőnél.

A mechanikus hatásra kilendülő húr anyagi részecskéinek pulzáló mozgása következtében kialakuló ΔF erő mindannyiszor ismétlődik, ahányszor a húr átlendül a rezgés legszélső helyzetébe. Vagyis a húr anyagi részecskéi két szélső helyzet között kialakuló pályán periodikusan mozognak, mechanikai rezgést végeznek.

A húr mechanikai rezgésétől a lábgerincre háromirányú, illetve a pulzáló mozgásból következően ezekkel ellentétes irányú erőket is figyelembe véve hatirányú erőcsoport képződik. Ezek az erők jutnak a lábtalpakon keresztül a tetőlemezre (81. ábra).



81. ábra: A húr rezgőmozgásából a lábra ható erő

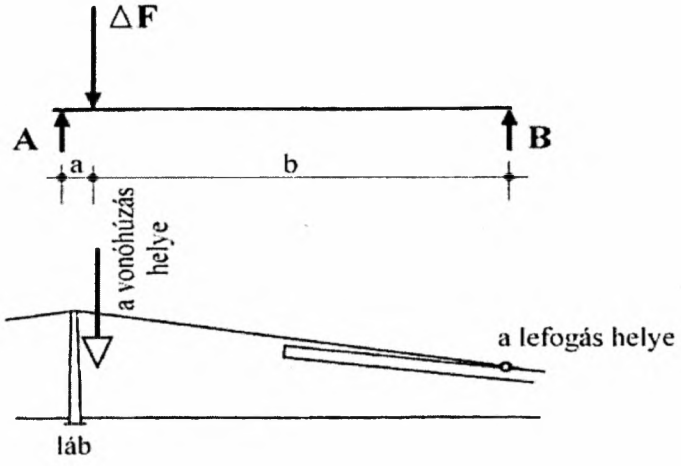
Ezek az egymásra közel 90°-os szöget bezáró erők a húrláb talpfelülete és a tetőlemez között mozgást gerjesztenek, csúszósúrlódást hoznak létre. A súrlódás nagysága arányos az érintkező felületeket egymáshoz nyomó erővel, ez pedig azonos a húrnyomással és a ΔF erővel. A tetőlemez felülete a talpak alatt a súrlódó erő hatására az idő függvényében benyomódik, s mivel a súrlódás két egymáson mozgó felület között lép fel, a benyomódás hossz- és szélességi mérete nagyobb a láb talpfelületénél.

A láb síkjában a tetőlemezre jutó merőleges erők a tetőlemezben transzverzális rezgést, a lemez síkjával megegyező másik két erő longitudinális rezgést indítanak el.

Tudvalévő, hogy az egyszerűen kifeszített húr rezgései közül a transzverzális rezgések képesek legintenzívebben a hang gerjesztésére, a longitudinális elmozdulások alig. Ezt az összehasonlítást Apian-Bennewitz úgy fogalmazta meg: „a transzverzális rezgések a zenei világban viszonylag nagyobb érdeklődésre számíthatnak. ... A hosszirányú rezgéseket a zenében nem, vagy csak kis mértékben lehet kihasználni."[74] Ennek az oka igen egyszerű. A transzverzálisan rezgő tetőlemez kilendülő anyagi részecskéi a velük nagy felületen érintkező levegőrészecskékkel történő frontális ütközéssel adják át a rezgő mozgást. A longitudinális irányú mozgó részecskék csupán súrlódás útján – lényegesen kisebb hatásfokkal – továbbítják a rezgő mozgást. Itt azonban mellőzzük annak részletezését, hogy ez a mechanizmus az anyagi részecskék világában miként történik, annál is inkább, mivel szilárd test és gáznemű anyag részecskéinek egymásra ható mozgá-

sáról van szó. Egyszerűbb, bár csak következtetésekre nyújt lehetőséget, ha két szilárd testnek a mechanikában ismert találkozását vesszük alapul. Ütközés esetében – mondja a mechanika – a rövid ütközési időnek következményeként nagy erőhatások lépnek fel az ütközésben résztvevő testek között. Súrlódás esetében az egymással érintkező testeknek csupán az érintkező felülete mentén történő viszonylagos elmozdulásról beszélünk.

A húrban keletkező mechanikai rezgés útját végigkísértük a tetőlemezig, illetve megismertük a tetőlemez anyagi részecskéinek mozgásirányait. Hogy a húrban létrehozott ΔF pulzáló erő nem más, mint mechanikai rezgés, annak bizonyítására egyszerű folyamat ad magyarázatot. Minden hegedűjátékos tudja, hogy ha közvetlenül a húrláb előtt húzza meg a húrt a vonóval, hangosabban szól a hegedű, mintha a fogólaphoz közelebb hozza mozgásba, pedig a felfekvés szomszédságában kisebb kitérésre lehet kényszeríteni, mint a zengő húrhossz középe táján. A kisebb húrmegnyúlásból következő kisebb ΔF erő ellenére mégis hangosabban szól a hangszer. Ennek oka, hogy a húrlábhoz közeli vonóhúzás a húr megnyúlásából adódó Δ feszítőerő helyett a vonóhúzással terhelt húrszakasz a lábnyergen képződő támaszerőt továbbítja a tetőlemezre. Ez pedig nagyobb – a húr rugalmasságából adódó veszteség miatt – a húrlábra jutó hossznövekedésből fellépő erőnél. Gondoljunk csak a gyakran alkalmazott analógtartó példánkra. Ha egy kéttámaszú tartón a terhelőerő az egyik támaszerő közvetlen közelében hat, akkor a támaszerő csaknem azonos nagyságú a terhelőerővel (82. ábra).



82. ábra: A vonóhúzás helyének és a támaszerők nagyságának összefüggése

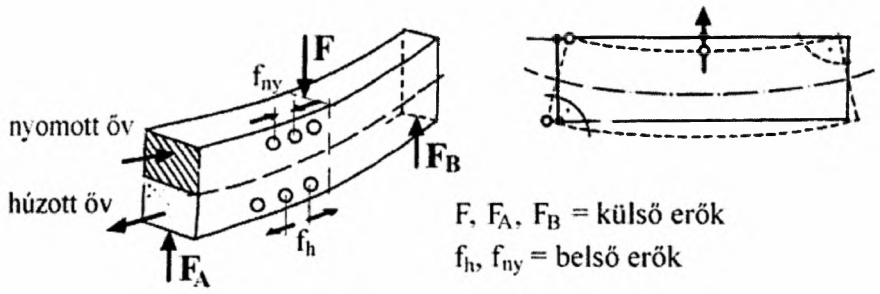
$$A = \frac{\Delta F \cdot b}{\lambda},$$

$$B = \frac{\Delta F \cdot a}{\lambda}$$

Mivel az *a* távolság tört része a *b*-nek, az *A* erő nagysága alig kisebb a terhelőerőnél *(ΔF)*, vagyis a vonóhúzásból (vonónyomásból) adódó pulzáló *ΔF* erő azonos a mechanikai rezgésből fellépő erővel.

A következőkben tekintsük át a mechanikai rezgés kialakulását és terjedését a tetőlemezben és a gerendának e folyamatban betöltött szerepét.

Induljunk ki abból, hogy ha egy gerendát meghajlítunk, a gerendának a hajlítás irányába eső oldalán a szélső szálakban nyomóerők, az ellentétes oldalon húzóerők lépnek fel. Ez egyben azt is jelenti, hogy a nyomott oldalon az anyag részecskéi összenyomódnak, a húzott oldalon pedig egymástól távolabbra kerülnek (83. ábra).

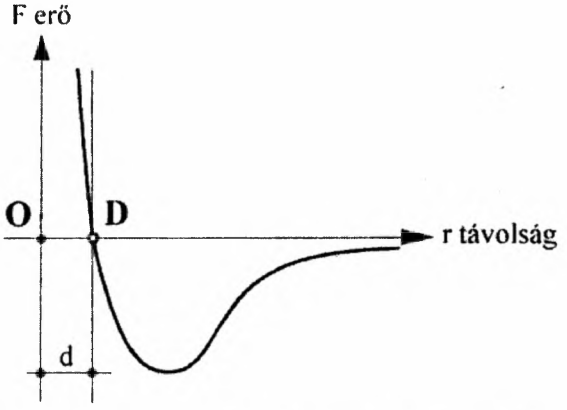


83. ábra: Hajlított gerendában fellépő belső erők

Az elemi részecskéknek az elmozdulását okozó külső erőkkel szemben az anyag molekulái között lévő „molekuláris erők" lépnek működésbe[75]. Ha a külső erőhatás nagy, a molekulák elmozdulása is nagy, illetve a külső erők csökkenésével a molekulák közötti elmozdulás is mérséklődik.

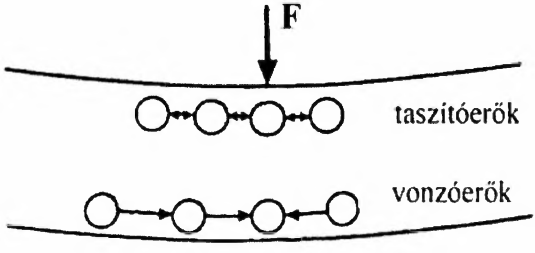
A molekuláris erőket nem lehet a klasszikus fizika elméletével megmagyarázni. Ehhez a kvantummechanikára van szükség. A szilárd anyagok atomjait a köztük lévő vonzerő tartja össze. Ha az atomok valamilyen kényszer hatására túl közel kerülnek egymáshoz, közöttük taszítóerő lép fel, ha pedig távolodnak egymástól a közöttük ható vonzerő megnövekszik.

Az atomok között ható erőt a 84. ábrán lehet megközelítően érzékelni. Az ábra két atom között ható *F* erőt mutat be *r* távolság függvényében.



84. ábra: A külső erőhatás és a molekulák mozgása

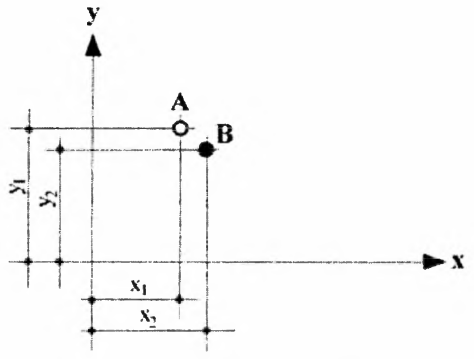
Az *r* tengelyen a *D* pontban, ahol a görbe a tengely metszi az erő *(F)* zérus, vagyis ebben a pontban az erők (külső-belső) egyensúlyban vannak, és a molekulák egymástól *d* távolságra helyezkednek el. Ha a molekulákat a *d* távolságnál közelebb kényszerítjük egymáshoz – pl. a gerenda hajlításakor a hajlítás irányába eső szélső szálakban, – taszítják egymást. Ez követhető a 84. ábra *r* tengely feletti szakaszán, ahol a molekulák *d* távolságnál közelebb kerülnek egymáshoz. Ha a molekulák távolodnak egymástól, köztük nő a vonzás, mint a hajlított gerenda alsó szálaiban. A grafikonról is leolvasható: amennyiben a molekulák egymástól való távolsága nagyobb a *d* távolságnál, vonzerő-növekedés következik be.[76]



85. ábra: Molekuláris erők a hajlított szerkezetben

Ez a folyamat játszódik le a hegedűgerendában hajlításkor. Az elemi részecskék a nyomott övben – az anyag nyugalmi helyzetében jellemző állapothoz képest – közelebb kerülnek egymáshoz, közöttük taszítóerő, míg a húzott övben távolodva egymástól vonzás, húzóerő lép fel (85. ábra)

A hajlító erő hatására a molekulák a gerendában kétirányú helyváltoztatásra kényszerülnek. Egyszer, mozgást végeznek a hajlítás síkjában, ugyanakkor oldalirányban is elmozdulnak (86. ábra)



86. ábra: A molekulák mozgásirányai hajlított szerkezetben

A koordinátarendszerben ábrázolt molekula nyugalmi helyzetét *(A)* y_1, x_1 értékek jellemzik. A lehajlás következtében a *B* pontban megváltoznak a helyzetparaméterek (y_2, x_2). Ezek az elmozdulások egybevethetők a mechanikai rezgésirányokkal: az *y* tengellyel közel párhuzamos elmozdulás a transzverzális rezgéssel, az *x* tengellyel egyirányú mozgás a longitudinális rezgésiránnyal azonosítható.

A tetőlemezre jutó merőleges irányú pulzáló erők egymás után ismétlődő lehajlásokat idéznek elő a tetőlemezben és a gerendában. A lehajlás zavarokat kelt a nyugalmi állapotban lévő anyagrészecskék között, és kilendíti őket egyensúlyi állapotukból. A mozgást elindító ΔF erő támadáspontjától, ahol a lehajlás, illetve a transzverzális irányú rezgés a legintenzívebb a távolabb lévő közegrészecskék is kimozdulnak eredeti helyzetükből. Ez a deformáció végigfut a gerenda teljes hosszán, érintve az egyes tetőszakaszokat. A lehajlás során a gerenda alsó és felső szálaiban hosszváltozás történik, aminek következtében az anyagrészecskék a gerenda tenge-

lyének irányában is elmozdulnak. A rezgés előrehaladásával mindig újabb és újabb közegrészecskék jönnek mozgásba, ami egyben azt is jelenti, hogy a mozgás terjedésével együtt energia is terjed a közegben. Mivel a rezgés energiája *(E)* egyenesen arányos a test tömegével, az amplitúdó és a frekvencia négyzetével ($E = 2 \cdot \pi^2 \cdot m \cdot v^2 \cdot q^2$),[77] a rezgést továbbító szerkezeti elem tömegének *(m)* jelentős szerepe van. Ebből következtethető, hogy a barokk, illetve a régi kisebb tömegű gerendák eredendően gyengébb hatásfokkal továbbíthatták a rezgésenergiát, szemben a később csaknem megkétszerezett tömegű gerendákkal. Erre utal Karl Fuhr is: „Mivel a tapasztalat azt mutatja, hogy az új gerenda beillesztésével gyarapodott a régi hegedű hangja...".[78]

Végül is az elméleti elemzések és a gyakorlati tények is azt mutatják, hogy a gerendának a húrokból induló mechanikai rezgésének felerősítésében és továbbításában van döntő szerepe. Végletesen úgy is fogalmazhatjuk, hogy a hegedű gerenda nélkül erőtanilag tartósan egyensúlyban lévő szerkezet, de gerenda nélkül elveszti hangjának zenei értékét. Tehát nem állunk messze az igazságtól, ha azt mondjuk, hogy a gerendának egyértelműen akusztikai szerepe van. Nélküle a hegedű nem nyújtja azt a zenei hatást, amire ebben a szerkezeti szimbiózisban képes.

2. A gerenda beillesztésének a módjai

Abból a tévhitből kiindulva, hogy a gerenda elsődleges szerepet tölt be a tetőre jutó húrnyomás viselésében, szükségesnek vélték erősítését, méretének, tömegének megnövelését. Sőt ennek a vélekedésnek kiszélesedésével nemcsak erősebb (nagyobb) gerenda behelyezésének szándéka merült fel, hanem a gerendában már a rögzítés előtt külön, külső feszítőerő alkalmazásával fokozni kívánták a tetőlemez megerősítését. A 19. század szakirodalmában pontos leírás utal rá: „A gerenda mindkét végét jobban kell hajlítani, vagyis *kiicelni*, mint a tetőt. A gerendának felenyvezésekor a tető boltozatához kell illeni. Ezzel a tető bal oldalát fölfelé tereli, a húrnyomásnak nagyobb ellenállást adva a jobboldallal szemben, amelynek a lélek adja a támasztékot".[79] Mint egy száz évvel később írja Vadon Géza, „hogy a húrok nyomásának kellőképpen ellenállhasson, kis feszültséget adnak a gerendának. Erre a célra a gerenda végeinél 1-2 mm billenés elégséges. ...

Ha a tetőt és egy ilyen fajta gerendát felenyveztünk, akkor az utóbbi a fent említett módon hat és a tetőnek egy a húrokkal és a húrláb hatásától független saját feszítést ad".[80]

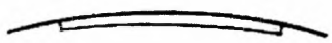
Külön téma lenne annak vizsgálata, hogy a befeszítést mióta alkalmazza a hegedűépítés, mikor kezdtek a gerendának „saját" feszítést adni. Alkalmazták-e már a 17-18. század fordulója tájékán, az ismert átépítés időszakában vagy csak később terelődött rá a figyelem. Elgondolkodtató Karl Fuhr közlése, amikor arról ír, hogy „a feszítés a klasszikus periódus hegedűinél sokkal kisebb volt, csekélyebb volt, mint manapság."[81] Nem tesz említést azonban arról, hogy milyen forrás alapján utal a klasszikus hegedűépítés korabeli gerendafeszítésre. Mivel azonban nem célunk a technológiai történelmi folyamat vizsgálata, maradjunk a gerenda tényleges – a mechanikai rezgést elősegítő – szerepének elemzésénél.

Zavaró és a szakmai egzaktság hitelét rontja, hogy a befeszítésről vallott nézetek és a gyakorlat évszázadokon át megoszlott. Voltak és vannak, akik szükségesnek tartják, s vannak, akik nem. „Ha ez nem történik így – írja Niederheitmann –, akkor a gyenge hegedűknél könnyen található egy torzió, egy ficamodás és az eredeti boltozati arányokban, amely a tető szabad rezgését megrövidíti."[82] Max Möckel ellenkező íveléssel tartja helyesnek a gerenda befeszítését. Úgy véli, hogy a régi itáliaiak a gerendavégeket a tetőlemezhez illesztve alakították ki, és középen a gerenda és a lemez között maradt rést a beenyvezéskor befeszítéssel megszüntették.[83] Tóth János egyik tanulmányában határozottan ellenzi, „sokan a hangszergerendát befeszítik, azt gondolván, hogy a hegedű hangját megjavítja vagy legalább is erősíti... Ez a befeszítés helytelen, mert a szabad rezgésben gátolja a fedelet".[84]

A mai hegedűépítés gyakorlatában is megtalálható mindhárom beillesztési mód alkalmazása: *a)* a tetőlemez ívéhez teljes hosszában pontosan illeszkedő, *b)* a gerenda középső szakaszán a lemez ívét követő, végeinél attól egy-két mm-re elmaradó, *c)* a gerendavégeken a tetőlemezt érintő, középső részén néhány mm rést képező ívvel kialakított, gerenda alkalmazása. Bármennyire is meglepő, de több évszázad alatt sem alakult ki osztatlanul, hogy valójában melyik beillesztés felel meg legjobban a gerenda akusztikai rendeltetésének. Pedig a hegedű szinte minden más szerkezeti elemét tökéletes pontossággal határozta meg az empirikus gyakorlat. Tudományos, elméleti megközelítés ez ideig nem ismert.

Tapasztalati úton, elméleti fejtegetés nélkül is szembetűnő a különböző gerendabeillesztés következménye (87. ábra).

1



a teljes szakaszán hézagmentesen illeszkedő gerenda

2

két végén befeszített gerenda a tetőlemezre alulról felfelé irányuló nyomóerőt hoz létre

3

középen befeszített gerenda a rögzítés után lefelé ható húzóerőt gyakorol a tetőlemezre

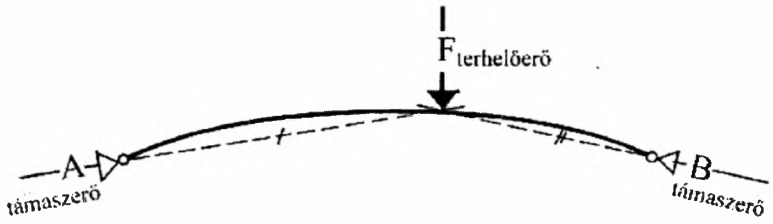
87. ábra

Valószínű ennek felismerése vezetett az egyik, vagy másik beillesztési mód előnyösebbnek vélt szubjektív megítéléséhez. De valójában mi van e mögött, hogyan és miként befolyásolja a tetőlemez mechanikai rezgését a különböző módon befeszített gerenda?

Nézzük meg, hogy a tudományos ismeretek – szűkebben az erőtani összefüggések – segítségével közelebb juthatunk-e a gerenda működésének megismeréséhez.

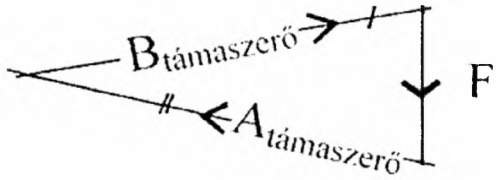
Arról már szó volt, hogy a húrok felhangolása előtt nincs a hegedű szerkezetben kimutatható belső erő.[85] A húrok felhangolását követően a húrnyomás a lábtalpakon keresztül két eltérő nagyságú koncentrált nyomóerőt képez a tetőlemezre. Mindkét erő, egymástól eltérő mértékben deformációt okoz a tetőlemezben és a gerendában. Ezeknek az erőknek a megoszlása a boltozott tetőlemez és a gerenda között igen bonyolult, összetett matematikai és statikai számítással mutatható ki. Esetünkben tekintsünk el a konkrét számítás igényétől, mivel elemzésünk során csupán elvi megközelítésre törekszünk. Az érzékelhetőséghez elégnek tűnik, ha a tetőlemezben és a gerendában fellépő belső erőket és azok hatását áttekintjük. Célszerű azonban előbb a térben hajlított tetőlemezben ébredő erőket megvizsgálnunk.

Erre a célra alakítsunk ki a tetőlemez teljes hosszában a gerendával azonos (5 mm) szélességű, virtuális metszetet. Tekintsük az így kapott modellt egy központi erővel aszimmetrikusan terhelt íves tengelyű kéttámaszú analóg tartónak (88. ábra).



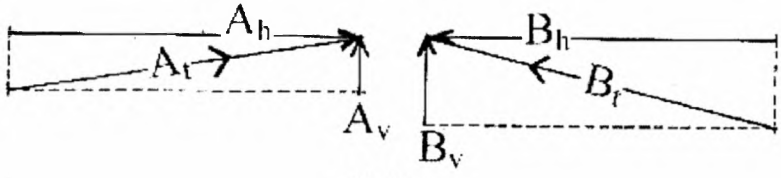
88. ábra

A képzeletbeli tartóra a terhelő erő – a húr feszítéséből adódó nyomóerő (F) és a húr rezgéséből képződő (Δ F) pulzáló erő – a húrláb síkjában hat. A terhelő erő a tetőlemezmetszet két végpontján, a felső és az alsó tőkénél a tartóív tengelyével közel megegyező irányú támaszerőket (A,B) hoz létre. A ferde támaszerők (A_t és B_t) felbonthatók: vízszintes, a tetőlemez vezérsíkjával párhuzamos, horizontális (A_h, B_h) és arra merőleges, vertikális (A_v, B_v) irányú erőkre. A terhelőerő (F) nagyságával léptékhelyesen (méretarányosan) felrajzolt erővonal két végpontjából az erők támadáspontját összekötő egyenesekkel húzott párhuzamos vonalak egyben a keresett támaszerők irányát és méretarányos nagyságát is meghatározzák – A,B támaszerők – (89. ábra).



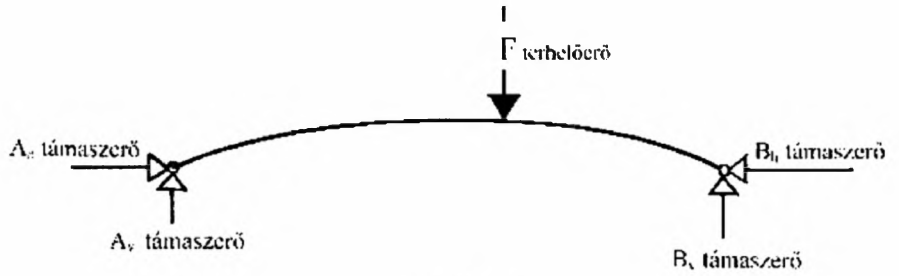
89. ábra: Az analóg tartóra ható terhelőerővel szemben képződő (A, B) támaszerők

A méretarányosan szerkesztett erőábrából az is kiderül, hogy az oldalirányú támaszerők (A_h, B_h) lényegesen nagyobbak a terhelőerővel szemben fellépő támaszerőknél (A_v, B_v) (90. ábra).



90. ábra

A keresett erő konstellációt a 91. ábra szemlélteti:



91. ábra

Ezek a nyomóerők a felhangolt hegedűben állandóan jelen vannak, s mindaddig léteznek, amíg a húrnyomás meg nem szűnik. Így ezekkel a belső erőkkel a gerenda működésének vizsgálatakor számolni kell.

A húrnyomásból fellépő erő (F) nagysága a felhangolás függvénye, hatásiránya állandó. A húrok rezgéséből képződő (ΔF) erők az előzőhöz viszonyítva kicsiny, változó irányú, pulzáló erőhatások. Ezek az igen kicsiny (ΔF) erők azonban éppúgy nyomóerőket idéznek elő a tetőlemezben és a gerendában, mint a tartós terhelés. Csakhogy a pillanat egyik töredékében növelik, a másikban csökkentik a lemezben meglévő nyomóerőket ahogyan az erők iránya változik. Amikor a ΔF erő a tetőre merőleges irányú, a lemezben lévő nyomóerő növekszik, hatásirányának megváltozásával pedig csökken. A húrnyomásból keletkező belső erők számszerűen meghatározhatók. A ΔF erő azonban számos tényező függvénye (vonónyomás, vonósebesség, a vonószőr állapota, a vonóhúzás helye, játék dinamikája stb.), nagysága csak kísérleti úton, gyakori értékek átlagolásával közelíthető meg.

Eddig két jellegzetesen különböző erőről beszéltünk, amelyek megjelennek a tetőlemezben és a gerendában. A két erő nagysága markánsan eltér egymástól és a mechanikai jellemzőik is különböznek. A húrnyomásból keletkező erők nem bontják meg a terhelés után keletkezett erőrendszer egyensúlyát, a hegedűtest fellépésük után nyugalmi helyzetben marad. A húr rezgéséből adódó belső erők a ΔF nyomóerő ritmikus változása következtében az anyagban – az anyagi részecskék között – mozgást idéznek elő.

Az előző fejtegetésünk során megismertük a tetőlemezben húrnyomásból és a húr rezgéséből kialakuló terhelő, és ezekkel szemben képződő támaszerőket. Nem foglalkoztunk azonban külön a gerendában fellépő erők-

kel. A további elemzésünkben tekintsük át, hogy miként és milyen erők alakulnak ki a különböző módon beillesztett gerendában. Kezdjük a befeszítés nélkül behelyezésre kerülő gerenda vizsgálatával.

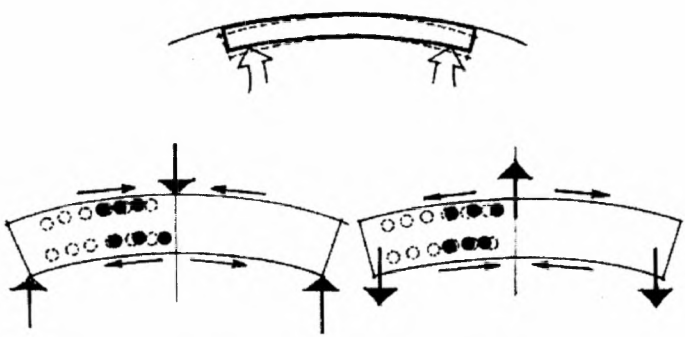
2.1. Befeszítés nélküli gerenda

A tetőlemez íves felületével megegyező, azonos ívvel kialakított és hézagmentesen beillesztett gerendában, mivel rögzítéskor alakváltozásra nem kényszerül – az anyagára jellemző molekuláris erőkön kívül – semmiféle erő nem lép fel mindaddig, amíg a tetőlemezt külső erőhatás (húrnyomás) nem éri. A terhelőerő fellépésekor a beenyvezéssel létrejött merev kapcsolat következtében osztozik a támaszerők viselésében. (A tanulmány 1.1. fejezetében már részleteztük, hogy ez a kényszerszerepe nem szükségszerű, a tetőboltozat kiegészítő elem nélkül is képes viselni a húrnyomásból képződő terheket). A terhelőerők megszűnésével a befeszítés nélküli gerendában, mint a tetőlemezben is feszültségmentes állapot alakul ki, illetve áll helyre.

Ettől sajátosan eltérnek a befeszítéssel behelyezett gerendák, mivel ezek maradandó feszültséget hoznak létre a hangszerszerkezetben, ami a terhelőerők *(F, ΔF)* megszűnése után is megmarad.

2.2. Két végén befeszített gerenda

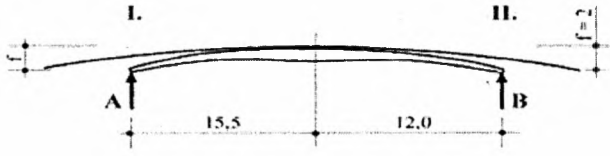
Nézzük meg, ha a gerendát rögzítése előtt, külső erő alkalmazásával a tetőlemezhez feszítik, a kényszerhatás következtében milyen belső erők lépnek fel benne. Elsőként a két végén befeszített gerendában képződő erők hatását tekintsük át.



92/a ábra 92/b ábra

Ha a gerenda középen fekszik fel a tetőlemez belső felületére, és a két végét hozzáhajlítják, benne a hajlításra igénybe vett anyagra jellemző molekuláris átrendeződés következik be. A hajlítás irányába eső szélső szálakban a molekulák összenyomódnak, az ellentétes oldalon távolodnak egymástól (92/a ábra). A befeszítő erő megszűnése, pontosabban: a két szerkezeti elem rögzítése után ez a státusz megváltozik. A gerenda alsó részében a kényszer hatására egymástól távolabb kerülő molekulák előbbi helyzetükbe, eredeti helyük elfoglalására törekszenek. Tudott dolog, hogy az építészetben a födémgerenda lehajlásának csökkentése érdekében a vasbeton gerendák alsó zónájában előre-feszített acélhuzalokat helyeznek el. Ennek következtében a gerenda még beépítés előtt a később várható, terhelésből adódó lehajlással ellentétes irányban kis ívben meghajlik. Így beépítve a nagyobb teher alatt csekélyebb mértékű lehajlás következik be. A hegedű szerkezete ezzel ellentétben akkor működik kedvezően, ha a korlátozott nagyságú ΔF erő a mechanikai rezgés során minél nagyobb mértékű lehajlást idézhet elő a gerendában.

Nézzük meg, megközelítően milyen nagyságú nyomóerő képződik a gerenda befeszítésével. Hasonlítsuk a két végén befeszített gerendát egy két végén koncentrált erővel terhelt, konzolos iker tartóhoz (93. ábra).



93. ábra

A befeszítés nagysága 2 mm, ami a képzett analóg tartó esetében a lehajlással, az előidéző erő pedig a konzolra ható támaszerővel azonos.

A lehajlás: $f = \frac{F \cdot \lambda^3}{3 \cdot E \cdot I}$, ahol F a lehajlást előidéző erő (A, illetve B), λ a fesztáv, E a rugalmassági modulus és I a gerenda keresztmetszetének inercianyomatéka (mivel a hegedűgerenda változó keresztmetszetű, a magassági méret átlagát vesszük az inercianyomaték kiszámításához). A számítás eredménye: az I. konzol befeszítéséhez 0,28 kp, a rövidebb, II. konzol befeszítéséhez 0,61 kp erő szükséges. Ez a két befeszítéshez keltett erő együttesen képezi az ikerkonzolok támaszerőit: 0,89 kp, ami azonos a gerendában képződő, felfelé irányuló nyomóerővel. A középen befeszített gerenda esetében ugyanígy mutathatjuk ki a lefelé irányuló erőt abból kiindulva, hogy a konzolos tartóként vizsgált szerkezetben a lehajlások egy pontba esnek.

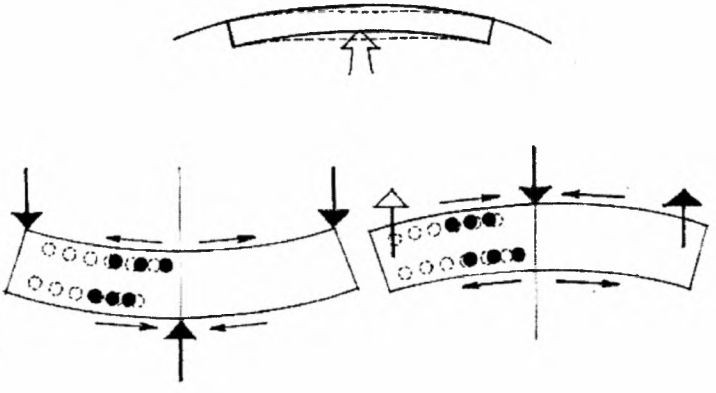
Ezek ismeretében összegezhető, hogy a befeszítéssel behelyezett gerenda módosítja a hangszerszerkezet erőviszonyát. A rögzítés előtt külső erővel alakváltozásra kényszerített szerkezeti elem, (miután a beragasztással merev kapcsolat alakul ki) a tetőlemezben maradandó belső feszültséget hoz létre.

Az előzőekben megismertük, hogy a húrok felhangolása előtt a teljes szerkezet és valamennyi eleme mentes a feszültségtől. A húrnyomás kialakulása után a tetőlemezben és a gerendában a lehajlás következtében belső erők lépnek fel. A húrnyomás megszűnésével ezek megszűnnek, és a szerkezetben ismét előáll a feszültségmentes állapot.

A két végén befeszített gerenda alkalmazása során, ha megszűnik a húrnyomás, a szerkezetben nem áll vissza feszültségmentes állapot, tovább is megmarad a gerendában a befeszítésből adódó hajlítófeszültség. Sőt a gerenda és a tetőlemez között kialakított merev kapcsolat következtében a tetőlemezben is állandó belső erők lépnek fel. Ezek a tetőlemezben, s ezzel együtt az egész hangszerszerkezetben kimutatható feszültséget hoznak létre.

2.3. Középen befeszített gerenda

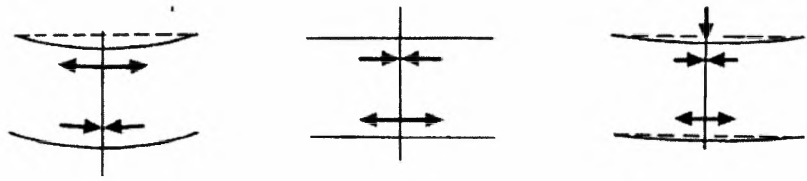
A szakirodalom több helyen említést tesz a középen befeszített gerendáról, a gyakorlatban azonban ritkábban fordul elő. Ez esetben a gerenda két vége illeszkedik a tetőlemez ívéhez, és a középső részénél marad 1-2 mm-nyi rés a gerenda és a tetőlemez között, amit a beenyvezés során befeszítenek. A befeszítéskor a gerendában a tetőlemez felőli – a hajlítás irányával megegyező – övében húzóerő, a vele átellenbeli övben nyomóerő keletkezik (94/a ábra). Rögzítés után az elmozdult anyagi részecskék a hajlítás (befeszítés) előtti, eredeti helyzetük elfoglalására törekednek visszatérni. Így a gerenda tetőlemezzel érintkező felső szálaiban nyomóerő, alsó részén húzóerők lépnek fel (94/b ábra).



94/a ábra

94/b ábra

A belső erőknek az így kialakuló elrendeződése megegyezik a ΔF erők által előidézett lehajlás során keletkező belső erőkkel (95. ábra).



A beillesztéskor kialakuló belső erők

A rögzítés után létrejövő belső erők

ΔF erő hatására kialakuló belső erők

95. ábra

Végül is a középen befeszített gerenda – mint a két végén kényszerhatással beillesztett gerenda – a tetőlemezben állandó feszültséget, a húrnyomástól és a ΔF erőlökésektől független belső erőket hoz létre.

Az eddigiek alapján megismertük a gerenda befeszítéséből keletkező belső erőket és a szerkezetre gyakorolt hatásukat. Válasz nélkül maradt azonban a vizsgált erőknek és a hangszer mechanikai rezgésének viszonyítása. Nem esett szó a gerenda hajlításából fellépő belső erők és a lemez mechanikai rezgése között létező egzakt összefüggésekről. Arról, hogy miként befolyásolja egyik vagy másik – ellentétes hatású belső erőket létrehozó – gerendabeillesztés a tetőlemezben létrejövő mechanikai rezgéseket, mechanikai hullámokat. Ennek magyarázata túlnyúlik az erőtan határain. Feltárásához elmélyült fizikai-akusztikai, kvantumfizikai ismeretek szükségesek. Az elemi részecskék és az erő viszonyáról van itt szó, arról, hogy az anyagra ható különböző erők miként hatnak a részecskék kényszermozgására. Mivel választott témánk ma megítélhetően nem tartozik az exponált fizikai érdeklődés körébe, így e kérdés megválaszolása még várat magára. Jelenleg be kell érnünk az erőtani összefüggések magyarázatával annak alapján, hogy az eltérő okokból kimutatható következmények az okozatokban is nyomon követhetők és feltárhatók.

Erőtani szemlélet alapján áttekintve a három beillesztési mód következményeit:

- A tetőlemezhez teljes hosszában illesztéssel behelyezett gerenda esetén a tetőlemezben, illetve a hegedű szerkezetében nem lép fel belső erőhatás. A merev szerkezeti kapcsolat következtében osztozik a tetőlemezzel a terhelőerőkből (a húrnyomásból, a ΔF erőkből) képződő feszültségek

megosztásában, de azok megszűnésével a hangszer szerkezete ismét feszültségmentes állapotba kerül.

- A két végén befeszített gerendában a hajlításból kialakuló belső erők módosítják a molekuláris erőviszonyokat, aminek hatására a tetőlemezre alulról felfelé, a terhelőerővel ellentétes irányú nyomóerő képződik. Következménye, hogy a ΔF erőhatásokat differenciálja: amíg a tetőlemezre irányuló erőlökéseket gyöngíti, az ellenkező irányú erőhatásokat erősíti. A gerenda befeszítésből kialakuló belső erők állandósulnak, és a húrnyomás megszűnése után továbbra is feszültséget tartanak fenn a szerkezetben.
- A középen befeszített gerenda a tetőboltozat–gerenda együttes teherviselő képességét intenzívebben igénybe veszi, mivel a befeszítéssel létrehozott tetőlemezre merőleges erő a húrnyomást növeli meg, és a húrnyomás megszüntetése után továbbra is feszültséget gerjeszt a hegedű szerkezetében. A ΔF erőhatások közül, a két végén befeszített gerendával ellentétben a tetőlemezre irányuló erőlökéseket erősíti, a felfelé irányulókat gyengíti.

2.4. A különböző beillesztési módok célszerű alkalmazásai

Az előző elemzések érzékeltetik, hogy a különböző gerenda-beillesztési módok egymástól nemcsak eltérő, hanem egymással ellentétes hatást gyakorolnak a tetőlemez mechanikai rezgésének kialakulására. Ezek ismeretében kíséreljük meg, választ adni arra a kérdésre, hogy melyik gerenda-beillesztési mód fogadható el hatékonyabbnak, melyik gerenda-beillesztési mód segíti elő a ΔF erő hatására létrejövő mechanikai rezgés amplitúdójának optimális kialakulását.

A tető belső boltozatához pontosan illeszkedő gerenda lehajlása egyenes arányban áll a húrnyomás és a ΔF erő nagyságával, valamint a tetőlemez és a gerendák anyagának mechanikai jellemzőivel. Erős, a korrózió hatásától még mentes anyagú közegben a ΔF erő szembe kerül az anyag egészséges rugalmasságával. A *befeszítés nélküli gerenda* alkalmazása előnyösebb a már kevésbé fiatal, de az eredendő szilárdsági jellemzőit még nagy részében őrző szerkezetbe. Új hegedűbe történő behelyezése esetén tudomásul kell venni, hogy a hangszer anyagának kezdeti merevsége egy ideig fékezi az erőlökések

hatására a gerendában kialakuló lehajlást, a mechanikai rezgés továbbításában szükséges intenzitásának kibontakozását.

Jogosan merülhet fel a kérdés: „mit jelent az, hogy már kevésbé fiatal", hány éves? Erre konkrét időt meghatározni nem lehet, mivel a fa anyagának szilárdsági és mechanikai jellemzőinek alakulását több tényező befolyásolja: az anyag sejtszerkezeti felépítése, a környezeti hatás stb. Ennek eldöntése a hegedű anyagának állapota alapján lehetséges. Egy bizonyos, hogy új hangszerbe történő alkalmazás során egy ideig számolni kell fékezettebb mechanikai rezgés kialakulásával.

A *két végén befeszített gerenda* – mivel a ΔF erővel ellentétes irányú erőt hoz létre –, az anyag eredendő mechanikai jellemzőivel még rendelkező hegedűszerkezetben mérsékli a lehajlás mértékét, rontja a mechanikai rezgés intenzitását, főként új hegedűkben. Öreg hegedűkben, ahol az anyag rugalmassága már jelentős mértékben lecsökkent, az évgyűrűk kései pásztáiban a parafásodás jelei mutatkoznak, és a tavaszi pászták cellulóztartalmuk megváltozása miatt rideggé, törékennyé válnak, hatékonyabb a tetőlemez rugalmasságát gyámolító, feszítéssel behelyezett, két végén befeszített gerenda alkalmazása.

S végül a *középen befeszített gerenda* hatásából következik, hogy a nagy rugalmassággal rendelkező, a lassú alakváltozás hatásától lényegében még nem érintett anyagú új, illetve fiatal hangszerben képes leghatékonyabban kifejteni mechanikai rezgést erősítő szerepét. Ebben az esetben a befeszítéssel kialakított, s a ΔF erő hatásirányával megegyező erő hatékonyan növeli a tetőlemez és a gerenda együttes lehajlását, a rezgés intenzitásának fokozását.

A gerenda befeszítési módjának meghatározása során többször szóba került a hegedű anyagának jellemzője, az anyag rugalmasságának foka. Olyan konstelláció ez, amikor ennek függvényében határozható meg az alkalmazható beillesztési mód. Tehát nem lehet kizárni egyik vagy másik befeszítési módot sem. Szükséges azonban a szerkezeti elemek mechanikai, szilárdsági adottságainak egybevetése. A gerenda, amely kizárólag minden esetben rugalmassága teljében lévő anyagból készül, a hegedű anyagának állapotát figyelembe vevő beillesztési mód megválasztásával képes kedvező hatásfokkal működni.

Ebben a összefüggésben megnövekszik az egyes szerkezeti elemek fizikai tulajdonságainak fontossága, főként az anyag rugalmassági jellemzőinek figyelembevétele. A következő fejezetben az anyagnak ezzel a fizikai tulajdonságaival foglalkozunk, és az ebből adódó következményeket kíséreljük meg bemutatni a hegedűgerendán.

3. Az anyag rugalmassága és fáradása

Zenészek és hangszerészek körében közismert, hogy az öreg, főként a koncert, illetve zenekari szólóhegedűkben megközelítően 25–30 évenként cserélni kell a gerendát, mert a hegedű hangja gyengül, elveszti csillogását, „elfáradt a gerenda". „Minden Stradivari hegedűben idővel ismét fel kell újítani a gerendát" – írja Sacconi *Stradivari „titkai"* című könyvében.[86] Ennek okozója az idő múlása, az anyagban végbemenő irreverzibilis folyamat. Nem másról van ez esetben szó, mint a hangszer anyagának természetes öregedéséről, az öregedés komplex folyamatának (sugárzásnak, nedvességingadozásnak, oxidációnak) kitett anyag fizikai, mechanikai tulajdonságainak kedvezőtlen változásáról. De valójában milyen változás következik be az anyag fizikai jellemzőiben az idő függvényében? Mi okozza a „fáradás" tünetét a hegedűgerendában, mi lehet e jelenség tényleges oka?

3.1. A faanyag korróziója

A fának mint szerves anyagnak az élettartama véges, és hosszú létezése alatt az anyagban végbemenő folyamat megváltoztatja korábbi mechanikai, szilárdsági jellemzőit. Annak ellenére, hogy a faanyag korróziós tulajdonságai jók – néhány adottsága még a vasét is felülmúlja –, a környezeti tényezők: a levegő, fény, víz, a különböző vegyi eredetű anyagok (lúgok, savak, sóoldatok) korróziós folyamatot indítanak el benne. A levegő oxigénje elsősorban a színét változtatja meg. Felszíni rétege előbb megbarnul, később a világos színű fák elszürkülnek, a sötétebb színűek pedig meghalványulnak. Ennek a kezdeti szakasza – jóllehet, ez a korróziós folyamatban meghatározó szerepet játszó időnek szinte kimutathatatlan töredéke – a hegedűkészítésben a szerkezet építése során még kedvező is lehet a fa alapszíneinek megváltoztatásában. Ismert, gyakran alkalmazott technológiai folyamat, hogy számos mester „napoztatta" a hegedűket lakkozás előtt.

A korrózió negatív hatása főként abban nyilvánul meg, hogy az oxigén megtámadja a sejtfalakat felépítő cellulózt, és csökkenti a sejtfalak szívósságát. A cellulózról tudjuk, hogy a növények szilárd, teherviselő vázát alkotja, vízben, savakban és lúgokban nem oldódik. Az oxigén – amitől megóvni nem lehet – az idő függvényében gyengíti a teherviselő képességét. Az ibolyántúli sugarak, hosszabb időn át a cellulóztartalom állagát támadják meg, hatásukra a farostok rideggé, törékennyé válnak, és a fa rugalmassága csökken. A korrózió hatására a faanyag szilárdsági, mecha-

nikai tulajdonságai vesztenek kezdeti értékeikből. A mérnöki faszerkezetek tervezése és megfigyelése, illetve az elvégzett laboratóriumi vizsgálatok azt mutatják, hogy a szilárdsági jellemzők leginkább a nedvességtartalom és a sugárzás hatására változnak. Tévedés azt hinni, hogy a hegedű szerkezetében – a „száraz fában" – nincs víz. A nedvesség a fa természetes alkotóeleme, egy része a sejtüregekben, más része a sejtfalakban vegyileg kötött víz formájában létezik. A szobaszáraz fában is nettó 6,1–12 %, bruttó 5,6–10,5 % nedvességtartalom mutatható ki.[87]

A leggondosabban védett, környezeti hatásoktól óvott, használatban lévő hangszert a hosszú élettartam alatt igen sok kisebb-nagyobb légköri – környezeti – hatások érik (hőmérsékletkülönbség, fény, sugárzás, páratartalomváltozás, a levegőben lévő kémiai eredetű szennyeződések: gőzök, gázok füst stb.), amelyek a fa természetes tartósságát, ezen belül szilárdsági jellemzőit, rugalmasságát csökkentik.

A környezeti hatás következtében lezajló korrózió mellett mechanikai eredetű tényezők is gyengítik a faanyag rugalmasságát. A sokszor változó terhelési impulzus kifárasztja az anyagban tartósan meglévő molekuláris erőket. (Egy drótszál gyakori intenzív hajlítgatása végül is töréshez vezet, a molekulák közötti erők rendszerének teljes felborulása miatt.) Mérnöki faszerkezetnél a kifáradást ott veszik figyelembe, ahol a számított feszültségek ismétlődése a szerkezet élettartama alatt eléri a 100.000 ciklust. Egyszerű lengőhajlításra igénybe vett 100 % statikus szilárdsággal rendelkező gerenda (hibátlan, egyenes szálú fa) szilárdsági indexe $2{,}10^6$ számú terhelési ciklus után 60 % - ára csökken. A hegedűgerendában a ΔF erő hatásirányának változása következtében szintén létrejön a rezgés frekvenciájának függvényében ciklikus feszültségismétlődés. Látszólag ugyan az összevetés távolinak tűnik, elsősorban azért, mert az anyag molekuláinak mozgását előidéző erők között jelentős nagyságrendi különbség van, más okból pedig a terhelési ciklus is eltérő. A folyamat azonban mindkét esetben azonos, vagy legalább is közel azonos. Valójában – fizikai értelemben – a hegedűgerenda anyagának fáradásához hozzájárul az anyag statikai jellemzőit megváltoztató, matematikailag kimutathatatlan számú igénybevételi ciklus is.

3.2. A tartós terhelés és a lassú alakváltozás

Az anyag fáradásának a korrózión és a belső kohéziós erőt csökkentő igénybevételen kívül további okai is vannak. Tudjuk, hogy minden erőhatás terhelés az anyagban alakváltozást idéz elő: az anyag összenyomódik, megnyúlik, meghajlik. Fából készült teherviselő szerkezetekben a terhelés pillana-

tában létrejövő kezdeti rugalmas alakváltozást változatlan terhelés mellett további, időben elhúzódó úgynevezett lassú alakváltozás követi. Hajlításra igénybe vett szerkezeteknél a terheléskor keletkezett lehajlást további lehajlás követi. Rugalmas anyagban a rugalmassági határig történő alakváltozás a terhelés hatására azonnal kialakul (pl. az acélhúr a kifeszítéssel azonos időben megnyúlik s változatlan feszítőerő mellett, megnövekedett hosszát tartósan megtartja). Lineáris rugalmasság esetén a feszültség és az alakváltozás közötti kapcsolat nem függ az időtől, reverzibilis folyamatot tükröz.

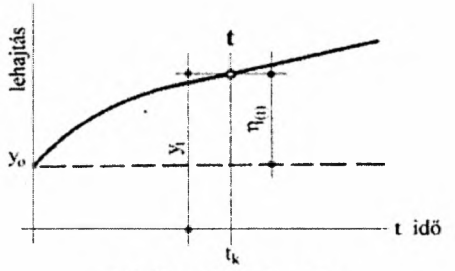
A mérnöki gyakorlatban az utóbbi évtizedekben nagy számban épültek különböző korszerű (csavarozott, ragasztott) technológiával nagyméretű faszerkezetek. Mivel a fa anizotrop anyag benne a feszültségelosztási rendszert térfogatváltozáson kívül mindig torzulások, alakváltozások kísérik. Ezek megismerésére, az anyagban végbemenő folyamat feltárására nagy figyelmet fordított a műszaki tudomány. Ennek vizsgálatára a múlt század második felében új tudományág bontakozott ki: a reológia, mely a mechanikának önállóvá vált ága, a deformálható testek alakváltozásával foglalkozik, a terhelés hatására létrejövő feszültségek és az alakváltozások időbeli alakulását vizsgálja.[88]

Amikor a hegedűgerenda mechanikai tulajdonságait kutatjuk az idő függvényében, nem tűnik reménytelennek, hogy analóg módon összehasonlításra, netán azonos folyamat felismerésére nyílik lehetőség a fából készült nagy szerkezetek vizsgálata során megismert fizikai folyamatok, illetve a hegedűgerendában időben lezajló mechanikai változások között.

A fa nem ideálisan rugalmas anyag. Benne a terhelés hatására további lassú alakváltozás – ahogyan a reológia fogalmazza –, úgynevezett kúszás tapasztalható, vagyis a szerkezet deformációja a tartós terhelés alatt az idő függvényében folyamatosan növekszik. Ennek oka, hogy a belső súrlódása miatt az anyagi részecskék között nem alakul ki a terheléssel egy időben konszolidált egyensúlyi állapot. A terhelés kezdetével dinamikusan indul ez a folyamat. A szerkezeti elem kezdeti markáns alakváltozását követően, a deformáció alatt az anyag hosszúkás makromolekulái a tartós belső erők hatására kimozdulnak egyensúlyi helyzetükből, és a molekulák közötti erők átrendeződését indítják el. Így az anyag részecskéi elmozdulnak korábbi helyzetükből s közöttük újabb konstelláció alakul ki.

A kúszás három szakaszból tevődik össze. Az intenzív szakaszban az alakváltozás sebességi értékei a legmagasabbak: ez mintegy 3–5 napig tart. A második szakaszban az alakváltozási sebesség egyenletessé válik, a deformáció lineárisan növekszik az idő függvényében. Ez a szakasz a fellépő feszültségtől és a fa fizikai jellemzőitől függően eltarthat 5–30 évig. A harmadik szakaszban a kúszás gyakorlatilag megáll, illetve olyan kismértékű, hogy figyelmen kívül hagyható.[89]

A lassú alakváltozás mértéke a reológia segítségével meghatározható. A deformáció és az idő kapcsolata kétdimenziós rendszerben választott *t* időpontban az n kúszási tényezővel fejezhető ki (96. ábra).

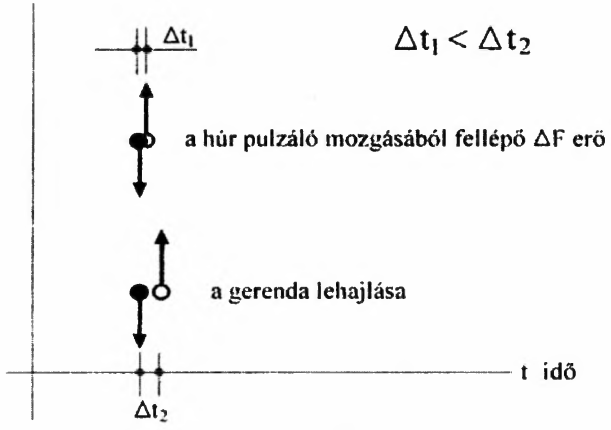


96. ábra: Kúszásgörbe

A kúszási tényező: $n = \frac{y_t - y_o}{y_o} \cdot 100\ \%$, a teljes változás t időpontban:

$$y_t = y_o\,[\,1 + 0{,}01\,\eta(t)].$$

A kúszás mértékét elsősorban a tartós feszültség nagysága határozza meg, azonban már kis feszültséggel is bekövetkezhet, és évekig eltarthat. A terhelés megszűnése után a kezdeti rugalmas deformáció teljesen megszűnik, az időben elhúzódó lassú alakváltozásnak – a kúszásnak – mintegy fele késleltetve szűnik meg.



97. ábra: A *ΔF* erő impulzusa és a molekulák mechanikai rezgésfázisa

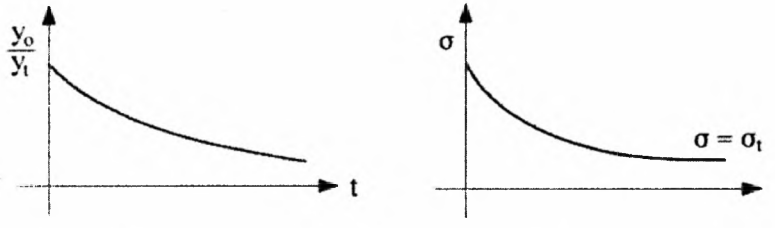
A magasépítésben alkalmazott faszerkezetekben állandó tartós terhelés hatására általában statikus, egyensúlyban lévő erőrendszer alakul ki. Ilyennek tekinthetjük a felhangolt hegedűben a húrnyomásból adódó terhelést. A mérnöki szerkezeteket érő igénybevételt – a statikus terhelés mellett – további időszakos, egyben dinamikus terhelés egészíti ki, pl. széllökések. A hegedű gerendájára pedig a húr rezgéséből eredő, pulzáló ΔF erő hat. Ezek az erők mindkét esetben szuperponálódnak, és eredőjük változást idéz elő a szerkezetben.

Terhelés alatt a kúszás szakaszában lévő gerenda – a pulzáló erők hatásának csökkenő periódusában – késve tér vissza nyugalmi állapotába, vagyis a deformáció késve szűnik meg. Az anyagi részecskék mozgásának ez az időbeli eltolódása a mechanikai rezgés amplitúdóját csökkenti (97. ábra)

Ennek következményeként a gerenda, gyengülő hatásfokkal tudja ellátni feladatát. Minél előrehaladottabb a lassú alakváltozás folyamata – vagyis minél nagyobb a fában bekövetkezett kúszás –, annál lassúbb a terhelés hatására elmozdult molekulák visszatérése kiinduló helyzetükbe. Az anyagban bekövetkezett mechanikai változás a részecskék mozgásának „fáradását" idézi elő az erő hatására, a részecskék elmozdulása időben később következik be.

A mérnöki faszerkezeteken végzett megfigyelések számunkra még egy igen figyelemreméltó tulajdonságát tárták fel a fának, ami a jelenlegi vizsgálatunk szempontjából az első pillanatban nem is tűnik lényegesnek. A nagy szerkezetekben kimutatható, hogy a tartós feszültség esetében az idő függvényében csökken a kezdeti feszültség, relaxáció következik be.

A kialakuló feszültségesés néhány hónap alatt elérheti a kezdeti alakváltozást okozó feszültség 60–70 % -át. Ennek az oka a terhelés hatására létrejövő lassú alakváltozás, az anyag molekulái között bekövetkezett kúszás. Az állandó terhelés mellett a feszültség és az idő közötti kapcsolatot bemutató görbe csaknem a kúszásgörbe tükörképe (98. ábra).[90]



a lassú alakváltozás folyamatát ábrázoló grafikon

a feszültség csökkenése a lassú alakváltozás alatt

98. ábra

Mivel a kúszás mértékét elsősorban a tartós feszültség nagysága határozza meg, s a nagyobb kúszás pedig a feszültség csökkenését eredményezi, egy véges iterációs folyamat adódik. Ez azonban leáll a késleltetett mozgású anyagi részecskék egyensúlyi állapotának kialakulása után.

A hegedű szerkezetében azonban – mivel a húrokban lévő feszítőerőnek, illetve az ebből adódó feszültségeknek állandónak kell lenni, mert csökkenése esetén megváltozik a húr rezgésszáma – relaxáció nem léphet fel. Állandó alaprezgéshez (Hz) állandó nagyságú feszítőerő tartozik:

$$f = \frac{1}{2 \cdot \lambda} \cdot \sqrt{\frac{F}{\varphi \cdot q}},$$

ahol f az alaphang rezgésszáma, F a húrban lévő feszítőerő, φ az anyag sűrűségi mutatója, q a keresztmetszet felülete.

Mivel a hegedűszerkezetben, illetve a gerendában nem léphet fel relaxáció, a benne lévő lassú alakváltozás (kúszás folyamata) valamivel élénkebb, mint a feszültség és a lassú alakváltozás szabad egymásra hatását követő szerkezetben.

Mérnöki faszerkezetekben a tapasztalatok alapján a kúszás második szakaszában, amikor az alakváltozási sebesség állandóvá válik, és a deformációk lineáris növekedést mutatnak az idő függvényében a feszültségesés relaxáció mellett 30 évig eltarthat. Nem lehet meglepő, hogy a hegedűgerendában, ahol nem léphet fel feszültségesés – hiszen a húrnyomás állandó –, nem érvényesülhet a két jelenség közötti egymásra hatás, így ez a folyamat lerövidül. Ennek alapján érthető, tudományos ismeretekkel igazolható, hogy 25 év körüli idő elteltével szükségszerű a gerenda cseréje.

IV.

A HÚRLÁBRÓL – AHOGYAN MA LÁTJUK

Bevezetés

Meglepő hogy, a húrlábbal – a húrláb mechanikai rezgésével – keveset foglalkoznak a hegedű témakörét elemző tanulmányok. De, hogy mi lehet ennek a tényleges oka, véleményem szerint csak találgatni tudjuk. Nagy valószínűséggel, nem is tulajdonítottak neki jelentős szerepet, mivel nem tekinthető a hangszerszerkezet (vele egybeépített) szerves részének, csupán kiegészítő, applikált elemének. Az sem zárható ki, hogy rendeltetésének korábbi, hiányos megítélése miatt foglalkoztak vele visszafogottan. (Mindemellett nem hallgatható el, hogy kialakítására kezdettől fogva nagy figyelmet fordítottak a hegedűépítők. Készítésének idejére, helyére s alkotójára utaló formajegyek rendszerezését pedig több tanulmány taglalja). Ami azonban szembetűnő, hogy a fellelhető – a húrlábbal foglalkozó – elemzésekben gyakran ellentmondó vélekedések feszülnek egymásnak, és a mai ismeretekkel összevetve vaskos tévedések fordulnak elő. Esetenként, helyenként szerepének, rendeltetésének megítélésében is számos bizonytalanság tűnik fel.

Valójában pedig a húrláb *hangszertípust alakító kiegészítő szerkezeti elem.* Szerepét a húrok rezgéséből keletkező, s a hangszer anyagában továterjedő mechanikai hullámok – hanghullámok – intenzitásának növelésében a gyakorlatban rég felismerték, elméleti jelentőségét a hegedűszakirodalom azonban mind ez ideig nem tárta fel, vagy ha érintőlegesen foglalkozott is vele több kérdést megválaszolatlanul hagyott.

Ebben a tanulmányban tekintsük át részletesen e témakört, hogyan látjuk ma és vizsgáljuk meg a hegedű-húrláb tényleges szerepét és jelentőségét.

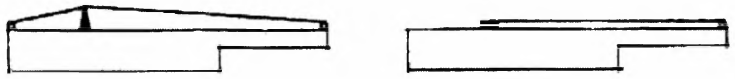
1. A húrláb szerepe és jelentősége

A húrláb a húros hangszerek körében kiterjedten alkalmazott kiegészítő szerkezeti elem. A különböző pengető és húros hangszereken egymástól eltérő technikai, formai megoldásai alakultak ki. Talán ennek következménye, hogy hangszertípusonként más-más módon ítélik meg a húrláb szerepét és jelentőségét.

Éppen ezért, valamint a szakirodalomban is tapasztalható eltérő értelmezések miatt előbb célszerűnek tűnik egyértelműsíteni: mi is valójában a húrláb és milyen szerepet tölt be – kiemelten a hegedű, (a hegedűcsaládba

tartozó további hangszerek; mélyhegedű, gordonka, bőgő) – valamint a vele rendelkező pengetős hangszerek működésében.

A *Hangszerek Enciklopédiája* a kordofon hangszerek ismertetése kapcsán azt írja, hogy egyes hangszereken a húrokat a testhez rögzítik és külön elemmel, hanglábbal támasztják alá (A) „másoknak pedig húrtartójuk van, amelyek hanglábként működnek"(B)[91] (99. ábra).



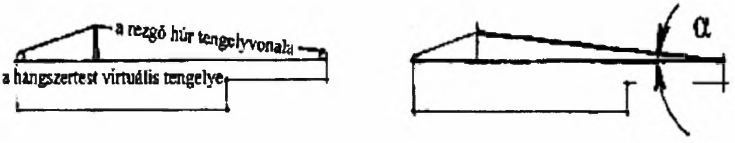
99. ábra (A) (B)

E szerint a hangláb, vagy húrláb[92] bizonyos esetekben lehet a húrokat alátámasztó elem, más körülmények között pedig hanglábként működő húrtartó?

Kíséreljük meg egzakt módon meghatározni mi is valójában a húrláb és mi a tényleges szerepe. A húros hangszerek egy részén a húrok két ponton távköztartókon (nyergeken) illeszkednek a hangszertesthez. Ennek a technikai megoldásnak két változat alakult ki: 1) a hangszertest teljes hosszával megegyező hosszúságú húrokkal, 2) a tetőlemez közbenső szakaszához rögzített, a hangszertestnél lényegesen rövidebb húrozattal épített hangszerek típusa. Közös jellemzőjük, hogy mindkét esetben a húrok tengelye párhuzamos a hangszertest virtuális tengelyvonalával (100. ábra).

100. ábra

Ha azonban a kifeszített húr és a hangszertest közé további, harmadik felfekvést képező, közbenső alátámasztó elem kerül, megszűnik a hangszertest, valamint a húr tengelyvonala közötti párhuzamosság és az alátámasztás magasságától függően a két tengely egymással szöget zár be (101. ábra).

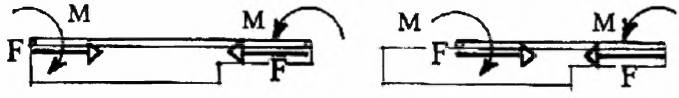


101. ábra

Ám, hogy ez a látható, de a következtetések szabatos kialakításához – a tapasztalatok alapján – mégis csekélynek tűnő eltérés milyen változást hoz létre a hangszer mechanikai működésében, egyszerű tényfelismeréssel nem is tűnik jelentősnek, karakterformálónak. Megismeréséhez tekintsük át a statika segítségével a hangszertestben fellépő belső erők rendszerét.

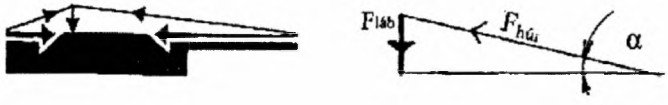
A hangszertest két legtávolabbi pontján rögzített, feszített húr a hangszertestre a benne fellépő feszítőerővel azonos nagyságú, vele ellentétes irányú nyomóerőket (F) és a feszítési pontokon a húr és a hangszertest közötti távolságtól függő forgatónyomatékokat (M) hoz létre. Ugyanez az erőkonstelláció alakul ki akkor is, ha a rögzítési pontok közelebb kerülnek egymáshoz, de a húr és a hangszertest párhuzamossága változatlan marad (102. ábra).

102. ábra



Abban az esetben, ha a két ponton felfekvő feszített húr a közbenső alátámasztás révén a hangszertest virtuális tengelyével szöget zár be *az alátámasztás helyén még egy további*, – a hangszertestre merőleges irányú – *erő képződik* ($F_{láb}$). (103. ábra).

103. ábra



Egyszerű összefüggéssel kifejezve a húrban fellépő $F_{húr}$ nagyságú feszítőerőnek a húrláb síkjában képződő komponense: $F_{láb} = \sin\alpha \cdot F_{húr}$. (Azokon a hangszereken, amelyeken nincs a kifeszített húrok alatt közbenső alátámasztó elem nem hat ilyen típusú erő a hangszertestre). Ennek az erőnek ($F_{láb}$) hatása következtében megváltozik a hangszernek, mint rezonátornak a működési mechanizmusa, s ily módon az előbbihez képest eltérő, sajátos hangszertípus jön létre.

Végső soron összegezhető tehát: *a húrláb* (a bekezdés elején idézett definícióban foglaltakkal szemben) *nem húrtartó*. Szerepe nem technikai, nem a húr rögzítését szolgálja, hanem a húr rezgéséből keletkező mechanikai hatásokat közvetíti, csatolja a tetőlemezre. Egyértelmű, a húrláb *a hangszer hangzásbeli – akusztikai – tulajdonságát meghatározó elem*. Jel-

lemzője, hogy a hangszer szerkezetével nem épül egybe, csupán a húrok feszítéséből következő kényszerhatás alatt illeszkedik a hegedűtesthez.

Az a korábban kialakult, napjainkig hangoztatott nézet, hogy a húrláb csupán a húrok alátámasztását szolgálja, félrevezető következtetés, a gyakorlat jó ideje rácáfolt erre. Húrlábat már a középkori hangszereken: lantokon, fidulákon is alkalmaztak (104. ábra). Az alig későbbi időből – a 16. század elejéről – fennmaradt festményeken ábrázolt hangszerek a hegedű megjelenését megelőzően használt húrlábak kialakításáról tanúskodnak[93] (105/a-b. ábra). Kezdetlegességük, szerény kialakításuk ellenére azonban, (ma már elméletben bizonyítható) ugyan azt a szerepet töltötték be a hangszerek mechanikai működésében, mint mai utódaik. Jelentőségük a gambák, violák fejlődésével növekedett. Meghatározó rendeltetésük a vonós hangszerek körében a hegedű 17-18. század fordulóján lezajlott „átépítés" során kristályosodott ki.[94]

A korai „barokk" hegedűkkel szemben az átépítés utáni hangszerek szólisztikusabb, virtuózabb játékra alkalmas zenei teljesítőképessége, alkalmassága bizonyítja, hogy a húrláb kiemelkedő szerepet tölt be a hangszerhang alakulásában, a mechanikai rezgéseknek, a hangszertest anyagán belüli terjedésében.

104. ábra: A pisai Camposanto freskórészlete (1360): pszaltérium- és fidulajátékos

105/a ábra:
Matthias Grünewald (1740/83-1540):
Jézus születésének allegóriája (1512-16)
(részlet)

105/b ábra:
Goivanni Andrea lira da
braccioja (Verona, 1511)

Eddig a húrláb meghatározó jelentőségét a hangszertestben a felhangolás következtében kialakuló belső erők bemutatásával és összehasonlításával bizonyítottuk. A húr rezgéséből azonban további, újabb erők keletkeznek, és ugyanúgy az előzőekkel azonos módon oszlanak meg, s ugyancsak erőhatásokat gyakorolnak a hangszertestre mint rezonátorra. Ezekkel, vagyis a hang kialakulását előidéző erők és a hangláb viszonyával a további fejezetekben foglalkozunk. Részletesen megvizsgáljuk a húrláb sajátos szerepét a hegedűtestben képződő mechanikai hullámok kialakulásában, és elemezzük a mechanikai rezgésekre, valamint a hanghullámok intenzitásának növelésére gyakorolt hatását.

2. Korábbi vélekedések a húrlábról

Teljességre törekvés nélkül – csupán ízelítőnek – pillantsunk bele, miként vélekedtek korábban a húrlábról, a húrláb szerepéről. Karl Fuhr, a hegedű akusztikájával foglalkozó neves teoretikus írja *A hegedű akusztikai rejtélyei* című könyvében[95]: „A húrláb fontos feladata, hogy a húrrezgéseket átvigye a hangzó testre..." "Ennél az átvitelnél azonban az irány, amelyben a húrrezgések megtörténnek, nem kedvező, mert ezek a tető középső részén a boltozat haránt irányában mennek végbe..." "A rezgéseket függőlegessé kell tenni, hogy erőteljesen hassanak és mindenekelőtt, hogy a környező levegőt erős rezgésbe hozzák. Felvetődik a kérdés, hogyan fog ez megtörténni?".[96] A probléma megfogalmazásánál azonban nem jutott tovább, nem adott rá megnyugtató magyarázatot. Azt azonban világosan látta, hogy a húrlábnak a tetőlemezre merőleges irányú erőhatásokat kell továbbítani. Erről így ír, "Minden esetre egy dolog biztos: A transzverzális irányban bekövetkező húrrezgéseket függőleges irányúvá kell átváltoztatni, ha a hegedűtestben erős rezgéseket akarunk létrehozni.[97] Némi határozatlanságot érzékeltetve fejtegeti: „A húrlábnál sokkal inkább a rugalmassággal kell az oldalmozgást és a függőleges rezgésekbe való átkapcsolást támogatni. Ezt a feladatot a modern húrláb – amely célszerűségben a régi mestereket, még Stradivarit is felülmúlja – kiváló módon oldja meg".[98] Okfejtése azonban misztikumba torkollik. Mint konklúziót mondja: „a húrláb az oldalrezgésekkel – fent ugyancsak oldalirányú – hintázó mozgásba kerül..." „Minél jobban haladunk lefelé, annál kevésbé lép fel az oldalmozgás, viszont annál intenzívebb lesz a lefelé irányuló mozgás, ami végül a talpakon függőleges mozgássá válik".[99]

Mások sem jutnak tovább ennél, ezt ismételgetik az ok-okozati összefüggések tényszerű feltárása nélkül. Vadon Géza a hangszerészképzés számára írt tankönyvében részletezi:[100] „A húrok rezgése a láb gerincét jobbrabalra, tehát horizontális vízszintes irányba rázogatja. Ugyanakkor a lábat a húrok irányában ható s így az előbbitől 90°-ra eltérő horizontális irányban (előre-hátra) rezegteti az, hogy a húrok a kilengéskor feszesebbek, középső helyzetükben pedig lazábban. E horizontális rezgéseknek kell vertikálisakká, (függőlegesekké) alakulniuk, hogy a tetőlemezt rezgésbe hozzák".[101] Ezzel a nézettel napjaink legnagyobb netes lexikonjában is találkozunk. Egyik helyen olvasható a húrláb ismertetésénél „..a vonó által gerjesztett, a hangszer-

tetővel nagyjából párhuzamos síkban történő húrrezgést át kell alakítani arra merőleges irányú rezgésre, hogy a hangszertető azt átvehesse".[102]

A szükségszerűnek vélt rezgésirány-transzformáció megvalósításáról még a gyakorlati célokat szolgáló tankönyvből sem kapunk egzakt magyarázatot. Annyit mond, „Hogy a húr rezgésirányainak átváltoztatása minél tökéletesebb legyen, és hogy a tetőlemezben keltett rezgések visszaható mozgását is kellőképpen hasznosítani, esetleg hatástalanítani lehessen, tapasztalati módon alakult ki a láb rugózását fokozó kivágásokkal a mai, tökéletesnek mondható X-szerű alakjára".[103]

Így, még a húrláb alakja, „formája" is vád alá kerül, s tőle teszik függővé a – *hullámterjedés* – irányának transzformálását. Pap János akusztikus *A hangszerakusztika alapjai* című munkájában írja[104] „Mivel a húrok rezgése nem merőleges a tetőre, olyan lábformát kellett kitalálni, amely merőlegessé transzformálja azt (nemcsak a mai lábformák képesek erre!).[105]

Ezekben a vélekedésekben nemcsak véletlenszerű bizonytalanságok rejtőzködnek, hanem számos tévedés, alapvetően torz állítások húzódnak meg. Ne kommentáljuk most ezeket, ehelyett a továbbiakban a mai ismeretek alapján megfogalmazható tényeket állítsuk velük szembe.

3. A húrban keletkező erők és mechanikai rezgések hatása a húrlábra

3.1. A húr felhangolása során fellépő erők

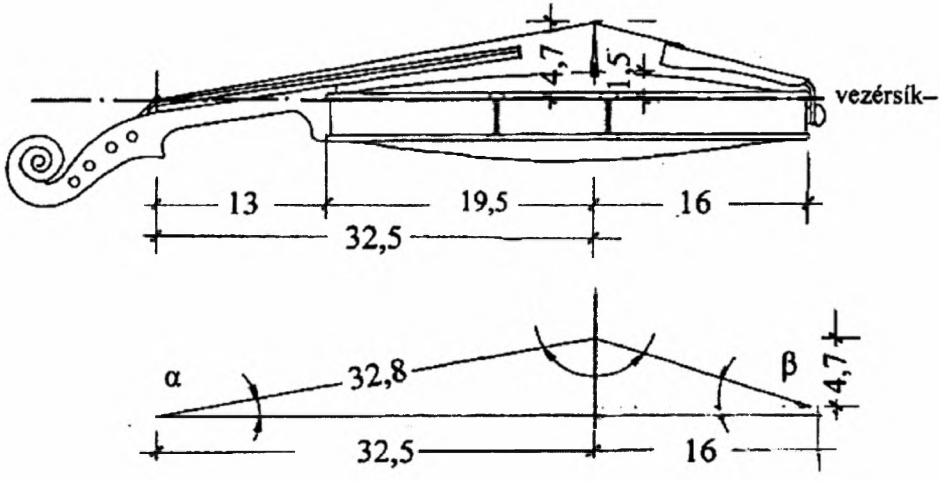
Megkönnyíti témakörünk áttekintését, ha előbb egy felhangolt, nyugalmi helyzetben lévő *e*-húrban fellépő feszítőerőnek a hangszertestre – s így a húrlábra – gyakorolt hatását elemezzük. (Vizsgálódásunkhoz az *e*-húr a legalkalmasabb, mivel anyaga homogén és ismerjük paramétereit, jellemzőit). Abból a nyilvánvaló tényből indulhatunk ki, hogy a felhangoláshoz az alaphang – a kromatikus skála alapján 659,35 Hz frekvencia – eléréséhez a húr fizikai jellemzőitől függő mértékű feszítőerő szükséges.

Ennek nagysága az $f = \frac{1}{2 \cdot l} \cdot \sqrt{\frac{F}{A \cdot \rho}}$ összefüggésből kifejezve közvetlenül kimutatható, ahol f = frekvencia: 659,35 Hz, l = a rezgő húr hossza:

32,80 cm, F = a feszítőerő, ρ = a húr anyagának sűrűségi mutatója: (krómnikkelacél) 8,2, A = a húr keresztmetszetének a felülete: átmérője - 0,28 mm, felülete - 0,0615 mm^2. Így a keresett erő: $F_{feszítő} = 4 \cdot l^2 \ f^2 \cdot A \cdot \rho$, azaz $F = 4 \cdot (32{,}80)^2 \ (659{,}35)^2 \cdot 8{,}2 \cdot 0{,}0615 = 9{,}55$ N. Tehát a felhangolt húrban 9,55 N feszítőerő lép fel.

Ebből megítélhető a felhangolással keltett feszítőerő hatása a hegedűtestre s, hogy milyen további erők lépnek fel a hangszer különböző pontjain. Kiszámításához azonban előbb meg kell ismerni a húrtengely és a hangszer virtuális tengelyvonala között lévő szögek nagyságát.

A zengő húr hossza 32,80 cm. A húr két felfekvési pontjának (a felső nyereg és a húrláb között) a tetőlemez kávákkal érintkező alsó síkjában – nevezzük *vezérsíknak* – mérhető vetülete 32,50 cm, ami megegyezik a nyakmenzúra (13 cm) és a korpuszmenzúra (19,5 cm) összegével. (Feltételezve, ahogyan a hegedűépítés gyakorlatában kortól és alkotótól függetlenül szinte legtöbb esetben kimutatható, hogy a felső nyergen a húr felfekvési pontja a tetőlemez képzeletben meghosszabbított vezérsíkjába esik.) (106. ábra).



106. ábra

Ezekkel az értékekkel számolva a zengő húr és a vezérsík között kialakuló α szög:

$$\cos\alpha = \frac{32,5}{32,8} = 8^{\circ}14'$$

A zengő húrszakaszban keltett feszítőerő (F=9,56 N) a hangszertestre nyomóerőt gyakorol ($F_{nyomó}$). Ennek nagysága azonos a húrban létrejött feszítőerőnek a vezérsíkban kimutatható vetületével:

$F_{nyomó} = \cos\alpha \cdot F_{feszítő}$, azaz $0,99085 \cdot 9,56 = 9,47$ N.

A húrban képződő feszítőerőnek a húrláb síkjában a hangszertestre merőleges irányú komponense:

$F_{láb} = \sin\alpha \cdot F_{feszítő}$, vagyis $9,56 \cdot 0,14349 = 1,37$ N

Nem hagyható figyelmen kívül, hogy a rezgő húrszakaszban a felhangolással keltett feszítőerő a húrláb és az alsó nyereg közötti – hátsó – húrszakaszban, illetve a húrtartó tengelyvonalában is fellép. Így az ebből képződő erőkomponensekkel is számolni kell.

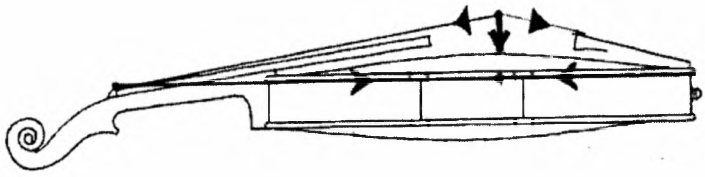
Az alsó nyeregnél a húrtengely és a vezérsík között lévő szög az alkalmazott hegedűméretek alapján számolva 14° 42′. A hegedűtest vezérsíkjában képződő nyomóerőt már ismerjük (9,47 N). Így ennek alapján kiszámítható a húrtartó felőli húrszakaszban fellépő feszítőerőből képződő, s a húrláb síkjában ható komponenserő ($F_{láb\,2}$).

$$tg\alpha = \frac{F_{láb\,2}}{9,47} \quad ; \quad F_{láb\,2} = 0,26422 \cdot 9,47 = 2,50 \text{ N}$$

Összegezhetjük tehát, hogy a felhangolás során a húrban keltett feszítőerő a hegedűtestre teljes hosszában 9,47 N nyomóerőt ébreszt. S külön kimutathatjuk, ami vizsgálatunk szempontjából kiemelten jelentős, hogy a húrlábra (1,37 N + 2,50 N) együttesen 3,87 N nyomóerő adódik át. Ennek a nyomóerőnek a nagysága a húrra ható feszítőerő, valamint a húrtengely és a vezérsík által bezárt szög (a hegedűépítésben ismert: nyakdőlésszög) függvénye. A szög növelésével, változatlan nagyságú húrfeszítőerő mellett is arányosan növekszik a húrlábsíkjában a tetőlemezre irányuló erő.

Az előbbiekben megismerhettük a felhangolt *e*-húrban keltett feszítőerőnek a húrlábra, illetve a hegedűtestre gyakorolt hatását. A többi húrból is (*g*, *d*, *a*) – a húr fizikai jellemzőitől függően – ugyanúgy és ugyanolyan erőhatások képződnek. A négy húrból együttesen cca. 80-85 N nyomóerő lép fel a hegedűtestben, hossztengelyével megegyező és cca. 11,8 N nyomóerő hat a húrláb síkjában a tetőre merőleges irányban[106] (107. ábra).

107. ábra

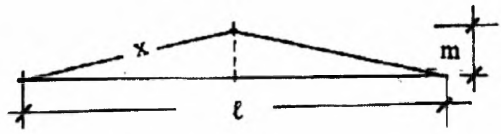


Ugyanígy kiszámolhatjuk a hegedűtestre jutó további erőhatásokat is, pl. a húr felfekvési pontjain a felső és az alsó nyergeken képződő forgatónyomatékokat. Mivel azonban ezek a húrláb szerepének vizsgálata szempontjából indifferensek, nem térünk ki részletezésükre. Fontosabb megjegyezni, hogy ha tovább növekszik a húrban fellépő feszítőerő (pl. magasabb alaphang elérése érdekében, vagy egyéb ok miatt, a húr kilendítése, rezgése következtében) a képződő többlet-feszítőerő a hegedűtestre az eddig megismertekkel megegyező módon oszlik meg.

3.2. A húr mechanikai rezgéséből létrejövő erők

Induljunk ki abból a releváns ismeretből, hogy ha a kifeszített húrt megpendítjük, vagy vonóhúzással kitérítjük nyugalmi helyzetéből, minden pontja, alkotó-anyagrészecskéje elmozdul, egymáshoz viszonyítva új konstellációba kerül, és a húr hossza megnövekszik. Az összefüggések könnyebb áttekinthetősége érdekében válasszuk a pendítéssel kilendülő húr mozgásának elemzését, mivel a megpendített húr mozgása lényegében megegyezik a vonóhúzással keltett húrmozgás időben és térben lehatárolható egyetlen mozgásfázisával. Részletes taglalás nélkül is követhető ez a folyamat, mivel ismert, hogy a vonószőr és a húr érintkezési pontján fellépő tapadóerő hatására a húr követi a vonó mozgását mind addig, amíg a kilendülés következtében a benne növekvő feszítőerő nem haladja meg a tapadást előidéző erő nagyságát. A feszítőerő domináns megnövekedésével a húr visszalendül, csökken benne a feszítőerő, de a mozgásba lévő vonó, a vonószőr–húr tapadásából ismét fellépő erő újabb kilendülésre kényszeríti.

Nézzük meg, a hegedű *e*-húrjának megnyúlását, ha zengő húrszakaszának felező pontján 0,5 cm-re kitérítjük. A felhangolt, nyugalmi helyzetben lévő *e*-húr hossza a láb koronavonalától a felsőnyeregig (*zengő húrszakasz*) 32,8 cm (108. ábra).



108. ábra

Az ábrát szemlélve nyomban feltűnik, hogy a kilendülő húr törttengelyvonala és a nyugalmi helyzetében jellemző tengelyvonala egyenlőszárú háromszöget képez. Ebből az is felismerhető, hogy a háromszög két szárának együttes összege egyenlő a kilendülő húr hosszával.

Egyszerű összefüggés ($c^2 = a^2 + b^2$) alapján a háromszög egyik szárának hossza (x):

$$x^2 = \left(\frac{l}{2}\right)^2 + m^2 \quad ; \quad x = \sqrt{\left(\frac{l}{2}\right)^2 + m^2}$$

A kilendülő húr teljes hossza (2·x):

$$2\sqrt{\left(\frac{l}{2}\right)^2 + m^2} \quad ; \quad 2\sqrt{(16{,}4)^2 + (0{,}5)^2} = 32{,}82 \text{ cm.}$$

Végül is a húr hossza a kilendülés során számításunk szerint 32,82 cmre meg növekedett, illetőleg a kilendülő húr tengelyvonal-hossza 0,02 cmrel *megnyúlt*. Pontosabban fogalmazva a felhangolás közben történt feszítés során végbement hossznövekedés után az anyag rugalmassági határán belül további nyúlás következett be.

Ezzel megismertük a kilendített *e*-húr megnyúlásának mértékét. A Hooke-törvény segítségével kiszámíthatjuk, hogy ez a hossznövekedés mekkora nagyságú feszítőerő hatására alakul ki.

A kilendítéssel bekövetkezett megnyúlást ($\Delta l = 0{,}02\ \Delta$cm) létrehozó erő nagysága (F):(ahol F =a megnyúlást előidéző erő, l = a húr eredeti hossza: 32,50 cm., ρ =a húr anyagának rugalmassági modulusa: $2 \cdot 10^5$ N/mm, A= a húr keresztmetszete: – átmérője 0,28 mm –, 0,615mm^2)

A húr kilendülése közben fellépő erő:

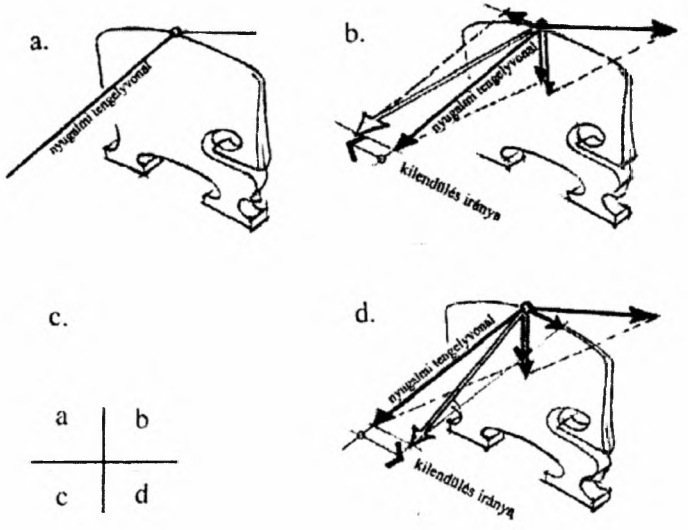
$$F = \frac{0{,}02\ 2\ 10^5\ 0{,}615}{32{,}5} 7{,}57 \text{ N}$$

Hangsúlyozni kell, hogy a most megismert F erő a húr felhangolását követően jön létre a benne már meglévő, sokszorta nagyobb feszítőerő ($F_{\text{feszítő}}$) kialakulása után. Kicsinysége és a mindenkori megkülönböztethetőség érdekében, mivel többször kell hivatkozni rá, jelöljük a továbbiakban ΔF erőnek.

Nézzük meg ezek után, hogy a húr kilendülése, rezgése közben keletkező ΔF erő milyen hatást képez a húrlábra. Részletesebben, a kilendülés során létrejövő ΔF feszítőerőnek milyen irányú *erőkomponensei* alakulnak ki a húrlábon.

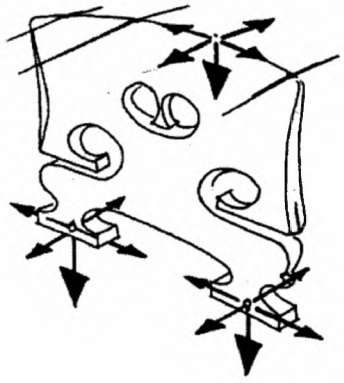
Vizsgáljuk meg ezek összefüggését a húr mozgásfázisainak egymást követő sorrendjében (109/a-b-c-d ábra).

1) a húrban, kilendülésének kezdeti pillanatában – *alap-helyzetben* – csak a felhangoláskor kialakult $F_{feszítő}$ erő létezik, nem képződik ΔF erő (109/a ábra).
2) *a kilendülés irányába eső szélső helyzetbe* kerülő húrban kialakul a megnyúlásból adódó ΔF erő és ezzel együtt fellép komponenseinek a hatása a húrlábra (109/b. ábra).
3) a visszalendülés közben, az alaphelyzetén – nyugalmi tengelyvonalán – áthaladó húrban megszűnik a ΔF erő és csupán a felhangolással kialakult feszítőerő marad (109/c = 109/a ábra).
4) *a kilendülés irányával ellentétes szélső helyzetbe kerülő húrban* újból fellép a ΔF erő, és komponensei hatást gyakorolnak a húrlábra (109/d ábra). (Vizsgálódásunk témáját tekintve figyelmen kívül hagyhatjuk, hogy nagyságrendje – a csillapított rezgés során – az energiaveszteség hatására kis mértékben csökken az előző kilendüléskor képződő értékhez viszonyítva).



109. ábra

Az ábrákon szemléletesen követhető, hogy a húr különböző mozgásperiódusaiban létrejövő, illetve megszűnő ΔF erőkből milyen hatáskomponensek képződnek a húrláb koronavonalán. Megkülönböztetett figyelmet érdemel, hogy a húr kilendülésének két szélső helyzetében minden oldalirányú erőkomponenshez kapcsolódik egy-egy tetőlemezre merőleges erőkomponens (110. ábra). Ez bizonyítja, hogy a húr rezgéséből közvetlenül létrejönnek a tetőlemezre irányuló erőimpulzusok, erőlökések. Egyben azt is sejteti, hogy nem valamiféle áttételes módon, más szerkezeti elem közreműködése révén jut el a húr mechanikai mozgásenergiája a rezonátortestre, hanem módosítás nélkül direkt közvetítéssel.



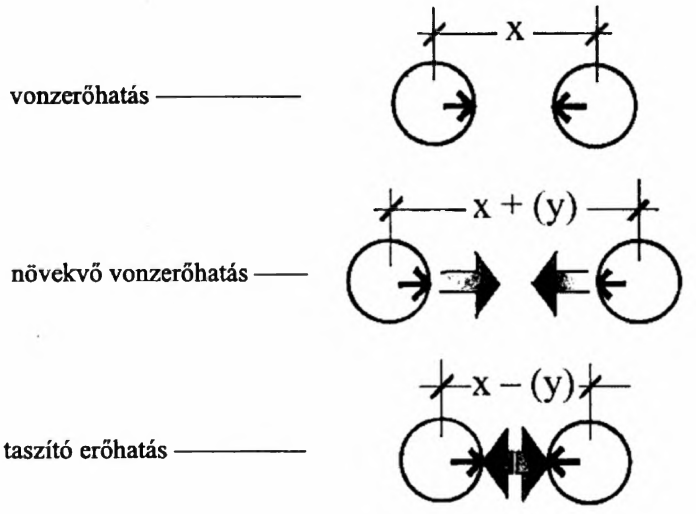
110. ábra

Kirajzolódik előttünk, hogy a húr kilendülése, rezgése következtében képződő húrlábra jutó erők – ΔF erőkomponensek – kiemelkedő arányban képeznek a tetőlemezre merőleges irányú erőhatásokat. Ezek az erőhatások, úgy is fogalmazhatjuk erőlökések, a húrlábon (és a felső nyergen) keresztül átadódnak a hegedűtestre, benne mechanikai rezgést indítanak el s hatásukra különböző mechanikai hullámformák képződnek és csatolódnak a tetőlemezre.

4. A húrláb szerepe a húrokban keletkező mechanikai rezgések továbbításában

Az előzőekben megismertük a húr rezgése közben a húrlábgerincen kialakuló ΔF erőket. Most vizsgáljuk meg, hogyan továbbítja a húrláb a hegedűtestre, a tetőlemezre ezeket az erőhatásokat.

Ennek áttekintéséhez a szilárd anyagot alkotó részecskéket összetartó erők – molekuláris vonzó és taszítóerők –, valamint az anyagra ható külső erők viszonyából indulhatunk ki. A modern fizika feltárta a molekulák egyensúlyi állapotának és egymáshoz viszonyított helyzetük változásainak törvényszerűségét. A szilárd anyagok molekulái között mindenkor az adott anyagra jellemző vonzerőhatás érvényesül. *Ha a molekulák* valamilyen kényszerítő tényező (pl. külső feszítő, húzóerő) hatására *távolabbra kerülnek egymástól, közöttük növekszik a vonzerő, ha pedig túl közel kerülnek egymáshoz* (pl. külső nyomóerő következtében) *közöttük taszítóerő lép fel.* A részecskék viszonyában kialakuló vonzerők, illetve taszítóerők kvantuma arányos a változást előidéző, külső erőhatás nagyságával (111. ábra).



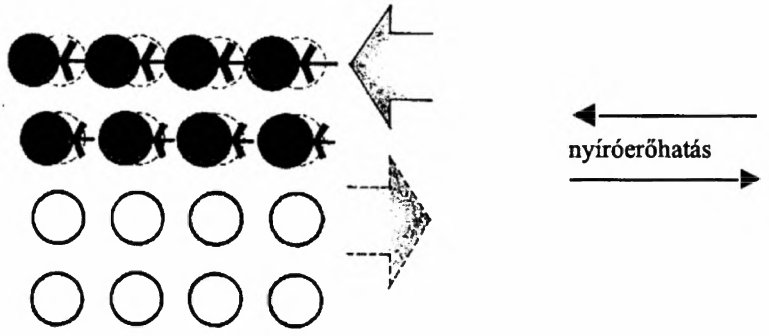
111. ábra

Korábbi fejtegetéseinkben már megismertük, hogy a feszített húrban a rezgés, a húr hosszának változása következtében, molekulái között fellépő további vonzerő növekedésével arányos ΔF erők keletkeznek. Ezek komponensei a húr és a húrláb érintkezési pontján:

1) a húrláb síkjára merőleges, a húriránnyal megegyező (előre-hátra),
2) a tetőlemezzel – a vezérsíkkal – párhuzamos oldalirányú (jobbra-balra),
3) a húrlábsíkban a tetőlemezre merőleges irányú erőhatásokat keltenek.

Közös jellemzőjük, hogy a húrrezgés frekvenciájával azonos fázisban ismétlődnek.

Vegyük sorra ezeket, mert hatásmechanizmusukat elemezve könnyebben jutunk közelebb a húrláb megítéléséhez, mai szemléletünk alapján a tényeknek megfelelő magyarázatához. Kezdjük a húrtengely irányú ΔF erőlökésnek a húrláb molekuláira gyakorolt hatásának vizsgálatával. A húrláb koronavonalán a ΔF erőlökés a hatásirányában érintett molekulát a vele szomszédos, nyugalmi helyzetben lévő részecskétől távolabbra kényszeríti s a molekulák között nyíróerőhatás lép fel. Így a húrlábsíkra merőleges hatásirányú erőlökések a részecskék között nyíróerőket képeznek. (112. ábra).



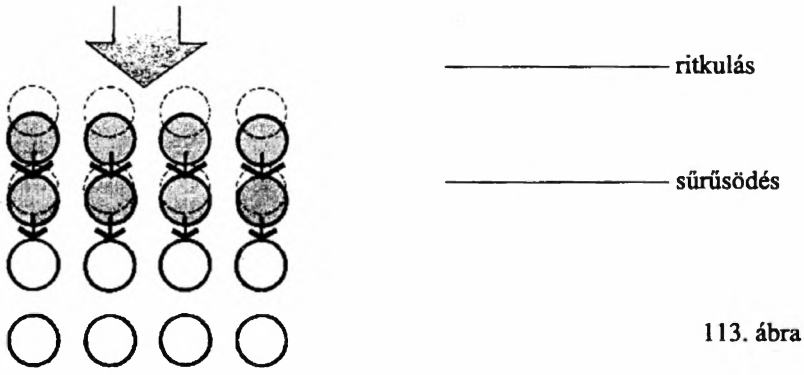
112. ábra

Nyíróerők alakulnak ki, mindannak ellenére, hogy a húrláb nem illeszkedik szervesen a hangszertest szerkezetéhez, nem épül vele egybe. Kapcsolatuk, erőtani fogalmak szerint nem tekinthető merevnek, a húrirányú erőhatások a húrlábgerincet előre-hátra billenthetik anélkül, hogy a húrlábtalpak kimozdulnának helyzetükből. A felhangolt-feszített húrban fellépő, a húrlábsíkjában a tetőlemezre irányuló nyomóerő hatására a húrlábtalpak és a tetőlemez között kialakuló kényszertapadás következtében ellenáll a síkjára merőleges erőhatásoknak, s ennek következtében nyíróerők alakulnak ki benne.

Ugyanúgy nyíróerőhatást képeznek a molekulák között a húrlábsíkjában oldalirányba, az *f*-bevágások irányába ható ΔF erők is.

Egészen más – a vizsgált témánk szempontjából kiemelkedően jelentős – *a húrlábsíkban a tetőlemezre merőleges irányba ható* ΔF *erőknek* a húrláb molekuláira gyakorolt hatása. Mivel ezek a ΔF erőlökések a részecskékre nyomóerőhatást fejtenek ki és a molekulák között taszító erőhatás

formájában továbbadódnak, közvetlenül elérik a tetőlemezt. Ha a hullámelmélet definíciója szerint fogalmazunk, azt mondhatjuk, hogy a pulzáló nyomóerők a húrlábban nyomóhullámokat (*longitudinális hullámokat*) keltenek. (113. ábra)



113. ábra

Triviális példával illusztrálva úgy működik ez, mintha egyik végével a padlóra állított lécdarab felső, szabad végére ráütünk. Tapasztaljuk, hogy az ütésből fellépő erőlökés a léc alsó végén átadódik a vele érintkező járólapra. Eközben a léc anyagának molekulái között ugyanúgy változik a konstelláció (sűrűsödés-ritkulás), benne nyomóhullám képződik, és a molekulák közötti erők továbbítják az ütésből keletkezett külső erőt, vagyis a hullámok energiát szállítanak, továbbítanak.

S most érkeztünk el fejtegetésünk lényegi részéhez. A húrláb tehát eredendően a húr rezgése közben képződő nyomóerő-lökéseket közvetít a tetőlemezre. Nincs szükség tehát semmiféle erőhatás-átalakítására, „alkalmassá tételére" miként azt több korábbi tanulmányban olvashatjuk, a húrláb a rezgésből képződő erőhatásokat, rezgéshullámokat módosítás nélkül továbbítja.

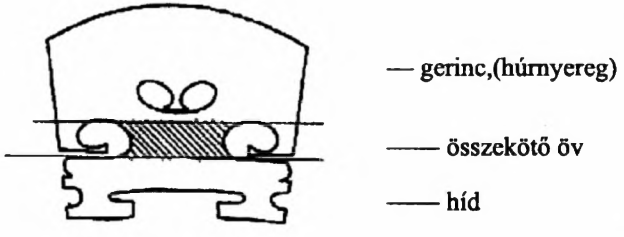
Nézzük meg most azt is, van e tényleges összefüggés a húrláb kialakított formája (ornamentikája) és rendeltetéséből, funkcionális szerepéből – a húrrezgés továbbítása érdekében – szükségszerűen következő alaki, formai jegyei között. A szakirodalomban megoszlanak, sőt keverednek a vélemények e témában. Többen kiemelten a húrláb formájától teszik függővé a húrrezgés tetőlemezre csatolódásának hatékonyságát. Más források a húrlábnak valamiféle alakítható, elérhető képességét, adottságát tartják szükségesnek. Karl Fuhr *A hegedű akusztikai rejtélyei* című könyvében kihangsúlyozza: „A

húrláb maximálisan rugékonnyá és rugalmassá van téve, hogy a húrrezgések teljesebb átvételét teljesítse".[107] Ám ebből nem derül ki, hogy ezt mivel, miként lehet elérni: formai (dekoratív) kialakítással, vagy más egyéb feltételek biztosítása révén (méretezés, anyagra jellemző tulajdonság stb.)?

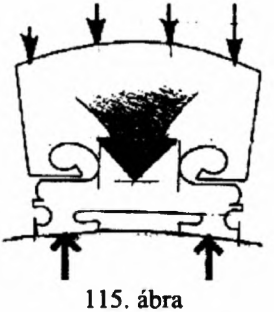
Tárgyilagos szemlélet alapján annyi bizonyos, hogy a húrláb optimális formakonstrukcióját alapvetően szerepéből, rendeltetéséből eredő hatások alakíthatják elsődlegesen, semmiféle díszítőszándék, desing-ra törekvés nem mellőzheti a funkciójából következő megjelenési formát. Nem lehet kizárni azonban e téren a következetesség hiányosságait, esetleg az indíttatás, a prioritás felcserélését. Elemzésünkben is csupán erről van szó, arra keresünk választ, hogy milyen mértékben ismerhetők fel a ma használatos húrláb megjelenésében a rendeltetéséhez kötődő formajellemzők. Vagyis felismerhető-e, hogy egyértelműen szerepe, funkciója alapján nyerte el jól ismert dekoratív alakját, vagy inkább az eszmei-alkotói díszítő szándék motiválta markánsabban kialakult formáját. Ne menjünk bele ennek, (különben is az esztétikába tartozó, a tartalom és forma egységét elemző kérdéscsoport) részletezésébe, maradjunk a technikai jellegű összefüggések vizsgálata körében. Amiért mégis meg kellett említeni ezt a problémát, az abból a megfigyelésből fakad, hogy a hegedűláb mai gyakorlati alkalmazása során is szembetűnő ellentmondások jelentkeznek. Vizsgáljuk meg ezt a már eddigiekben is alkalmazott analóg módszerrel.

Könnyedén felismerhető a díszítésnek tűnő, játékos formaelemekkel ékített húrlábak tagoltsága. Valamennyi – szinte kivétel nélkül, kortól és alkotójától függetlenül – három önálló, sajátos funkcióval rendelkező részegységre bontható. Ezek:

1) a húrnyeregként funkcionáló felső *gerinc*
2) az összekötő középső *öv*
3) és az alsó, a húrtalpakat összekötő *híd* szakasz (114. ábra).



114. ábra



115. ábra

A felső gerinc elem a húrok statikai-mechanikai kapcsolódását és a húrok közötti közvetlen rezgésátvitelt biztosítja. A gerinc elem és az alsó, talpakat összefogó híd között elhelyezkedő öv az áthaladó erőhatásokat tömöríti a híd középső szakaszára (115. ábra). Az ábra szemléletesen érzékelteti a húrokban képződő erők híd-részre jutó együttes eredőjének és a talpakon képződő támaszerők hatásvonalának térbeni helyzetét. Ennek jelentősége a vizsgált összefüggések szempontjából meghatározó. Erőtani hasonlattal könnyen követhető. Vizsgáljuk meg egy, két végén alátámasztott, hosszának középső szakaszában megterhelt tartórúdban, gerendában kialakuló erőhatásokat. A terhelés következtében a gerenda lehajlik. Keresztmetszetének a terhelő erők felőli felső részében szálai rövidülnek, molekulái egymáshoz közelebb kerülnek, közöttük taszítóerő lép fel. Ugyanakkor a tartó alsó szálai megnyúlnak, molekulái távolodnak egymástól és közöttük vonzerő-növekedés képződik.

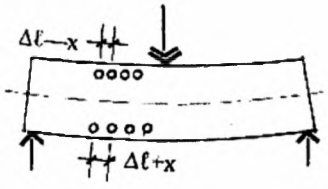
Ha most összehasonlítjuk a tartó és a hegedűláb hídelemét analóg viszony segítségével magyarázatot kapunk a húrláb formája és a mechanikai rezgés továbbjutása között rejlő kapcsolatra. A gerenda lehajlása során a molekulák között képződő erők (*belső erők)* és a külső (*terhelő- és a támasz-)* erők között erőegyensúly helyzet alakul ki. Ha változik a terhelőerő, ugyan olyan mértékben növekednek, vagy csökkennek a támaszerők. Az anyag molekuláinak helyzeti konstellációja – közelebb, távolabbra kerülése egymástól – vagyis a lehajló gerenda szélső szálainak hosszváltozása, megnyúlása, rövidülése szorosan összefügg a külső erők nagyságával és hatásvonaluk egymástól való távolságával, a gerenda hosszával és anyagának fizikai jellemzőivel. Minél erőteljesebb a lehajlás annál nagyobb a gerenda hajlítás irányába eső oldalán a molekulák közötti távolság növekedése, és ezzel egy időben a gerenda alsó szálainak megnyúlása. Miközben az ellentétes oldalon a molekulák egymáshoz közelebb kényszerülnek, a felső szálak megrövidülnek.

A molekulák egymáshoz viszonyított helyzetének változását, gyakorlatiasabban fogalmazva a megnyúlást, rövidülést, vagyis a (Δl) *hosszváltozást* a

$$\Delta l = \frac{F \cdot l}{E \cdot A}$$

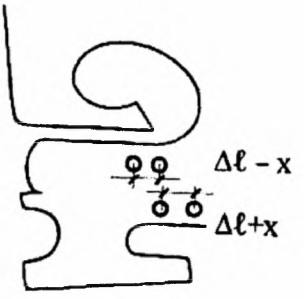
összefüggés érzékelteti (ahol F = a hosszváltozást előidéző erő, l = az eredeti hosszméret, E = az anyag rugalmassági együtthatója, A = a tartó keresztmetszetének felülete).

A húrlábra jutó ΔF erők hatására kialakuló s a húrláb hídelemén képződő molekulák közötti helyzetváltozás – a híd felső „szálaiban" fellépő tömörülés (rövidülés), alsó szakaszán a ritkulás, (megnyúlás) – az „l" hosszának megváltoztatásával befolyásolható. A húrláb középső, összekötő övrész szélességi méretének változtatása révén növelni, vagy csökkenteni lehet a húrláb „rugalmasságát", a rajta áthaladó ΔF erőlökések, mechanikai hullámok tetőlemezhez csatolódását. (116. ábra)



a molekulák tömörödése

a molekulák ritkulása



116. ábra

Minden szilárd anyag rendelkezik molekulái között eredendően érvényesülő erőhatások (kötési erő, molekulák közötti kölcsönhatás) következtében bizonyos fokú „rugalmassággal". Ez nem más, mint a molekulák egymáshoz viszonyított távolságának változását előidéző erő hatása. Az a erő, amely a molekulákat kimozdítja egyensúlyi helyzetükből és közöttük a lehetséges „legkisebb távolság" kialakulását kényszeríti ki. (Gondoljunk a már említett lécdarabra, részecskéinek tömörödése az azonos hatásvonalban érő ütésből adódó erőt „rugalmasan" adja át felfekvési pontján. Gyakran alkalmazzák is, amikor „tompítani" akarják az ütésből eredő, munkadarabra jutó hatást). Ezt a „rugalmasságot" a külső-belső erőhatások közötti egyensúlyi helyzetre törekvés hozza létre. Ám egy szerkezet rugalmasságát a reá ható és a benne keletkező erők ismeretében méreteinek alakításával, megválasztásával befolyásolni lehet.

Levonható az a következtetés, hogy a húrláb középső összekötő öv része és a talpak tengelyvonala közötti távolság mértéke, nagysága érzékenyen befolyásolja a húrlábon áthaladó erőhatások tetőlemezre csatolódásának jellemzőit. Tehát igazolható a mai, korszerű ismeretekkel, amit a korábbi tanulmányok általánosságban hangsúlyoztak a húrláb rugalmasságáról.

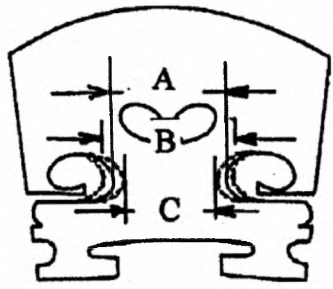
Ez a felismerés azonban újabb dilemmát is ébreszt. Ha a húrláb rugalmasságának a mechanikai erőhatások transzportálásában jelentős szerepe van – és amit már jó ideje ismételget a szakirodalom –, miért nem adaptálta, miért nem élt vele a hegedűépítés? Megszokott, hogy standard húrlábakat alkalmaznak új és öreg hangszerekre, függetlenül a hangszertest mechanikai rezgésképességének érzékelhető jellemzőitől. Pedig ez az adottság még az új, nemrég épült hangszerek, de ugyanúgy az öreg hegedűk esetében sem egységes. A nyersebb hangzású rezgéstulajdonsággal rendelkező hangszerekre – az előbbiekben megismert összefüggések miatt – előnyösebb a nagyobb rugalmassággal kialakított húrláb. Egyszerűen annak érdekében, hogy a húrrezgésből adódó erőimpulzusok közvetlen hatását lágyítsa (puhítsa), a hangszertestben létrejövő rezgések „érdességét" tompítsa. Ugyanúgy hátrányos a merev, nagyon alacsony, kicsiny rugalmassággal rendelkező húrláb használata érzékeny rezgéstulajdonságú hangszer esetében, mert a húrok mechanikai rezgéséből képződő erőimpulzusok továbbítása csaknem közvetlen „kemény" csatolással jut a tetőlemezre, s ez csökkenti a hangszer – már létező kifinomult – hangzásbeli adottságainak érvényesülését. Mindemellett zavaróan hat, hogy csillapítás nélkül közvetíti a húrrezgéssel együtt kialakuló kedvezőtlen hangjárulékokat is (vonósúrlódás, vonókoppanás stb.).

Végül is a húrlábat adaptálni lehet csakúgy, mint a hangszer más elemét. Ez egyszerűen a középső öv-rész szélességének csökkentésével vagy növelésével érhető el s így a hangszer adottságaihoz alkalmazkodó, húrláb alakítható ki. Az összekötő öv szélességi méretének megválasztásával növekszik, vagy csökken, hosszabb, vagy rövidebb lesz a lehajlásban szerepet játszó „hídszakasz". Ennek jelentősége az előzőekben vizsgált, – lehajlás közben elemzett – tartórúdban kialakult belső erőviszonyokkal összehasonlítva érzékelhető. Láttuk, minél nagyobb a lehajló gerenda hossza (ℓ) annál nagyobb az anyag részecskéi között a molekuláris erők differenciálódása. Ugyanúgy a húrlábtalp és az öv közötti méret megválasztásával befolyásolni lehet a húrlábtesten áthaladó erőlökéseket – a mechanikai rezgést –, s ennek függvényében rugalmasabb, vagy merevebb hatással jutnak a tetőlemezre. Gyakorlatias szemlélettel fogalmazva: a talpakat összekötő hídelemek méretének (inerciáját növelő magassági méretének), megváltoztatásával a szemek közötti távolság növelésével, vagy csökkentésével érzékenyen befolyásolható a húrlábnak éppen az aktuális igényekhez (az adott hegedűhöz), viszonyított legelőnyösebb képessége (117. ábra).

A általánosan alkalmazott szélesség

B növelt szélesség

C csökkentett szélesség

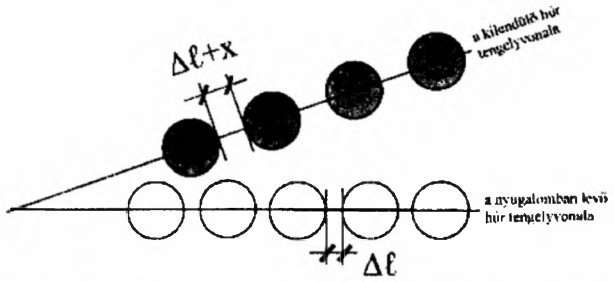


117. ábra

Értelemszerű a húrláb teljes szélessége számos összefüggés, kötöttség miatt nem változtatható (*f*-nyílások közötti távolság, gerenda helyének optimuma, fogólap szélesség stb.) de az öv szélessége a minimális statikai biztonságot nyújtó legkisebb mérettől szinte a talpak belső érintővonaláig terjedhet. Nagysága, – az éppen adott hegedűhöz – adaptálás során a kívánt rugalmasságot eredményező méret alapján határozható meg.

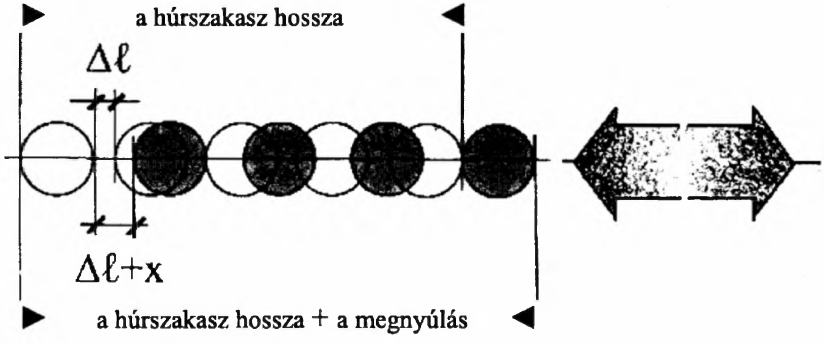
5. A mechanikai rezgések, mechanikai hullámok kialakulása és terjedése a hegedűtestben

Sok helyen hangoztatott axiómaként ismert, hogy a hegedűtest átveszi és felerősíti a húr regését, tovább „színezi", sajátságos hangkarakterrel egészíti ki. (Mindegyik hegedűnek egyedi, sajátos hang-jellemzője van, mint ahogy az emberi hang is egyénenként eltérő). A hegedű rezonátor szerepét kiterjedten elemezték már a hegedű akusztikai kérdéseivel foglalkozó tanulmányok és feltárták a hangszer anyagán belül terjedő mechanikai hullámok jellemzőit. Fizikusok, akusztikusok, hegedűépítők írott munkái nyomán feltárult a hegedű „működése". A klasszikus fizika értelmezése szerint kimutatták a rezgés terjedését, intenzitásának térbeli eloszlását a hangszertest különböző elemein: tetőlemezen, hátlemezen, kávákon, stb. A mai, modern fizikai szemlélet alapján azonban további részkérdések merülnek fel: hogyan is alakul ki a hangszerben a mechanikai rezgés, a különböző erőhatások milyen hanghullámokat indítanak el, s hogyan terjednek ezek a szilárd anyagon belül? Ismert, hogy a húr rezeg, átadja a rezgést a húrlábnak, s az továbbítja a tetőlemezre, de miként? Transzformálja a hanghullámokat, vagy más szerkezeti elem (lélek) közreműködése révén módosítja, alakítja a rezgés intenzitását – ahogyan azt több, korábbi tanulmány készítője feltételezte?



118. ábra

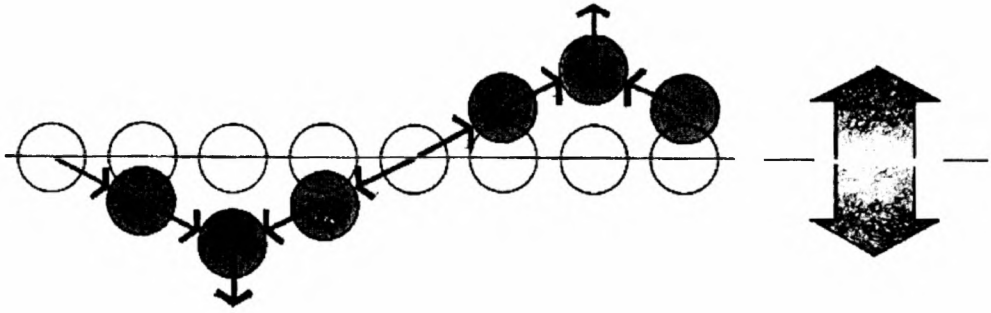
Nézzük meg ezt a modern fizika szemüvegén keresztül. Vizsgáljuk meg először a húrban létrejövő mechanikai rezgés, mechanikai hullám kialakulását. Vegyük szemügyre a húrtengely irányába képződő ΔF erő és a molekuláris erők viszonyát. A mozgásban – rezgésben – lévő húr tengelyvonala a kilendülés mértékétől függően megnyúlik. Ugyanakkor molekuláinak a száma nem változik, ugyanannyi marad, mint a megnyúlás előtt a húr nyugalmi állapotában volt. A kilendített húrban a megnyúlás során a részecskék távolabb kerülnek egymástól, miközben a közöttük ható összetartó erő – vonzerő – kimozdulásuk mértékével arányosan növekszik (118. ábra). A megnyúlás a rezgőmozgás folyamatában a rezgés fázisát követve ismétlődik. A molekulák azonos ritmusban kerülnek közelebb-távolabb egymáshoz, és ugyanígy érvényesül közöttük a húr teljes rezgő szakaszában a vonzerőhatás pulzálása is. A molekuláknak a húr megnyúlásirányával megegyező mozgása, a közöttük lévő vonzerőhatások erősödése, gyengülése egyszerre, egy időben jön létre a rezgő húr valamennyi részecskéje között. Így a molekulák mozgásjelensége nem adódik tovább, nem terjed a húr egyik pontjából a másikba, egységesen azonos erő és mozgás viszony érvényesül valamennyi részecske kapcsolatában. Következésképen a rezgő húrban nem alakul ki hosszanti (a húr tengelyirányával megegyező) irányú mechanikai hullám, csupán nyúlási trend (119. ábra).



119. ábra

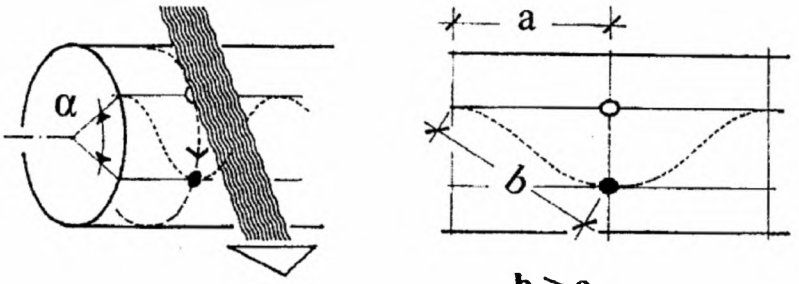
A rezgő húrban a molekulák azonban nemcsak a húr tengelyirányában mozdulnak el, hanem a tengelyre merőleges irányba is. Mivel a rezgő húr tengelyvonala ívet alkot, kilendülő részecskéi eltérő távolságra mozdulnak el nyugalmi helyzetükből. Ennek következtében visszalendülésük során egymástól különböző hosszúságú pályán haladnak, amit azonos idő alatt kell megtenniük. A húr nyugalmi tengelyvonalától legtávolabb lévő, s így hosszabb mozgáspályára kényszerülő molekula indulási sebessége nagyobb, mint a vele szomszédos, de kisebb távolságra kilendülő molekuláé.

A nagyobb távolság megtételére kényszerült s nagyobb sebességgel visszalendülő molekula magával rántja a közvetlen közelében lévő, kisebb kezdő sebességgel induló részecskét. A két molekula között nyíróerőhatás képződik. Ez a jelenség láncszerűen tovább adódik, hullám formájában terjed, s mint *nyíróhullám (transzverzális hullám)* végigfut a húr teljes hosszán (120. ábra).



120. ábra

A rezgő húrban eddig megismert molekulák közötti viszony éppúgy kialakulhat a húr pendítésével, mint vonóhúzással. Mindkét esetben a húr tengelyvonala kitér nyugalmi helyzetéből s molekulák térben, három dimenzióban mozdulnak el egymástól. A vonóhúzás azonban további erőhatás is ébreszt. A vonó tapadása a húrra csavaró hatást gyakorol s az egymással szomszédos metszeti síkban lévő anyagi részecskék között torziós erőhatások lépnek fel. Ez a jelenség a vonóhúzás helyétől kiindulva csökkenő intenzitással ugyan, de a rezgő húr teljes szakaszán *torziós hullámot* indít el (121. ábra).



b > a 121. ábra

Mivel a torziós hullámokban a molekulák a húr hossztengelyére merőleges síkban mozdulnak el, úgy tűnhet, nem keltenek a húrlábban aktív mechanikai rezgéseket. (Legalábbis olyanokat, amelyek a tető- és a hátlemezben transzverzális rezgést gerjesztenének.) Valójában külön elemzés nélkül felismerhető, hogy ez a vélekedés megtévesztő, ha szemügyre vesszük, hogy a torziós hullám terjedése során az eredeti helyzetükből kilendülő molekulák közötti vonzerő növekszik. A vonzerő-növekedés pedig a húrban tengelyirányú erőz hoz létre. Arról viszont már bőven esett szó, hogy a húrban indukálódó pulzáló hosszirányú erő a húrlábon keresztül a tetőlemezben transzverális hullámokat indít el. A húrban képződő feszítőerő-növekedés (ld. 121. ábra: b>a) a húrláb síkjában a tetőlemezre irányuló ΔF erőlökéseket továbbít. Ily módon a húr rezgéséből keletkező, s a húrlábra merőleges ΔF erők, valamint a torziós hullámokból fellépő erőhatások integrálódnak. Végül is a húr rezgéséből képződő hanghullámok kialakulásában – ha szerény mértékben is – a vonóhúzás során a húrban fellépő torziós hullámok is szerephez jutnak.

A húrban keletkező mechanikai hullámok (hullámfajták) részletezése után vizsgáljuk meg a húrlábban kialakuló és továbbterjedő mechanikai hullámokat. A húrban fellépő ΔF erők komponensei a húr és a húrláb érintkezési pontján:

1) a húrláb síkjára merőleges (előre-hátra),
2) a tetőlemezzel – *vezérsíkjával* – párhuzamos oldalirányú (jobbra-balra),
3) a húrlábsíkban a tetőlemezre merőleges irányú erőhatásokat keltenek.

Ezek az egymást követő erőlökések a húrlábban mechanikai rezgést indítanak el. Az erő támadáspontjában a húrláb anyagának molekulái kimozdulnak eredeti helyzetükből, összenyomódnak (közöttük sűrűsödés jön létre) miközben a szomszédos részecskéknek ütköznek. Az ütközéssel

együtt fellépő ellenhatás miatt visszalendülnek, közöttük ritkulás áll be. Az erőlökés következtében a molekulák között kialakuló sűrűsödés-ritkulás nyomóhullám, longitudinális hullám alakjában tovább terjed.

De hogyan jut a húrlábban képződő nyomóhullám (longitudinális hullám) a tetőlemezre, s ott milyen mechanikai hullámtípusokat indít el? A longitudinális hullámban haladó energia, a részecskék mozgásiránya azonos a hullám terjedésének irányával, így a húrláb a lábtalpakkal érintkező tetőlemezre pulzáló ΔF nyomóerőket ad át. Ezek a lemez síkjára merőleges irányú hullámforrásként ható erőlökések kilendítik nyugalmi helyzetükből a tetőlemez húrlábbal érintkező molekuláit. Az erőlökés megszűnésével (a ΔF impulzusirányváltása során) visszalendülnek, és maguk után húzzák a kitérített, a hozzájuk közvetlenül csatolódó molekulákat. Ez a molekulák közötti elmozdulás *nyíróhullámok (transzverzális hullámok)* formájában a tetőlemez minden irányába kiterjed, a hangszertest teljes hosszában, keresztirányban pedig az *f*-bevágások, valamint a káva vonaláig.

Mivel a nyíróhullámok, (transzverzális hullámok) esetében a részecskék mozgásiránya a hullám haladási irányára – a tetőlemez síkjára – merőleges a rezgésből keletkező valamennyi hullámforma közül ennek legnagyobb a hatása a hegedűtest hangsugárzó képességének érvényesülésében.

Teljességre törekvés nélkül még szólni kell a hegedű, (mint hangforrás) és a levegőben kialakuló hanghullám (érzékelhető hang) kapcsolatáról, pontosabban a hangszertestben képződő különböző hullámfajták és a levegőben induló, létrejövő hanghullámok csatolódásáról. Mivel nem tartozik e tanulmány témakörébe a légnemű közegben terjedő hullámjelenségek elemzése és részletezése, ezért áttekintésünket csak a szilárd anyagban tovahaladó mechanikai hullám rezgő részecskéinek és a velük érintkező levegőmolekulák között lehetséges impulzusátadás eseteire, vagyis a levegőben létrejövő hanghullámok keletkezésére, kialakulására korlátozzuk.

A levegőben terjedő hanghullámokról csupán annyit, hogy a rezgő hangszertesttel érintkező levegőmolekulák a rájuk ható impulzus hatására kilendülnek nyugalmi helyzetükből, és a szomszédos molekulákhoz ütköznek. Közöttük átmeneti sűrűsödés jön létre, amit a mozgásimpulzus átadódása után ritkulás vált fel. Így a levegőben nyomóhullám – longitudinális hullám – formájában terjed a hangenergia. Bennünket most pedig a levegőben még csak kezdődő, éppen kialakuló hanghullám és a mechanikai rezgésben lévő hangszertest közötti viszony érdekel.

A levegőben kialakuló hullámrezgés kiindulási pillanatában a légmolekulák úgy lendülnek ki, mozdulnak el amilyen irányú és hatásfokú erőimpulzus éri őket. Ebből az is következtethető, hogy a levegőben létrejövő hanghullámok intenzitása a rezgésben lévő szilárd anyag molekulái és a levegő részecskék között létrejövő érintkezés módjától, az átadódó erőimpulzus hatásirányától függ.

A hegedű hangsugárzó lemezeiben két karakterisztikus rezgéshullám, – hullámfajta – különböztethető meg:

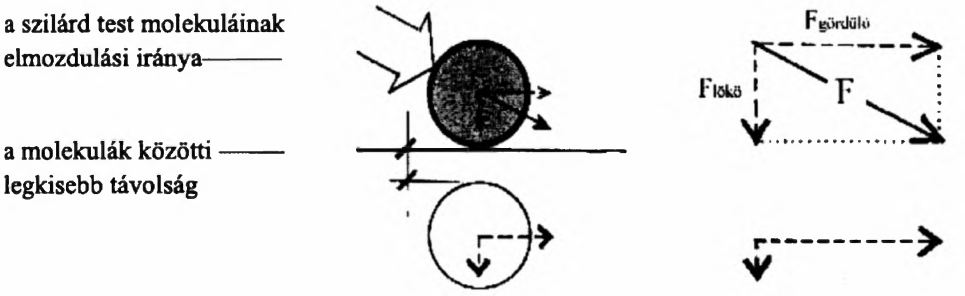
1) nyomóhullám, vagy *longitudinális hullám*
2) nyíró, illetve *transzverzális hullám*.

Nem hagyható azonban említés nélkül, hogy valójában a húr két szélső felfekvési pontján – a felső, illetve az alsó nyergek és a hangszertest érintkezésénél – még egy további úgynevezett *hajlítási hullám* is képződik. Ennek jelentősége a levegőben terjedő hanghullámok kialakulására a hegedű esetében nem számottevő. (Azokon a hangszereken van a hajlítási hullámoknak jelentős szerepe, amelyeken a húrokat közvetlenül a tetőlemezre erősített húrtartóhoz rögzítik, pl. a pengetős hangszerek egy részén: lantokon, gitárokon. Ezekben a hangszerekben a tetőlemezben kialakuló nyíróhullámokat a húrtartó tetőlemez merev kapcsolatából kényszerűen fellépő hajlítási hullámok indítják el).

Vegyük sorra a hegedűtestben képződő hullámtípusoknak a levegőben képződő hanghullámok kialakulására gyakorolt hatását.

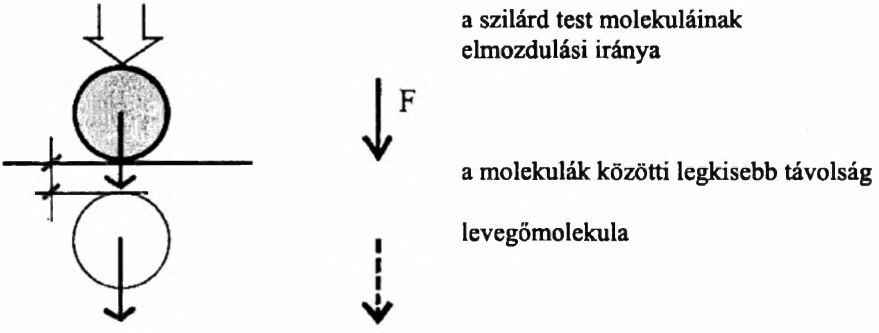
A tető-, illetve a *hátlemezekben* – szabatosabban fogalmazva a lemezek vetületi síkjával megegyező hosszanti irányú – *longitudinális hullámmozgást végző molekulák és a* velük érintkező *levegőmolekulák* között csupán érintőleges csatolódás jön létre. Ha a szilárd anyag molekulái és a légnemű anyag molekulái között az erőimpulzus gördülő érintkezéssel adódik át, a levegőben képződő hanghullámok kialakulására alig gyakorol hatást.

Amikor a longitudinális hullámmozgást végző szilárd anyag molekulája az érintősík mentén a levegőmolekula közelségébe kerül, kialakul a „molekulák közötti legkisebb távolság", s az egymáshoz túl közel kerülő molekulák között a vonzerőt taszító erőhatás váltja fel. Ennek a taszítóerőnek az érintő síkkal megegyező irányú komponense a levegőmolekulát nem kényszeríti elmozdulásra s így nem is képződik hatására hanghullám. Valamivel értékelhetőbb az érintősíkra merőleges irányú taszítóerőkomponens, azonban ez sem elegendő a levegő molekulák között jelentősebb hanghullámok elindítására (122. ábra).



122. ábra

A levegőben tovaterjedő hanghullámok intenzív kialakulását a szilárd anyag molekulái és a levegő molekulái között azonos mozgásirányba eső, közvetlen ütközés indíthatja el. Ha a hangszer hangsugárzó lemezeiben a nyíró-, transzverzális hullámmozgást végző molekula mozgásiránya egybeesik a kimozduló levegőmolekula mozgásirányával, akkor jön létre maximális impulzus átadás (123. ábra).



123. ábra

Minél nagyobb impulzus éri a levegőmolekulákat annál fokozottabb hullámmozgás alakul ki. Nagyobb lesz a hullámok molekulái között fellépő sűrűsödés (taszítóerő), ritkulás (vonzerő-növekedés), hatványozódik a részecskék mozgássebessége, gyorsulása, egyszerűen fogalmazva: intenzívebb hanghullámok képződnek és terjednek a közvetítő levegő közegben.

Utószó

A tanulmány elején szembesültünk azzal a kérdéssel: mit is értünk valójában *húrláb* alatt? Egyszerűen csak a húr alátámasztását szolgáló elemnek tekinthető – ami a hegedű (hegedűcsalád) használatát, a vonó kezelését segíti elő –, vagy e mellett egyéb funkciója is létezik? Nem tűnik erőltetettnek ez a dilemma, mivel vizuálisan csupán annyi érzékelhető, hogy a hegedűláb a húrok egymástól való távolságának megnövelésével elősegíti a vonójátékot, és a láb gerincének íves kialakításával módot nyújt a húrok külön-külön, esetenként a szomszédos húrok egy időben lehetséges megszólaltatására. A tanulmányban részletezett összefüggések azonban túlmutatnak a húrláb látszólagos szerepén.

Elmélkedésünk végén, következtetésként megfogalmazhatjuk, hogy a húrláb a hangszertest mechanikai rezgésének intenzitását befolyásoló, kizárólag akusztikai szerepet betöltő kiegészítő szerkezeti elem. Nélküle működnek húros hangszerek, de hatásukra a hangszer hangzása erőteljesebbé, fokozottabbá válik. Hasonlítsuk össze a jóval nagyobb hangsugárzó, rezgő testfelülettel kialakított gitár és a hozzá képest jelentősen kisebb testű hegedű hangintenzitását. Ennek a közvetlen érzékelhető, s a tapasztalatban evidensnek tűnő ténynek elméleti összefüggéseit kívántuk ebben a tanulmányban feltárni.

V.

A HEGEDŰÉPÍTÉS RÉGI-ÚJ DILEMMÁI

Bevezetés

A hegedű több mint négy évszázad óta az anyagi kultúra része. Az eltelt időszak társadalmi, eszmei, tudati változásai különböző hatást gyakoroltak rá, hol serkentő, máskor ellentmondásos jelenségeket idézve elő.

Rendeltetéséből következik, hogy már kialakulását a megújuló szellemi világ és az élénkülő zenei igény formálta, konstruálta. Mégsem szűkíthető le a hatást gyakorló tényezők köre a korabeli elvárásokra, technikai ismeretekre, a mindenkori alkotók – hegedűépítők – képességeinek, felkészültségének szintjére. Mivel a hegedű egyben műalkotás, s életkorával, a régiség konzekvenciájával is kiegészül, további összefüggések bővítik a hatótényezők összességét.

Tévedés hinni, hogy a hegedűépítés fejlődése során kihasznált minden progresszív hatást, és elhárított minden kialakult akadályt. Ugyanúgy balgaság bízni abban, hogy a hegedű iránt ez ideig megnyilvánult megbecsülés önmagában védelmet biztosít a további általános fejlődésből sarjadó negatív hatásokkal szemben.

A tanulmányban foglalkozunk a korábbi idők, valamint napjaink hegedűépítésére ható külső és belső zavaró tényezők (hiedelmek, tévelygések, áltudományok és az önelvűség jelenségének) némely negatív hatásával. S nem kerülhetők meg napjaink társadalmi, szellemi változásaiból, az eluralkodó fogyasztói szemléletből, a zenei élet technicizálódásából, a termelés globalizációjából leselkedő következmények felbukkanó jelei sem. Bár ezek ma még csak egyes jelenségekben érhetőek tetten, tényleges hatásuk a távlatban válhatnak valójában alakító, formáló erővé, de az élénken szaporodó előjelek szorongást keltenek. A bontakozó felismerés óvatosságra ösztönöz, hogy amit az alkotó emberi szellem e téren létrehozott és évszázadokon át megőrzött, mi több, folyamatosan újrateremtett, azt ne veszélyeztethessék visszafordíthatatlan folyamatok.

1. A klasszikus hegedűépítés kora

1.1. A kialakulás és a tökéletesedés időszaka

A 16. század második felében kialakult hegedűépítést hosszú-hosszú időn keresztül kreativitás jellemezte. Az alkotók nemzedékeken át kitartóan keresték, kutatták a növekvő zenei igényeknek mind jobban megfele-

lő vonós hangszerek építésének – a megújuló esztétikai szemléletet is tükröző – megoldásait. Ösztönözte szándékukat e korszak törekvése a valóság megismerésére, a dolgok között létező összefüggések feltárására. A felhalmozott tapasztalatok alapján épített instrumentumok tökéletesítésére – mint minden más alkotás terén – egyetlen lehetőség állt rendelkezésre: további ismeretszerzés, próbálkozás, kutatás, kísérletezés.

Az újszerű (ma is egyedülálló) hegedűforma kialakításához felhasználható forrást nyújtottak a korabeli vonós hangszerek és az ismert vizuális művészet formavilága. A hangszer hangzásbeli képességének fejlesztése azonban újabb tapasztalatokat, – az alkalmazott anyag jellemzőinek megismerését és a szerkezet kedvező méretviszonyainak felismerését igényelte. Minthogy e három tényező: forma, anyag és szerkezet nem függetleníthetők egymástól, iterációs kölcsönhatásuk megismerése kiterjedt, sokirányú kísérletezést igényelt.

A kialakulás időszakában karakterisztikussá vált a korábbi vonós hangszerektől eltérő *hegedűforma,* és a hangszerépítésben részben már ismert dobozszerkezet adaptálásával a hegedű *formátuma* (nagysága). (*Hegedűforma*: két főnézetben, szimmetriatengelyre szervezett – lendületes ívekkel, ellenívekkel lehatárolt térbeli forma – korpusz – fejben végződő nyúlvánnyal: nyak, kulcsház, csiga. *Szerkezeti rendszer*: két térbeli formált boltozatos lemez – fedő és hát – között, hat ponton – tőkék – összefogott síkban hajlított oldalfalakkal – kávák – kialakított doboztest, hozzá kapcsolódó egy darabból álló nyúlvánnyal – nyak, kulcsház, csiga –. További rögzített szerkezeti elemek, gerenda, fogólap – *applikált kiegészítők*: lélek, láb, húrtartó, kulcsok, gomb és a húrok; formátum: a játékmódhoz viszonyuló méretnagyság). Legszabatosabban a forma jött létre, ezen a későbbi fejlődés sem változtatott, csupán a formarészek jellemzőiben és arányaiban fejlesztett ki jellegzetes megoldásokat. Időtállónak bizonyult a szerkezet alapkonstrukciója mindamellett, hogy a hangzásképesség növelése az egyes szerkezeti elemek méreteinek meghatározása megannyi újabb próbálkozásra, módosítgatásra késztetett. Ezek mellett a formátum – a hangszer nagyságának – kialakítása minden előkép, ismeret és tapasztalat nélküli feladat elé állította az alkotókat.

A hegedű előtti vonós hangszereket „a középkori vonós hangszerekhez hasonlóan függőleges tartásban, térd vagy padlóra támasztva szólaltatták meg. Nem sokkal 1530 előtt jelenik meg a viola da braccio (kar-viola), amely lényegében már azonos a mai utódaival vállra helyezve, csaknem vízszintesen kinyújtott karra fektetve játszottak rajta.[108]

A formátum a játékmód függvénye, ergonómiai vonatkozásai meghatározók. S mivel a hegedűn egészen új játékmód alakult ki, az ebből levonható tapasztalatok is fokozatosan váltak ismertté, formátumalakító erővé. A korábbi időből ismert hegedűk korpuszméretei jelentős eltérésről tanúskodnak. Gasparo da Salo (1537–1609) 35,1–36,4 cm korpuszhosszúságú hegedűket készített.[109] Andrea Amati (1500 v. 1538–1577 v. 1580) és fiai „kis modell" szerint dolgoztak – 35,0–35,3 cm rezonátortestet építettek.[110] Unokája, Nicola Amati (1596–1684) kezdetben apja hegedűméreteit követte, később növelte a korpuszméreteket: 35,4 cm-ről 35,8 cm-re.[111] Paolo Maggini (1580–1632) jelentősen nagyobb formátumú hegedűket épített: hangszereinek korpuszmérete: 36,2–36,6 cm: de szélességük is meghaladja a kortársak hegedűinek méreteit.[112]

A formátumhoz kapcsolódó következmények jelentősen befolyásolták a hangszer megítélését. Niederheitman írja Magginiről: „hangszerei olyan optimumot értek el, amelyet Cremonában sem igen múltak felül... a bresciai iskolát 1700 után még sokáig vezetőként fogadták el az akkori idők virtuózai. Maggini hegedűinek játszhatósága azonban mérete miatt kissé korlátozott".[113]

A formátum alakítására irányuló kísérletezgetés végigkísérte a klasszikus hegedűépítést. Antonio Stradivari változatos, legtöbb esetben 35,55 cm korpuszméreteket alkalmazott, de épített 36,2, 36,35 cm[114], sőt 32,00 (1699) és 33,00 (1734) cm hosszúságú hegedűtesttel is hangszereket.[115]

A hegedű kialakulása kezdetén létrejött hegedűforma és a szerkezet megtartása mellett a barokk stílusszemlélet előretörésével szenvedélyesen élénk kísérletezés erősödött fel. Az invenciózus mesterek már koruk elismerését is elnyerő megoldásaikkal, a formarészek kiérleltebb arányaival, az ívek lendületesebb kialakításával, az *f*-bevágások rajzának finomításával kiemelkedő szintet értek el. Ezzel együtt a minden részletre kiterjedő igényes kidolgozással (sarkok, szegélyek, berakások, a csiga térbeli hatásának fokozása stb.) tovább növekedett a hegedű műalkotás jellege.

A formarészek finomítása mellett a hangzásbeli képesség fejlesztése, a szerkezeti elemek méreteinek (a lemezvastagság, boltozatmagasság) kialakítása további kutatásra, kísérletezésre késztette a hegedűkészítőket.

Az Antonio Stradivarival foglalkozó irodalom tevékenységének négy jellegzetes szakaszát különbözteti meg aszerint, hogy milyen irányú kutatás, kísérlet jellemezte műveit. Munkásságának első szakaszában, 1665 és 1686 között főként mesterét, Nicola Amatit követte, de már megmutatkoztak sajátos, egyéni törekvései: pl. alacsonyabb boltozatok, merészebb ívek

alkalmazása. 1686-tól 1694-ig intenzív kísérletező szakasz ismerhető fel dokumentumokban fennmaradt munkáiban. Boltozatai laposabbak, az *f*-nyílások elegánsabbak, a középső ív terjedelmesebb, mint későbbi alkotásain, a sarkok pedig kiugróbbak. Az egész hangszer nagyobb lett, a csigánál feltűnően erősek.[116] 1693-tól hosszabb korpuszt alkalmazott. Kísérletező törekvése még tevékenységének aranykorában – a legtapasztaltabb alkotó éveiben készült munkáin – is felismerhető. „Körvonalai szélesebbek, boltozatai minden irányban egyenletesek", a tető- és a hátlemezek eltérő vastagsággal készültek, csigái mélyebb kidolgozásúak.[117]

Sacconi, számos Stradivari-hegedű és -rekvizitum kitűnő ismerője írja: „Stradivari akkor sem volt teljesen elégedett, amikor már kiforrott mester volt. Mindig új formákat rajzolt, méreteket és arányokat változtatott meg, hogy még jobb hangzást érjen el, mindezt a korábbi modell feladása nélkül."[118] Ez a tökéletesítésre irányuló szenvedélyes törekvés ismerhető fel Giuseppe Guarneri (Guarnerius del Gesu) (1687–1745) fennmaradt hegedűin is. „Nála semmi sem sematizálható, s ez nemcsak a rész- formajegyeiben fejeződik ki, hanem szerkezeti méretek változatos alkalmazásában is megtalálható".[119]

Külön formaértékeket teremtett Jakob Steiner (1621–1683) tiroli hegedűépítő, aki bár ismerte az olasz vonós hangszerkultúrát, ám attól részben eltérő, sajátos, egyéni formajegyekkel és hangzásbeli eredményekkel gazdagította a hegedűépítést.

A hegedűépítés klasszikus korábban folyó kísérletezés, kutatás jellegében fellelhető a következő évszázadok hegedűépítésében is. Ezek azonban inkább a technikai-technológiai viszonyok gazdagítása terén érvényesültek. A kialakult formajellemzőket a későbbi hegedűépítés átvette, és a modell utáni építőszemlélet alapjának tekintette (Stradivari-, Guarneri del Gesu-, Steiner-modellformák).

1.2. A hegedű térhódítása a zenevilágban

1.2.1. Az „átépítés" időszaka

A formájában és hangzásában kialakult hegedű alig néhány emberöltő alatt magára vonta kora érdeklődését. Mértékadó udvari, egyházi, főúri és a növekvő számú tehetős polgárság körében az új hangszer iránt felerősödött igény serkentően hatott fejlődésére. Szinte szárnyakat adott a művelt világban betöltött szerepének növekedéséhez a 17. század vége felé a barokk

zene kiteljesedése. A hegedűjáték művészei, a zeneszerzők hegedűre írt kompozíciói: hegedűszonáták, hegedűversenyek, zenekari concerto grossóik önálló szerepet teremtettek e zeneszerszám számára.[120] A szólószerep, a virtuóz játékmód új követelményeket támasztott a hangszer hangzásteljesítőképességével szemben.

A zeneművű önálló tolmácsolása – a szólójáték – a hegedűtől nagyobb hangerőt, vivőképességet, hangterjedelmet és gazdagabb hangszínt igényelt. A virtuóz játékmód pedig könnyebb megszólaltathatóságot, gördülékeny játéklehetőséget kívánt. A dominánsabb hangzás érdekében megnövelték a húrok vastagságát, és fémszál bevonattal látták el. Körülfont húrról az első említést 1650 tájáról találta J. H. van der Meer.[121] Valamivel később írja J. Rousseau, francia hegedűművész: „az 1675-ös év körül egy ezüsttel átszőtt húrt helyeztem az althegedűmre".[122] A kialakult szólószerep kiugróbb követelményt támasztott, mint amit a fejlődés intuitív szakaszában az ösztönös kísérletezés produkált. A meglévő hegedűkről „a régi nyakat eldobták, a korpuszra a korábbinál valamivel hosszabb nyakat illesztettek a felső tőkébe süllyesztve".[123] Megnövelték a nyak dőlésszögét, a láb magasságát, a fogólap hosszát és a gerenda méreteit.[124] Ezek a metrikus eltérések formakarakter változást nem okoztak, a korpuszt vizuálisan nem érintették. Az átépített hangszereken megtartották a kulcsházat és a csigát. Szembetűnő módosítást a fogólap meghosszabbítása – és dekoratív kialakításának egyszerűsítése –, oldalnézetben a nyak dőlésszögének megnövelése és a magasabb láb eredményezett.

Valamennyi ez időben történt változtatás zenei indíttatású, a hegedű hangzásteljesítményének növelésére irányult. Ösztönzően hatott a játékmód fejlődése is. „A 17. század vége táján Rómában a harmadik, Nápolyban és Velencében már az ötödik és a hatodik fekvésig jutottak"[125] „A régi fogólap a magasabb fekvésekben való játékhoz már nem volt elég, ezért szintén hosszabbra cserélték" – írja H. van der Meer.

A 18-19. század fordulója táján végbement a szakirodalomban a hegedű „átépítéseként" emlegetett folyamat.[126] Ennek során csaknem valamennyi meglévő hegedűt átépítették. „A régi hegedűk, brácsák és csellók közül csak nagyon kevés maradt ránk eredeti állapotában."[127] Az új vonós hangszereket pedig ettől kezdődően ennek alapján készítették.

Az „átépítés" hosszan elnyúló folyamat során ment végbe, egyes források szerint 1750-től 1840-ig tartott.[128] Feltárásával adós maradt a hegedűirodalom, pedig a hangszer hangzásteljesítményének ez időben elért fejlesztése nem marad el a sokat aposztrofált klasszikus kísérletező periódus

eredményeitől, s mindezt a hegedűépítők az empirikus akusztikai tapasztalataikkal valósították meg. A tevőleges akusztika ezt követően bontakozott ki: F. Savart (1791–1841), H. v. Helmholtz (1821–1894). Nem szükséges bizonygatni, hogy a hegedű „feltalálása" izgalmas kérdés, a hangzás, illetve a hangteljesítmény ilyen fokú fejlesztése „kitalálása" sem elhanyagolható. Ki mit tett, mit valósított meg? Hol és mikor? Milyen sorrendben? (a nyak- és húrhossznövelés, a magasabb láb alkalmazása magától értetődően összefügg. A fogólap hosszának növelése több szakaszban történhetett, a játékba bevont fekvések számának emelkedésével. A gerenda méretének módosítása pedig rapszodikusságot takar (ld. Hill-testvérek közölt gerendaadatait).

1.2.2. A modell utáni építőszemlélet kiterjedése

A hegedű lendületes fejlődése, varázslatos adottságai révén a zeneművészet kedvelőinek, művelőinek körén kívül a hétköznapi zenének is kedvelt, keresett hangszerévé vált. A 18. század első felében ugrásszerűen megnövekedett a kereslet iránta, ami egyrészt a mennyiség növelésére ösztönözte a hegedűépítést, másrészt minőségi differenciálódást indított el. Az egyedi, kézműves alkotóműhelyek számának folyamatos növekedése mellett ipari termelési jelleget öltő, tömeggyártásra berendezkedett hegedűépítő központok alakultak ki (Mittenwald, Markneukirchen, Klingental, Mirecourt stb.). Ezek legfontosabb céljuknak a termelés növelését, olcsó hegedűk előállítását tekintették. „Nem mesterműveket, hanem könnyen megszólaló és szívesen vásárolt, mindennapi használatra alkalmas hangszereket gyártottak, bár Markneukirchenben a tömeggyártás mellett egyedi hangszereket is készítettek". [129]

A manufaktúrákban folyó hegedűgyártás részben a tömegtermelés, részben az egyes munkafolyamat merev elkülönítése miatt nem érte el az egyedi hegedűépítésben már korábban kialakult színvonalat. Mindamellett, hogy az itt folyó termelés az egyéni képességen alapuló kézműves technológiára épült, a hegedűt mint személyhez kötődő egységes műalkotást a személytelenné váló termelő munka keretébe kényszerítette. Mások készítették a csigát-nyakat, mások a hangszertest elemeit, s végül az összeállítást, sőt a lakkozást is külön, szakosodott műhelyekben végezték. Különkülön lehetett bár színvonalas, igényes kivitelezésű mindegyik, ám a mű egysége, a különböző kezek közül kikerült részek formaharmóniája csorbát szenvedett, hiányzott a műalkotásokban meghatározó jelleget nyújtó, személyhez kötődő alkotói karakter tükröződése.

Csaknem ezzel egy időben alakult ki az a nézet, miszerint a hegedű hangkvalitása, hangzásának kiválósága összefügg a hangszer életkorával. A korábban készült, „öreg" hegedűk hangja teljesebb, s velük vonzóbb hanghatás érhető el, mint fiatalabb, főként új hangszerekkel. A hegedűépítés klasszikus időszakában épült hangszerek ez időre már közel százévesek voltak, vagy ennél is magasabb korúak. Ismertségük a zenei élet kiteljesedésével, az előadóművész-virtuózok Európát átfogó körútjain dinamikusan nőtt.[130] A köztudatban és a szakmai megítélésben ösztönösen összekapcsolódott a kiváló hangzásbeli tulajdonság a hangszer életkorával. S ehhez társult a hangszer készítését érzékeltető klasszikus időszak (Amati-, Steiner-, Stradivari-, Guarnerius-hegedűk) ismert formavilága. Alig kétséges, hogy a formajegyeknek a korra utaló hatása bizalomkeltő, marketingelőnyöket sejtet. Újraéledt, pontosabban új tartalomra váltott az elődök ismert formáinak követése, másolása. Elterjedtté vált a legismertebb kiváló „hegedűtípusok" modellezése.

Természetes folyamat, megszokott volt addig is a tanítómester, vagy külön tiszteletet kiváltó korábbi alkotók formamegoldásának követése, alkalmazása.[131] Mindez a nagy elődöktől megszerzett ismeretek közvetlen felhasználásán, a tanítvány–mester viszonyán, az előkép tiszteletén alapult. Noha a manufaktúrákban folyó hegedűépítés is előszeretettel alkalmazta a klasszikus nagy mesterek „modelljét", ám ennek során mester és tanítvány kapcsolat még nyomokban sem fedezhető fel.

Az egyedi alkotótevékenység keretében – még ha szélesebb körűvé is vált a modell utáni építés – mindvégig szabadon érvényesült a mindenkori alkotó sajátos formajegyeinek, konstrukció-részleteinek alkalmazási lehetősége.[132] A modell szerinti építés nem zárta ki az invenciózus alkotás lehetőségét, végeredményben nem másolás, nem másolat![133]

A modell alapján folyó hegedűépítés látszólag szűkíti az egyéni alkotó leleményesség körét, valójában produktív hatást gyakorolt: háttérbe szorította a bizonytalan kísérletezgetést, az ötletszerű kutatást, leszűkítette a szertelenséget, spontán szabályozottságot hozott létre, és egyben elősegítette a hegedű iránt kibontakozó társadalmi megbecsülést, a klasszikus alkotók elismertetettségét.

A modell utáni építőtevékenység végeredményben egyfajta önmegvalósító, értékmegőrző progresszív alkotófolyamat.

2. Zavaró jelenségek a hegedűépítésben

2.1. Hiedelmek, tévelygések

A klasszikus hegedűépítés időszakában készült hangszerek hangzását a későbbi korok ideálisként fogadták el. Ez viszonyítási alapot teremtett a hegedűk hangzásteljesítményének megítéléséhez. A régi és az új hegedűk hangképessége között tapasztalt különbség a zene aktív művelői körében, a hangszerkereskedelemben és a műgyűjtők világában differenciálásra késztetett, a hegedűépítésben pedig hosszú ideig zavart keltett. Érthetetlennek tűnt, hogy a klasszikus forma és konstrukció felhasználásával – modell alapján – a mesterség akkumulált tapasztalatai, erkölcsi normái szerint, kiemelkedő minőségben készült hegedűk hangzásjellemzőit a zenei közvélemény az öreg hegedűk mögé sorolta.

Nyugtalan, lázas kutatásra, keresgélésre, találgatásra adott ez okot. Se szeri, se száma azoknak a kísérletezgetéseknek, elméleti fejtegetéseknek, amelyek az okok feltárására, a miértek megválaszolására irányultak. Hegedűépítők, teoretikusok, a 19. században már fizikusok, régészek is foglalkoztak azzal, minek a következménye a megkerülhetetlennek tűnő jelenség? Mi lehet a tényleges ok: az építéshez felhasznált anyag közötti különbség, az anyag előkezelése (technológiai eltérés), a korábbi alkotók szellemi hagyatékából hiányzó vagy eltitkolt ismeret?

Mivel a legszembetűnőbben a lakk vizuális hatásában, a lakkozásban ismertek fel lényeges eltérést a klasszikus korban készült és az újabb hegedűk között, legkorábban és legkiterjedtebben a lakk szerepének tulajdonították a korábbi hangszerek hangjának sajátosságát. „A hegedűépítés egyetlen kérdését sem vitatták hevesebben, a legmerészebb hipotézisek tárgyává téve, mint a lakkozást, egyik sem szolgált jobban a pénzsóvár és szédítő reklámozásnak, de egyiket sem kutatták olyan komolyan és szorgalmasan, mint a lakk titkát" – írja Karl Fuhr.[134] Kategorikus nézetek láttak napvilágot, tekintélynek tartott szakértők törtek lándzsát a lakk hangzást meghatározó szerepe mellett. Számos irodalmi-hely rögzíti: „a cremonai hegedűk hangzásbeli kiválósága a lakkban rejlik".[135]

A fennmaradt – ismert – korabeli hegedűkből ugyanakkor az a következtetés vonható le, hogy az egykori hegedűépítők nem tulajdonítottak a lakkozásnak a hangszer kvalitását meghatározó (befolyásoló) szerepet. Jó néhányan nem is fordítottak jelentős figyelmet rá. Az azonban aligha kétséges, hogy a lakk körül kibontakozott hiedelem megbolygatta a hegedű-

építés szellemi és anyagi erőit. A misztikus összefüggések vélelme pszichikai és gyakorlati értelemben is bénítóan hatott, kisebbségi érzetet váltott ki (a korábbi hegedűépítő tevékenységgel szemben), csökkentette az önbizalmat és az értelmetlen kutatgatással, erőfeszítéssel időt és energiát vont el a tényleges fejlődéstől. A lakk feltételezett hatását sem a szenvedélyes törekvés, sem a higgadtabb kísérletezgetés nem tudta bizonyítani (eredményének csupán a lakkhoz felhasználható új anyagok és technológiák megismerését tekinthetjük: alapanyag, oldószerek, színezők, kiegészítők).

Több évszázadon keresztül mételyezte és vitte tévútra a hegedű világát a „lakkhipotézis", mire a tudományos ismeretekre épülő elmélet egzakt módon feltárta a lakk tényleges szerepét. A felszított lakkmítoszt végül is az akusztika csendesítette le.

Bár a kezdeti fizikai mérések azt mutatták, hogy a lakkok akusztikai szempontból kimondottan károsak, „csillapítják a rezgést, elhangolják a felhangokat"..., „csak később vált ismertté, hogy homogenizálja a felületek rugalmassági tulajdonságait, csillapítja a fül számára kellemetlen extra magas felhangokat". „Az igaz, hogy egyetlen rossz hangszer sem lesz jó a lakkozástól, de valamelyest javulhat hangjának minősége és a jó hangszert tönkre lehet vele tenni."[136] Védi a hangszert a mechanikai, kémiai, sugárhatásoktól, növeli az esztétikai hatását, kiemeli a fa textúráját, plasztikáját, és ténylegesen csak harmadsorban játszik kisebb szerepet a hang alakulásában.

Az „öreg" hegedűk hangteljesítményének elérésére irányuló kísérletezgetés során a lakk hangzásra gyakorolt hatásának misztifikálása mellett az építéshez felhasznált anyag életkorától remélték a rejtély megoldását. Az új hegedűkhöz öreg templompadokból, lebontott házak, építmények gerendáiból visszanyert faanyag felhasználásával kísérleteztek. A fiatal – hegedűépítésre alkalmasnak tartott fát különböző kezelés alá vetették: hőkezeléssel (füstöléssel, pörköléssel, égetéssel), lúgozással, impregnálással, fürdetéssel, áztatással, gáztelítéssel, felületbevonással, sugárzással (fényhatással) és mechanikai terheléssel (vibrálással, rázással) próbálkoztak fokozni az új hangszerek fizikai teljesítőképességét.

Kiegészítették ezeket a „zavaró repüléseket" az olykor felbukkanó „felfedezések", szerkezeti „újítások" (lélek, láb, gerenda stb.). Otto Möckel *A hegedűépítés művészete* című munkájában, a *Módosító kísérletek a vonós hangszereknél* című fejezetben kritika alá vonja ezeket. Jóhiszeműen írja: „a legtöbb esetben amatőrök vagy fantaszták köréből kerültek ki", ám ugyanitt több szaktekintélyt, ismert hegedűépítőt is felsorol. Az ál lakkideológia és az anyag körüli tévhitek, kísérletezgetések eredménytelensége

az új hegedűknek régies hatást keltő megjelenítését – öregbítését – (gyakran kifejezetten hasonmás készítését) indította el.[137] Ez a jelenség részben téves szemlélet kialakulásához vezetett, részben morális csapdát állított. Az ebből származó valós probléma nem az eredetinek feltüntetett másolat készítésében lappang – az morális kérdés, esetleg jogi eset –, hanem egyszerűen az új hangszer antik hatást keltő kialakításában rejlik. Nem hihető, hogy a régi köntösben megjelentetett hangszertől kizárólag az öreg hegedűkre jellemző hanghatást várták volna el, (nagy valószínűséggel e mögött üzleti érdekek rejtőztek). Még ha kezdetben élt is ilyen remény, az e téren folyó próbálkozások kudarcai, sikertelenségei eloszlatták ezeket. Az alkotói ösztön és a természetes következtető erő egyaránt ellentmond ennek akkor is, ha az addig akkumulált tapasztalat elégtelennek bizonyult, és az új – a tudományokból fakadó – ismeretek pedig még nem álltak rendelkezésre (az akusztika ezt követően bontakozott ki). Egy egyszerű logikai következtetés rávilágít a régi és az új különbözőségére – az új idővel lehet régi – a zöld almát hiába színezik pirosra, nem attól érett.

Ezzel sorra vettük a 18. század hegedűépítésében zavart okozó jelenségeket. Ennyi elég is lenne a teljességhez. Ám később, – sőt napjainkban is – felbukkan olyan nézet, hogy egy-egy kiváló, korai mester hangszeréről készített másolat építésével fejlődik a mesterségbeli tudás, tökéletesedik az alkotókészség.[138]

Nem vitatható a társművészetekben ismert másolatkészítés társadalmi, kulturális jelentősége. Egy-egy kiemelkedő alkotásról készített hű másolat lehetővé teszi az eredeti mű – egy időben több helyen – történő bemutatását, megismerését. A festmény képet formál, eszmei tartalmat, élményt közvetít (értelemmel nehezen követhető) érzelmi hatásokat továbbít. A szobor a valósághoz közelálló, vagy absztrakt térhatásokkal, kompozíciókkal tolmácsolja mindezeket. Ezekről készült – tökéletes – másolat azonos hatás közvetítésére alkalmas.

A hegedű funkciója kettős: egyrészt auditív hatások, zenei effektusok közvetítése, másrészt ezzel párosuló esztétikai szerep: látványának vizuális élmény nyújtása. Ebben a funkciókettőzöttségben rejlik a hegedű másolatok készítésében lappangó csapda. A vizuális tartalom megismételhető. Tökéletesen pontos másolat az eredetivel azonos hatást nyújthat, még az idővel kialakult mechanikai sérülések, kopások nyomai is imitálhatók (legfeljebb az oxidációval együtt járó jelenségek okoznak problémát), a hegedű hangzása azonban nem (még ugyanazon faanyagból, azonos méretezésű, egy időben készült hangszerek sem szólnak egyformán). A meg-

tévesztésig kifinomult pontossággal készült másolat sem képes az eredeti hangszer (korkülönbségtől függetlenül) hangzásbeli jellegét, hangszínét reprodukálni.

A probléma azonban nem csak ebben az egyetlen ellentmondásban rejtőzik. Nemcsak azzal találjuk magunkat szemben, hogy a másolat a hegedű teljességét tekintve nem lehet az eredeti mása, csupán részleges utánzása, hanem emellett hamis illúziókkal terhelt. A kópiakészítés ideológiája szerint a másolatkészítés az eredeti hangszer tökéletes mását igényli: az alkotó mester sajátos forma- és technológiai jegyeit, a későbbi időkben a rajta keletkezett jellemző sajátosságokkal (kopások, karcolások, repedésnyomok, benyomódások stb.).[139] Ha a kópiakészítés egy-egy kiválóság alkotásának reprodukálása, az alkotó tudás növelését szolgálja, miben segít, miféle szakmai ismereteket gyarapít a másolt hangszer használata során keletkezett sérülések, idő marta nyomok másolása? Ezek nem az eredeti hangszer készítőjének keze nyomai, munkájának, képességének készségének jegyei, hanem tőle teljesen független hatások képződményei.

A következtetés egyszerű axióma: a másolat nem képes egy meglévő hegedűnek, mint hangszernek teljes megismétlésére, csupán a vizuális jellemzőinek bemutatására. Az akusztikai képesség nem reprodukálható. Ebből egyértelműen következik, hogy a másolat készítésével legfeljebb az eredeti hangszer alkotójának keze nyomán létrejött, vizuálisan megismételhető értékei képezhetik a szakmai ismeret fejlesztés érdekeit, az avitt jelleg utánzása puszta fikció. Semmi kétség, hogy a hegedűépítőknek színvonalas restaurátori ismeretekre is szüksége van. Ennek megszerzésére aligha alkalmas a másolatkészítés, inkább a felújításra szoruló régi hangszerek javítása alakítja ki az ilyen irányú tapasztalatot (több ismeretet, igényel egy repedés megjavítása, mint annak imitálása).

Az „öregítés", „másolatkészítés", az avittság imitálása a vélt hiedelmek ellenére sem hozott akusztikai eredményt, nem gyakorolt hatást a hegedű hangjára. Továbbra is rejtély maradt az ok, de mindinkább erősödött a meggyőződés, hogy az ideálnak elfogadott hangzás elválaszthatatlan a hegedű életkorától. Csak az a hegedű képes a kívánt hangzást nyújtani, amelyiken életkorából adódóan már sokat játszottak, pontosabban a rendszeres játék következtében éri el a hegedű a várt hanghatást. Ebből egyenes következtetést vont le a kor gondolkodása: a még éretlen hangú hegedűt – főként az újat, vagy amelyiken keveset játszottak – „be kell játszani".

Ludvig Spohr (1784–1859) hegedűművész, a bejátszás elméletének szellemi atyja 1816-ban több, gyűjteményben őrzött Stradivari-hegedűt

szólaltatott meg, amelyeken az ideig tartósan nem játszottak. Beszámolójában azt írja: „A hang telt és erőteljes, azonban új és fahangú, legalább tíz évig kellene játszani rajtuk, hogy kiválóak legyenek.[140] Ezt az elméletet sokan átvették. Csaknem száz évvel később írja Niederheitmann: „bizonyított dolog, hogy a régi vonós hangszer hangtökéletessége nemcsak az öregségének (?), a lakk minőségének, a faanyagok és mindenekelőtt az építési módnak tudható be, hanem ehhez jelentős segítséggel társul a hosszú éves kijátszottság is".[141] Még később Karl Fuhr még konkrétabban fogalmaz: álláspontja szerint „A hang a bejátszással kapja meg az utolsó finom csiszolást, amely könnyebb hangzásban és még nagyobb lágyságban nyilvánul meg."[142]

Napjaink hegedűs világa is követi ezt az elméletet. Vadon Géza a hangszerészek számára írt tankönyvében a bejátszást – „az állandó rezonanciakészség megmaradásának" elérését, a hegedű „fiatalság korának" időigényét 1-2 évben határozza meg (álláspontja szerint „ezután kezdődik a „kijátszás" kora: ez az időszak 50-60 évre tehető).[143] Meggyőződésük hitelességét, véleményük őszinteségét nincs okunk kétségbe vonni. A korszerű tudományos ismeretek alapján azonban ezekkel a nézetekkel – s főként indoklásaikkal – szemben aggályok, kételyek merülnek fel. Tény, hogy a hegedű hangzásjellemzője használata során változik, kiteljesedettebbé válik, ám ezt (mint ok-okozati összefüggést) a rajta történő játék következményének ez ideig nem sikerült elméletben bizonyítani. Fuhr megfogalmazása szerint: „A minduntalan ismétlődő rezgéseknek kitett fa rostjai kedvezően befolyásolják a rugalmasságot úgy, hogy az könnyebben és készségesebben fogja a rezgéseket kelteni. Régi hangszereknél a fa rezgőképességének legkedvezőbb optimumát még túl is lehet lépni"(?)[144] (Ha a rezgések kedvezően hatnának a fa rugalmasságára, illetve rezonáló képességére, játék nélkül, mechanikai rezgés alá vetve, oszcillátor segítségével elérhető lenne. Ilyen kísérletek történtek is.)

Spohr megfigyeléséből kiindulva, miszerint a kiváló adottságokkal rendelkező közel egy évszázaddal korábban készült hegedűk új hegedűkre jellemző hangzást nyújtottak, nemcsak az tekinthető ténynek, hogy azokon nem játszottak, hanem hogy azok nem voltak állandóan használatra készek, felhangoltan (tartósan feszültség alatt), mint azok a hangszerek, amelyeken rendszeresen játszottak.

A modern fizika – legutóbbi évtizedeiben kialakult önálló ága, a reológia – feltárta azokat a folyamatokat, amelyek tartós terhelés, feszültség alatt lévő anyagban végbemennek. A hegedű szerkezetében a felhango-

lás következtében a húrokban keletkező feszítőerő alakváltozást idéz elő, és feszültségeket hoz létre. A terhelést követő alakváltozást időben elhúzódó, úgynevezett lassú alakváltozás, a reológiában kúszásnak nevezett folyamat követi. Ennek során a szerkezet elemi részecskéinek konstellációja megváltozik, a közöttük lévő vonzó-taszító erők relációja a rezgés továbbterjedéséhez előnyösebb pozíciókat hoz létre. A terhelés – a felhangolt állapot – tartós fennállása esetén ez a folyamat a lassú alakváltozás függvényében optimalizálódik. A feszültség megszűnésével az alakváltozás megáll, a szerkezet részecskéi között a kúszás előtti állapot visszarendeződése következik be. Erre enged következtetni az a feljegyzés: „Gyakran megfigyelték, hogy egy valódi itáliai hegedű is elveszítheti régi jó tulajdonságait, még akkor is, ha korábban rendszeresen és sokat játszottak rajta."[145]

A reológia a kúszás következményeit három időszakaszra különíti el. A terhelés kialakulása után viszonylag rövid idő (1–3 hónap) alatt végbemegy az intenzív szakasz: a szerkezet elemi részecskéi között legjelentősebb relációváltozás, a részecskék között legintenzívebb elmozdulás. A további állandó terhelés 5–30 év során kimutatható viszonyokat eredményez. Az ezt követő időszakban oly mértékben lelassul, hogy értékelhető jelenséget nem okoz (lásd *A hegedűgerenda mai szemmel* tanulmány 3.2. *A tartós terhelés és a lassú alakváltozás* című fejezetét).

Nincs közvetlen összefüggés a Spohr levelében megjelölt bejátszási időigény (10 év)[146] és a reológia alapján a terhelés alatt álló szerkezetben 5–30 év alatt még értékelhető változások között. Sőt még az sem bizonyított, hogy a kúszás következtében kialakuló anyagon belüli erő-konstelláció akusztikailag miként hat a hangszer rezonáló képességére, ez az akusztikára vár. A valóság azonban, hogy a bejátszás eddigi elmélete napjaink ismereteivel nem támasztható alá, a reológia pedig egzakt viszonyok mellett lehetőséget kínál az ok és okozati összefüggések felderítésére. (Tisztában vagyok vele, hogy mindez asszociáció – bár tudományos ismeretekre alapozott állítás, bizonyítás nélkül. Az ellenőrzés – kísérleti igazolás, egybevetés – a továbbiakban az akusztika és a reológia együttes feladata.)

Több logikai érv szól az egzakt reológiai összefüggés mellett: „Hosszabb ideig használaton kívüli hegedűkön ismételt használatbavételkor nehéz a játék és csak fokozatosan nyerik vissza a korábbi jó tulajdonságaikat" – írja Niederheitmann.[147] Ez a tapasztalat is arra enged következtetni, hogy a terhelés megszűnését követően visszarendeződő elemi részecskék az előnytelenebb rezonáló képesség érvényesülésének nyitnak utat, s az újból előálló terhelés lehetőséget teremt a részecskék közötti (a rezgésben

kedvezőbb) konstelláció ismételt kialakulásához. Hosszú ideje általános tapasztalat, hogy a „bejátszottnak" tekintett hegedűt jelentősebb szerkezeti elemének (gerendájának) cseréje után ismételten be kell játszani, vagyis az új szerkezeti résznek is csak a lassú alakváltozás hatására alakul ki az előnyös akusztikai képessége.

A felismerhető érvek, a korszerű fizikai ismeretek alapján több mint asszociációnak tekinthető viszonyulások azt erősítik, hogy a hegedűk hangkarakterének előnyös változása nem a „bejátszással", hanem a játékra alkalmas állapotban – felhangoltan –, hosszú időn át tartós feszültség hatása alatt álló hangszerekben jön létre.

2.2. Áltudományok, ellentmondások

A hegedűépítést fejlődése folyamán a 18. században érte a legtöbb konstruktív és retrográd hatás. Egyrészt a hegedű ez időre kiforrott, kedvelt hangszerré vált, s megkezdődött a nagy ívű zenei pályához nélkülözhetetlen korszerűsítés „átépítés" folyamata. Másrészt a korábban készült hegedűk életkorával összefüggő előnyös sajátosságok „titkának" felderítésére irányuló erőlködések kudarcai is kezdtek ismertté válni (lakk, faanyag, preparálás, öregbítés, másolatkészítés) A hegedű részleteiben is kifinomult formáját, formavilágát a közízlés már tökéletes alkotásnak fogadta el.

A tökéletes fogalmához pedig ösztönösen társult, hogy az nem is annyira a szubjektív alkotói intuíció, mint inkább valamiféle rend, szabály, törvényszerűség alapján valósul meg, miként a festészetben a valóság érzékeltetését a perspektíva szabálya, a formák egymásmellettiségét a kompozíció rendje, az építészetben és a szobrászatban a résztömegek egymáshoz viszonyított arányát matematikai, geometriai formulák foglalják össze. A hegedűépítésben olyan elmélet kapott számyra, amely a szabad alkotói intuíció hatására kialakult hegedűformát matematikai- geometriai szabályok közé kívánta kényszeríteni. A páduai Antonio Bagatella (1715– vagy 1755–?) *A vonós hangszerek felépítése* című munkájában fektette le matematikai módszereit. A hegedűtest hosszát 72 egyenlő részre osztotta, s az így nyert részegységgel mint sugárral (R) rajzolt körök, illetve körszakaszok illesztésével szerkesztette meg a hegedű körvonalát. A szerkezet vastagsági méreteit a teljes hosszból arányosan számította ki. Elméleti munkájáért a páduai Akadémia 1783-ban a művészetek számára kitűzött díjjal jutalmazta (1786-ban nyomtatásban is megjelent). Nem tudni, hogy milyen

lehetett a korabeli fogadtatás, az azonban bizonyos, hogy az akusztika ez időben még nem nyújthatott elegendő ismeretet a szerkezeti méretek objektív megítéléséhez (a tudományos alapokon nyugvó akusztika Felix Savarttal (1791–1841) indult). Karl Fuhr – e témával foglalkozva – írja a díjjal kapcsolatban: „A hivatalos értesítőben azonban megjegyezték, hogy az ismertetett szabályok nem nevezhetők tudományos eljárásnak és a hangra gyakorolt befolyásuk túlságosan újak ahhoz, hogy felismerhetők legyenek az összefüggések."[148] Rajta kívül még jó néhányan próbálkoztak matematikai, geometriai módszerek (szerkesztés, aranymetszés, arányszámítás) alkalmazásával a hegedű formai és szerkezeti méretezésének elvét bizonygatni. G. Wettengel, 1828., C. Schulze, 1901., A. Schneider, 1906., A. Beck, 1923., M. Möckel, 1925., H. Kaysers, 1947.[149] Mindegyikükben közös az a vágy, hogy a hangszerek jóságát valamiféle geometriai szerkesztési elvre vezessék vissza" mondja jóhiszeműen Pap János *Tudomány vagy művészet* című tanulmányában.[150] Ezek a későbbi – főként a 20. századi „erőlködések" a fizikai tudományok – az akusztika terén – fellendülő ismeretek mellett már antagonisztikussá váltak. A spekulatív teoretikus törekvések nem vitték előbbre a hegedűépítést, inkább tévútra vezették. S nem kis mértékben gyanakvást, bizalmatlanságot váltottak ki a hegedűépítésben felhasználható – valós és táguló – tudományos ismeretekkel szemben.

Ez időre már fizikusok akusztikai felismerései segítették a hangtan elméleti és gyakorlati problémáinak megismerését: E. F. Chladni (1767–1827), német fizikus pálcák és lemezek rezgéseinek vizsgálatai alapján láthatóvá tette a rezgő lemezek csomópontjait (Chladni-féle ábrák), F. Savart (1791–1841), francia fizikus volt a hegedű-akusztika megalapozója, H. Helmholtz (1821–1894) német fizikus pedig a rezonancia törvényszerűségeit vizsgálta.[151]

A korábbi, általudományok köntösébe bújtatott teória (az anyagtól független, geometriai elvekkel történő akusztikai célú méretmeghatározás) csalódást okozott a hegedűépítésben. Gyanakvást, tartózkodást keltett az új ismeretek felhasználásával szemben és konzerválta a kialakult eredményeket.

Aligha lehet magyarázatot találni másban azokra a jelenségekre, elméletben ellentétes megoldásokra, amelyeket a hegedűépítés a mai napig is „elvarratlanul" visel. Olyan evidens, eltérő eredményt rejtő szerkezeti méretezési módszereket alkalmaz a hegedűépítés, amelyek tételes bizonyítás nélkül is figyelmet keltőek. A bizonyításhoz szokott ismeret pedig ellentétességet fedez fel mögöttük.

Ilyen pl. a tető- és a hátlemezek vastagsági méretezésének egymástól merőben eltérő rendszere. Legáltalánosabban a peremvonaltól a súlypont irányában növekvő vastagsági méretek gyakoriak. Ezzel szemben – nem új keletű megoldás – a horony vonalán, a szélek felé vékonyabbra hagyott, a további részeken egyenlő, vagy csaknem egyenlő lemezvastagság kialakítása.[152] Leszámítva a boltozat hatását sík lemez esetében is azonnal érzékelhető, hogy az anyag egyéb fizikai jellemzői mellett a lemez vastagsági mérete meghatározó a rezgés kialakulásában. Nyomban előbukkanó kérdés: mikor előnyösebb az azonos vastagságú lemez, illetve milyen körülmények között jobb az eltérő lemezvastagság? Bizonyos, hogy nem zárja ki egyik a másikat, hiszen mindkét lemezméretezést még ma is alkalmazza a hegedűépítés. Ha valamiféle érzékeléssel megállapítható összefüggés van az anyag és a lemezméret megválasztása között, az mindenképpen fizikai valóság – mérhető viszony –, ok-okozati kapcsolat.

A másik indoklásra szoruló kérdés: a gerenda szerepének megítélése: statikai vagy akusztikai? Mindkét vélemény létező valóság. Ennél még hangsúlyosabb az alkalmazás módjában, a beillesztésben meglévő szöges ellentétben álló eltérés. Egyik szemlélet szerint a behelyezésre kerülő gerenda végeit „feszítik be" a tetőlemezhez, másik szerint ellentétesen a középső részét. Amíg a végein befeszített gerenda alulról felfelé irányuló nyomóerőt ad át a tetőboltozatra, a középen befeszített gerenda felülről lefelé irányuló erőt képez a tetőlemezre. Egyszerűen ellentétes erőhatást fejtenek ki a rezgő lemezre.[153]

A látszólag „békés egymásmellettiségben" megbúvó ellentétek nem annyira kiforrott, hitelesen bizonyított elvekről tanúskodnak, inkább közömbösséget takarnak. A szakirodalom több helyen sommásan úgy ítéli meg, hogy „a valódi fejlődés tulajdonképpen a 19. század második felében lezárult". Otto Möckel írja: „a mi időnkben épített hegedűk kivitelezésben megegyeznek Stradivari hangszereivel", „csak azt értékelik, aki a saját munkájában a hegedűépítés mestereinek mesterét a legjobban tudja utánozni". Ez igaznak tűnik az empirikus fejlődési szakaszra. Ám ezzel egy időben s főleg ezt követően kialakult tudományos ismeretek – fizika, akusztika, kémia – utat nyitottak a további fejlődés számára, s még inkább a kétes, ellentétekbe torkolódó elmélet és gyakorlat felszámolásához.

A hegedűépítésben még ma sincs „kijátszva" minden. Utaljunk csak a nagyon is szembetűnőre: a hegedű kompozíciója és a szerkezete között fennálló különbségre. A hegedű kompozíciója, formája és szerkezete (a kulcsok elhelyezkedését a gerenda és a lélek helyzetétől eltekintve) szim-

metrikus konstrukció. A húrok ezzel szemben aszimmetrikusan helyezkednek el: tömegük, a bennük fellépő feszítőerők, rezgőmozgásuk jelentősen eltér egymástól. (Az *e*- és az *a*-húrokban fellépő feszítőerő együttesen 166 N, a *d*- és a *g*-húrokban 129 N, ebből következik, hogy az *e*+*a*-húrok 67,93 N, a *g*+*d*-húrok 52,68 N nyomóerőt fejtenek ki a tetőlemezre. Vagyis a hegedűtest jobb oldalán 15,25 N-nal nagyobb terhelést kap a tetőlemez. Az alaprezgésben jelentkező különbség: $e = 659{,}20$ Hr, $a = 440{,}00$ Hr, $d = 297{,}67$ Hr, $g = 196{,}01$ Hr.) Vajon az eltérő feszültség hatásának, a különböző frekvenciáknak kitett tetőlemez egyöntetűen alkalmas-e szimmetrikusan kialakított vastagsággal? Az akusztikai vizsgálatok szerint a mélyebb fahang a vékonyabb – a kisebb vastagságú – lemezek esetében bontakozik ki előnyösebben. Pap János írja: „... a lemez rezgései modulusainak frekvenciái magasodnak, ha hossz- és szélességi méreteit csökkentjük, illetve ha a rezgési csomóvonalakon vékonyítjuk, és mélyülnek, ha a lemezvastagságot a rezgésmaximum helyén csökkentjük"[154]

Ne menjünk ennek részleteibe, nem e tanulmány témája, de valószínűsíthető, hogy gazdagítaná a tapasztalatot olyan kísérleti hangszerek építése és akusztikai vizsgálata, amelyeken a tetőlemez-, gerenda- és a lélekkonstelláció változatlan hagyása mellett az eltérő igénybevételnek előnyösebb (az *e*- és az *a*-húrok felőli oldalon vastagabb, a *d*- és a *g*-húrok felől vékonyabb) lemezvastagsággal készülnének.

2.3. Önelvűség, retrográd jelenségek

A hegedűépítésben a 19. század második felétől látszólagos konszolidáltság alakult ki. Nem kis túlzással kimutatható, hogy bizonyos stagnálás következett be (leszámítva a megújítására irányuló törekvéseket, amelyek nagyrészt negligálva a kialakult formát és szerkezetet, azoktól eltérő megoldásokkal álltak elő). Ezzel egy időben széles körben tágult az aktív, felhasználható új ismeretek köre. A természettudomány különböző ágaiban, a fizikában (azon belül a mechanikában, dinamikában, statikában, akusztikában) és a kémia terén a hegedűépítésben is alkalmazható újabb és újabb ismeretek gazdagították az elméletet és a gyakorlatot. A megrögzött alkotószemlélet azonban lassan oldódott, az újat vonakodva és csak korlátozott keretek között fogadta be.

Meglehet, hogy ez általános jelenség, s a befelé fordultság más szakmai ismeret-területeken is fellelhető, még az elméleti, a tudományterülete-

ken, sőt mi több, napjainkban is. „Egyesek csak azt hajlandók elismerni, hogy a technológia fejlődött, de azt már tagadják, hogy ez szükségképpen a mélyebb, tudományos megismerés következménye, holott teljesen egyértelmű, hogy a természettudományi megismerés egyben mindenféle technológia, gyakorlati alkalmazás alapja is" – írja Beck Mihály akadémikus a tudományok elemzése során mai viszonyainkra.[155]

Bizonyos, hogy az elmélkedésből fakadó ismeretek jó része elvont, s a hegedűépítés gyakorlati síkján, közvetlenül az alkotómunkában szűk felhasználási lehetőséget nyújtanak. Az akusztika mint önálló tudományág közel kétszáz év óta gyarapítja a hangtani ismereteket, ám a mindennapi hegedűépítő munkában az „empirikus akusztikai" tapasztalatok a meghatározóak. „A hangszerakusztika az elégedetleneknek, a kíváncsiaknak, az újat keresőknek, az érteni akaróknak készült"... iránymutató, főként a járatlan utat jelzi. A járhatóhoz tudásunk mai szintjén csak fogódzókat ad..." sommázza Pap János *A hangszerakusztika alapjai* című művében.[156]

Mégis aligha az ismeretanyag szűkössége okozza alkalmazásának visszafogottságát, abból legfeljebb annyi érvényes, hogy korlátozott a gyakorlatban közvetlenül felhasználható módszert nyújtó ismeret. Másik ok nagy valószínűséggel a logisztikai igény: a hiányos technikai feltételek, a műszerezettség alacsony szintje, s nem utolsó sorban az alkalmazáshoz szükséges szakirányú elméleti felkészültség.

Azonban nemcsak az akusztika felhasználásában nyilvánul meg nehézkesség, hanem más a hegedűépítést közvetlenül érintő aktuális tudományos eredményekkel szemben is. Korunkban megújult szemléletre váltott a fizika. A hegedű kiteljesedésének időszakában meghatározó newtoni alapfogalmakat a modern fizika átfogóbban értelmezi. Kialakult a kvantummechanika, ami megvilágította az anyag részecskéinek mozgástörvényeit, s utat nyitott a rezgéshez asszociálható viszonyok felismeréséhez. Új tudományágak fejlődtek ki, új ismeretek tárultak fel: pl. a reológia (a terhelés alatt álló szerkezetben bekövetkező, időben elhúzódó változások hatásának vizsgálata). A teljesen kiforrott, – alkalmazott kutatási – tudományos eredmények is csak transzmisszión keresztül nyújthatnak közvetlen használható ismereteket a hegedűépítésnek. A „közvetítés" hiánya pedig bénítóan hat.

A gond abban rejlik, hogy „a fizika művelői ritkán tévednek olyan területre, amelyek közvetlenül kapcsolatba hozhatók a hegedűk versenyképesebb teljesítményével. A hegedűépítők pedig... egyre inkább a kézműipar elvárásainak megfelelően végzik munkájukat" – írja Erdélyi Sándor *Euró-*

pai hegedűkészítés és a bécsi iskola című munkájában.[157] Ez a megállapítás tárgyszerűen nyilvánvaló, a tényszerűségét – következményeit – tekintve nyomban hangsúlyt nyer az alapvető kérdés: CUI PRODEST? (kinek az érdeke?).

Oka lehet a nyitottság beszűkülésének, hogy a kiváló tulajdonságokat felmutató, klasszikus korban készült hegedűkről a szakmai, szellemi források a „tökéletesség", a „megismételhetetlenség" illúzióját élesztették. „A hegedűépítésben minden változtatással legfeljebb a kísérletek szándékával, de nem az eredményekben gazdagodtunk" – vélekedett Niederheitmann *Cremona* című munkájában.[158] „A berendezésen (szerkezetén) nincs mit javítani" „A hegedű tökéletesen, mint kész műtermék állt előttünk az itáliai hegedűépítő művészet mestermunkáiban, akusztikai vonatkozásban már Gasparo Bertolottinál", írja Otto Möckel *A hegedűépítés művészete* című munkájában.[159]

Ez a sokszor hangsúlyozott nézet ki nem mondottan, de egyben elkerülhetetlenül azt sugallja, hogy ez a szakma kiaknázta a hozzá eljutott – a tapasztalati úton – elérhető lehetőségeket. A mintegy közel négy évszázad alatt megannyi progresszív kísérletezés, produktív kutatás és vélt „felfedezés" után a további lehetőség, a további fejlődés reménytelenül beszűkül. Marad az aktuális alkotói ismeret és az éppen felhasználásra kerülő anyag individuális egybevetése, noha új ismeretek, új tudományterületek, új tudományágak törvényszerű viszonyok kialakulásának felismerésével, új elemekkel tágult a hagyományos ismeret és a technológia arzenálja.

A szűk gyakorlatias szemlélet szférájában élők – esetenként ellenvéleményt sejtető felhanggal – úgy teszik fel a kérdést, hogy a mai elméleti ismeretek (a modern fizika, benne a statika-mechanika, akusztika, reológia) felhasználásával építhetők-e úgymond jobb hangzású hegedűk? Nem vitatható a kérdés jogosultsága. Az ismeretek tágulása megannyi területen igazolta már a progresszív változás lehetőségét, s önmagában fejlődésellenes lenne ennek az egyenesnek tűnő következtetésnek a tagadása. Mivel azonban e tanulmány nem foglalkozik a hang – a hangszerhang – elemzésével, minősítésével, s főleg viszonyításával, csupán az anyag-rezgés (a hangszertestben keltett hanghullámok) hatásfokának növelését elősegítő elméleti összefüggésekre utal, itt annyi fogalmazható meg szabatosan, hogy a modern technikai ismeretek segítségével

- korrigálhatók a hegedűépítés gyakorlatában napjainkban is fellelhető (a hangszertest rezonáló képességének érvényesülésével szemben ellenhatást kiváltó) szerkezeti megoldások,

- tervezhetővé válik a hegedűépítéshez felhasznált anyag rezgőképességének optimális érvényesülése és a hangzásbeli elvárások egzaktabb megközelítése.

Ezek révén a hegedűépítés a hagyománytiszteleten alapuló anyagszerkezet használata mellett felzárkózhat korunk elméleti ismeretvilágához, és növelheti jövőbeli biztonságát a kihívásokkal szemben.

3. A hegedűépítés dilemmája napjainkban

3.1. A programozott, gyári hegedűgyártás kihívásai

Napjaink hegedűépítésében kísértetiesen megismétlődik a közeli századokban lezajlott folyamat, amikor egy időben viaskodott a mesterhegedű-építés és az ipari jellegű hegedűgyártás. A kézműves műhelyek kooperációja révén létrejött manufaktúrák és a későbbi gyári technológiára szervezett hegedűüzemek tömegesen állították elő az egyszerűbb igényeket kielégítő hangszereket. E mellett továbbra is prosperálóan működtek a mesterhegedűket építő önálló alkotóműhelyek.

A korunkra jellemző általános ipari fejlődés között új viszonyok alakultak ki. A robbanásszerűen kibontakozó kibernetikai technológia megteremtette a programozott ipari hegedűgyártás feltételeit. Újra feléledt a hegedűépítés és a hegedűgyártás között korábban létező duális, már-már a rendezettség látszatát keltő egymásmellettiség, amit azzal a vulgáris magyarázattal kísért a közvélemény, hogy az egyedi hegedűépítés művészhangszereket készít, az ipari hegedűgyártás pedig a mennyiségi igényeket elégíti ki. A mai párhuzamos egyidejűség, a kétféle hegedűépítés viszonya azonban merőben más, gyökeresen eltér a korábbitól. A különbség: determináló és kihatását tekintve sorsformáló.

A manufaktúrák korlátozott lehetőséggel rendelkeztek, az addig kialakult kézműves technológiát alkalmazva a munkamegosztásban rejlő előnyöket aknázták ki. A személyhez kötődő tevékenység éppúgy alapját képezte a termelésnek, mint az önálló, egyedi műhelyekben. A hegedűépítés technológiájában a kisebb mechanizálástól eltekintve újat nem hoztak, legfeljebb előmozdították és gyorsították a kézműves hegedűépítés differenciálódását. Elkülönült a vonókészítés, a húrgyártás, s tovább szakosodott műhelyekben készültek az applikációs elemek (fogólap, kulcsok, húrtartó stb.). Az egységet igénylő munkafolyamat külön-külön önálló részfeladatokra bontása azonban szétzilálta a hegedőépítő-tevékenységet, ami végül is (a kész mű, a hegedű és alkotójának kapcsolatát tekintve) az *alkotás* személytelenné válásához vezetett. Az atomizált, laza kapcsolatban álló

termelőhelyek koordinálásának erőtlensége pedig a minőség csökkenését eredményezte, és utat nyitott a legutóbbi időkig vegetáló, lényegében már ipari technológiával működő koncentrált gyári hegedűkészítésnek.

A kibontakozó programozott ipari hegedűgyártás merőben más alapokon nyugszik. Az informatikai eszközök felhasználására épülő termelési folyamat nem támaszkodik manuális erőforrásra. A teljesen mechanizált technológiát programozott komputertechnika, digitalizált rendszer vezérli.

Kihívásai nem korlátozódnak csupán a mennyiségi termelés emelésére és a fajlagos költség csökkentésére, hanem szélesebb sávban érinti és befolyásolja az alkotó – kézműves – hegedűépítést. Potenciális kihatása a tapasztalható, mérhető ugrásszerű minőségjavulásban rejlik (ami nemcsak vizuális, hanem akusztikai tulajdonságában is feltűnik). A legmarkánsabb elemei a programozott gyári hegedűkészítésnek: a minőséget megalapozó *teljes körű műszerezettség* a technológiai folyamatok ellenőrzéséhez (főként az akusztikai mérésekhez), valamint a *műszaki fejlesztésben* rendelkezésre álló lehetőség, a gyártásba bevonható legkorszerűbb tudományos fizikai, kémiai ismeretek adaptálására. E két döntően meghatározó tényező mellett már szinte eltörpül a *kiterjedt kooperációban* rejlő lehetősége: az anyagbeszerzés, a kereskedelem globális kiszélesedése, a késztermék terítése és az értékesítés marketing feltételeinek kézben tartása.

Ezek jó része már nem a prognosztika körébe tartozó jelenségek. Mindennapi tapasztalat a gyári hegedű-kínálat kiszélesedése, már ma is jelen vannak a világ hegedűpiacán kész és félkész hangszerekkel és tartozékokkal. A kínai hegedűgyártásról írja a *Hangszer Világban* Andrásik Remo a 2004-ben megrendezett Music China nemzetközi hangszerkiállítás és vásár kapcsán: „Találkoztam olyan gyártókkal, akik a legkényesebbnek számító területeken igen magas szintű minőséget produkálnak, elképesztő alacsony költségek mellett, ... több ilyen cége is, ... akik az elmúlt években egymás elől nyerik el a nemzetközi hangszerépítő versenyek díját."[160]

A vizuális minőség előretörés már reális valóság, ami mögött ott setteng az akusztikai kvalitás is. A számítógépes integrált termelésvezérléssel készített hangszerek olyan szintet értek el, amely esetenként csekély kézi munka ráfordításával új mesterhangszer benyomását keltik. A Hangszer Világ indokoltan azon kesereg, hogy „a kínai és román hangszerek átdolgozásával – *mesterhangszerek* – készülnek jeles mesterek közreműködésével (újralakkozás, stb.)" Ennek mindössze a műszaki vonatkozását emeljük ki: t. i, hogy csupán kis módosítással, személyhez kötődő formajegyekkel kiegészítve ezek a gyári hangszerek megtévesztően „mesterhegedűnek" tűnnek.[161]

Az ipari technológiával készült (olcsóbb előállítási költséget igénylő) hangszerek minőségének további fokozódása csökkentheti az egyedi hegedűépítés körét. Mivel a koncentrált programozott termelés nem képes javí-

tási munkák ellátására, az ezzel járó összes tevékenység a szoliter hegedűépítő-műhelyekre hárul, amit a fennmaradás érdekében szükségszerűen vállalni kényszerülnek. (Részben más okok közrejátszása miatt Magyarországon már jó egynéhány, kizárólag új hangszerek készítésére orientálódott hegedűkészítő adta fel, és hangszerépítés helyett kizárólag javítással foglalkozik.)

Az egyedi kézműves jellegű hegedűépítés és az ipari tömeggyártás között a tényleges, könyörtelen feszültség a legutóbbi időben alakult ki. Az általános szakmai és társadalmi figyelemmel követett mesterhegedűkészítés kiváltságos helyzetét megborzolta a modern gyári technológia.

A jövő prognosztikai módszerekkel is csak érintőlegesen körvonalazható. Ami biztos, hogy a zene és a hegedűművészet továbbra is igényli a kiváló hangú hangszereket. Szükség van és lesz „mesterhegedűkre", „művészhegedűkre". Az azonban nem szavatolható, hogy ezek a hangszerek a korábbi, egyedileg épített műremekek köréből kerülnek ki, mindinkább a legkorszerűbb ismeretek felhasználásával készült instrumentumok nyerhetnek el előnyösebb társadalmi megítélést – amennyiben ezek követik elődeik kifinomult formavilágát, hangbeli kvalitásuk párosul korunk hangideáljával, a nosztalgia (az antik jelleg iránti ragaszkodás) nem akadályozza meg a kor előretörő önmegvalósítását. S ezzel nemcsak egy nagy múltú szakma sorsa pecsételődik meg, hanem a személyhez kötődő alkotó tevékenység kizárása miatt elvész a hegedű kialakult vizuális értéke, s nem tekinthető tovább művészeti alkotásnak.

Már most több mint felbukkanó tendencia – már valószerű –, hogy a kialakulásától kezdve műalkotásnak tekintett hegedű építése (megalkotása) a modern időnk velejárójaként integrált termelőfolyamattá, marketingtevékenységgé változik. Paradox fintora ez a fejlődés folyamatának, hogy mire az ember (emberiség) képessé válik feltárni és megismerni az önmaga alkotta hegedű minden „rejtélyét", látens összefüggéseit, akkorára aligha nevezhető *alkotásnak*, mindinkább *gyártmánynak*.

3.2. Az egyedi, alkotó hegedűépítés reformlehetőségei

A napjaink hegedűépítésében újból kialakult kettősség – az egyedi műhelyekben folyó tradicionális alkotómunka mellett az előretörő programozott ipari hegedűgyártás – életre keltette a korábbi idők hegedűépítését megosztó, látszólag lehiggadt viszonyát. A formálódó jelenségekből érzékelni lehet, hogy ebben a kettősségben kiéleződik a küzdelem és megnövekszik a tét. Mélyíti a szembenállást az általános fejlődésből kialakuló körülmény, misze-

rint a felmérhető potenciális lehetőségek a programozott ipari termelés keretében integrálódnak. Mégsem ez napjaink legnagyobb, csaknem sorsalakító kihívása az egyedi, hagyományos hegedűépítéssel szemben.

A klasszikus hegedűépítésben ötvöződött a művészi formaalkotó igény (a korszellemnek megfelelő hegedűforma létrehozására) a korabeli technikai ismeretek felhasználásával. Mindkét összetevőt szellemi indíttatás, újszerűt teremteni vágyó alkotói szándék inspirálta. A mai hegedűépítés jórészt kitaposott úton jár, lényegében formában és szerkezetben a kialakuláskori alkotást követi. Azonban különbséget kell tenni a hegedűépítés kezdetén kialakult formához, illetve a korabeli ismeretek alapján megkonstruált szerkezethez viszonyulás között. A forma követése a létrehozó elődök iránti tiszteletből fakad, megőrzése pedig túlmutat a szakmai világ – hegedűépítők, a zeneművelők – körén; kiterjedt társadalmi konszenzus. A történelem egymástól különböző szellemi, művészeti szakaszain átívelő általános köztisztelet pedig egyaránt kötelez hegedűépítőt, hegedűművészt, hangszerkereskedőt, műgyűjtőt, és megóvja az örökölt formavilág szétforgácsolását.

Más azonban a tartalma, vonzata a technikai ismeretek körébe tartozó szerkezethez viszonyulásnak. A klasszikus korban kialakult szerkezet az akkori ismeretvilág, technikai képesség és az éledező természettudomány gyakorlatban követhető felismerése alapján formálódott. Az ember ma már kilépett a világűrbe, átlépte a hang sebességét és betekintett az anyagot alkotó mikrovilág rejtelmeibe. A tapasztalat, az ismerethalmaz, a tudomány új pályákra lépett.

A klasszikus mesterek feltehetően tisztában voltak hangszereik kvalitásával, de nem tudhatták, hogy alkotásaik hangzásbeli képessége később, idővel éri el a kiteljesedést (az időfaktor szerepével az anyag mechanikai tulajdonságaira gyakorolt hatásával a jelekből ítélve még a következő korok hegedűépítői sem lehettek tisztában).

Napjaink ismeretanyaga, a kapcsolódó tématerületek tudományos ismeretei (mechanika, statika, akusztika, reológia, kémia stb.) nemcsak intuitív módon megkonstruált szerkezet igazolására ad lehetőséget, hanem a felismert ellentmondások kiszűrésére, s főként a mindenkor szükséges tudatos tervezéshez, méretezéshez nyújt alapot.

A hegedű kialakulásának idején a hegedűépítőt, a festőt, a szobrászt, az építészt alkotó munkájuk alapján egyaránt „mesternek" tekintették. Később a művészet különböző ágaiban alkotók, illetve a kézműves tevékenységet önállóan művelők „művész" és „mester" megnevezése elkülönült, jóllehet, több különféle kézműves mester munkája kívánt művészi igényességet, is-

mereteket (hangszerkészítők, hegedűépítők, ötvösök, műbútorasztalosok stb.). Ma a művészetek gyakorlóitól: festőktől, szobrászoktól, iparművészektől velük született képességeiken túl széleskörű ismeretanyag megszerzését kívánják meg, munkájukat diploma megszerzéséhez kötik. Képzésük lényegesen meghaladja a hagyományosan értelmezett „kézműves-iparban" tevékenykedőkkel szemben kialakult követelményeket.

A művészképzésben és a konstruktív ismeretek megszerzésében a művészeti és a természettudományi egyetemeken általában öt-hét év tanulmányi idővel számolnak, amit szervezett továbbképzés követhet (felsőfokú tanulmányokra épülő kurzusok, posztgraduális képzés, tanulmányutak stb.). A hegedűépítő hangszerészképzésben középfokú szakképesítés folyik (mindamellett, hogy kiemelkedő műértelmet igénylő karbantartó-restauráló alkotómunkára való felkészítés is részét képezi). Magyarországon a hegedűépítőképzés az érettségi után három év egyedi hangszerépítő-javító műhelyekben napi nyolc óra gyakorlati munka keretében folyik. Elméleti képzést a Liszt Ferenc Zeneművészeti Egyetem Hangszerészképző Szakiskolája nyújt havi három-négy alkalommal, mintegy huszonöt órát kitevő órakeretben (csak viszonyításképp: az olasz, cremonai hegedűkészítő iskola képzési ideje ma már öt év).

Reményt keltő, hogy a budapesti Hangszerészképző Szakiskola 2006. évi felvételi honlapján is megfogalmazást nyert: „...terveink között szerepel egy egyetemi felsőfokú hangszerész szak indítása..."[162]

Az ismeretanyag megsokszorozódása és az informatikai robbanás után evidensnek tűnő kérdés: napjainkban az egyedi alkotó-hegedűépítés előtt álló – az átalakult viszonyok között – elegendő-e, úgy is fogalmazhatnánk: megfelelő-e a meglévő képzési forma?

Válasz helyett nézzük meg a valóság három mozaikját:

1) Az intuitív módon kialakított korabeli hegedűszerkezetben kimutatható ellentmondások húzódnak meg (lemezvastagság, gerenda), ezek felismeréséhez szükséges ismeretek (fizika, akusztika) régóta rendelkezésre állnak. Ennek ellenére a mai hegedűépítésben továbbra is léteznek a szerkezet méretezésében elméleti, logikai ellentmondások. Fennmaradásuk, eltűrésük semmiképpen sem írható a korábbi alkotók számlájára.

2) A modern konstruktív ismeretek kiszélesítik az alkotói mozgásteret. Az anyag sajátos jellemzőinek szabatos *mérésén* túl utat nyitnak az előre meghatározható célok eléréséhez, a *tervezéshez*, a szerkezet állóképességének növelésére (hangszer-statikai ismeretek), a hangzásképesség optimálisabb kihasználására (akusztika, reológia) és az *ellenőrzésre*, a tervszerű-

tudatos alkotói folyamatot elősegítő kontrollra. A hang objektív fizikai valóság, mérhető, viszonyítható. Egzakt jellemzőkkel rendelkezik. Szubjektív megítélése (gyakran ugyanannak a fizikai jelenségnek eltérő értékelése) elmarad a modern konstruktív módszerektől. Ma még a széltében alkalmazott tapasztalatokra épült, szubjektív érzékeléssel folyó eljárások korlátokat állítanak és bénítják a tervezés érvényesülését.

Az egyedi, alkotó hegedűépítés és a programozott integrált hegedűgyártás közötti viszony elemzéséből indultunk ki. Befejezésül – harmadik mozaikként – Gábor Dénes Nobel-díjas mérnök fizikus szavait idézzük: "...a jövőt megjósolni nem lehet, csak feltalálni. A feltaláláshoz pedig, a dolgok megismeréséhez s főként alkalmazásához az ismeretek tömegére van szükség". Az ismeretek láncreakciója felgyorsult, újabb és újabb felismerések sokasága lép be napjaink életébe. Időről-időre megkerülhetetlenül újabb kérdéssel találjuk magunkat szemben. Így az a kérdés is felbukkan, hogy a hangszerész-képzésben kialakult, egyszer megszerezhető ismeret-halmazon kívül, azt követően van-e lehetőség szervezett továbbképzés keretében (a hangsúly a szervezett, emelt szintű, didaktikusan felépített továbbképzésen van) – más, összetett művészeti és műszaki ismereteket igénylő alkotó tevékenységhez hasonlóan – versenyképességet biztosító aktuális ismeretek megszerzésére? A felvetődő dilemmára nem e tanulmány feladata választ adni. A megoldás szükségessége a tárgyalt jelenségekből érzékelhető, régóta érlelődik, a valóság kiélezte, egyszerűen: fel kell „találni" a jövőt.

Utószó

A tanulmány a hegedűépítés fejlődésének keretében vizsgálja azokat a külső-belső tényezőket, amelyek a hangszer kiteljesedése óta zavart keltettek, sőt néhány ma is problémákat okoz. Tévedés lenne azonban ezeket egyöntetűen a hegedűépítés számlájára írni. Szerepe van kialakulásukban, elterjedésükben – esetenként, napjainkig tartó létezésükben – a mindenkori közfelfogásnak, hegedűsöknek, hegedűkereskedőknek, gyűjtőknek, sőt valamelyest a modern ismereteket tágító tudományágak (fizika, kémia) érintőleges művelőinek is.

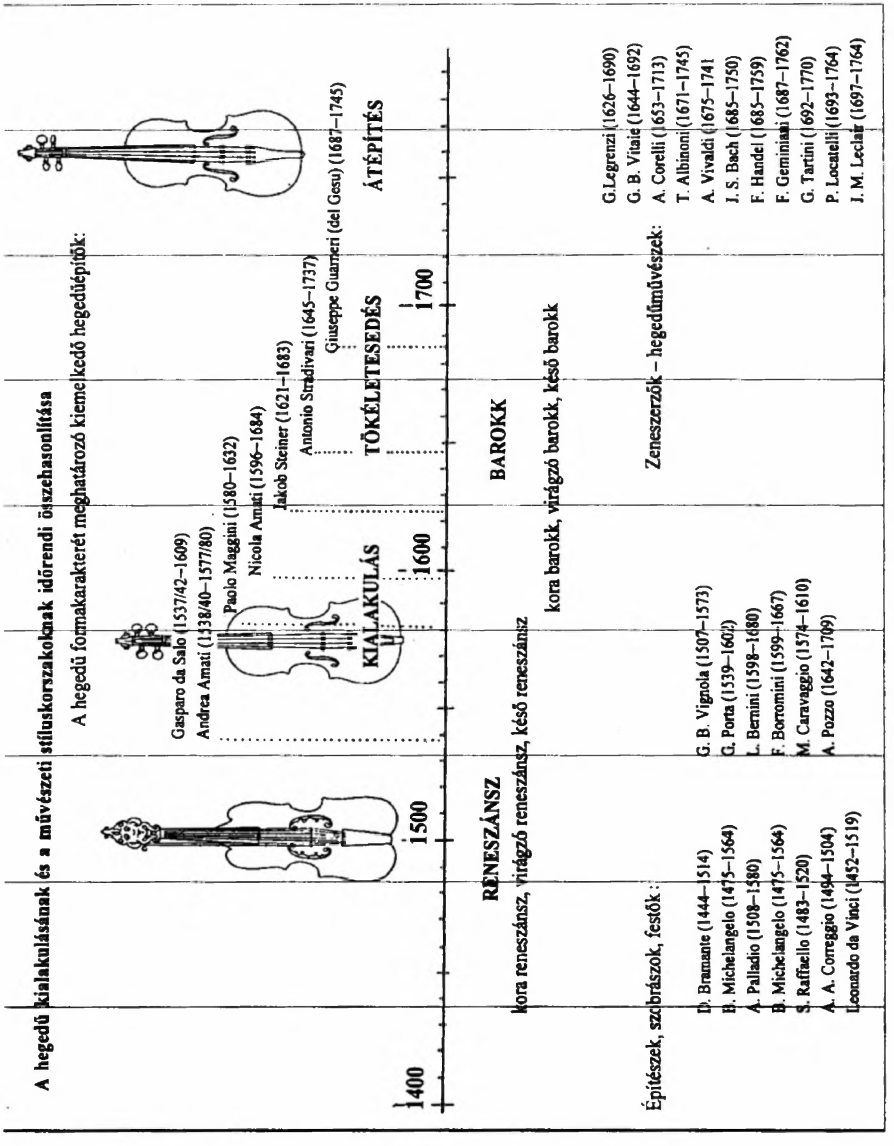
A lakkmisztikum feltupírozása nem a hegedűépítők „találmánya", ma már több mint bizonyosság, hogy tőlük különálló érdekkörök fortélyossága. A bejátszás szükségességét sem a hegedűépítők erőltetik, mint ahogyan a korunkra jellemző természettudományos ismeretekhez viszonyított relatív

lemaradás sem csak konzervativizmusukban kereshető. Nem is szólva napjaink megkerülhetetlen kihívásairól, ami az általános fejlődés próbatételeként kívülről nehezedik e szakmára.

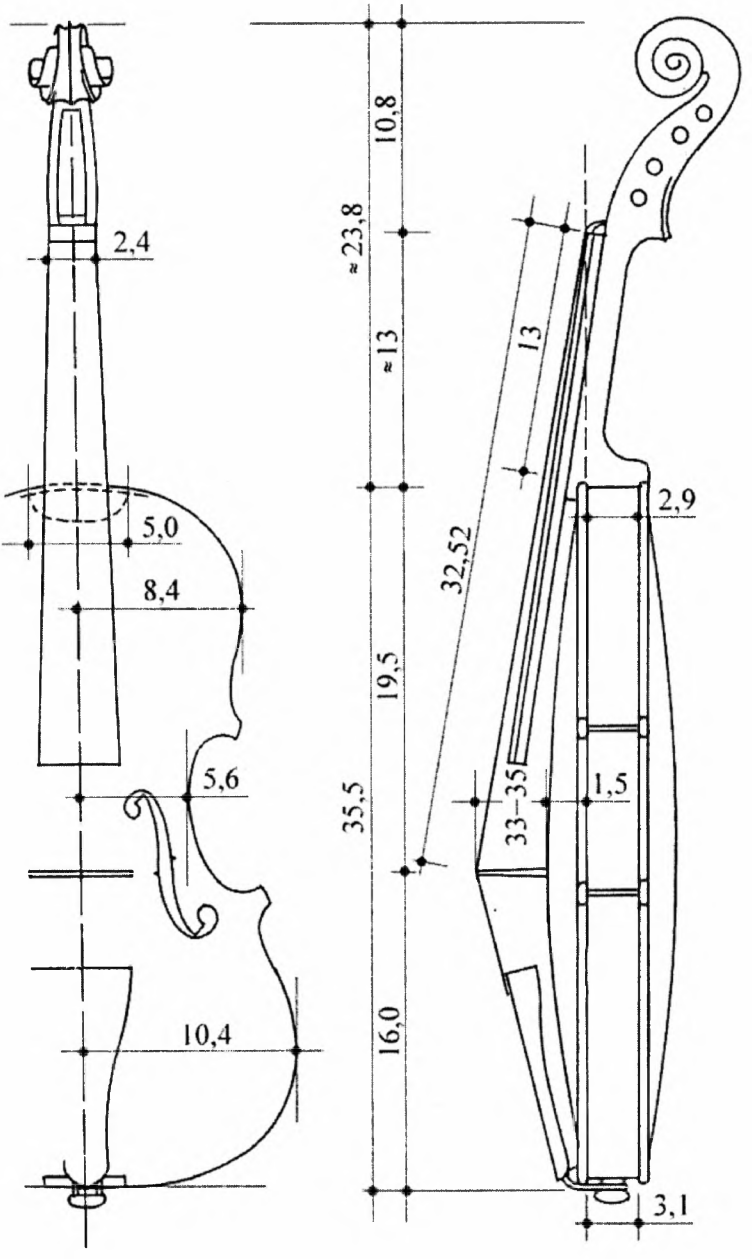
Mindezek ellenére mégsem menthető fel a hagyományos hegedűépítés, mivel a vizsgált jelenségek egy részét önmaga idézte elő (öregbítés), más esetben résztvevőként, társ-szerep terheli (másolatkészítés), és végül érvényesülni enged, „megtűr" visszatartó jelenségeket (elméleti ellentmondásokat). Már csak védelme érdekében sem méltányos semlegesnek tekinteni, mivel a tárgyalt tények következményei látszólag csaknem kivétel nélkül a hegedűépítésre hatnak vissza, valójában pedig közügy. Korunk kihívása „sorsdöntő", nemcsak az egyedi, alkotó-hegedűépítés jövőjének kérdése, hanem végeredményben az egyetemleges kultúra ügye.

MELLÉKLETEK

1. A hegedű kialakulásának és a művészeti stíluskorszakoknak időrendi összehasonlítása



2. A számítások során alkalmazott hegedűméretek



3. A hegedűépítésben használt fafajták átlagos statikai értékei

fafaj megnevezése		Lucfenyő (Picea abies)	Vörösfenyő (Larix decidua)	Juhar (Acer pseudoplatan)	Senegál ébenfa (Dalbergia melanox)	Paliszander (Dalbergia migra)
térfogatsúly N/m^3		4700	5900	6300	12300	8800
szakítószilárdság N/cm^2	II	9000	10700	8200	-	11900
	⊥	270	230	-	-	-
nyomószilárdság N/cm^2	II	4300	4700	4900	7300	6400
	⊥	580	600	-	-	-
hajlítószilárdság N/cm^2		6600	9600	9500	-	10200
nyírószilárdság N/cm^2		670	900	900	-	1750*(II)
csavarószilárdság N/cm^2		900	1300	2600	-	-
hasítási ellenállás N/cm^2	érintő	34	-	160*	-	162
	sugár	25	34	100	-	89
Brinell-keménység N/mm^2	bütü	32	48	62	175	92
	oldal	12	19	27	98	58
rugalmassági modulus (E)* N/cm^2		730 000 1 100 000 2 140 000	630 000 1 380 000 2 000 000	640 000 940 000 1 520 000	-	1 250 000

Megjegyzés: A táblázatban szereplő értékeket dr. Lugosi Armand: *Faipari kézikönyv. Fontosabb európai fajok átlagos szilárdsági értékei, valamint az iparilag hasznosított egzofajták szilárdsági adatai* című táblázat ismerteti. Az egyes fafajták rugalmassági modulusát *(E)* és a *-gal jelzett értékeket Kovács Illés: *Faanyagismeret-tan* című könyve tartalmazza.

4. A tanulmányban alkalmazott statikai alapfogalmak

aktív erő – (külső erő) a szerkezetre ható külső terhelőerők, amelyek valamilyen erőhatást fejtenek ki a szerkezet egyes pontjaira

alakváltozás – a testek külső erő hatására alakváltozást szenvednek. Az erő nagyságától és az anyag tulajdonságaitól függően megváltozik a méretük, térfogatuk, esetenként az alakjuk is (összenyomódnak, megnyúlnak, meghajlanak, elcsavarodnak). Egy szilárd test alakváltozása az anyagra jellemző határig (rugalmassági határ) arányos a testre ható erővel.

anyagjellemzők – olyan mérőszámok – számszerűsített mutatók –, amelyekből az anyagnak a terhelés során bekövetkező viselkedésére lehet következtetni (pl. rugalmassági modulus, szilárdság stb.)

befogás – két test – szerkezet – (befogó és befogott) között kialakított kényszerkapcsolat, amely kizárja, hogy a befogott szerkezet csatlakozó része a másikhoz képest elmozduljon

belső erő (passzív erő) – a testre ható külső erők hatásával szemben az anyagban fellépő erő

csavarófeszültség – csavaróerő hatására az anyag keresztmetszetén ébredő feszültség

csuklós alátámasztás – erő hatásának kitett szerkezet kapcsolata más szerkezettel, amikor a csatlakozási ponton a szerkezetek egymáshoz képest nem tudnak elmozdulni, csupán tengelyük iránya változhat

elemi metszet vagy erő – differenciálisan kicsiny méretű vagy mértékű metszet, illetve erő

eredő (vektor) – az erő nagyságát és irányát vektormennyiségnek nevezzük. Valamilyen lépték arányában nyíllal ábrázolva kapjuk a vektort, más néven az erőt. A vektor többnyire egymásra merőleges alkotókra (komponensekre) bontható. Az alkotók (komponensek) együttes hatása azonos az eredő (vektor) hatásával.

erő – a test állapotában, helyzetében, alakjában változást okozó vagy arra törekvő hatás, amely a testet összenyomja, megnyújtja, hajlítja, nyírja, csavarja. A fizikában a test mozgásváltozásához szükséges tényező:

$$\left(F = kg \cdot \frac{m}{\sec^2}\right)$$

Az erő vektormennyiség, van nagysága (pl. 20 kp, 200 N), hatásvonala (az a vonal, amely mentén az erő hat), iránya (amerre az erő hatása irányul), támadáspontja (az a pont, ahol a testre hat). 1 kp = 9,806 N; 1 kp ≈ 10 N, 1 dyn = 10^{-5} N.

erőpár – két egyenlő nagyságú, nem egy egyenesbe eső, egymással párhuzamos ellentétes irányú, egy síkban ható erők együttese

feszültség – szilárd és rugalmas testekben külső erőhatás reakciójaként fellépő keresztmetszeti felületre ható belső erő és a terület hányadosa, jele: σ, mértékegysége: N/cm^2, N/mm^2.

forgatónyomaték – (nyomaték) egy síkban ható két ellentétes irányú erőnek hatásvonalukon kívül lévő pontra gyakorolt hatása. Forgatónyomatékot képez egy erőpár vagy egyetlen erő egy rajta kívülálló pontra. $M = F \cdot n$ (erő · az erő és a pont közötti távolsággal, az erő karjával).

hajlítás – a keresztmetszet síkjára merőleges síkban működő erőpár – vagy két-két különböző hatásvonalban elhelyezkedő ellentétes irányú erő – által létrehozott igénybevétel

héjszerkezet – sík vagy több irányban hajlított lemezszerkezet, amelynek a vastagsága az oldalirányú méreteihez képest rendkívül kicsiny

húzás – a keresztmetszetre ható húzóerő által létrehozott igénybevétel, aminek során az anyagban az erő irányával párhuzamos szálak megnyúlnak

igénybevétel – a testre, illetve a szerkezetre terhelő külső erők hatása (húzás, nyomás, nyírás, csavarás, hajlítás)

inercianyomaték – tehetetlenségi nyomaték valamely síkidomnak az x, y koordinátarendszer x tengelyére számított másodrendű nyomatéka

koncentrált erő – adott támadáspontban működő meghatározott nagyságú erő

külső erő – a testre, a szerkezetre ható – kialakulását tekintve tőle független erő

lehajlás – hajlítással igénybe vett tartó pontjainak függőleges, illetve a külső erő hatásával ellentétes irányú elmozdulása.

maradandó alakváltozás – a terhelés megszűnése után észlelhető alakváltozás

nyírás – a szerkezet egy adott keresztmetszetén létrejövő feszültségek eredőinek a keresztmetszet síkjába eső alkotói által előidézett igénybevétel

nyomás – olyan igénybevétel, amikor az erő a test részecskéit egymáshoz közelíteni kényszeríti

nyomaték – ld. forgatónyomaték

nyúlás – megnyúlás az összenyomódás ellentéte, erő hatására a test eredeti hosszának megváltozása. Jele $\Delta\lambda$;

$$\Delta\lambda = \frac{F \cdot \lambda}{E \cdot A}.$$

radiális erő (sugárirányú erő) – poláris koordinátarendszerben a rádiuszvektor irányába eső erő

rugalmassági modulus (Young-modulus) – egyszerű húzásra igénybevett anyagban (rúdban, húrban) az arányossági határon belül a feszültség és a fajlagos nyúlás hányadosa.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}.$$

stabilitás – (állékonyság) a szerkezet állapotának jellemzője, olyan körülmény, amelyben a terhelőerők hatására a szerkezet nem mozdul el, illetve az igénybevételnek ellenáll

statika – a testek, szerkezetek nyugalmi állapotával, az erők egyensúlyával, illetve az egyensúly feltételeivel, okaival foglalkozó ismeretek összessége

súlypont – geometriai alakzatokban, síkidomokban, felületeken, testekben ható súlyerők erőközéppontja

szilárdság – valamely test vagy tartó szilárdsága az a feszültségi érték, amelynél, illetve aminek átlépése után az anyagban roncsolódás (szakítás, törés) következik be. Lehet nyomó-, húzó-, hajlító-, nyíró-, csavarószilárdság

szögforgás (szögváltozás) – terhelő erő hatására a tartószerkezet hossztengelyének szögnagysággal kifejezhető eltérése a terhelés előtti helyzetétől, illetve a terhelő erők hatására az anyagon belül elmozduló egy síkban elhelyezkedő részecskék síkjai között fellépő szögeltérés (pl. hajlításra igénybe vett szerkezet keresztmetszeteinek szög változása a terhelőerők hatása alatt).

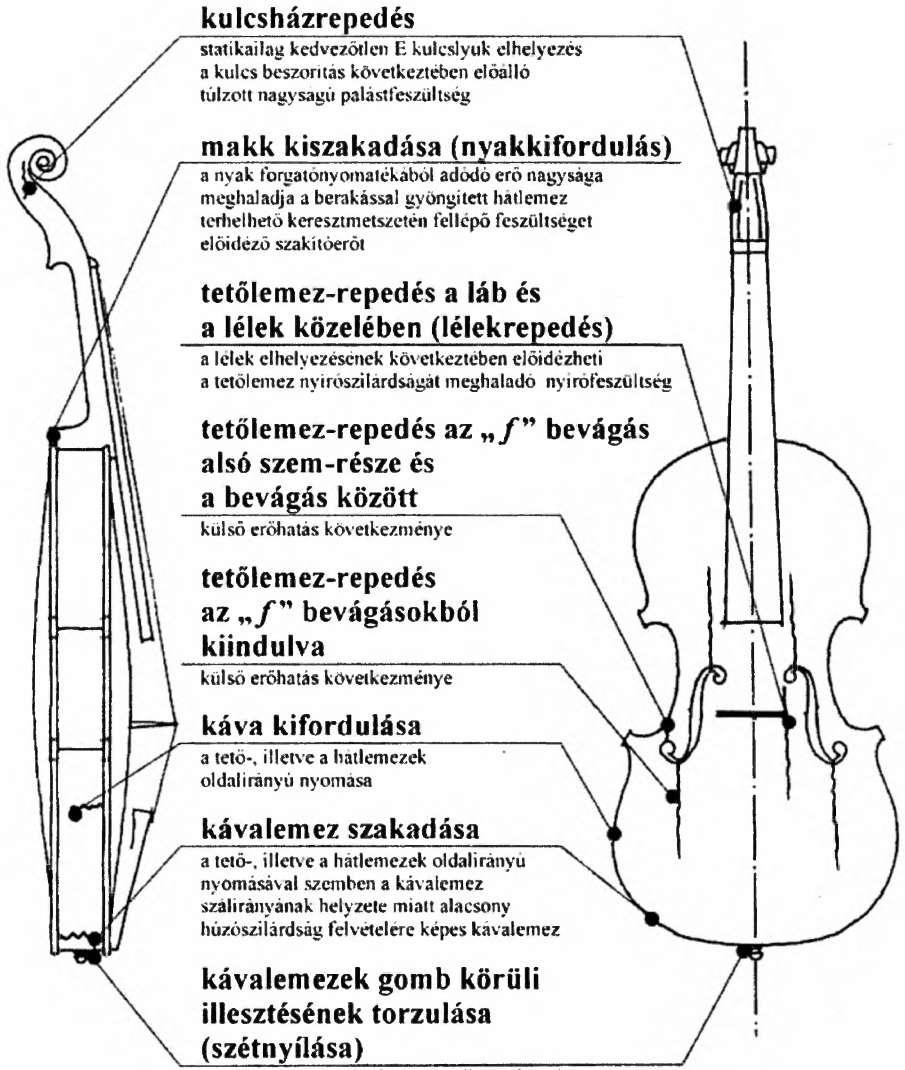
tartó – olyan szerkezet, amely a rá ható erők (terhelőerők) hatására a szilárd testek alakváltozásai folytán létrejövő kisebb mozgásoktól eltekintve helyzetét nem változtatja

támaszerő – a szerkezetre ható külső hatásával szemben fellépő külső erők, amelyek a szerkezet elmozdulását, helyzetének megváltoztatását megakadályozzák

tehetetlenségi nyomaték – ld. inercianyomaték

vektor háromszög (erőháromszög) – a vektor és a vektorkomponensek ábrázolása, illetve a közöttük lévő trigonometrikus összefüggés

5. A belső és a külső erőhatások következtében a hegedűtestben leggyakrabban bekövetkező sérülések és okozói



IRODALOM

Alte Meistergeigen, Band III. und IV. Die Cremoneser Schule, Band V. Die Schule von Neapel, Band VI. Die Schule von Rom, Livorno, Verona, Ferrara, Brescia und Mantua. Verlag-Erwin Bochinsky Musikinstrument, Frankfurt am Main

Apian-Bennewitz, Paul Otto: *Die Geige.* 2. kiadás. Verlag von Bernh. Friedr. Voigt. Leipzig, 1920. Magyar fordítás (*A hegedű*): Vékes József. Budapest, 1989.

Bagatella, Antonio: *Regel zur Verfertigung von Violinen, Violon, Violoncellen und Vioaen.*

Buchaman, George: *The Making of Stringed Instruments.* A Workshop Guides B. T. Batsford Ltd. London, 1989.

Buchner, Alexander: *Geigen verbesserer.* Verlag Das Musikinstrumentum. Frankfurt am Main, 1973.

Cremer, Lothar: *Die Geige aus der Sicht des Physikers.* Göttingen, 1971

Cremer, Lothar: *Physik der Geige.* S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 1981.

Csonka Pál: *Héjszerkezetek.* Akadémiai Kiadó. Budapest, 1981.

Darvas Gábor: *Zenei ABC.* Zeneakadémiai Vállalat. Budapest, 1963.

Ember Ildikó: *Zene a festészetben.* Corvina Kiadó. Budapest, 1984.

Erdélyi Sándor: *A hegedű.* MTA Zenetudományi Intézet. Budapest, 1982.

Farga, Franz: *Geigen und Geiger.* Albert Müller Verlag, Zürich, 1940. Magyar fordítás (*Hegedűk és hegedűsök*): Vékes József. Budapest, 2004.

Feynman, Richard Phillips – Leighton, Robert B. – Sands, Matthew: *Mai fizika.* Budapest, 1970.

Fuhr, Karl: *Die akustischen Rätsel der Geige.* Verlag Carl Merseburger, Leipzig, 1926. Magyar fordítás (*A hegedű akusztikai rejtélyei*): Vékes József. Budapest, 2002.

Gerle Róbert: *A hegedűgyakorlás művészete.* Zeneműkiadó. Budapest, 1987.

Hangszerek Enciklopédiája. *Öt világrész másfél ezer hangszere.* Gemini Kiadó. Budapest, 1996.

The Hermitage. *Room – to room giude.* Aurora Art Publichers. Leningrád, 1979.

Heyde, Herbert: *Musik-instrumentumbau 15–19. Jahrhundert.* Kunst–Handwerk Entwurf, Breitkopf u. Hartel – Wiesbaden

Hidi László: A hegedűépítés problémája. Budapest, 1926.

Hill, W. H. – Hill, A. F. – Hill, A. E: *Antonio Stradivari.* Deutsche Verlags – Anstalt, Stuttgart, 1987.

Hutchins, Carleen Maley: *The Physik of Violins.* Scientific American 1962.

Juracsek Béla: *A magyar hangszerépítő művészet.* Vác, 1921.

Kelényi György: *A barokk művészete.* Budapest, 1985.

Kepes György: *A látás nyelve.* Gondolat Kiadó. Budapest, 1979.

Kolneder, Walter: *Das Buch der Violine.* Atlantis Musikbuch Verlag Ag, Zürich, 1989.

Kovács Illés: *Faanyagismerettan.* Mezőgazdasági Kiadó. Budapest, 1979.

Leonhardt, K.: *Geigenbau und Klangfarbe.* Das Musikinstrument Verlag Frankfurt am Main, 1981.

Lugosi Armand: *Faipari kézikönyv.* Műszaki Könyvkiadó. Budapest

Major Máté: *Építészettörténet.* Műszaki Könyvkiadó. Budapest, 1955.

Maksay László: *Műalkotás, kompozíció.* Stílus. Budapest, 1961.

Meer, John Henry van der: *Musikinstrumente.* München, 1938.

Meer, John Henry van der: *Hangszerek az ókortól napjainkig.* Zeneműkiadó. Budapest, 1988.

Morant, Henry de: *Az iparművészet története a kezdettől napjainkig.* Corvina Kiadó. Budapest, 1976.

Mózes Gyula – Vámos Endre: *Reológia és reometria.* Budapest, 1968.

Möckel, Max: *Die Kunst der Messung im Geigebau.* Berlin, 1935.

Vadon Géza: *Hangszerész (vonós) szakmai ismeret a szakmunkásképző iskolák számára.* Budapest, 1987.

Vajda Emil: *A hegedű.* Győr, 1902.

Vitruvius: *Tíz könyv az építészetről.* Képzőművészeti Kiadó. Budapest, 1988.

Wölfflin, Henrich: *Renesans und Barok.* München, 1888.

Zeyringer, Franz.: *Das Mensurproblem der Viola.* Siegburg, 1975.

A TANULMÁNYOKBAN SZEREPLŐ KÉPEK FORRÁSJEGYZÉKE

1.	ábra:	Alte Meistergeigen, 285. oldal
2.	ábra:	Alte Meistergeigen, 26. és 27. oldal
3.	ábra:	van der Meer 1988, 54. oldal
4.	ábra:	The Hermitage, 121. oldal
5.	ábra:	www.wga.hu
6.	ábra:	www.europeanciticomarketing.com
7.	ábra:	www.affordablecruisestours.com
8.	ábra:	www.wga.hu
9.	ábra:	Pogány, 359. oldal
10.	ábra:	http://en.wikipedia.org/wki/reneasance_architekture
11.	ábra:	www.geocities.com/architecture
12/a	ábra:	www.wga.hu
12/b	ábra:	www.wga.hu
13.	ábra:	Pogány, 389. oldal
17/a	ábra:	Szentkirályi – Détshy, 68. oldal
17/b	ábra:	Vitruvius, 84. oldal
18/a	ábra:	Szentkirályi – Dětshy, 60. oldal
18/b	ábra:	Vitruvius, 85. oldal
19.	ábra:	Műalkotások elemzése a gimnáziumok számára. Tankönyvkiadó. Budapest, 1980. 279. oldal
20.	ábra:	Vitruvius, 136. oldal
21.	ábra:	Vitruvius, 72. oldal
25/a	ábra:	Pogány, 315. oldal
25/b	ábra:	Szentkirályi – Détshy, 385. oldal
26/a	ábra:	www.magyarzenetortenet.hu
26/b	ábra:	a szerző felvétele
27.	ábra:	http://mroe.cmt.hu
28/a	ábra:	Magyar Művészet 1890-1910. Akadémiai Kiadó. Budapest, 1981. 430. oldal. 922. kép
28/b	ábra:	http://fr.wikipedia.org/wiki/Catulle_Mendès
28/c	ábra:	Moholy-Nagy László: Az anyagtól az építészetig. Corvina Kiadó. Budapest, 1968. 110. oldal
28/d	ábra:	www.museumshop.hu
104.	ábra:	van der Meer, 34. oldal
105/a	ábra:	Ember, 22. kép
105/b	ábra:	A világ nagy múzeumai. Bécs, Kunsthistorisches Museum. Corvina Kiadó. Budapest, 1991. 36. oldal

JEGYZETEK

I. A HEGEDŰ FORMAVILÁGA ÉS KIALAKULÁSA

1 van der Meer, 54. oldal

2 Hangszerek Enciklopédiája, 210. oldal

3 Niederheitmann: Cremona. Charakteristik der italienischen Geigenbauer und ihrer Instrumentee. Merseburger. Leipzig, 1928. 170. oldal

4 Karel Jalovec: *Encyklopadie des Geigenbaues. Artia.* Praha, 1963. adatai szerint Gasparo da Salo 1540. május 20-án született és 1609. április 14-én halt meg. A. M. Mucchi könyvének címében is e két dátum szerepel: A. M. Mucchi: *Gasparo da Salo la vita e l'opera 1540-1609.* Milan, 1940. W. L. von Lütgendorff: *Die Geige und Lautenmacher vom Mittelalter bis zu gegenwart.* Frankfurt am Main, 1904. (rev. 6/1922. R 1968.). Gasparo Bertolotti da Salo by Robert E. Andreus, 1953. Berkeley, California

5 A *Lexikon Musik-Instrumente*, Mayers Lexikonverlag Mannheim (Wien) Zürich szerint 1500 körül született és 1579-ben hunyt el. Albert Fuchs: *Taxe Streihinstrumente* születését 1505-1510 közöttre teszi, halálának időpontját 1577. december 24-ére. A *Britannica Hungarica Világenciklopédia*, Magyar Világ Kiadó. Budapest, é.n. adata szerint 1520 körül született és 1578 körül halt meg. Apian-Bennewitz azt írja: „születésének és halálának pontos éve nem ismert, körülbelül 1535 és 1611-re tehető". Farga még azzal egészíti ki, hogy „születésének éve nem ismert, mert korának egyházi anyakönyve tűzeset során megsemmisült. A legtöbb történész 1535-re vezeti vissza, mivel 1611-ben, halálának évében 76 éves volt." (Farga, 52. oldal)

6 Britannica Hungarica Világenciklopédia

7 Lexikon Musik-Instrumente

8 Jalovec

9 O. Möckel

10 ifj. Szemmelweisz Tibor szíves közlése, hivatkozással: Gasparo Bertolotti da Salo By Robert E. Andreas. Copyright London, 1953. Berkley, California – forrásra.

11 *Alte Meistergeigen*, Band V. és VI. 285. oldal

12 ifj. Szemmelweisz Tibor szíves közlése, hivatkozással: The Hill Collection of Musical Intruments int he Ashmolean Museum. London David D. Boyclen, London Oxford University Press, 1969. – forrásra.

13 *Alte Meistergeigen*, Band III. és IV. 28-29. oldal

14 Farga, 53. oldal

15 van der Meer, 80. oldal 126. sz. kép

16 *The Hermitage,* 121. oldal

17 Max von Laune: *A fizika története.* Gondolat Kiadó. Budapest, 1960. 10. oldal

18 Farga, 128. oldal

19 Farga írja: Andrea Amatival összefüggésben: „Akkoriban Velencében a hegedű elkészítéséhez minden nyersanyag beszerezhető volt. A borostyán a Keleti-tenger partvidékéről, a gyanták minden fajtája: az Afrikából és Nyugat-Indiából származó Kopál, a Kelet-Indiai sellak, az Észak-Afrikai Sandarac, a Mastix Smyrnából, Benzol a Sanda-

szigetekről, a terpentin Illiriából. Színezőanyagok: Aloegumi, berzsenyfa, kékfa, sárkányvér Kelet-Indiából, Gumi-Gutti Hátsó-Indiából, Katechu Bombayból..." 54. oldal

20 Itáliai hegedűiskolák: Bresciai isk. 1520-1620. Cremonai isk. 1550-1760. Milánói, Nápolyi iskolák 1680-1800., Firenzei, Bolognai, Római iskolák 1680-1760, Velencei isk. 1690-1764. O. Möckel, Történelmi bevezető XXV. oldal. Ld. még Niederheitmann *Cremona* című művének Italia hegedűiskolái 2. fejezet.

21 A több évszázadon keresztül kolostori és néhány főúri könyvtárban megmaradt kézirat nyomtatásban 1486-ban jelent meg Rómában, amit számos kiadás követett: 1496-ban Firenzében, 1511-ben Velencében Fra Giocondo igényes tipográfiával és 136 fametszetes illusztrációval II. Gyula pápának, a két évvel későbbi kiadást Guliano Medicinek ajánlotta. A 16. század közepén Németországban (1543-as Rivius-féle) és Franciaországban (1547-es Jean Martin-féle) is napvilágot láttak kiadások. A teljes reneszánsz korban kiemelt műnek tekintették. Még a 17. században a francia barokk építészetben is szerepet játszott. A 18. század művészetszemlélete a vitruviusi elveket nem ismerte el általánosan igazolhatónak az ókori görög műemlékek felújuló vizsgálata és a legutóbb felfedezett ismeretek alapján. „A Panthenon nem bizonyította Vitrivius kánonjait, minden dór templomnak mások voltak az arányai" (*A művészetek története. Rokokótól 1900-ig.* Corvina Kiadó. Budapest, 103. oldal)

22 Vitruvius, 71. oldal

23 A középkortól a kései reneszánszig keveredett a számok metafizikus és elvont, absztrahált megítélése. A számok szimbolikus jelentőséggel is rendelkeztek, pl. 3=szentháromság – három dimenzió (hosszúság, szélesség, magasság); 4=evangéliumi szimbólumok – a négy alapelem (tűz, víz, levegő, föld) stb. Az arányosság meghatározásában is kifejeződik: sectio divina-nak, isteni aránynak nevezik. Elvont matematikai értelmezés alapján a 18. század elejétől jelölik – sectio aureának, aranymetszésnek. Heyde, 19, 20. oldal

24 A térhatású ábrázolás – centrális projekció – elvét Filippo Brunelleschi (1377–1446) és Leon Battista Alberti (1404–1470) firenzei építészek megalapozták. Szabatos törvényszerűségeit Albert Dürer /1471–1528) német festő ismerte fel.

25 A korábbi korok alkotásaiban nem érvényesül az eredendő emberi érzelem kifejezésére irányuló törekvés. Az ókori ábrázolásokon jellemző a sematizált, archaikus mosoly. A román és a gótikus művészetben az átszellemült lelkiség hangsúlyozása

26 Szentkirályi, 15. oldal

27 Szentkirályi, 7. oldal

28 A *barokk* szó a latin „verruca"-ból származik. Jelentése: fogyatkozás, kis hiba. Olaszországban a 17. század végén a szélhámosságot, a csalárd ügyletet nevezték baroccónak. A spanyol *barrueco* tisztességtelen üzletet, hibás következtetést jelent, a francia *baroque* szó: félresikerült, különös, meghökkentően szabálytalan fogalmát fejezi ki.

29 Az említésre kerülő formaalkotó-elemek a valóságábrázolásra törekvő képzőművészetben általánosíthatóak. Az elvont, a tárgyi valóságtól elszakadó ábrázolás tágabban értelmezi ezeket. E szerint a „feladat nem a tárgy, s nem is valamilyen érzés megjelenítése, hanem a tömeg, az anyag, az arányok, az alak, az irányok, a helyzetek és a fény viszonylatainak szuverén alakítása." Moholy-Nagy László: *Az anyagtól az építészetig.* Corvina Kiadó. Budapest, é.n. 187. oldal

30 Pogány, 10. oldal

[31] A szimmetria valójában a tömegformára érvényes, a szerkezetre nem, mivel a gerenda és a lélek a konstrukció szimmetriáját megbontja. A kulcsok elhelyezkedése pedig eredendően aszimmetrikus rendszert követ. Hasonlóan csorbát szenved a szimmetria a láb felső ívének kialakításában is.

[32] A zenei elvárásokból fakadó szerkezetet érintő jellegzetességekkel, amely a hegedű formajegyeiben nem okoztak változást (pl. lemezvastagság alakulása) a tanulmány keretében nem foglalkozunk.

[33] van der Meer, 53. oldal

[34] Heyde

[35] A vitruviusi arányábra alapján az emberi test arányai: a talp és a férfitag (a) valamint a váll és a férfitag (b) közötti arány 1,53, a kinyújtott kar + vállszélesség (c), valamint a kar teljes hossza (d) közötti arány 1,68. A könyök és a láb(fej) között – a későbbi korokban mértékegységként is használt „könyök": 45 cm, „láb": 30 cm, arányszám: 1,5.

[36] Sacconi

[37] Szemmelveisz, 11. oldal

[38] Mivel a sarkok lekopottak a berakás eredeti állapotban megmaradt csúcspontjai alapján határoztuk meg az egyes formarészek magassági méreteit.

[39] Matematikában: Leonardo Fibonacci (1180–1250) pisanoi matematikus már rámutatott ezekre az arányokra. A róla elnevezett Fibonacci-féle számsor (1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55...) viszonyításában megtalálhatók ezek az arányeredmények: 3:2=1,5, 5:3=1,66, 8:5=1,60, 13:8=1,62, 21:13=1,61, 34:21=1,62, 55:34=1,62. Mai értelmezés szerint: a nagyobbik rész (a) úgy aránylik a kisebbikhez (b), mint az egész (a+b) a nagyobbikhoz (a): a:b= (a+b):a: a:b=1,6179.

[40] Modern hegedűnek nevezi többek között: Hangszerek enciklopédiája, 211. oldal, Hill – Hill – Hill nyomán Erdélyi Sándor: Európai hegedűépítés és a bécsi iskola. Hangszer Világ V. évf. 3. sz. 1995. 10. oldal, Kolneder, 202. oldal

[41] A modern szó fogalma a *Magyar Értelmező Kéziszótár* szerint: „a legújabb kor szellemi és műszaki fejlettségének, igényeinek, ízlésének megfelelő, korszerű" (Akadémiai Kiadó. Budapest, 1992.). A *Magyar Szókincstár* alapján modern, ami korszerű, mai, mostani, újszerű, korunkbeli (Tisza Könyvkiadó. Budapest, 1998.). A *Britannica Hungarica* szerint: „A modern művészet a vizuális művészetben, a festészetben, szobrászatban, építészetben, grafikában, valamint az ipari formatervezésben a 19. század végén a 20. században jellemző törekvések. A 19. században a francia impresszionizmussal kezdődött."

[42] „einem barocken und einem modernen Geigenhals" Hill – Hill – Hill, 199. oldal

II. A HEGEDŰ ANALÓG STATIKAI ELEMZÉSE

[43] Az elfogadott normál *a*-hang rezgésszáma 1788-ban 409 Hz (párizsi hangolás), 1858-ban a párizsi konferencián hivatalosan elfogadott érték 435 Hz volt, 1939-től nemzetközi megállapodás alapján 440 Hz. Darvas, 9. oldal

[44] O. Möckel

[45] Faipari táblázatok nem adják meg a juharfában (Acer pseudoplatan) a szálirányra merőleges szakítószilárdságot, de a hozzá hasonló térfogatsúlyú szil- (Ulmus scabra), tölgy- (Qvercus robur) és égerfának (Alorus glutinosa) a szállal párhuzamos szakítószilárdságát ismertetik.

	térfogatsúly	párhuzamos szakító-szilárdság	merőleges szakító-szilárdság
szil (hegyi)	6800 N/m^3	8000 N/cm^2	400 N/cm^2
tölgy (kocsányos)	6900 N/m^3	9000 N/cm^2	400 N/cm^2
éger (mézgás)	5400 N/m^3	9400 N/cm^2	300 N/cm^2

[46] Buchaman, 113-115. oldal

[47] Az idevágó szakirodalom a csaknem teljesen párhuzamos szálú lombos fák esetében (szil, tölgy, éger) a szálra merőleges szakítószilárdságot 200–400 N/cm^2 értékben határozza meg. Ez az érték rendszertelen szálirányú fában – hegyi juhar esetében – jelentősen, akár 5%-ára csökkenhet.

[48]

	térfogatsúly N/m^3	nyomó- szilárdság II.	Brinell-keménység N/cm^2	
			oldal	bütü
senegál ébenfa	12300	7300	98	175
afrikai vasfa	10700	9600	90	130
paliszander	8800	6400	56	92

[49] A szakirodalom a μ-t fa és fa között száraz állapotban idegen anyaggal történő felületi kezelés nélkül 0,4–0,6 értékek között határozza meg.

III. A HEGEDŰGERENDA MAI SZEMMEL

[50] Apian-Bennewitz

[51] Szemmelweisz, 11. oldal

[52] Szabolcsi Bence: *A zene története rövid összefoglalásban.* Kultúra Világa. Budapest, 585. oldal

[53] van der Meer (1938) 115. oldal

[54] Sacconi barokk hegedűmásolata Stradivari 1702-ben készített *De Fontana* hegedűjéről

[55] Apian-Bennewitz, 103. oldal: „I Rousseau francia hegedűművész 1687-ben megjelent *Traite de la viole* című könyvében írja: „az 1675-ös év körül az althegedűre egy ezüsttel átszőtt húrt helyeztem fel".

[56] Uo, 104. oldal

[57] A húrokban fellépő feszítőerő nagyságát kp-ban adjuk meg, mivel az 1980-ig megjelenő dokumentumok is ezt használják, és a húrgyártók ismertetőiben a mai napig is kp-ban vagy lb-ben (pound-ban) határozzák meg az egyes húrok jellemző paramétereit.

[58] Szembeötlő, hogy a barokk hegedűn – de még az átépített hegedűn is – az egyes húrokban fellépő feszítőerők nagysága csaknem azonos. Ennek az a magyarázata, hogy ez időben szükségesnek tartották, hogy „a húrok azonos hosszúságúak legyenek és azonos erővel feszüljenek meg...". Apian-Bennewitz, 103. oldal

[59] Fuhr, 54. oldal

[60] Sacconi

[61] Fuhr, 54. oldal

[62] Apian-Bennewitz, 17. oldal: „Franciaországban, Moniteuban 1859. febr. 25-től elrendelték, hogy az egyszer megütött *a*-hangnak 435 rezgést kell egy másodperc alatt felvennie".

[63] Uo, 106. oldal

[64] Niederheitmann, 20. oldal

[65] O. Möckel, 133. oldal

[66] A húrok adatainak rendelkezésemre bocsátásáért köszönetet mondok Adrian Müller technikai igazgatónak (PIRASTRO), az Akkord Music Hangszerkereskedelmi és Szolgáltató Kft.-nek, Bogschütz István hangszerészmesternek, Juharos László úrnak (THOMASTIK) és Szabó Attila cégvezetőnek, a D'Addario magyarországi képviselete vezetőjének.

[67] A fenyőfának a nyomószilárdsága kisebb, mint a szakítószilárdsága, ezért a semleges tengely a szakítószilárdságot viselő belső erők irányába tolódik el. Lucfenyőben a szakítószilárdság 90 N/mm^2, a nyomószilárdság 43 N/mm^2. Számításunk során a semleges tengelyt – az egyszerűség érdekében – a tartólemez középvonalában vettük fel, mert a tényleges szilárdsági értékek nagyságrendileg jóval alacsonyabban, mint a megengedett szilárdsági értékek.

[68] Számításunkhoz a mai fémhúrok húrnyomását (12,00 kp) vettük alapul, szemben a 18. század elején átépített hegedűk 6,91 kp-os húrnyomásával.

[69] Fuhr, 55. oldal

[70] Vadon, 52. oldal

[71] Pap János, 123. oldal

[72] Fuhr, 55. oldal

[73] Pap János, 123. oldal

[74] Apian-Bennewitz, 30-31. oldal

[75] A molekula az anyagnak az a legkisebb része, amely az adott anyag tulajdonságait viseli, önállóan is létezik, és egészként mozog, kémiai kötéssel összekapcsolt atomokból áll. A molekulák között „molekuláris erők" működnek.

[76] Feynman – Leighton – Sands, 156. oldal

[77] ahol m a test tömege, v a rezgés terjedési sebessége, q a keresztmetszet felülete

78 Fuhr, 54. oldal
79 Niederheitmann, 21. oldal
80 Vadon, 53. oldal
81 Fuhr, 54. oldal: Bagatella igényelte ezt a befeszítést, erre hivatkozik Max Möckel: *Das konstruktions Geheimnis der alten italienischen Meister* című könyvében (Berlin, 1925.)
82 Niederheitmann, 21. oldal
83 Fuhr, 54. oldal és a 34. lapalji jegyzet
84 Tóth János: *A modern és a régi olasz hegedűk problémái.* Budapest, 1926. 11. oldal
85 A behelyezett lélekben a felhangolás előtt létezhet minimális nyomóerő, miután a tető- és a hátlemez közé kerül enyhe beszorítással, sőt ennek hatása a tető és a hátlemezben is ébreszt elenyésző erőket. Ezeknek azonban vizsgálataink szempontjából nincs jelentősége.
86 Sacconi, 119. oldal
87 Rónai Ferenc – Somfalvi György: *Tartó faszerkezetek.* Budapest, 1982.
88 Mózes Gyula – Vámos Endre, 56. oldal
89 Mózes Gyula – Vámos Endre, 58. oldal
90 Mózes Gyula – Vámos Endre, 59. oldal

IV. A HÚRLÁBRÓL – AHOGYAN MA LÁTJUK

91 Hangszerek Enciklopédiája, 165. oldal.
92 A tanulmány címében és a továbbiakban: *húrláb*, más értekezésekben *láb*, *hangláb* v. *hegedűláb* szerepel. Húrláb vagy hangláb, ennek eldöntése az etimológia körébe tartozik. Itt a *húrláb* megnevezést használjuk, abból a megfontolásból, hogy a *láb* fogalom tárgyhoz, testhez kapcsolódik: asztalláb, hídláb, zongoraláb stb.
93 Ember, Képek jegyzéke
94 Az „átépítés" előtti barokk hegedűkön a húrláb magassága 3,00 cm, átépítés után: 3,5 cm. A húr tengelyvonalának törésszöge a húrláb-nyereg fölött 150 °-ról 158°-ra emelkedett, ezzel együtt nőtt a zengő húrszakasz és a hangszertest tengelysíkja közötti szög nagysága, s vele növekedett a hegedű hangjának *vivőképessége,* hangereje.
95 Fuhr
96 Fuhr, 57. oldal
97 Fuhr, 58. oldal
98 Fuhr, 59. oldal
99 Fuhr, 61. oldal
100 Vadon
101 Vadon, 27. oldal
102 http://hu.wikipedia.org/wiki
103 Vadon, 28. oldal
104 Pap
105 Pap, 116. oldal
106 Pongrácz (2004)
107 Fuhr, 62. lap

[108] van der Meer (1988) 53. oldal
[109] Kolneder, 105. oldal
[110] Niederhetimenn, 108-111. oldal
[111] Kolneder, 110. oldal
[112] Kolneder, 114. oldal: Hegedűméretek P. Maggini: 36,2–36,8 (17,8–16,8) (20,8–21,8) (2,7–2,8); N. Amati: 35,2–35,8 (16,5–17,2) (20,4–21,4) (2,9–3,00) 108. és 110. oldal
[113] Niederheitmann, 145. oldal
[114] Hill – Hill – Hill, 339-340 oldal
[115] Kolneder, 138-139 oldal
[116] Niederheitmann: Stradivarinál
[117] Niederheitmann: Stradivarinál
[118] Sacconi
[119] Niederheitmann: Guarneri, Giuseppe del Gesunál
[120] A. Corelli (1653–1713) zeneszerző, hegedűművész, szóló szonátákat írt, a concerto grosso megteremtője. T. Albinoni (1671–1745) hegedűművész, zenekari concerto grossók szerzője. A. Vivaldi (1680–1761) zeneszerző, hegedűművész 124 hegedűversenyt írt. G. Tartini (1692–1770) hegedűművész, zeneszerző, hegedűversenyek, hegedűszonáták szerzője. A kifejlett hegedűjáték-technika megteremtője, a hegedű tökéletesítésével is foglalkozott, új szerkezetű vonót talált fel. J. S. Bach (1685–1750) zeneköltő, kiemelkedő hegedűversenyek alkotója. i.t. stb.
[121] van der Meer (1938) 115. oldal
[122] Apian-Bennewitz, 103. oldal
[123] van der Meer (1938) 115. oldal
[124] A változtatások metrikus értékei: a nyak méretét (menzúráját) 0,7–0,9 cm-rel növelték meg (Stradivari, ahogy Nicola Amatinál tanulta, a nyak hosszát a korpusz és a felső nyereg között 12,1–12,4 cm-re építette. Hill – Hill – Hill, 197. oldal). A rezgő húr hossza az átépítés előtti 21,5–31,86 cm-ről 32,5–32,75 cm-re növekedett, láb feletti törésszöge 161°22'-ről 156°44'-re csökkent. A láb magassága a korábbi 25 cm-ről 31–33 cm-re változott (Szemmelweisz, 13. oldal). A fogólap hossz 7–8 cm-re növekedett (Stradivari előbb 19 cm, később, 1685-ben 20 cm, 1715-ben 21,6 cm méretű fogólapot alkalmazott. Hill – Hill – Hill, 200. oldal). Az átépítés után a fogólap hossza: 26,7–27,0 cm.
A gerenda méreteinek változása (Hill – Hill – Hill, 185. oldal):

	hossz.	max.magasság	szélesség
Antonio és Hieronymus Amati 1621	27,0	0,6	0,5
Nicola Amati 1650	21,9	0,6	0,6
A. Stradivari 1680	24,3	0,6	0,5
A. Stradivari 1721	24,8	0,8	0,5
A. Gagliano 1720	27,6	0,8	0,5
F. Gagliano 1783	30,5	1,0	0,7
20. században	26,7	1,1	0,6

[125] I. Rühlmann: *Die Geschichte der Bogeninstrumente*. Braunchweig, 1882.

[126] „az 1750 előtt épített hegedűket 1840-ig átépítették" Kolneder, 202. oldal

[127] van der Meer, 201. oldal

[128] Kolneder, 202. oldal

[129] Farga, 154. oldal

[130] Fuhr írja „Stradivarit már életében a legjobb hegedűépítőként ismerték el... Hegedűit azonban hosszú ideig nem becsülték annyira, mint Nicola Amatiét. Csak a 18. század utolsó évtizedeiben következett be fordulat, amikor Viotti és az általa alapított világhírű francia hegedűiskola hegedűsei Piero Rode, Baillot, Kreutzer, Lafon, Habenck és mások a zenei világot Stradivari hangszerük remek hangjával ejtették ámulatba". „Teljesen hasonlóan történt ez más országokban is. Angliában és Németországban a 18. században Steiner még nagyobb tekintélynek örvendett, mint Amatiék". Guarnieri del Gesu nevét kezdetben alig ismerték, mígnem az 1820-as években Paganini révén vált ismertté". (Paganini „Kanon" hegedűjét Guarneri del Gesu 1743-ben készítette, források szerint 1802-ben került a hegedűművészhez)

[131] A. Stradivari tanítómestere, Nicola Amati hegedűit követte alkotó periódusának elején (Niederheitmann: Cremona) M. Klotz „megtévesztően eredeti Steiner hegedűket épített" (Farga, 140. oldal) pedig nem ismert, hogy Jakob Steinernek voltak-e tanítványai" (Farga, 139. oldal)

[132] N. Lupot (1758-1824) a legnagyobbnak tekintett francia hegedűépítő korán felismerte Stradivari hegedőinek zenei kvalitásait és művészi értékeit és Stradivari-modell után dolgozott „Azonban a kivitelezés számos részletében, a modell elegáns formájában mindig érvényre juttatta saját jellegét" F. Farga, 158. oldal

[133] Gyakran található a szakirodalomban: Stradivari, Guarneri stb. -másolat, imitáció, kópia, reprodukció, ezek etimológiai jelentése: *másolat* = önállótlan utánzat; *imitáció* = utánzat, hamisítvány; *reprodukció* = valaminek újra előállítása, utánzat, *kópia* = másolat, utánzat. Modell (olasz szó) = minta, mintakép, eszmény – aminek formája, méretei alapján készítenek hasonlót (*Magyar Értelmező Kéziszótár*)

[134] Fuhr, 97. oldal

[135] Még a 19. században is a Hill-testvérek a lakk szerepét „primátorként" értékelték. Fuhr, 100. oldal

[136] Pap, 110. oldal

[137] Nem azonos a modell utáni alkotó tevékenység során épített hegedűkkel. A modell utáni alkotás feltételezi korábbi jellegzetesség átvételét a mindenkori alkotó sajátos, egyéni megoldásaival kiegészítve. A hasonmás valamely alkotás hű mása: nem társulnak hozzá a tényleges alkotó személyéhez kapcsolódó formajegyek.

[138] Nemrég (2001-ben) Magyarországon szakmai körök szervezésében „hegedű kópiakészítő verseny" zajlott le.

[139] A hegedűkópia készítő versenyről írja a Hangszer Világ 2001. XI. évf. 2-3. sz. 32. oldal „igazán magas színvonalat az jelentené, ha valóban nem tudnánk megkülönböztetni némely kópiát a csaknem 270 esztendős eredetitől".

[140] Fuhr, 123. oldal

[141] Niederheitmann, 102. oldal

[142] Fuhr, 124. oldal

[143] Vadon, 176. oldal

[144] Fuhr, 125. oldal

[145] Niederheitmann, 191. oldal lapalji jegyzet

[146] Fuhrnak más volt a véleménye: „Spohr ehhez igen bőven mérte ki az időt. Véleményem szerint – akusztikailag helyesen épített hangszernél sokkal rövidebb idő szükséges a bejátszáshoz" (123. oldal)

[147] Niederheitmann, 102. oldal

[148] Fuhr, 141. oldal

[149] Gustav Adolf Wettengel, marcknerkircheni hegedűépítő matematikai módszerrel határozta meg a hegedű kontúrját és szerkezeti méreteit (Apian-Bennewitz, III.). Carl Schulze: *Stradivarius Geheimnis.* Berlin., Adolf Beck: *Die Proporcionale Konstrukcion der Geige.* Lipcse, 1923. Max Möckel: *Das Konstruktionsgeheimnis der alten italianischen Meister.* Berlin, 1925. és uő.: *Der Goldene Schnitt im Geigenbau unw....* Berlin, 1925.

[150] Pap János: *Tudomány vagy művészet (A hegedű akusztikai problémái).* Az első Budapesti Nemzetközi Hegedűkészítő Verseny és Kiállítás keretében megrendezésre került Nemescsányi-emlékkonferencián elhangzó előadás szerkesztett változata 2. oldal

[151] E. F. Chladni: *Nachrichten von einigen (teils wirklichen, teils vielleicht nur angeblichen) neueren Erfindungen und Verbesserungen musikalischer Instrumente*: LAMZ. 1821., F. Savart: *Memorie sur la construkcion des instruments á cordes et a archet.* Páris 1818., H. Helmholtz: *Die lehre von den tonenfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik Braunschweig.* 1913.

[152] Sacconi leírásából is ismert, hogy Stradivari többször „a tetőlemezeit egyenlő vastagságúra hagyta".

[153] Pongrácz (2004), 131. oldal

[154] Pap, 8. oldal

[155] Beck Mihály: *Parajelenségek és paratudományok.* Tudomány-Egyetem sorozat. Vince Kiadó Kft. 2004. 17. oldal

[156] Pap, 7. oldal

[157] Erdélyi Sándor: *Európai hegedűkészítés és a bécsi iskola.* Hangszer Világ 1995. V. évf. 3. sz. 6. oldal

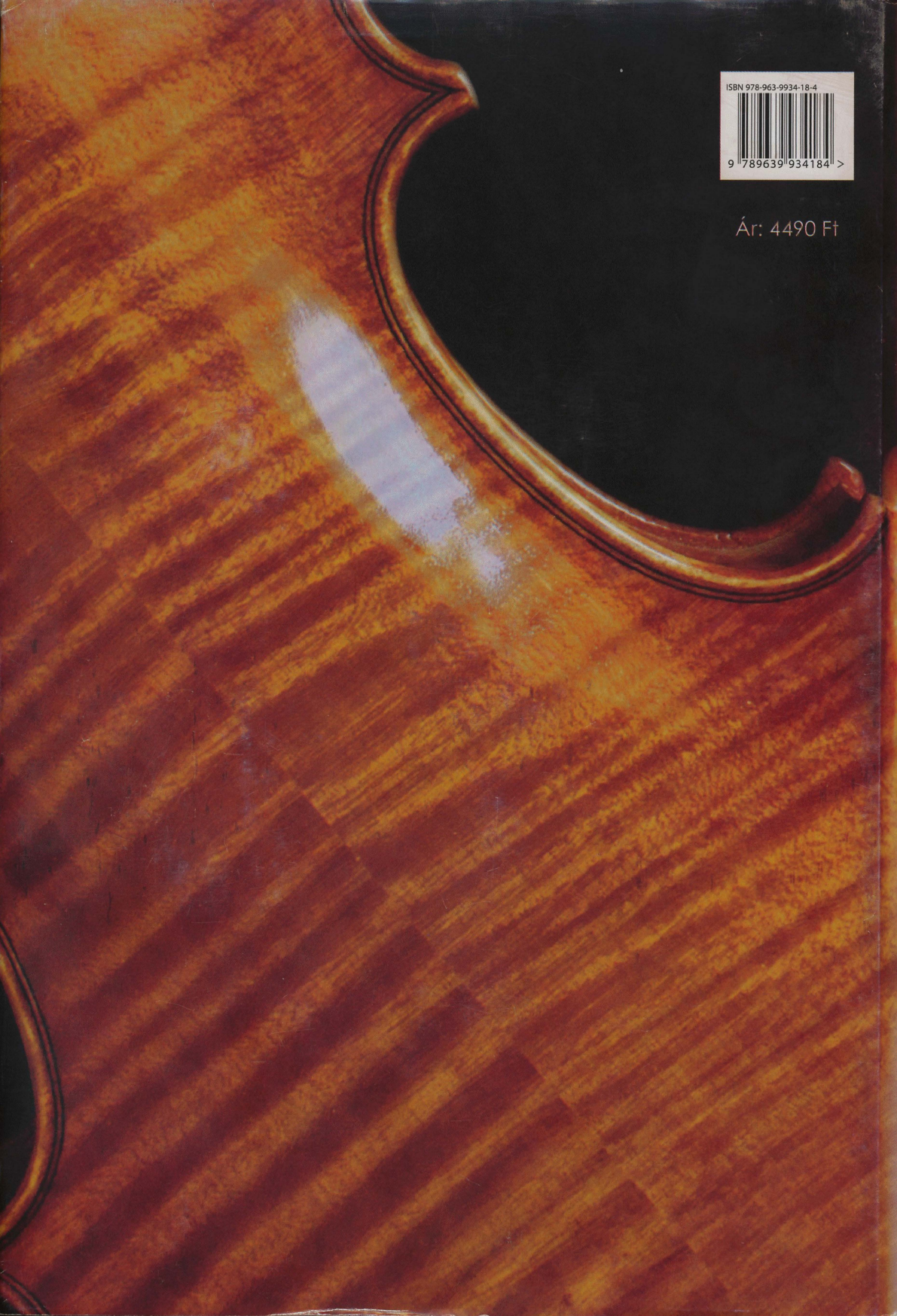
[158] Niederheitmann, 20. oldal

[159] O. Möckel, XXI. oldal

[160] Andrásik Remo: Hangszer Világ 2005. XV. évf. 1. sz. 23. oldal

[161] Semmelweis Tibor: *Késői levél.* Hangszer Világ 2004. XIV. évf. 1. szám 31-32. oldal

[162] A Liszt Ferenc Zeneművészeti Egyetem Hangszerészképző Szakiskolájának 2006. évi felvételi tájékoztatója elérhető a www.lfze.hu honlapról.



ISBN 978-963-9934-18-4

Ár: 4490 Ft

A hegedűt szinte megvalósulása óta műalkotásnak tekintették. Ennek gyökere bizonyíthatóan a vizuális művészetek és a hegedű formavilága között kimutatható kapcsolatban rejlik. Olyan viszony ez, amely a művészetek között egyetemlegesen jellemző, s a hegedű kialakulásának idején meghatározó művészeti stílusszemlélet hatásában kereshető.

(A hegedű és kialakulása és formavilága)

A több évszázaddal ezelőtt empirikusan kialakult hegedűszerkezet állékonysága már tapasztalatból ismert, s mindez *tudományosan is bizonyítható*. Eddig azonban ismeretlen volt, mekkora szellemi bravúr az – a húrok feszítéséből – a hegedűben képződő belső erőrendszer, amit a korai hegedűépítők létrehoztak. A tudomány csak jóval később ismerte fel, és a mérnöki szerkezetek tervezésében is alig száz éve alkalmazzák.

(A hegedű analóg statikai elemzése)

A hegedű élettartama a tapasztalatok szerint évszázadokat ívelhet át, egyik szerkezeti elemét, a gerendát mégis 20–25 évenként cserélni kell. Indoklásául az elméleti elemzések is csak annyit mondanak: „elfáradt, új, rugalmas gerendára van szükség". De valójában mi okozza ezt a jelenséget: kizárólag az anyag „elöregedése", vagy a *tartós terhelés hatására az anyag molekulái között változó konstelláció* időben elhúzódó folyamatának a következménye?

(A hegedűgerenda mai szemmel)

A húrlábról eddig kialakított vélekedések megoszlanak, ellentmondások, vaskos tévedések fordulnak bennük elő, pedig a húrláb *hangszertípust alakító szerkezeti elem*. Gyakorlati szerepét – a hangszer anyagában terjedő mechanikai hullámok intenzitásának növelésében – rég felismerték, elméleti jelentőségét a hegedű-szakirodalom azonban mind ez ideig nem tárta fel, vagy ha érintőlegesen foglalkozott is vele, számos kérdést megválaszolatlanul hagyott.

(A húrlábról, ahogyan ma látjuk)

A hegedűépítésben létezése óta különböző külső-belső tényezők keltettek zavart. Szerepük van ezek kialakulásában, elterjedésében a mindenkori közfelfogásnak, hegedűsöknek, hegedűkereskedőknek, hangszer-gyűjtőknek, sőt valamelyest az egyes tudományágak (fizika, kémia) érintőleges művelőinek is. Bár a tárgyalt tények következményei látszólag az alkotó-hegedűépítésre hatnak vissza, mindez valójában több ennél: *közügy, az egyetemleges kultúra ügye*.

(A hegedűépítés régi-új dilemmái)

Dr. Pongrácz Pál építészmérnök. Aktív szakmai munkáját az épülettervezés, városrendezés, építésigazgatás és az egyetemi oktatás keretében végezte.

Gyakorlati tevékenysége mellett több szakkönyvnek és tanulmánynak a szerzője. Nyugdíjba vonulása után, a hegedűkészítői képesítés megszerzését követően a hegedűépítés gyakorlati és elméleti kérdéseivel foglalkozik. Hegedűket készít és e témában elemző tanulmányokat ír.