

M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Építőmérnöki Kar

Hidak és Szerkezetek Tanszék

Széchenyi lánchíd viselkedésének elemzése a rekonstrukció során

TDK dolgozat

2021.

Készítette:

Vitányi Borbála

BSc III. évfolyam

Konzulensek:

Dr. Dunai László

Dr. Kövesdi Balázs

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés.....	3
2. Lánchidak szerkezeti viselkedése és kialakítása	3
2.1. Történeti áttekintés	3
2.2. Lánchidak szerkezeti kialakítása	6
3. A Lánchíd története	6
3.1. Kivitelezés	7
3.2. Az 1849-ben átadott szerkezet leírása	10
3.3. A Lánchíd átépítése (1914).....	11
3.4. A Lánchíd a II. világháború után.....	15
4. A híd tervezett felújítása	19
4.1. A hídon végzett vizsgálatok	19
4.2. Felújítási szempontok.....	22
4.3. A felújítás részletei.....	23
5. A hídon végzett vizsgálat és a mérőrendszer leírása	25
5.1. A vizsgálat tárgya és célja	25
5.2. A mérőrendszer felépítése	25
5.2.1. Hídfők.....	27
5.2.2. Függesztőrudak	28
5.2.3. Budai pilon	29
6. A P1-P4 mérőhelyek eredményeinek kiértékelése	31
6.1. Rendelkezésre álló adatok	31
6.2. Elemzési stratégia	32
6.3. Adatok kiértékelése mérőhelyenként.....	33
6.3.1. P1 mérőhely.....	33
6.3.2. P2 mérőhely.....	38
6.3.3. P3 mérőhely.....	41
6.3.4. P4 mérőhely.....	45
6.4. Kiértékelt eredmények összefoglalása.....	48
7. Összefoglalás.....	50
8. Köszönetnyilvánítás	51
Irodalomjegyzék.....	52
Ábrajegyzék	53
Táblázatjegyzék.....	54

1. Bevezetés

A budapesti Széchenyi lánchíd felújítása kiemelt beruházás napjainkban, melybe a TDK munkámon keresztül volt lehetőségem betekinteni. A 2021 nyarán megkezdődött átépítés nagy figyelmet kap az építőmérnöki szakmában, és azon kívül is az egész ország figyelemmel kíséri. A Lánchíd nem csak Budapest egyik legfontosabb jelképe, de a világörökség részét képezi, ezért a rajta végzett munkálatok rendkívüli odafigyelést igényelnek műemlékvédelmi szempontból is.

A Széchenyi lánchíd jelenlegi állapotának és a felújítás indokainak megismeréséhez először a Lánchíd építését, erőjátékát és működését, majd a Lánchíd történetét tanulmányoztam, mivel a most aktuális átépítés mozzanatainak megértéséhez elengedhetetlen a korábbi szerkezet és annak átépítéseinek átfogó ismerete. Ennek okán a dolgozat első fele a Lánchíd kivitelezési problémáiról, az 1914-es újjáépítés okairól és körülményeiről, valamint a II. világháború utáni felépítésről szól. Ezt követően ismertetem a jelenlegi Lánchídon végzett különböző vizsgálatokat, majd az átépítés szükségességének témáját járom körül.

A BME Hidak és Szerkezetek Tanszék a híd története folyamán többször végzett méréseket a szerkezeten. A felújításhoz kapcsolódva a hídszerkezet statikai viselkedésének részletesebb megismerése érdekében 2021. júniusától újra végeznek folyamatos, monitoring jellegű méréseket. Dolgozatom második felében a mérőrendszer felépítését ismertetem, majd rátérek a mérési eredmények kiértékelésére.

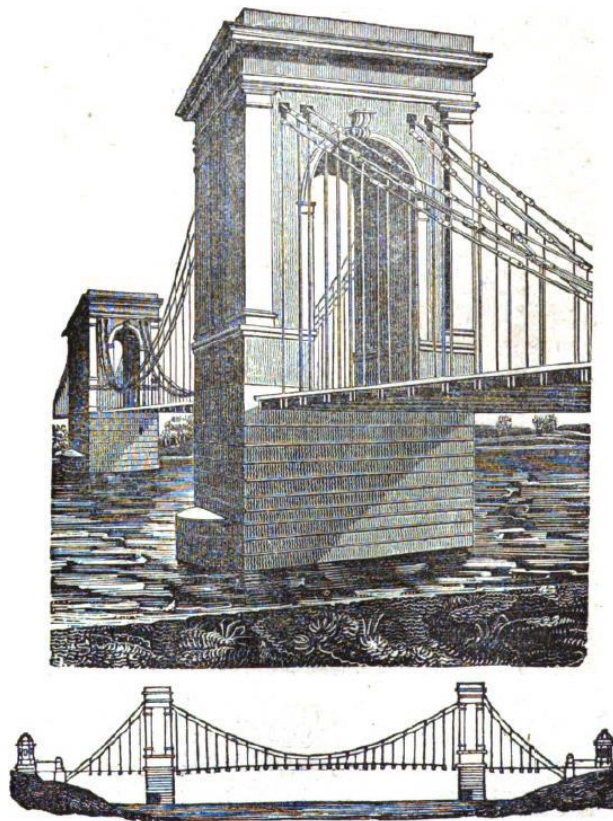
A Tanszék nyúlásmérést végez a híd kijelölt, jellemző pontjain. Ennek egyik célja a korrózió miatt befeszült csapos kapcsolatok elfordulási képességének vizsgálata. Korábbi mérések alapján a csuklós kapcsolatok befogottként működnek, ami nyomatókot okoz az egyébként normál igénybevételre méretezett láncszerkezetben. Kutatásom célja ezen nyomatókok vizsgálata, összefüggések keresése a budai pilon különböző mérőhelyeinek adatai közt.

2. Lánchidak szerkezeti viselkedése és kialakítása

2.1. Történeti áttekintés

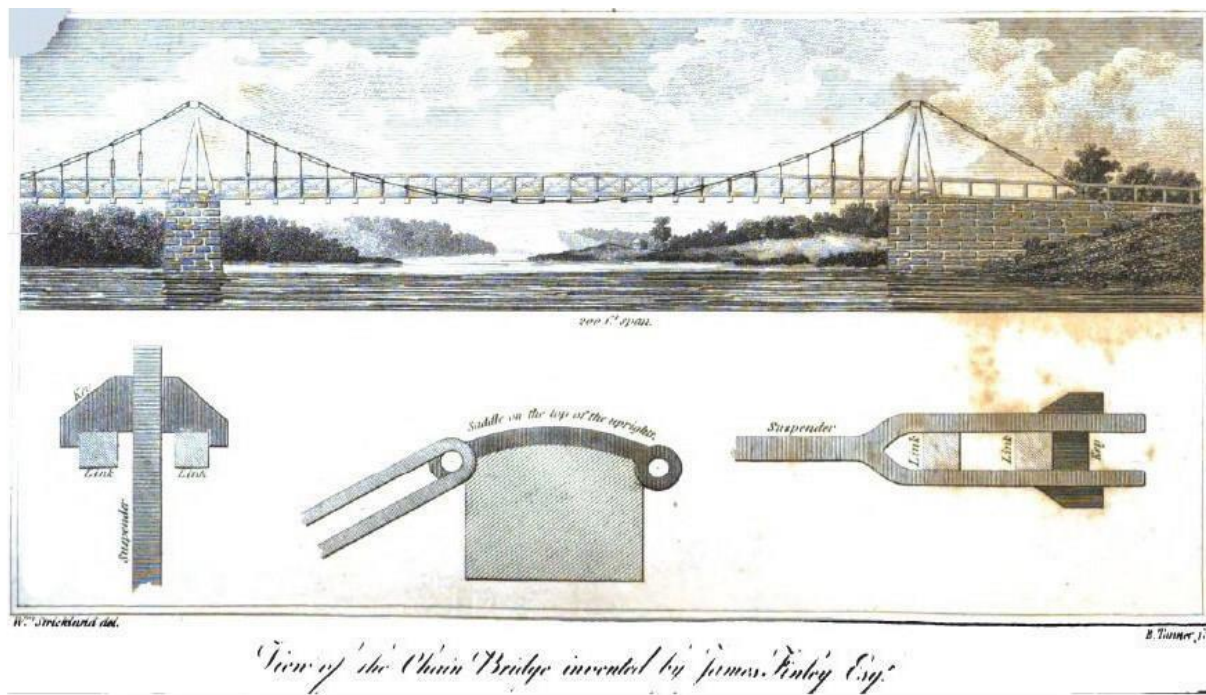
Az első európai vas függőhíd a szakirodalom szerint Angliában épült a Tees folyó fölött 1741-ben. Mivel akkor még kiforratlan volt a hídépítés ezen technikája, a szerkezet meglehetősen pontatlan munka volt. A híd 21 m hosszú és 60 cm széles volt, és a völgy felett 18 m-rel vezetett át. A lánchidak építése 1814-ig nem terjedt el, ekkortól viszont ugrásszerűen növekedett a népszerűségük. Először csak Angliában, majd Franciaországban, az 1830-as évektől pedig majdnem minden európai országban megjelent. [1]

Az egyik első lánchíd a Temze fölött átívelő, William Tirney Clark által tervezett híd (2.1. ábra), melyet 1827-ben adtak át a forgalomnak. A szerkezet két mederpillérrel rendelkezett, középső nyílásköze 120 m volt. A hídpálya négy láncosra volt felfüggesztve függőleges rudak segítségével. A láncok 10 m hosszúak, 12,5 cm szélesek és 2,5 cm vastagok voltak. A láncsorok párban helyezkedtek el: a belső sor hat, a külső három lánclemből áll. A két pilon a pályaszinttől számítva 15 m magas volt, szélességük kb. 7 m lehetett. Az úttest egy 3,6 m széles forgalmi sávból, illetve a két oldalon egyenként 1,2 m széles járdából állt. [1]



2.1. ábra: A Temze-híd perspektivikus- és oldalnézete [1].

Az amerikai lánchídépítés úttörőjének James Finley tekinthető, aki első öntöttvas hídját Pennsylvania-ban tervezte meg 1796-ban. A Jacob's Creek híd ~21 m hosszú volt, mintájára Amerikában több lánchidat is építettek. A szerkezet öntöttvas láncokból áll, melyek két oldalon helyezkednek el és végei le vannak horgonyozva. A láncsor vonalvezetését úgy alakították ki, hogy a híd középső gerendáit a lánclemezekre lehetett támasztani. A többi gerenda a láncokhoz kapcsolódó vasrudak segítségével volt felfüggesztve. A láncok teherbírásának optimalizálása érdekében a pillérek magasságát úgy vették fel, hogy az így kialakult vonalvezetés süllyedése a támaszköz hetede legyen. A part felé eső görbületek ugyanolyan ívet futnak be, mint a középső nyílás láncsora. A láncok hosszát Finley javaslatára úgy határozták meg, hogy egyezzen a hídpályát alkotó gerendák közti távolságokkal, mivel így a függesztőrudak kiosztása jelentősen egyszerűsödik. A 2.2. ábra a Finley által szabadalmaztatott lánchíd kialakítás egy korai példáját mutatja. [1]



2.2. ábra: A Finley által szabadalmaztatott lánchíd kialakítás egy korai példája [1].

Az évtizedek során a lánchidak kialakítása nem esett át nagy változáson, a ma álló szerkezetek is a bemutatott alapelvek szerint készültek. A különbség csupán a gyorsabb, fejlettebb szerelési technológiák és a modern anyaghasználat adta lehetőségek miatt jelentős. A 19. század elején elterjedt egy új függőhídtípus, a kábelhíd, ami lehetővé tette nagyobb fesztávok áthidalását. Az egyre növekvő fesztávval azonban a szél által okozott rezgések komoly problémát jelentettek, erre John Roebling talált egy lehetséges megoldást, aki ferde kábeleket tervezett a rezgések csökkentése érdekében. A Cincinnatti-t és Covington-t összekötő hidat 1867-ben adták át a forgalomnak (2.3. ábra). [1]



2.3. ábra: John Roebling ferdekábeles hídja az Ohio folyó fölött [14].

2.2. Lánchidak szerkezeti kialakítása

A lánchíd-szerkezet a függőhidak egyik nagy csoportja a kábelhidak mellett. A függőhidak fő tartószerkezeti elemei láncok, vagy tartókábelek, melyek végpontjaikon le vannak horgonyozva. A lehorgonyzás általában hídfőbe történik lehorgonyzó saruk segítségével, azonban önmagába horgonyzott, úgynevezett nem valódi függőhíd is épülhet. A híd pályaszerkezete és merevítőrendszere ezen láncokra vagy kábelekre kerül befüggesztésre jellemzően függőleges, ritkábban ferde függesztőrudakkal vagy kábelekkel. [2]

A lánchidak fő teherviselő eleme a lánc, mely leggyakrabban két pilonon van átvezetve. A láncsorban főleg tengelyirányú húzóerő keletkezik. A lánc saját súlyának hatására láncgörbe (koszinusz hiperbolikus), míg a külső, egyenletesen megoszló terhek hatására parabola alakot vesz fel. [3][4]

3. A Lánchíd története

A Lánchíd alapkövét 1842. augusztus 24-én tették le, megkezdve ezzel az első állandó híd építését a Duna Regensburg alatti szakaszán. A Lánchíd nem csak ebben volt első, a 202,6 m-es középső nyílásával ez számított kora legnagyobb fesztávval rendelkező láncszerkezetének. Az állandó átkelő ötletének megszületése és a kivitelezési munkák megkezdése között több, mint két évtizednek kellett eltelnie, mivel politikai, pénzügyi, műszaki és társadalmi nehézségeket is le kellett küzdeni. Politikai akadályt főként a hídvám okozott, hiszen a XIX. század eleji rendi Magyarországon a nemesek adómentesek voltak, ám az átkelésért társadalmi rangtól függetlenül mindenkinek fizetnie kellett. Erre az építés költségeinek fedezése miatt volt szükség, mivel az ország jelentős tökehiánnyal küzdött. A Lánchíd ügyének másik fő politikai gátját a – már majd’ 50 éve üzemelő, 42 hajóból álló – hajóhíd (3.1. ábra) elbontásának kérdése, illetve az új híd létesítéséhez szükséges területek megvásárlása képezte. [5]



3.1. ábra: Hajóhíd a Dunán [15].

Pénzügyi problémát természetesen az – mintegy 6 245 000 Ft-os – építési költség előteremtése jelentette. A kérdéssel Széchenyi már az 1833-ban megjelent *Hídjelentés* című művében foglalkozott, ebben az írásában fejti ki a már említett hídvám-rendszer részleteit is. A szükséges tőkét egy részvénytársaság megalakításával biztosították, melynél a befektetett pénzüsszeg és annak kamata a hídvám jövedelmével törleszthető volt. A rendszer működőképesnek bizonyult, a hídépités költsége 1870-ig megtérült. [5][6]

A hídépités ellenzőinek egyik fő érve az volt, hogy a magyar mérnökök a reformkorban még nem rendelkeztek kellő tapasztalattal nagyfolyami hidak építése terén. Tartottak még az alapok kimosódásától, ennek okán a híd összeomlásától, esetleges leszakadásától. A mederpillérek miatt jégfeltorlódásra számítottak, ami pedig könnyen árvízhez vezethetett. A jegesár gondolata különös óvatosságra adott okot, hiszen a pesti lakosságban még elevenen élt az 1775-ös árvíz pusztításának emléke, emellett pedig éppen a híddal kapcsolatos tárgyalások közben vonult le az 1838-as pesti árvíz. Nem ez volt azonban az első függőhíd, amit a budapesti közönség láthatott, ugyanis a Városligetben alig 20 méteres nyílással épült már egy függőhíd (3.2. ábra). [7]



3.2. ábra: A városligeti híd Carl Vasquez metszetén [16].

Az állóhíd építéséről intézkedő törvénycikk 1836-ban „állandó országos bizottság” létrehozását rendelte el, mely bizottság 1838. szeptember 13-án bízta meg a Lánchíd Részvénytársaságot a neves angol hídépitő mérnök, William Tierney Clark által tervezett függőhíd megépítésével. Clark a megépített változaton kívül még két tervvázlattal állt elő, emellett pedig egy Pestre érkező másik neves angol mérnök, George Rennie is benyújtott négy javaslatot: háromnyílású függőhíd, kétnyílású lánchíd (egy pillérrel a folyam közepén), ötnyílású öntöttvas híd, valamint hétnyílású boltozott kőhíd. A megfelelő tervváltozat kiválasztásának terhére egyik megbízó sem vállalta magára, ezért két angol mérnököt, John Plews-t és Samuel Salter-t kérték fel szakértőnek. A döntés egyik legfontosabb szempontja – az esetleges kimosódást elkerülendő – az alapozás kiváló minősége volt. [8]

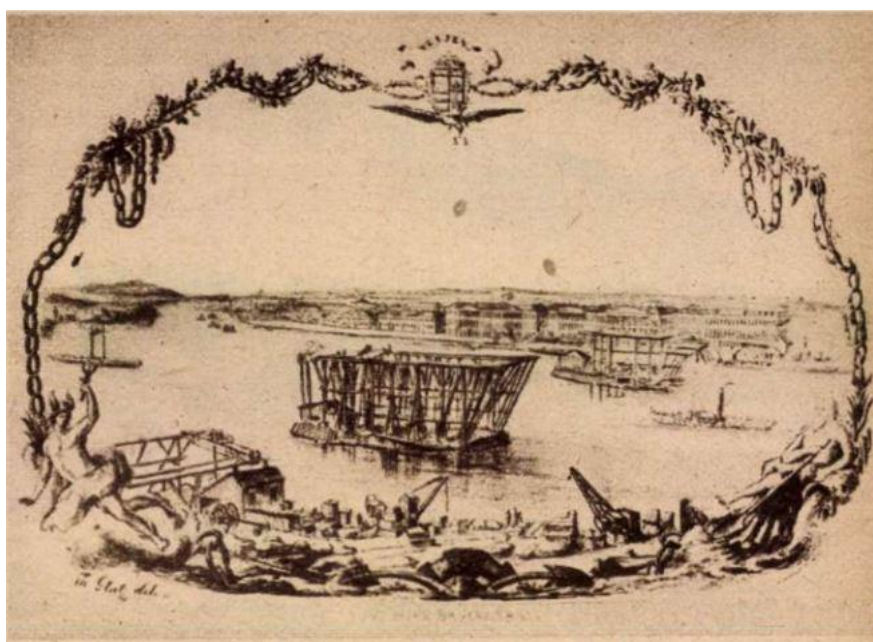
3.1. Kivitelezés

Az építési szerződés létrejötte után kezdetét vette az építés megszervezése és elindítása. Mivel a tervező, William Clark nem tudott mindig a helyszínen tartózkodni, Adam Clarkot bízta meg

a munkálatok állandó helyszíni irányításával. A névegyezés ellenére a fiatal skót mérnököt és a Lánchíd tervezőjét nem fűzte egymáshoz rokoni szál.

A kivitelezési munkálatok 1840 tavaszán kezdődtek meg az alapozáshoz szükséges anyagok szállításával. Az volt a törekvés, hogy a lehető legtöbb alapanyagot az országhatáron belülről szerezzék be. Ezt nagyrészt sikerült is betartani, a téglát egy pesti és egy óbudai üzem biztosította, a cementet egy budai parton létesített égető- és örlőüzemben állították elő, a faragott kőanyagot Sós-kútról hozatták, a tölgyet a szlavóniai erdőkből, viszont a vörösfenyő és gránit kváderek már Ausztriából érkeztek. [5][8]

Az alapozási munkák 1840. júliusának végén vették kezdetüket a budai pillér leendő helyén. Először a Duna vizét kiszorító jászolgátak építésére volt szükség (3.3. ábra). A zárógátat 3 sor, egymástól kb. 1,5 m-re fekvő cölöpsorból alakították ki, melyek szorosan egymás mellé helyezték, 38x38 cm-es tölgyfacölöpökből álltak. A teherbíró talaj a mederfenék alatt igen mélyen, nagyjából 5 m-en volt fellelhető, emellett pedig számolni kellett a kb. 7,6-9,2 m-es vízmélységgel is. Ezekből következett, hogy igen hosszú, 15-20 m-es cölöpökre volt szükség, melyekből mintegy 7000 darabot használtak fel. A beverés a korabeli technika miatt nagyon lassan haladt, minden egyes cölöpnél kb. 400 ütést alkalmaztak, így ez a folyamat két évig tartott. Az így készített szádfalak közül kikotorták a kavicsot és helyét vízzáró agyaggal töltötték fel, majd a munkagödörből is kiszivattyúzták a vizet, és leástak a teherbíró rétegig. A cölöpfalak függőleges andráskeresztes merevítést is kaptak, illetve két méterenként gerendarostély-dúcolás támasztotta meg. Az uszadék és jégzajlás ellen jégtörők biztosították a jászolgátak védelmét. [5][8]



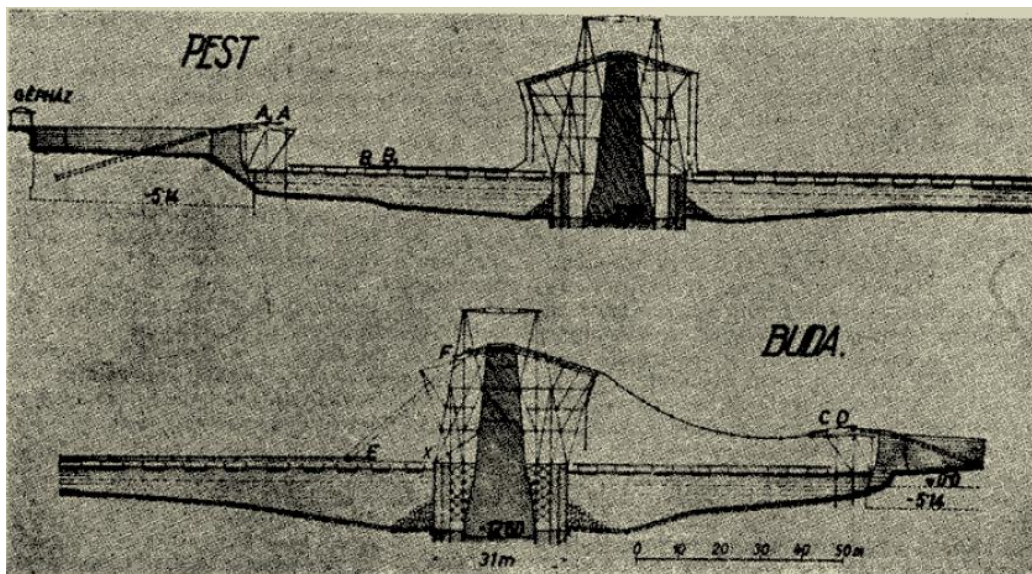
3.3. ábra: A Lánchíd pilléreinek alapozása; Theodor Glatz tollrajza 1842 körül [17].

A híd pilléreit és a hídfőket kék agyagra alapozták, az alapsík a budai pillérnél 12,60 m mélyen, a pesti pillérnél 7,30 m mélyen, a két hídfőnél pedig 5,14 m-en van a nulla vízszint alatt.

A kőfalazattal kiképzett hídfők és mederpillérek elkészülte után a háromnyílású felépítmény (88,7 + 202,6 + 88,7 m) megépítése következett. Az ehhez szükséges, mintegy 2146 tonnányi (más források szerint 2546 tonna) vasanyag legnagyobb része angolai gyártmány, de az

öntöttvas kereszttartókat Andrassy György dernői, más szerkezeti elemeket pedig Ganz Ábrahám budai öntödében készítették.

A láncszemek szerelése 1848. március 28-án kezdődött az első láncszem pesti lánckamrába történő bekötésével. A szerelési munkálatokról Vásárhelyi Boldizsár ír a legszemléletesebben a Közúti és Mélyépítő Szemle 1949/11. számában, a folyamat pedig a 3.4. ábrán látható. „Legelőször a lehorgonyzó láncrészeket szerelték fel a hídfőkbe. Azután emelődaruval felhúzták és elhelyezték a pillérekre a sarukat az idetartozó, köralakú lánctagokkal együtt, majd a pillér körüli állványon két oldalra szerelték össze a lánclemezeket addig, amíg a munkapályáig le nem értek. Ezután a szerelést a munkapályán folytatták, majd felemelték, összekapcsolták és kifeszítették az egyes láncrészeket.” A részben hajóhídon szerelt láncokat hatszoros áttételű csigasorokkal húzták fel, a kifeszítést pedig úgy hajtották végre, hogy az úszóállványon fekvő láncsor végét (B és E pont) felhúzták a hídfőbe szerelt végekhez (A pont), illetve a pillérek felől megkezdett végekhez (F pont). Először az oldalsó nyílásokban feszítették meg a két láncsort úgy, hogy előbb a felső, majd az alsó sort szerelték össze. A hídszerkezetben 12 láncrész helyezkedik el, így mindhárom nyílásban 4-4 láncemelésre volt szükség. A legutolsóra 1848. júliusában került sor, ám a felhúzó csigasor meghibásodása miatt a lánc visszazuhan a munkapályára, azt összetörte és a Dunába zuhant. A – mintegy 140 m hosszú – láncsor kiemelése és újra felhúzása kb. öt héttel hátráltatta a munkálatokat. [5]



3.4. ábra: Láncok szerelése [5].

A pályaszerkezet 1849. tavaszára szinte teljesen elkészült, a szabadságharc azonban jelentősen késleltette a mindennapi használatot. Az osztrákok hadviselési okból megkísérelték a fa pályaszerkezet felégetését, valamint a híd felrobbantását is, de szerencsére ezekre a pusztításokra nem került sor. Pest-Buda 1949. májusi ágyúzása során megsérült a Lánchíd budai pillérének északi oldalán a part felőli hídníllás első lánckötegének szélső lánclemeze. A láncszem cseréjét csak a teljes szerkezet tehermentesítésével tudták volna megoldani, ezért ehhez a lemezköteghez mindkét oldalról egy-egy fele vastagságú pót-lánclemezt illesztettek. Ebben a kötegben így 12 lemez volt, míg a többiben 10, illetve 11.

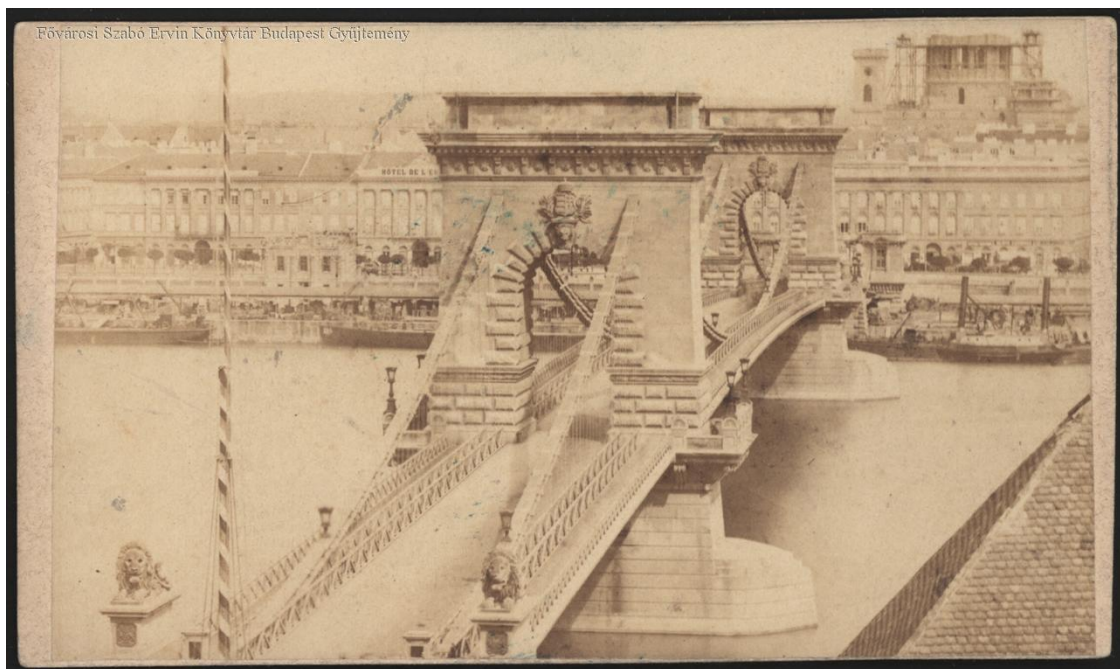
A hivatalos átadásra 1849. november 20-án került sor, az ünnepélyes avatóünnepség azonban elmaradt. A szabadságharc leverése után – egyfajta megtorlásként – a ceremóniát Haynau

vezette, aki alig hat héttel azelőtt végeztette ki az aradi vértanúkat. Maga a „Hídember”, Széchenyi István az átadás idejében már a döblingi elmegyógyintézetben volt, azonban a szerelési munkálatok során az első kifeszített láncon volt lehetősége átsétálni. Adam Clark haláláig csodálhatta élete egyik fő művét, Ferenc József a magyar nemesi címet is felajánlotta neki, ám ő skót nemességére hivatkozva nem fogadta el azt. [8]

3.2. Az 1849-ben átadott szerkezet leírása

Az így elkészült híd 380 m hosszú, háromnyílású függőhíd, melyek hossza: 88,7 m, 202,6 m, 88,7 m. A kocsipálya szélessége 5,4 m volt, a járdák mindkét oldalon 1,8 m szélesek voltak. A 3.5. ábrán az 1849-ben átadott szerkezet látható.

A híd felszerkezete függőhíd, melynek pályaszerkezete keresztartókból és hosszartókból álló tartórács volt. A merevítőtartó $33\text{--}34\text{ kN/cm}^2$ szakítószilárdságú kavartvas láncszemekből álló, csapokkal egymáshoz kapcsolt láncra volt felfüggesztve. A láncszerkezetben a híd északi és déli oldalán is két-két, egymás fölött futó láncsor található, melyek párhuzamosak a két oldal viszonylatában is. A láncszemek mintegy 4 m hosszúsággal bírtak, magasságuk 26 cm volt, de ezek a méretek a híd hossza mentén változtak, a horgonykamrába például majd' kétszeres hosszúságú láncok kerültek. Egy csomópontba összesen 21 (10+11) lánclemez futott be, így az együttes vastagság 60 cm-re adódott. A láncok a hídfőkben található kamrákban voltak lehorgonyozva, alakjukat pedig a hídfőknél és pilléreknél található iránytörő és koronasaruk adták. A láncszemeket összekapcsoló csapoknál kapcsolódtak a pályaszerkezetet felfüggesztő vasak, melyek az egymás fölötti két láncsor eltolása miatt egymástól 1,80 m távolságra kerültek. A könnyű, fagerendázatból álló hídpályaszerkezet öntöttvas keresztartókon és fa hosszartókon nyugodott az 1914-es átépítésig. Ezen munkálatokat bővebben a 3.3. bekezdés tárgyalja. A Howe-rendszerű merevítőtartó is fából készült, illetve az útpálya is fakockaburkolatot kapott. [1][5][9]



3.5. ábra: Az 1849-ben átadott híd [16].

3.3. A Lánchíd átépítése (1914)

Az 1849-ben átadott szerkezet és annak teherbírása teljes mértékben megfelelt a mérnöki tudomány akkori állásának, illetve a kor forgalmi igényeinek is eleget tett. Az 1880-as évek végén azonban indokoltta vált a Lánchíd vizsgálata, mivel a közúti forgalom fejlődésével rohamosan nőtt a szerkezet terhelése. A kirendelt szakbizottság megállapításai szerint a könnyű, fagerendázatból álló hídszerkezet, valamint az öntöttvas keresztartók cserére szorultak, helyettük vas hídpályaszerkezetet kell kialakítani. Kherndl Antal, műegyetemi professzor 1887. évi vizsgálata és 1888-1892 közötti számításai során megbizonyosodott arról, hogy a Lánchíd helyzete súlyos, ám az érdemi intézkedések még váratnak magukra. 1893-ban kitágították a lánccsatornákat, mivel korábban Ostrava-ban a szűk hely miatti takaríthatatlanság okán szakadt le egy híd. Az új hídszerkezet számításához a négyzetméterenkénti embertömeg terhelés értéke az addigi 150-200 kg helyett 400 kg lett. [5][6]

A megemelkedett forgalmi terheken kívül az is okot adott a szerkezet felülvizsgálatára, hogy már kezdettől fogva mind függőleges, mind vízszintes lengéseket is észleltek a láncokon. A függőleges lengések meggátolására merevítőtartó, míg a szél által okozott lengésekre vízszintes merevítő rácszat beépítését írták elő. Merevítőtartó addig is be volt építve a szerkezetbe, a kocsipálya és a gyalogos járda közé, azonban ez fából készült és feladatát nem tudta kellő mértékben ellátni. A 3.6. ábrán jól megfigyelhető egyrészt a fa merevítőtartó pályaszint alatti része, valamint a híd korlátja, másrészt a feltűnő hasonlóság a két szerkezeti rész között. [5][6]

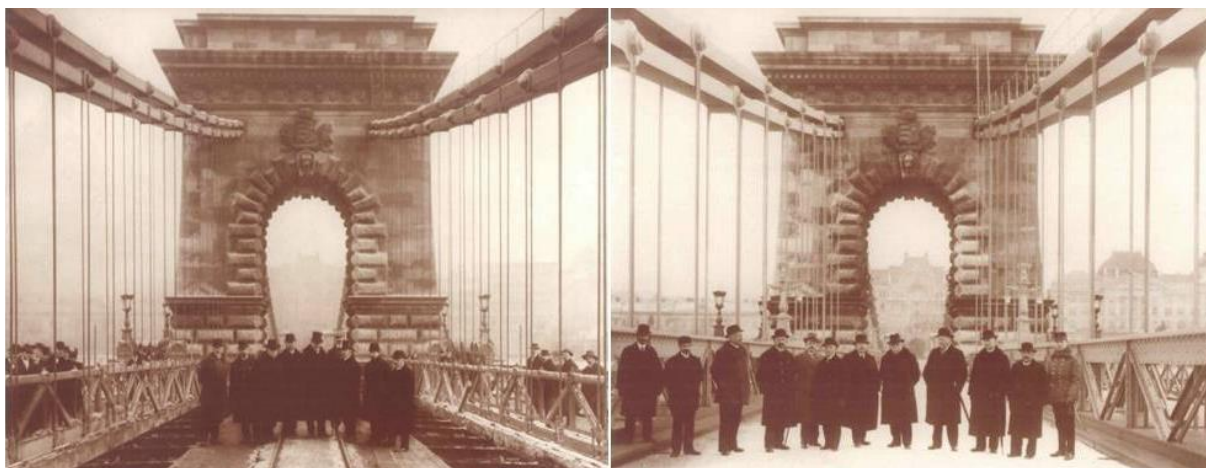


3.6. ábra: Az 1849-es szerkezet fa járdája és faszerkezetű merevítőtartója [6].

Az új elemek tömege annyira jelentősen növelte a híd összsúlyát, hogy a régi láncok ezt már nem tudták volna biztonságosan viselni, ezért új, nagyobb teherbírással rendelkező láncok beépítésére is szükség volt. Így tehát a hídfők és pillérek megtartásával teljesen új szerkezetet kellett építeni. A megnövekedett önsúly miatt a hídfőket is meg kellett erősíteni; ennek

érdekében az eredeti hídfők mellett keszonokra alapozott, körülbelül 5000 m³-es betontömböket terveztek, melyeket fogazással csatlakoztattak a hídfőhöz. A keszonok a hídfők alapjánál 3,5 m-rel hatolnak mélyebbre a talajba. Az alapozási munkákért Zsigmondy Béla cége felelt, a tervezési és felügyeleti feladatokat pedig Püspöky Gyula végezte. Az új szerkezet tervezésénél az volt a fő szempont, hogy a híd képe ne változzon, a láncok vonalvezetése legyen az eredetivel megegyező. [5]

Az újjáépítés tervezését és kivitelezését a kor kiemelkedő szakemberei végezték. Kherndl Antal számításai alapján végezték a munkálatokat, illetve a lánc és a merevítőtartó kölcsönhatását figyelembe vevő grafostatikai eljárást is ő dolgozta ki. Ezt az eljárást Kherndl Antal az akadémiai székfoglaló előadásában publikálta. A terveket Gállik István és Beke József készítették. Gállik a láncokért, azok kapcsolataiért, valamint az alapanyagügyekért felelt, míg Beke a merevítőtartó számításait végezte, valamint ők végezték a kivitelezési munkák felügyeletét is. A részlettervek kidolgozásának felelőse Jurkinyi Jenő, a helyszíni szerelés vezetője pedig Strauch Emil volt. Az átépítésben résztvevő mérnökök csoportját megörökítő fénykép a 3.7. ábrán látható. [1]



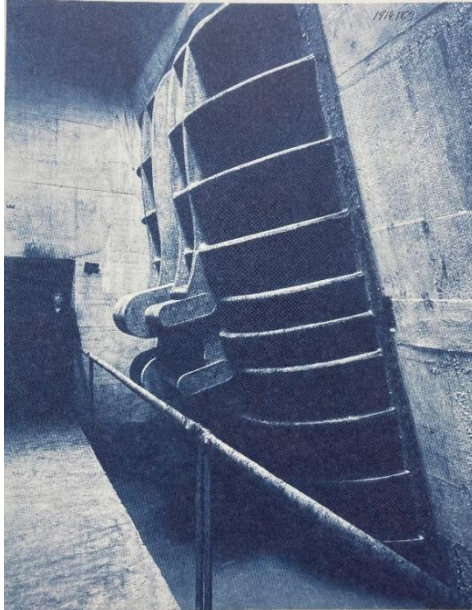
3.7. ábra: A felújításban résztvevő szakemberek a híd bontásának kezdetekor (bal oldal) és a forgalomba helyezés előtt (jobb oldal) [1]

Az átépítést a forgalmi igények miatt csak az Erzsébet híd átadását követően lehetett megkezdeni. A bontási munkák, melyekért az Állami Gépgyár felelt, 1914. február 2-án indultak el, és nagyon gördülékenyen haladtak. A munkálatok kezdete előtt a láncokat tehermentesíteni kellett, ezért 26 cm-rel megemelték őket. A szereléshez szükséges állványzatot cölöpjármokon elhelyezett acél híd főtartókra építették, melyeket a pilléreknél és az egyes nyílásoknál készítettek el. A régi szerkezet bontása ugyanazon év júniusára teljesen be is fejeződött, az új elemek szerelését követően pedig 1915. november 27-én átadták a megújult Lánchidat, mely ekkortól viselte Széchenyi nevét. [1]

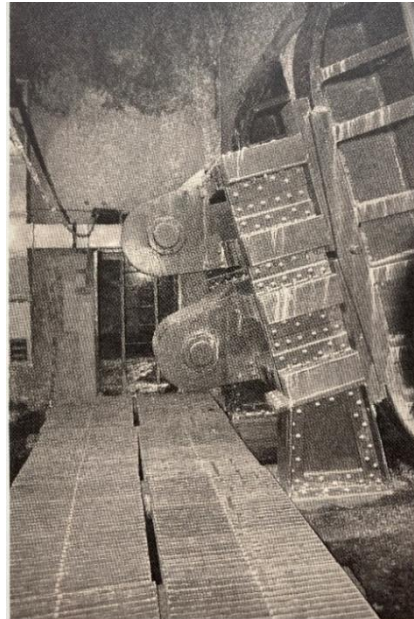
A régi alakot ugyan megtartották, de ettől eltekintve egy teljesen új acélszerkezet született. A főbb különbségeket az alábbi pontok tárgyalják:

- Az időközben elkészült Erzsébet híd építésénél szerzett tapasztalatokat alapul véve a láncok és a merevítőtartók 48-56 kN/cm² szakítószilárdságú karbonacélból, a többi szerkezeti elem pedig folyt acélból készült. A karbonacél jellemzői többé-kevésbé megfelelnek a mai S355 minőségnek. A láncszemek gyártása a MÁVAG diósgyőri gyárában folyt, a merevítőtartók pedig a cég budapesti telephelyén.

- Az egyes láncok tulajdonságai is jelentősen változtak: a hossz ~8 m-re nőtt, ezzel megduplázva az addigi méretét, emiatt a függesztőrudak távolsága 1,80-ról 3,60 m-re nőtt; a szemek magassága 260-ról 360 mm-re nőtt; az egy csomópontba befutó szemek száma pedig 21-ről 25-re emelkedett, egyik oldalon 12 db 29 mm, másik oldalon 11 db 29 mm vastag, illetve a széleken 1-1 db 17 mm vastag elem; a láncok teherbírása kétszeresére nőtt, anyaguk szilárdsága pedig közel 50%-kal lett nagyobb.
- A lánckötegek lehorgonyzását új, az összekötő csapokat nem terhelő módszerrel kivitelezték. Az új lánclemezek miatt természetesen a lehorgonyzó sarukat is cserélték. A régi és új lehorgonyzó sarukat a 3.8. és 3.9. ábrák mutatják be.



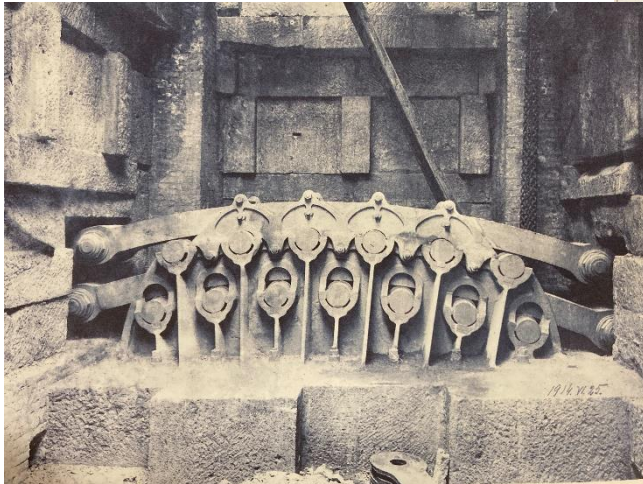
3.9. ábra: A régi lehorgonyzó saru [6].



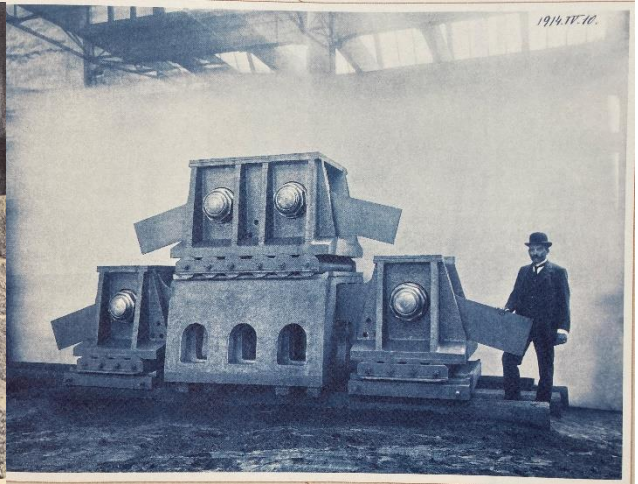
3.8. ábra: Az új lehorgonyzó saru [6].

- A kapuzat tetején új nyeregsarukat helyeztek el (3.11. ábra), alájuk szerkezeti köveket helyeztek. A görgős saruszerkezet csak függőleges terhet ad át a pilléreknek, ezzel az egy pillér alapjára adódó maximális nyomás az eddigi 10 kg/cm² helyett 5,5 kg/cm²-re csökkent. A 3.10. ábra jól mutatja, hogy a régi nyeregsaru íves láncokkal volt kiképezve.
- A pályacsatlakozásoknál került először alkalmazásra a Gállik István által tervezett fésűs dilatáció. Ennek előnye az volt, hogy nagy dilatációs hézag áthidalására adott lehetőséget, mégpedig zökkenésmentesen.

- Az új acélszerkezet tömege 5194 tonna lett, szemben az eredeti Lánchíd 2139 tonnájával. [1][5][6]

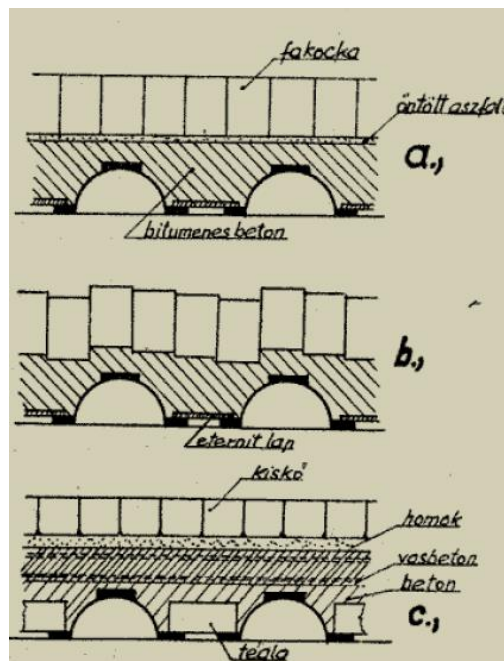


3.11. ábra: Régi nyeregsaru [6].



3.10. ábra: Új nyeregsaru [6].

A Lánchídon az acélszerkezet mellett a járda is új kialakítást kapott. Az addig konzolokon fekvő járdát vasbetonlemez szerkezetűre építették át, de esztétikai okok és a híd eredeti képének megőrzése érdekében a régi konzolokat is a helyükön hagyták. Emellett a szabadságharc során találatot szenvedett budai pillér sérülése is javításra került. A kocsipályára fakocka burkolatot raktak le, ám ezek rövid időn belül benyomódtak a nyári meleg miatt megpuhult bitumenes betonburkolatba. A fakocka burkolat romlását a 3.12. ábra is jól mutatja. Statikai számítások után 1920-ban a fakockaburkolatot kiskőburkolat váltotta. A zórésvasak közti hézagot téglákkal töltötték ki, majd betonnal egyenlítették ki. Erre a rétegre került 8 cm betonlemez, amin a homokba ágyazott kiskőburkolat kapott helyet. [5]



3.12. ábra: A fakockaburkolat romlása [5].

A Lánchíd átépítését örömmel üdvözölte nem csak Pest-Buda lakossága, de a műszaki körök is. A munkában résztvevőket a Kisfaludy Társaság Greguss-díjjal tüntette ki az utolsó hat év legkiválóbb műalkotásáért.

3.4. A Lánchíd a II. világháború után

A II. világháború során a visszavonuló német csapatok többek között a Lánchídat is elpusztították (3.13. ábra), 1945. január 18-án berobbant a pesti hídfő lánckamrájába helyezett töltet. Csak a szerencsén múlt, hogy a budai hídfőbe helyezett robbanóanyag nem lépett működésbe, mivel a lánckamra éppen el volt árasztva. A lehorgonyzás megszűntével a lánc jelentősen elmozdult, a pesti mederpillérnél 25 m-rel, míg a budain csak 3 m-rel. A kiszaladó lánc magával rántotta a koronasarukat is, ezzel áttörve a pillérek falazatát. A láncok egy része elszakadt, a koronasaruk a pillértől eltávolodva lógtak a láncon, ami már nem tudta tartani a pályaszerkezetet, így a függesztőrudak túlterhelődtek, és elszakadtak. Először a híd pesti, majd középső nyílása zuhant a Dunába, a budai nyílás pályája csupán kettétört és a vízbe csúszott (3.14. ábra). A robbanás ereje akkora volt a pesti hídfőben, hogy a falazat a lánccsatorna mentén átrepedt, a külső faltömb pedig 1-2 m-rel eltolódott. A helyreállítási munkákat addig nem lehetett megkezdeni, míg a mederpillérek és a pesti hídfő, illetve lánckamra sérüléseit ki nem javították, valamint a Dunába zuhant roncsokat is ki kellett emelni részben a hajózhatóság, részben pedig a Kossuth-hídba való beépítés miatt. [10]



3.13. ábra: A felrobbantott Lánchíd 1945-ben [18].



3.14. ábra: A budai nyílás kettőtört pályalemeze [6].

1947. tavaszán az a döntés született, hogy a hidat az átadás 100. évfordulójáig, azaz 1949. novemberéig újjá kell építeni, mégpedig az eredeti alakjában és eredeti méretekkkel. Csupán a pillér kapuzatait kell úgy átalakítani, hogy alattuk két busz biztonságosan elhaladhasson, valamint a hídfőket is meg kellett feleltetni a modern forgalmi igényeknek. Az újjáépítésnél két fontos, mérlegelendő kérdés volt:

- mennyire felhasználhatók a felrobbantott szerkezeti elemek – főleg a lánclemezek – figyelembe véve azt, hogy a híd teherbírását növelni kell, és
- milyen mértékben menthető a mederpillérek súlyosan sérült oromzata.

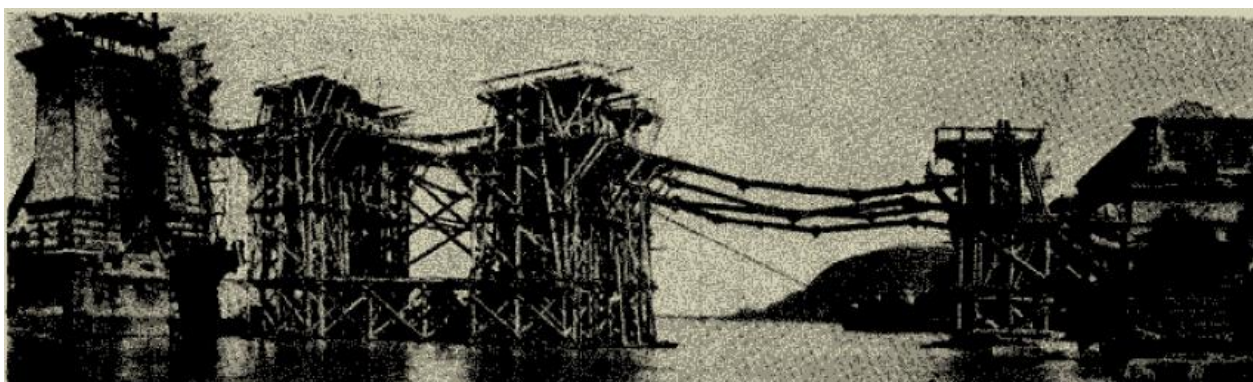
A roncsok helyének megállapítása után úszódaruk segítségével kiemelték a pályaszerkezetet, a merevítőtartókat, valamint a láncokat. Először a pesti hídfőnél kezdték meg a munkát, majd tovább haladtak a középső nyíláshoz, ahol alacsony vízállásnál látható volt, hogy a pesti nyílással ellentétben a pálya és a merevítő tartók nagy hosszúságban épek maradtak. Mivel ezek az elemek iszappal voltak fedve, csak robbantás és darabolás után lehetett őket kiemelni. [10]

A Dunából felhúzott láncszemek vizsgálata során arra jutottak, hogy kiegyenesítés után szilárdsága és kémiai összetétele alig változott az eredetihez képest, így a régi láncok 76%-át újra fel tudták használni. A túl nagy mértékben elhajlott, felhasználásra alkalmatlan láncszemek néhány darabját a 3.15. ábrán láthatjuk. A hiányzó lánclemezeket az 1913-as eredetivel megegyező szénacélból, Diósgyőrben gyártották. A merevítőtartó és pályaszerkezet épen maradt részeiből semmi nem bizonyult használhatónak, így ezeket teljesen új anyagból kellett legyártani. A híd lehajlásait csökkentendő, a merevítőtartót ezúttal nem karbonacélból, hanem 36.24.12-es folytacélból készítették. [10]

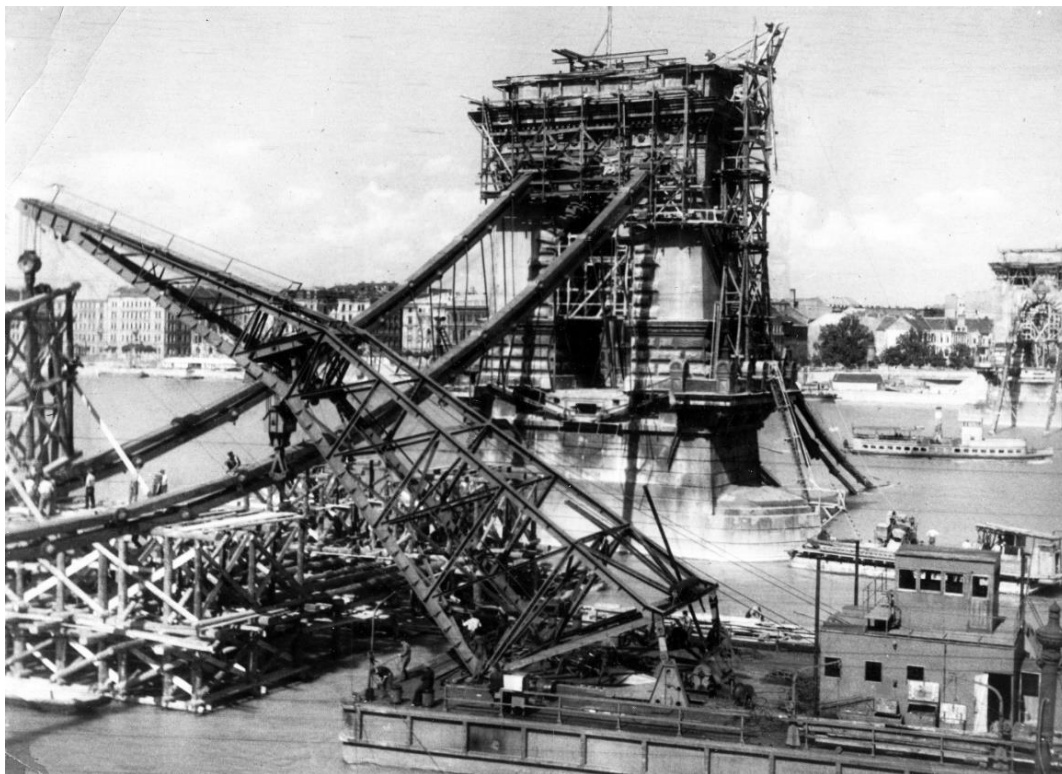


3.15. ábra: Elhajlott láncköteg a Dunában [19].

A hídszerkezet szerelését 1948 őszén kezdték el a budai nyílásban, mivel ott a láncok nem szakadtak le, csupán lesüllyedtek, és esélyes volt, hogy ezeket nem kell le- és visszaszerelni, hanem elegendő visszatolni. Ez abban az esetben volt biztosítható, ha rendelkezésre áll egy alsó állványzat (3.16. ábra), mivel a lánc leszakadt állapotában nem önhordó. Végül magát a merevítőtartót használták alátámasztó szerkezetnek, de ezt még merevíteni kellett egy ideiglenes vonólánccal, hogy elegendő legyen a teherbírása. A budai láncok helyreállítását a József Attila úszódaru is segítette (3.17. ábra) A saru eredeti állapotába való visszahelyezése fél évet vett igénybe, mivel – a csapsúrlódást elkerülendő – a lánc elemeket egyesével be kellett olajozni. A középső és a pesti nyílás láncainak szerelését úgy vitték véghez, hogy a merevítőtartót használták fel áthidalónak, ezeket 35-40 méterenként cölöpjármokkal alátámasztották a kellő teherbírás érdekében, és erre a szerkezetre került a láncszerelő állványzat. Ezt követően a láncra felfüggesztették a merevítőtartó darabjait, a pályalemezt és a pályaburkolatot, végül pedig összeszögecselték a merevítőtartó kapcsolatait. [10]



3.16. ábra: A budai lánc ideiglenes felemelésére, stabilizálására és az új merevítőtartó szerelésére szolgáló állványok [5].



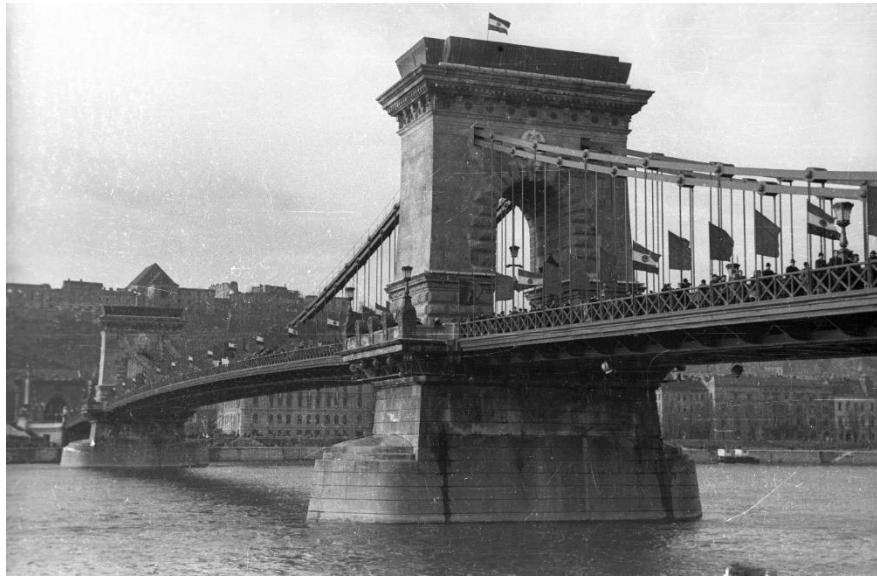
3.17. ábra: A József Attila úszódaru a budai láncok helyreállítása közben [18].

A vasbeton pályalemez zsaluzása és a vasalás elhelyezése a tartószerkezet szerelése után azonnal megkezdődött. A híd tartószerkezete abban tér el az 1914-15. évitől, hogy a pályalemezt a hossztartók tetejére hegesztett karmok hordozzák, illetve maga a vasbeton alkalmazása is újdonság volt a korábbi zórésvasas megoldás után. A betonozás 1949 októberének végére elkészült, ekkor került sor a 7 cm vastag kétrétegű hengerelt aszfaltburkolat készítésére.

A súlyosan rongálódott mederpillérek javításával egyidőben a budai hídfő is jelentős átalakuláson esett át. Mivel a pesti oldal mintájára ide is körforgalmú feljárót akartak létesíteni, a hídfő szélesítésre szorult. Ennek kapcsán épült meg a feljárát íves kifordulásához simuló lépcső is, mely közvetlen összeköttetést biztosított a szintén újonnan épített, 3,4 m átmérőjű gyalogos átjáróval. A pesti hídfő már 1939 óta rendelkezett ilyen aluljáróval, és ez épen is maradt a '45-ös robbanás ellenére. A hídfő legyező szerű kiszélesítése szükségessé tette a villamos aluljáró meghosszabbítását is, mindkét oldalon 10-10 m-rel. A buszok egymás melletti elhaladását a pillérek kapuzata alatt, ezek átalakításával oldották meg. Ennek köszönhetően az útpálya szélessége az említett két rövid szakaszon 5,4-ről 6,45 méterre nőtt, illetve mindkét oldalon helyet kapott egy-egy 40 cm-es kerékvető. Az eredeti tervek szerint a kapuzatokban vízszintesen vezetett át a kociút, azonban a lovaskocsikkal ellentétben a gépjárműveket már zavarta az enyhe lejtésű és vízszintes útszakaszok találkozása által képzett zökkenő. Az átépítést követően a pilléreken átvezető szakasz is íves kialakítást kapott, így a hídpálya hossz-szelvénye törés nélküli, folytonos vonal lett. Szóba került, hogy a mindhárom nyílás felett független kéttámaszú tartóként viselkedő merevítőtartót egy darab, folytatólagos tartóként alakítják ki, de ez sok más hátrány mellett csak a lehajlás szempontjából lett volna kedvezőbb, így elvetették az ötletet. [10]

Az új Lánchíd terve és erőtani számításai Sávolgy Pál munkái, a vasbeton szerkezetek terveit Méhes György készítette. Az acélszerkezetek részlettervei Fáber Gusztáv vezetésével készültek, újjáépítésüket pedig a Magyar Állami Vas-, Acél- és Gépgyárak végezte. A kő- és vasbeton munkákat a Dunahídépítő N. V. végezte Fábián József vezetésével. A helyszíni szerelést Zimányi István főépítésvezető irányította Bujdosó Géza és Bors Ernő építésvezetőkkel, a kivitelezést pedig Széchy Károly és Palotás László felügyelte a Közlekedési és Postaügyi Minisztérium Híd főosztályáról. A műszaki ellenőrzést Korda István és Sávós Károly végezte. [10]

A háború után új életre kelt Széchenyi lánchidat (3.18. ábra) 1949. november 20-án vehette használatba a közönség, éppen az eredeti híd megnyitásának 100. évfordulóján.



3.18. ábra: Az 1949-en átadott szerkezet [18].

4. A híd tervezett felújítása

4.1. A hídon végzett vizsgálatok

A Lánchídon az 1949-es átadást követően is többször végeztek felújítási munkálatokat. 1986-ban az UVATERV felkérte a Budapesti Műszaki Egyetem Acélszerkezetek Tanszékét, hogy a felújítás tervezésénél működjön közre. A szerződés szerint a Tanszék feladata a következő volt: „A lánckamrában lévő láncszakaszokon a korróziós kár okozta szelvénygyöngülés mértékének felmérése, a felméréshez szükséges vastagságmérő műszer kifejlesztése, a mérési eredmények feldolgozása és a gyöngítés mértékének megállapítása.” [11]

A láncszemek korróziójának mértéke erősen változó tendenciát mutatott. A méréseket letisztított láncszem kötegeken végezték, és minden vizsgált láncszemnél meghatározták a leggyengébb keresztmetszetet, majd a teljes láncköteg viszonylatában is megállapításra került az átlagos, illetve a teljes keresztmetszeti gyengítés. A mért lánckötegről egy ábrát a 4.1. ábra mutat be.



4.1. ábra: Helyszíni fotó egy korrodált lánckötegről [1].

A feldolgozott mérési eredmények alapján a következőket állapították meg:

- A budai hídfő északi alsó lemezkötegénél a dolgozó keresztmetszeti arány 91%, ez az érték a pesti hídfő déli felső lemezkötegénél 95%. Ezen értékek bizonyultak mértékadónak a Lánchíd két oldalán.
- Az ellenőrző statikai számításban a láncszemek korrózióval gyengített tényleges keresztmetszete a névleges keresztmetszet 90%-a ként kerüljön felvételre.
- A pesti hídfő déli, felső, a kihorgonyzástól számított első kötegénél a lemezek felülettisztítását ismét el kell végezni a hatékony korrózió elleni védelem érdekében.

Budapest vezetése 2002-ben jelezte egy újabb felújítás szükségességét. Az ehhez kapcsolódó vizsgálatot 2011-ben végezte a Főmterv-MSc-PontTerv Konzorcium az FKF Zrt. megbízásából. Megállapításra került, hogy a láncok állapota viszonylag jó, azonban a láncsatornában és a horgonykamrában jelentősek a korróziós károk. Megfelelőnek bizonyultak a függesztőrudak, a függesztők és a kereszttartók kapcsolatát jelentő szerkezeti részletek, illetve a kereszttartók. A statikai rendszer egyik leggyengébb elemének a lánc és a függesztő kapcsolatát biztosító, kis átmérőjű, egyszer nyírt szegecsek jelentik (4.2. ábra). Továbbá a statikai számítások azt mutatták, hogy a láncfejek feszültségei a láncnyakban lokálisan túllépik a megengedett értékeket, amennyiben a láncok közötti csapos kapcsolat befeszül, nem tud elfordulni. [1]



4.2. ábra: A függesztőrúd és láncköteg kapcsolata [1].

További korróziós károkat figyeltek meg az alábbi helyeken:

- enyhe korrózió a középső hossztartókon a pályalemez felülésénél,
- a szélső hossztartók felső övei nagy felületen és teljes keresztmetszetben károsodtak, a veszteség néhol a 40%-ot is eléri,
- a vasbeton pályalemez állapota kritikus, főleg a dilatációknál és a szegélytartó zónájában (4.3. ábra); a problémát az elkorrodált víznyelők okozzák,
- a merevítőtartó pályaszint alatti részein is megfigyelhetők korróziós károk, ennek oka a pályalemez átázása.



4.3. ábra: Korrózió a járdalemezen.

A BME Hidak és Szerkezetek Tanszék 2018. októberében terheléssel célvizsgálatot hajtott végre a hídon, melynek célja a láncok közti csapos kapcsolatok állapotának és elfordulási képességének ellenőrzése volt. Ehhez szükség volt a láncokban keletkező normálfeszültségek meghatározására, melyhez nyolc helyen végeztek nyúlásmérést. A nyúlásmérő bélyegek egy része az alsó iránytörő saru közelében, másik része a pilonok tetején elhelyezkedő iránytörő saruk melletti lánckötegen került elhelyezésre. A hídfőnél lévő iránytörő saruk közül mind a négyenél létesült mérőhely, a pilonok közül három a budai, egy a pesti pilonban helyezkedett el. Minden mérési helyen az iránytörés utáni két lánckötegen végeztek méréseket, mivel statikai számítások alapján befeszülés esetén az iránytörésnél keletkezik számottevő nyomaték. Az egymás melletti lánckötegek mérésével és a mérési eredmények közvetlen összehasonlításával következtetni lehet a hajlítónyomaték mértékére, ennek változása alapján pedig a csapos kapcsolat elfordulási képességére.

A mért maradó nyúlásértékek azt mutatták, hogy a vizsgált kapcsolatok többsége nem mozdult meg, a lánckötegeket összekötő csapok nem csuklósan működtek. Ez alól kivételt képez a P3 mérési hely, ahol a legnagyobb feszültségváltozást tapasztalták, aminek hatására a kapcsolat elfordult, közel csuklósan viselkedett, a lánckötegekben fellépő nyomaték értéke a terhelés hatására lecsökkent. [9]

4.2. Felújítási szempontok

A Lánchídon végzett vizsgálati és számítási eredmények azt mutatták, hogy a híd felújítása valóban indokolt az előrehaladott korróziós jelenségek miatt. A felújítás főbb feladatai a következők:

- a korrodált a vasbeton pálya- és járdaszerkezet átépítése,
- a teljes acélszerkezet korrózióvédelme,
- saruk felújítása, vagy cseréje,
- a kapuzat járdalemezének átépítése,
- a lánckamrák beázásának megszüntetése,
- a kőfelületek és szobrok teljeskörű rekonstrukciója.

Szóba került még a járda kiszélesítésének lehetősége, de ezt műemlékvédelmi okokból és a lánckötegek teherbírásának esetleges kimerülése miatt elvetették.

Az új pályaszerkezet kialakítására két változat is született: vagy az eredeti vasbeton pályalemez rendszer alkalmaznák korszerűsítve, vagy ortotrop acél pályalemezt (4.4. ábra) építenének be. Utóbbi változat ugyan költségesebb az acélanyag miatt, de az üzemeltetés és karbantartás egyszerűsége révén azonban mégis emellett döntöttek. [1]



4.4. ábra: Új ortotrop pályalemezek az építkezés helyszínén.

4.3. A felújítás részletei

A hídszerkezetben található saruk két csoportra oszthatók: láncsorokat megtámasztó elemek és merevítőtartót megtámasztó saruk. A láncsaruk cseréjére nincs mód, mivel ahhoz az egész felszerkezetet le kellene cserélni, így ezek állagmegóvása érdekében csupán felületi korrózióvédelemre kerülhet sor. A láncsaruk közül a hídfőre terhelő kombinált iránytörő saruk vannak a legrosszabb állapotban, mivel ezek vannak leginkább kitéve az időjárás viszontagságainak. A merevítőtartó végei a pilonoknál fészkekbe futnak be úgy, hogy a merevítőtartó övei alá és fölé sarukat helyeztek, melyek továbbítják a reakcióerőket a pilonszerkezetnek. Ezen saruk jelenleg nem látják el megfelelően feladatukat, ezért cseréjükre sor fog kerülni. A merevítőtartó szérláncozata is cserére szorul, mivel korrózió miatt több helyen is szinte teljes keresztmetszeti méretét elvesztette, melyre egy példát a 4.5. ábra mutat be.



4.5. ábra. Szinte teljes keresztmetszetben korrodálódott szélrács a merevítőtartóban.

A fő tartószerkezetek – láncok és merevítőtartó – közül egyiken sem terveznek szerkezeti átalakítást, csupán korrózióvédelmükről gondoskodnak. A kereszttartókon lokális korróziós károkat véltek felfedezni, azonban a javítási technológia meghatározására csak az állapotfelmérés után kerülhet sor.

A pályalemez mellett a járdaszerkezet is megújul. A régi vasbeton lemezt kicserélve keresztirányban bordázott acél járdatáblák kerülnek beépítésre, melyek vastagsága 12 mm, a bordák távolsága pedig 400 mm.

Az új pályalemezek beépítésének következtében csökkennek az állandó terhekből származó feszültségek. A pályaszerkezet esetében ez $\sim 250 \text{ kg/m}^2$, a gyalogos járda viszonylatában pedig $\sim 85 \text{ kg/m}^2$ önsúlycsökkenést jelent. A teljes felszerkezetre vonatkozóan ezen átépítések a számítási eredmények alapján 12%-os súlycsökkenést, és a medernyílásban $\sim 70 \text{ mm}$, míg az oldalnyílásokban $\sim 7 \text{ mm}$ emelkedést eredményeznek. [1]

A szerkezeti rekonstrukción túl átépítésre kerülnek a hídfők lépcsői, felújítják a hídfők helyiségeit, kiszélesítik a gyalogos aluljárókat, valamint a kő díszítőelemeket is restaurálják. Az egyágú kandelábereket a korabeli képek alapján restaurált háromágú kandeláberek fogják felváltani, illetve LED-es közvilágítás, valamint díszkivilágítás is kiépül. Látványos változás lesz még az úgynevezett láncfedő dobok visszaépítése mind a budai, mind a pesti oldalra. [12]

5. A hídon végzett vizsgálat és a mérőrendszer leírása

A Lánchíd felújítása kitűnő lehetőséget biztosít arra, hogy a szerkezeti viselkedését megismerjük és kövessük a munkálatok során. A vizsgálatokra a BME Hidak és Szerkezetek Tanszékét kérték fel, ami az alábbiakban ismertetett célkitűzéseket tette, és ezeknek megfelelő mérőrendszert dolgozott ki.

5.1. A vizsgálat tárgya és célja

A vizsgálat tárgya a Lánchíd felszerkezeti viselkedésének követése a 2021. nyarán megkezdett átépítés során. A vizsgált pontok helyét a mérést végző Hidak és Szerkezetek Tanszék a Tervezőkkel (MSc Kft. és Főmterv Zrt.) és a Kivitelezővel (A-Híd Zrt.) közösen határozta meg, ezen helyekre pedig mérőrendszert telepített. A helyszíni mérés célja a lánckötegek és függesztőrudak feszültségváltozásainak meghatározása a mérés kezdeti állapotához képest. Az eredményekből a szerkezet alábbi tulajdonságaira kívánnak következtetni:

- az ismert módon befeszült csuklók – az iránytörő- és koronasaruk közelében – erőjátékának vizsgálata és a lánckötegekben kialakuló hajlítónyomaték változásának építés közbeni meghatározása,
- a koronasarukon tapasztalt jelentős mértékű súrlódási erő meghatározása, valamint a koronasaru két oldalán található lánckötegekben kialakuló normál-erő változása az építés folyamán,
- a függesztőrudak erőjátékának vizsgálata, valamint az átépítés hatására kialakuló rúdererőváltozás mértékének meghatározása,
- lánckötegek alakjának meghatározása az egyes építési fázisokban geodéziai módszerekkel (a Kivitelező megbízottja végzi),
- koronasaru elmozdulásmérése.

A mérés elvégzéséhez a szerkezet megfelelő helyeire nyúlásmérő bélyegeket helyeztek el. A Tanszék által feldolgozott eredmények és az ebből levont következtetések segítségével a Tervezők a jelentős bizonytalansággal működő hídszerkezet tényleges erőjátékát ismerhetik meg kellően nagy pontossággal. A méréseket az átépítés megkezdésével egy időben kezdték el és az erőjátékot befolyásoló utolsó elem elhelyezésekor fogják befejezni. [13]

A TDK dolgozatomban keretében a hídon működő mérőrendszer eredményeinek kiértékelésében vettem részt és értelmeztem a mérési eredményeket, elemeztem a hídszerkezet szerkezeti viselkedését.

5.2. A mérőrendszer felépítése

A Tanszék által kiépített mérőrendszer két részből áll:

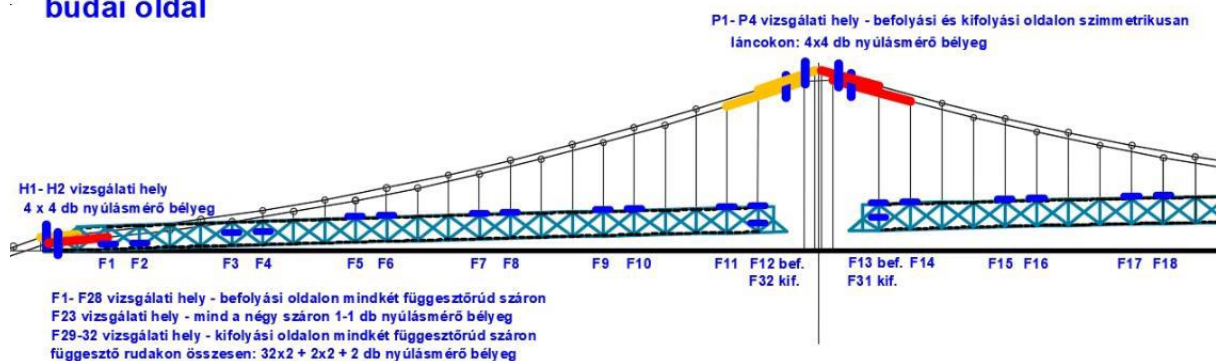
- online, folyamatos mérést biztosító rendszer: a budai oldali pilon mindkét oldalán levő lánckötegekben kialakuló nyúlásváltozást méri, közvetlenül a koronasaru melletti kötegekben, összesen $4 \times 12 = 48$ db mérőhellyel,
- időszakos mérést biztosító rendszer: a hídfőknél található iránytörő saruk melletti első lánckötegeken $4 \times 8 = 32$ db, a függesztőrudakon 70 db mérőhellyel rendelkezik, méréseket a Tervezővel és a Kivitelezővel egyeztetett időpontokban végeznek.

Összesen tehát 150 db mérőhelyet létesítettek, melyek az építés kezdetétől információt szolgáltatnak a szerkezet viselkedéséről.

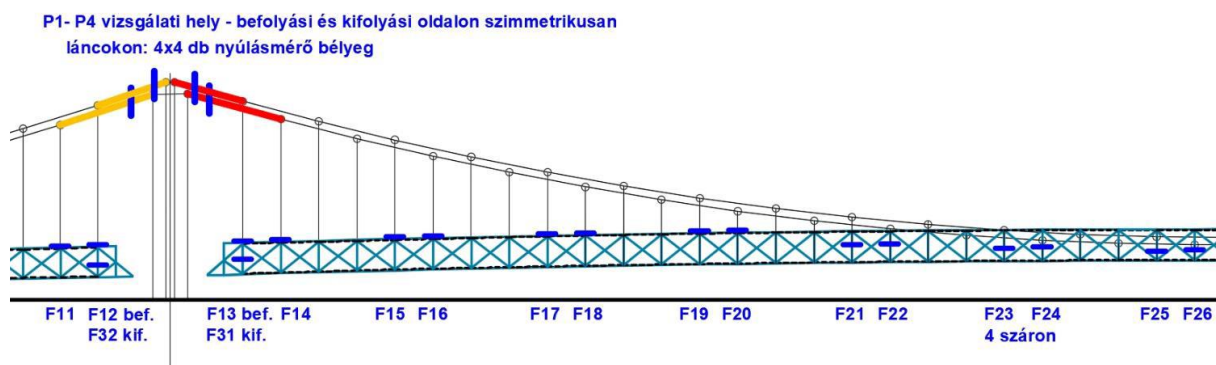
Mivel a mérés elsődleges célja, hogy a lánclemek közti csapos kapcsolat elfordulásának képességére fényt derítsen, a méréseket olyan helyen végzik, ahol számottevő nyomaték lép fel a láncokban a statikai számítások alapján. Az előzetes statikai számítások, valamint a 2018-ban végzett terheléses célvizsgálat eredményei alapján ezek a helyek a pilonok koronasarui utáni első, és az iránytörő sarukat követő első lánckötegeknél találhatók, ezért a mérési pontokat is ezen helyeken alakították ki.

A méréseket ezek alapján összesen nyolc helyen végzik: négy mérőhely a hídfőkben helyezkedik el (H1-H4), négy pedig a budai pilon koronasarui mellett (P1-P4). Mindkét helyen az alsó és felső lánckötegen is végeznek méréseket. A rendszer globális elrendezését az 5.1.-5.5. ábrák mutatják be.

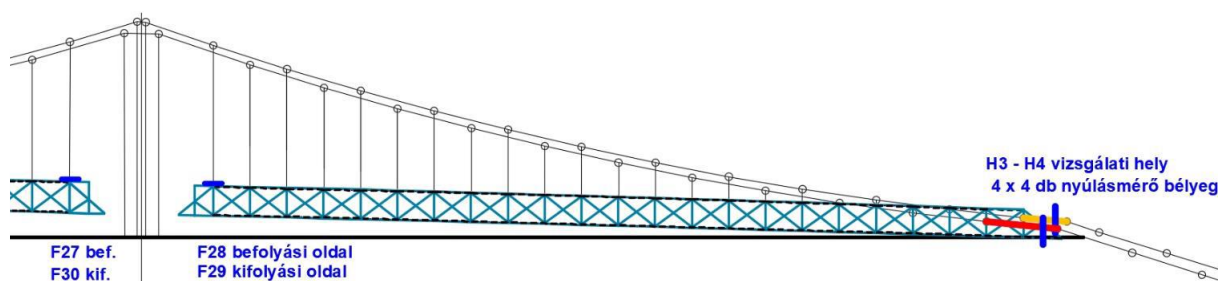
budai oldal



5.1. ábra: Nyúlásmérési helyek globális helyzete I.

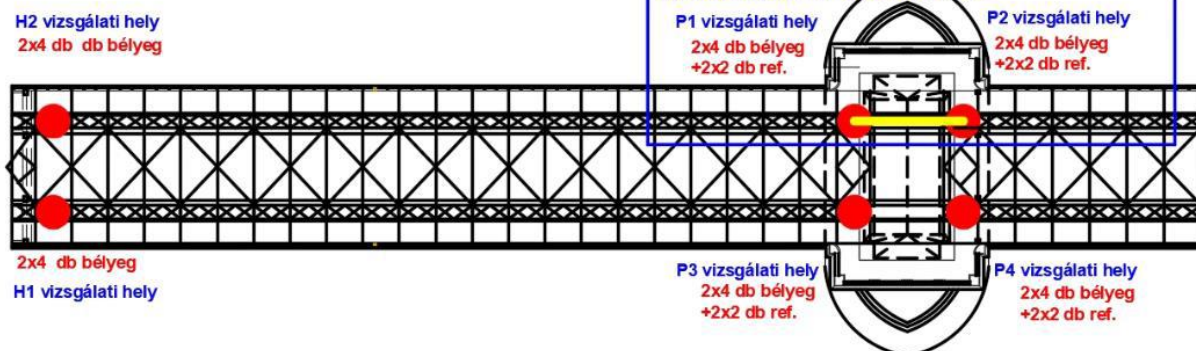


5.2. ábra: Nyúlásmérési helyek globális helyzete II.



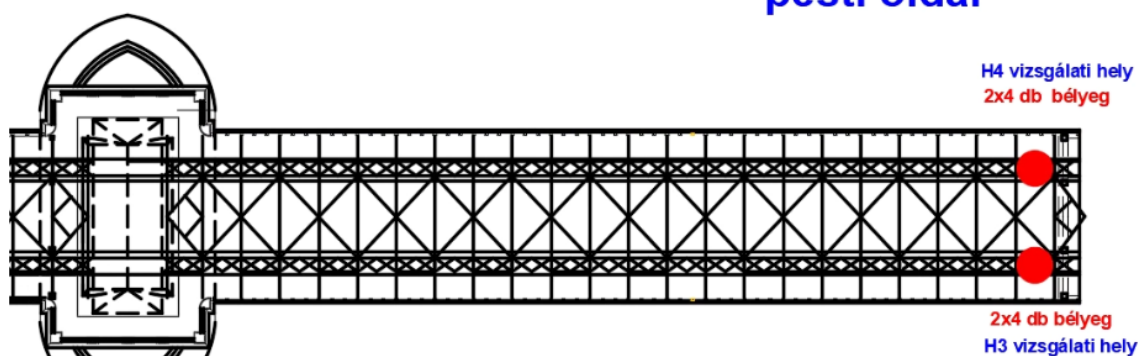
5.3. ábra: Nyúlásmérési helyek globális helyzete III.

budai oldal



5.4. ábra: Nyúlásmérési helyek globális helyzete IV.

pesti oldal

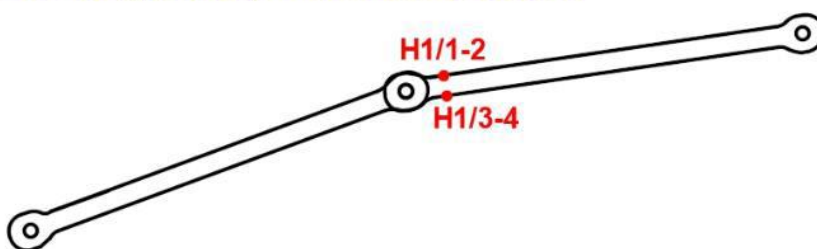


5.5. ábra: Nyúlásmérési helyek globális helyzete V.

5.2.1. Hídfeők

A hídfeőknél egy mérőhelyen 4-4 db nyúlásmérő belyeg került felhelyezésre az 5.6. ábrán szemléltetett módon.

H1 - H4 vizsgálati hely - nem online rendszer



5.6. ábra: Nyúlásmérő belyegek elhelyezkedése az iránytörő saruk mellett.

A bélyegek a lánckötegen a lánclemek párhuzamos részének végén, a fejrész lekerekítésétől mérve 100 mm-re helyezkednek el. A kötegen belül a nyúlásmérő bélyeg mindkét oldalról az első lánclemez gerinclemezőnek külső oldalán, az alsó és felső szélső száltól 20 mm távolságra helyezkedik el, tehát kötegenként 4 db nyúlásmérő bélyeg került elhelyezésre. A nyúlásmérő bélyegek bekötésének módját a vízzáró mérődobozba az 5.7. ábra mutatja be.



5.7. ábra: H1 mérőhely helyszíni képe.

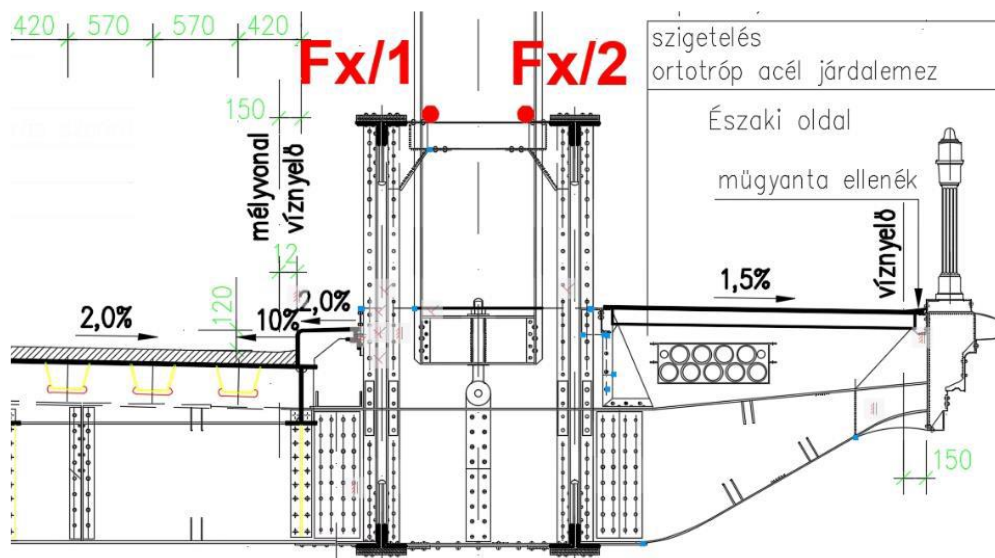
5.2.2. Függesztőrudak

Mivel a híd kétszeresen szimmetrikus, a függesztőrudak nyúlásmérésénél a híd negyedén került kiépítésre egy mindenre kiterjedő mérőrendszer. A másik három negyedben csak szűrőpróbaszerűen, a leghosszabb függesztőrudakon került kialakításra mérési hely a szimmetrikus viselkedés elemzésére. A részletes mérésre kiválasztott negyed a budai oldal befolyási része, ellenőrzésként a pesti oldal be- és kifolyási oldali leghosszabb függesztőrúdon is készülnek mérések. A mérés célkitűzése, hogy mind a felső, mind az alsó láncköteg minden második függesztőrúdjának nyúlásváltozása legyen meghatározva. Ennek megfelelően az 5.1. és 5.2. ábrán láthatóak szerint F1-F26 mérőhelyek lettek kialakítva. Az F27-F28 mérőhelyek a pesti oldal befolyási oldali, az F29-F30 mérőhelyek a kifolyási oldali leghosszabb rudakon helyezkednek el, az F31-F32 mérőhelyek pedig a budai oldal kifolyási oldalának leghosszabb rúdjaiban vannak. A legtöbb függesztőrúdon 2 db bélyeg található a rúd egy-egy szárán az 5.8. és 5.9. ábrán látható módon.

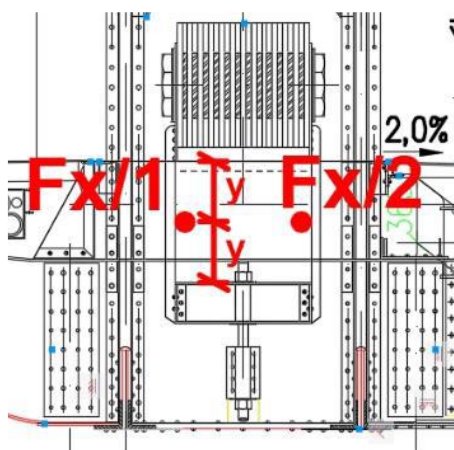


5.8. ábra: Nyúlásmérő bélyegek pozíciója a függesztőrudakon általános esetben.

Vannak függesztőrudak, melyek négy szárral rendelkeznek, ilyen esetben egy bélyeg kerül a külső, egy pedig a belső szára. Az F23-as mérőhely kivételt képez, ahol mind a négy szára került nyúlásmérő bélyeg. Azon függesztőrudak esetében, ahol a láncköteg a merevítőtartó belsejében van, vagy 1000 mm-nél közelebb van a felső öv síkjához, a bélyegeket a függesztőrúd hosszának felében lettek elhelyezve az 5.10. ábrának megfelelően.



5.9. ábra: Nyúlásmérési hely a függesztőrúdon általános helyen.



5.10. ábra: Nyúlásmérési hely a függesztőrúdon merevítőtartón belül.

A függesztőrúdon lévő mérési eredményeket helyszíni leolvasással vannak meghatározva, melyet a láncok és függesztőrudak szempontjából mértékadó beavatkozások előtt és után végeznek.

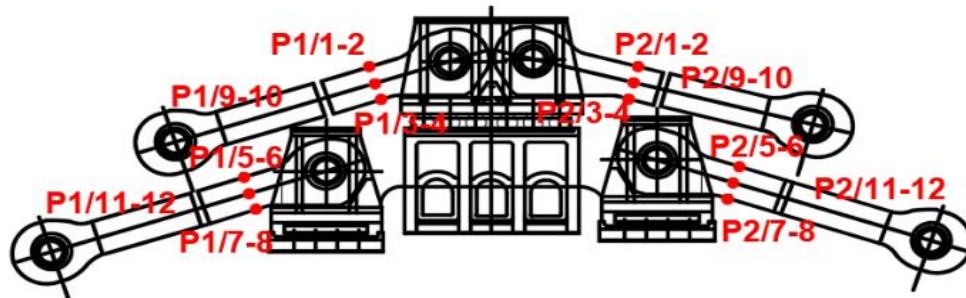
5.2.3. Budai pilon

A budai pilonon kiépített mérőrendszer négy mérőhelyből áll, melyek a négy koronasarunál helyezkednek el. A P1 és P2 mérőhely a befolyási oldalon, P1 a budai medernyílás felől, P2 a közbenső nyílás felől, míg P3 és P4 a kifolyási oldalon, P3 a budai medernyílás, P4 a közbenső nyílás felől helyezkedik el (5.4. ábra). Minden mérőhelynél vannak nyúlásmérő bélyegek az alsó és felső lánckötegen is, a hídfőkön vizsgált lánckötegekéhez hasonlóan a saruba befogott láncfejtől 100 mm távolságra, a gerinclemezen. A pontos mérőhelyek kijelöléséhez a 2018-ban végzett terheléses célvizsgálat eredményeit használták fel. Az alsó és felső szélső szál mellett

itt a láncok közepére, a semleges tengelyre is kerültek bélyegek, ezáltal a láncokban keletkező hajlítónyomaték- és normálérő változás egymástól függetlenül is meghatározható és összehasonlítható. A pontos elhelyezkedést az 5.11. és 5.12. ábrák szemléltetik.

P1 és P2 vizsgálati hely - befolyási oldal

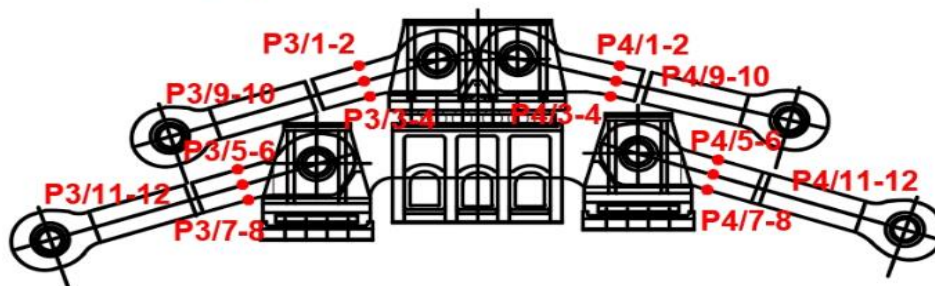
2x4 db bélyeg + 2x2 db ref.



5.11. ábra: Nyúlásmérő bélyegek elhelyezkedése a P1 és P2 mérőhelyeken.

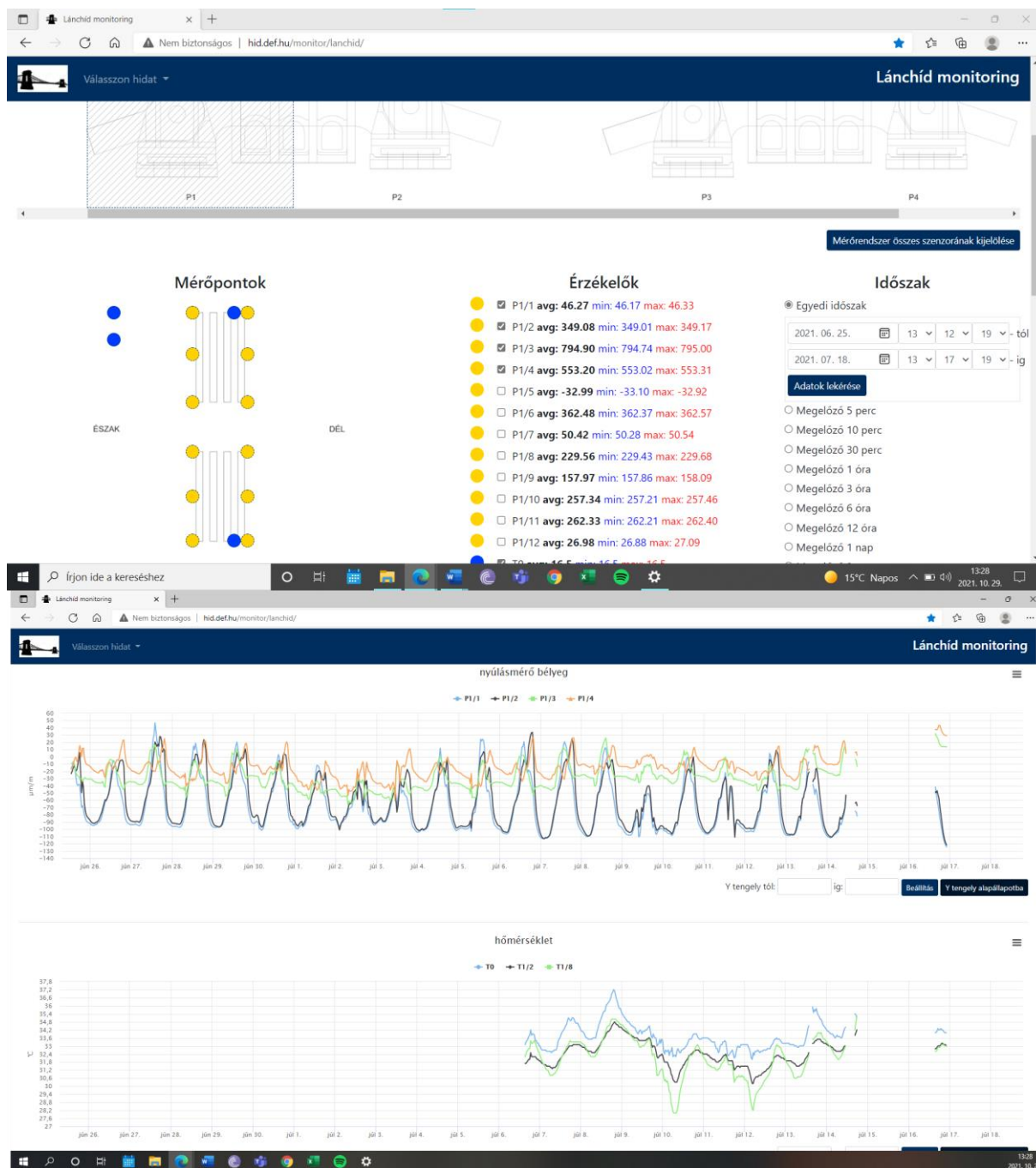
P3 és P4 vizsgálati hely - kifolyási oldal

2x4 db bélyeg + 2x2 db ref.



5.12. ábra: Nyúlásmérő bélyegek elhelyezkedése a P3 és P4 mérőhelyeken.

A mérőrendszer a fentebb ismertetett mérőhelyekkel ellentétben nem igényel helyszíni leolvasást, hanem folyamatosan rögzíti a nyúlásértékeket, majd egy online felületen elérhetővé teszi őket. A bélyegek nyúlásadatai egyenként is lekérhetőek, így lehetővé válik az egyes kötegek koncepcionális vizsgálata. A mért értékeket az online rendszer idő függvényében fel is rajzolja, ezáltal az eredmények azonnal kiértékelhetővé válnak. A nyúlásértékek mellett rögzítésre kerül a mérés időpontja, illetve az acélszerkezet és a levegő hőmérsékletének mérését is lehetővé teszik az erre szolgáló bélyegek. Egy példát az online kiértékelő rendszerre az 5.13. ábra mutat be.



5.13. ábra: A monitoring rendszer internetes felülete.

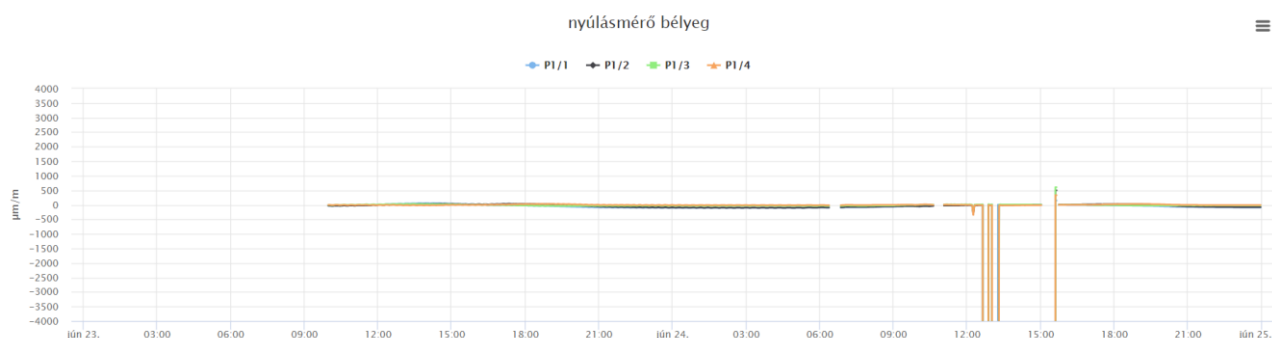
6. A P1-P4 mérőhelyek eredményeinek kiértékelése

A vizsgálat ismertett célkitűzései közül jelen dolgozat a láncokban keletkező hajlítónyomaték, ezáltal pedig a koronasaruknál lévő csapos kapcsolatok elfordulási képességének megfigyelésére összpontosít. Ezen jelenségeket az 5.2.3. pontban bemutatott budai pilonban lévő online mérőrendszer adatainak segítségével szeretném elemezni.

6.1. Rendelkezésre álló adatok

Az online mérőrendszer 2021. június 23-ától szolgáltatott adatokat. Kezdetben még jelentős mérési hibákat tapasztaltunk (6.1. ábra), ami többnyire áramszünetnek és áramingadozásoknak volt betudható, az elektromos hálózat kezdeti kiépítési bizonytalanságai következtében. Június

24. délutántól már stabilnak tekinthetőek a mérési adatok, így ezekre fókuszálok a dolgozatomban.



6.1. ábra: Kezdeti mérési hibák.

A kiértékelés megkezdése előtt meg kell említeni, hogy a monitoring rendszer 2021. július 14-én egy villámcsapás következtében teljesen tönkrement. Visszaállítani csak szeptember 18-án sikerült a rendszert, ekkor viszont a bélyegek kezdetben egységes nulla értékre kalibrálása nem történt meg esetleges adatvesztéstől tartva. Ennek okán a rendszer újraindítása óta keletkezett mérési adatokat az online felületről letöltöttem, és Microsoft Excel segítségével szeptember 18. 13:00 kezdőidőponttal egységesen 0 értékre hoztam. Ezzel ezt a pontot tekintetem a mérési eredmények kiindulási értékének, ehhez képest értékeltem a hídon azóta kialakult feszültségváltozásokat. A rendszer a mai napig működik és remélhetőleg az építés befejeztéig működni is fog, az adatokat azonban október 22-ig vizsgáltam.

A monitoring rendszer adatait két időintervallumban elemzem, először június 23. és július 14., majd szeptember 18. és október 22. között. Az első, nyári időszakban jelentős munkálatok nem történtek a szerkezeten, csupán az alsó függesztett állvány, illetve a bakdaru pályája épült ki, valamint a felújítás első lépéseként a híd teljes hosszáról lemarták az aszfaltot. Ez alapján kijelenthető, hogy az itt észlelt nyúlásváltozások döntő része a hőmérsékletváltozásból származik. Az őszi időszakban már jelentősen előrehaladt a munka, a középső nyílásban teljesen elbontották a vasbeton pályalemezt, valamint az új, ortotrop acéllemez beépítése is megkezdődött. Erről sajnos nincsenek adataink az online mérési rendszerben. A szeptember 18-tól való kiértékelési fázis már az új, acél pályalemez beépítése közben kialakuló feszültségváltozást mutatja.

6.2. Elemzési stratégia

A nyomaték kialakulásának és a csapos kapcsolat elfordulási képességének vizsgálatát mérőhelyenként végzem el előbb a nyári, majd az őszi eredmények kiértékelésével. A P1 mérőhely példáján ismertetem a nyúlásadatok ábrázolásának módját és bemutatom a tapasztalt jelenségeket. Ehhez az online mérőrendszer által generált diagrammokat használom fel. Az őszi adatsorok kiértékelését az online monitoring rendszerből lekért számadatokból elkészített grafikonokon mutatom be. Az egyes mérőhelyeken külön vizsgálom az alsó és felső láncköteget, ezeken belül pedig külön grafikonon ábrázoltam a szélső szálak és a semleges tengelyek mérési eredményeit. A tendenciák megismerése után összevetem a különböző mérőhelyek adatait és az egyes helyeken keletkező normálerők és nyomatékok nagyságát.

A mérési eredmények megértéséhez fontos volt tudnom, hogy melyik időpontban pontosan milyen munkafolyamat történ a hídon, melyet táblázatosan az 1. táblázat mutat be.

2021.05.10.	Alsó függesztett állvány elkészül a pesti oldalon
2021.06.17.	Alsó függesztett állvány a teljes szerkezet alatt, aszfalt lemarva
2021.06.30.	Alsó függesztett állvány a teljes szerkezet alatt, aszfalt lemarva, bakdaru pálya: modernyílásban akasztófák 80%, hídpálya felőli darupálya 80%
2021.07.15.	Alsó függesztett állvány a teljes szerkezet alatt, aszfalt lemarva, bakdaru pálya kiépült
2021.07.21.	Alsó függesztett állvány a teljes szerkezet alatt, aszfalt lemarva, láncállványok meder nyílásban, bakdaru pálya kiépült, a középső 12 nyílás kibontva
2021.08.01.	Alsó függesztett állvány a teljes szerkezet alatt, aszfalt lemarva, bakdaru pálya kiépült, láncállványok modernyílásban és budai déli láncon, a modernyílás kibontva (98%)
2021.09.18.	Függesztett állvány a teljes hídszerkezet alatt, bakdaru pálya kiépült, középről pilonokig a pályalemez és acélszerkezet kibontva, 56-64 jelű kereszttartó közben pályalemez beépítve. Állványok: Meder - Pest dél, Buda dél, Buda észak Part - Buda dél, Pest dél, Pest észak
2021.10.22.	44-76 jelű kereszttartó közben pályalemez beépítve.

1. táblázat: Építési fázisok időbeli eloszlása.

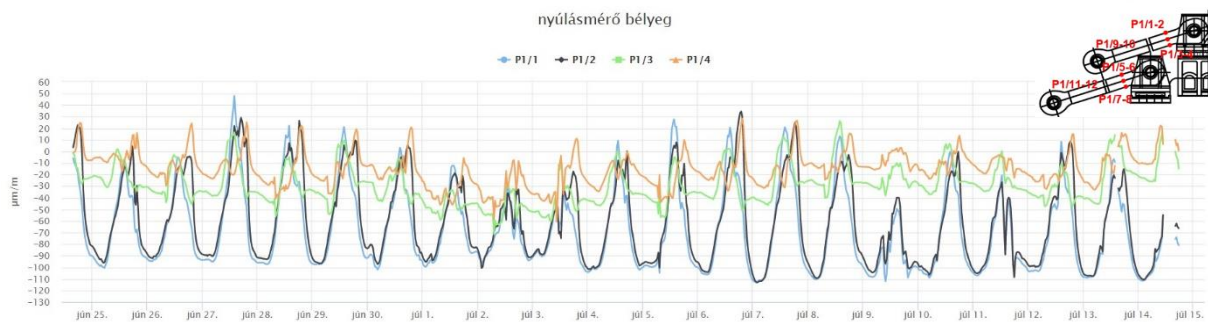
6.3. Adatok kiértékelése mérőhelyenként

6.3.1. P1 mérőhely

A mérőhely adatainak vizsgálatát a nyári intervallummal kezdem. Elsőként a felső láncköteg alsó és felső szélső szálainak nyúlásértékeit ábrázoltam, ez a P1/1, P1/2 (felső szélső szálak) és P1/3, P1/4 (alsó szélső szálak) bélyegeket jelenti (6.2. ábra).

A diagramm vízszintes tengelye az időtengely, a beosztás egysége egy nap, a függőleges vonalak 00:00 órát jelölnek. A függőleges tengely a nyúlásértékeket ábrázolja $\mu\text{m/m}$ (microstrain) egységben, melyet az acél rugalmassági modulusával (210 GPa) szorozva normálfeszültséggé számíthatunk át. A mérőrendszer online felületén kijelölt bélyegek mérési eredményei egy-egy vonalként jelennek meg, melyek a nyúláskülönbségeket szemléltetik. A vonalvezetés mutatja a láncszemek összehúzódását (negatív irányba mozdulás) és nyúlását (pozitív irányba mozdulás) azon a ponton, ahol a bélyeg elhelyezkedik. Optimális viselkedés esetén, azaz ha a láncokban csak normálerő keletkezne, a nyúlásértékek egyeznének. Esetünkben azonban a csapos kapcsolatok nem mozdulnak el megfelelően, ezért a szélső szálak ellentétesen mozognak, ami feszültségkülönbséget jelent a láncon belül, tehát nyomatókat a vizsgált keresztmetszetben. A kialakult nyomatók nagyságát a vizsgált grafikonokon abból állapíthatjuk meg, hogy megnézzük az alsó és felső szélső szálak közti távolságot.

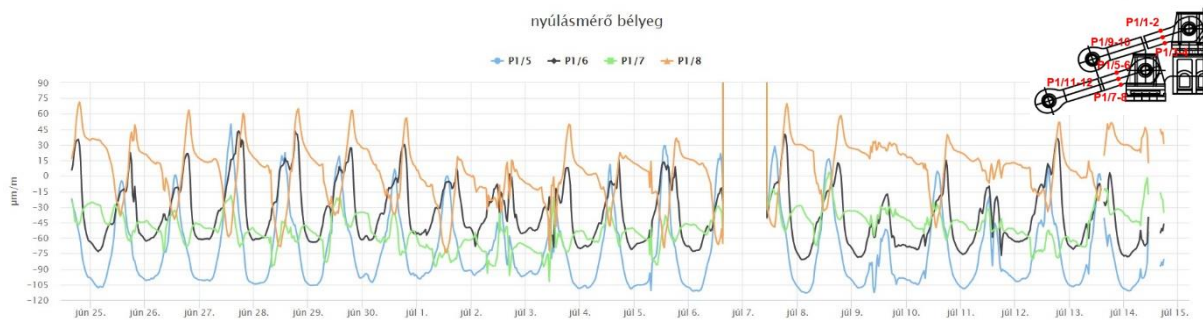
Az egyszerűség érdekében, mivelhogy jelent fejezet csak a P1 mérőhely eredményeivel foglalkozik, a bélyegekre a továbbiakban a mérőhely jelölése nélkül hivatkozom (pl. P1/1 → 1-es bélyeg).



6.2. ábra: P1 felső köteg mérési eredményei (nyár).

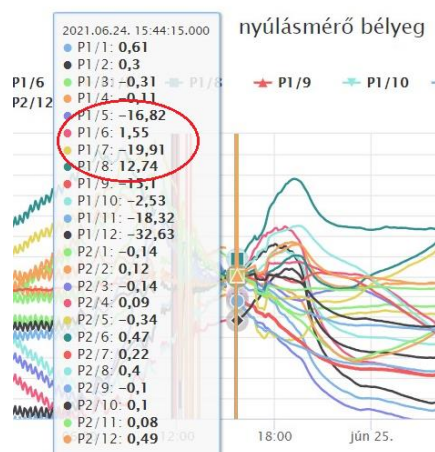
A felső láncköteg grafikonja alapján látható, hogy az 1-es és 2-es bélyeg szinte teljesen együtt mozog. Az P1/1 jelű bélyeg a vizsgált köteg befolyási oldali láncszemének felső szélső szálán, a P1/2 a kifolyási oldali láncszem felső szélső szálán található. Ugyanez az együtt mozgás megfigyelhető a köteg alsó szélső szálában is, azaz a 3-as és 4-es bélyegen. A felső szélső szál nyúláskülönbségei sokkal nagyobbak, 100-120 $\mu\text{m}/\text{m}$ nagyságúak (20-24 MPa). Ennek oka az lehet, hogy a felső szélső szál sokkal jobban éri a nap hőhatása, így ez jobban felmelegszik, tehát nagyobb nyúlásváltozásokat szenved. A szélső szálak különböző mértékű nyúlásváltozásából fakadó nyomaterék mellett együtt mozgás, azaz azonos nyúlásértékek is megfigyelhetők, ami normálerőt jelent. Az észlelt tendencia naponkénti ismétlődést mutat, ezzel bizonyítva, hogy csak a hőmérsékleti hatás okozza a normálerő mellett kialakult nyomateréket.

Az alsó láncköteg grafikonja (6.3. ábra) első ránézésre nem hozza a felsőn látott tendenciát, de a nulla értékre állítás időpontját megnézve látszik, hogy az 5-8 bélyegek esetében jelentős a nullától való eltérés, melyet a 6.4. ábra mutat be. A köteg két oldalán lévő láncok alsó (7-8) és felső (5-6) szélső szálai páronként közel azonos értékről indulnak, így a köteg két oldalán található láncokban ébredő nyomaterék a hibás nullázás ellenére is megfigyelhető.



6.3. ábra: P1 alsó köteg mérési eredményei (nyár).

A napon belüli változások, valamint a teljes tendencia egyezik a felső köteggel. Július 6-8. között egy $\sim 600 \mu\text{m}/\text{m}$ nagyságú hirtelen felugrás látható a grafikonon, ami mérési hibából adódik, ezért az alsó láncköteg diagramját a felsőével megegyező nyúlásváltozás-intervallumon ábrázoltam.



6.4. ábra: P1 és P2 mérőhelyen mért értékek a nullázás pillanatában.

Az alsó kötegben keletkezett maximális nyúlásváltozás hasonló a felső kötegéhez, ez 100-120 $\mu\text{m}/\text{m}$ (20-24 MPa). Megfigyelhető még az alsó köteg alsó szélő szálában egy keresztirányú nyomaték, mely a 7-es és 8-as bélyeg ellentétes mozgásából adódik.

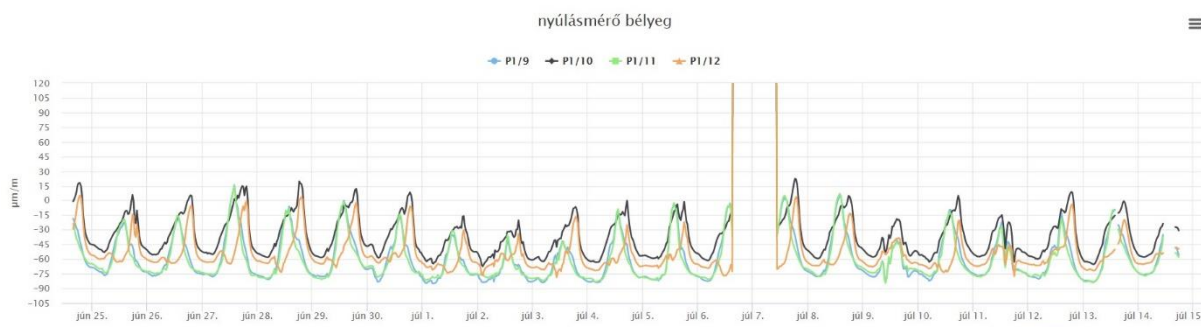
A hőmérsékletet mérő bélyegek csak július 6-tól szolgáltatnak adatot, amint azt a 6.5. ábra is mutatja. T0 a külső hőmérsékletet méri, T2 a P1/2 bélyeg mellett a felső láncköteg hőmérsékletét, T8 pedig az alsó köteg hőmérsékletét méri a P1/8 jelű bélyeg mellett.



6.5. ábra: Hőmérsékleti változás a P1 helyen (júl. 6-14.).

A lánckök hőmérséklete jellemzően követi a külső hőmérsékletet 1-2 $^{\circ}\text{C}$ eltéréssel, a két köteg hőmérséklete pedig szinte azonos. A felső köteg grafikonjával összevetve megfigyelhetjük, hogy ahol kisebb a hőmérsékleti ingadozás (pl. júl 10-12.), ott a feszültségváltozások is kisebbek.

Mindkét lánckötegen található két-két nyúlásmérő bélyeg a lánckök semleges tengelyén (6.6. ábra). Ezek nyúlásváltozásai mind a négy bélyegnél ugyanolyan tendenciát mutatnak, a napon belüli változások ismétlődnek a teljes vizsgált intervallumon. Itt láthatóan kisebbek a változások, mintegy 60-80 $\mu\text{m}/\text{m}$ (12-16 MPa), kisebb feszültségek ébrednek, mint a szélő szálakban.



6.6. ábra: P1 semleges tengelyek mérési eredménye (nyár).

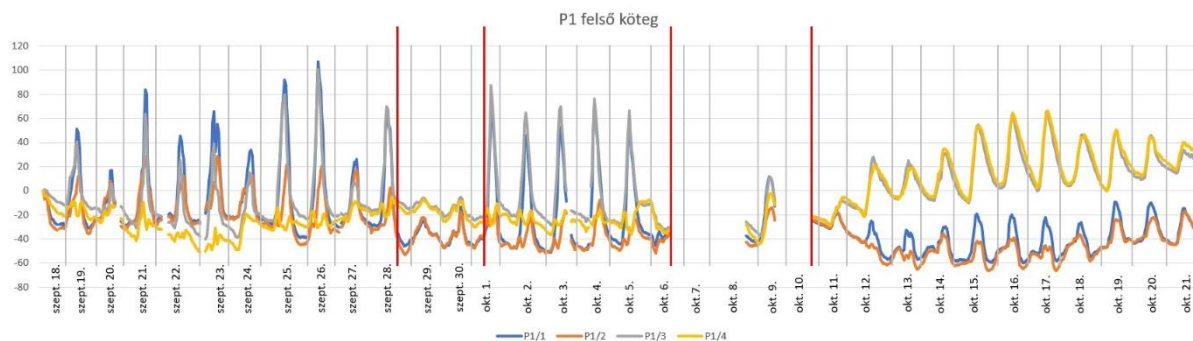
A szélső szálak semleges tengelyénél nagyobb feszültségkülönbsége is arra enged következtetni, hogy a napi hőingás okozta nyúlásváltozás mellett – ami a semleges tengelyben jelenik meg – valóban feszültségkülönbség adódik a szélső szálak közt, ezzel nyomatókat keltve a láncokban. A mérési eredmények alapján az is látható, hogy az alsó és a felső lánckötegben azonos nyúláskülönbség alakul ki a teljes vizsgált időszak alatt, ami igazolja a két láncköteg azonos szerkezeti viselkedését, azonos feszültségváltozási tendenciáját.

A június és július hónapban mért feszültségváltozási értékekből az is látható a P1 mérési helyen, hogy az építés hatásából (állványzat kiépítése és pályabontás elkezdése) szinte nincs méréssel kimutatható hosszabb időintervallumú feszültségváltozás a lánckötegekben, a napon belüli hőmérsékletingadozás hatásánál lényegesen kisebb feszültségváltozás következett be az építés hatására.

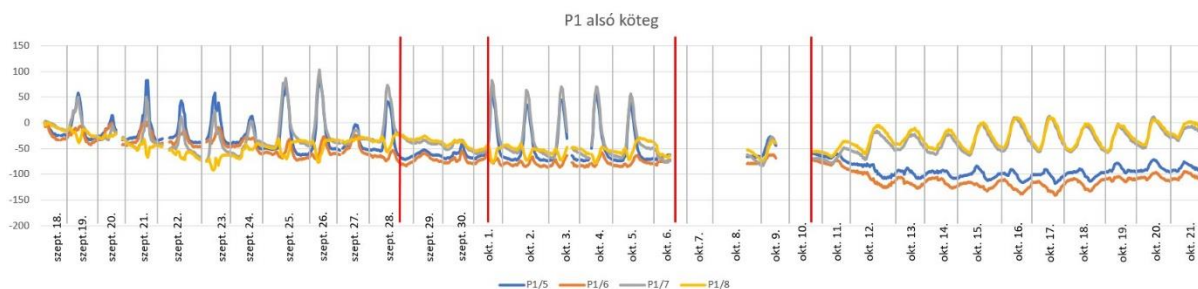
A szeptember 18. és október 22. közti grafikonokat vizsgálva öt jól elkülöníthető időintervallumot figyelhetünk meg, ezek a következőképp alakulnak:

- I. szept. 18. – szept. 28.
- II. szept. 28. – okt. 1.
- III. okt. 1. – okt. 6.
- IV. okt. 6. – okt. 10.
- V. okt. 10. – okt. 21.

A IV. intervallumon rendszerhiba miatt egyik mérőhelyen sincsenek használható adatok. A P1 mérési helyre vonatkozóan a mérési eredmények a 6.7. és 6.8. ábrán láthatók.



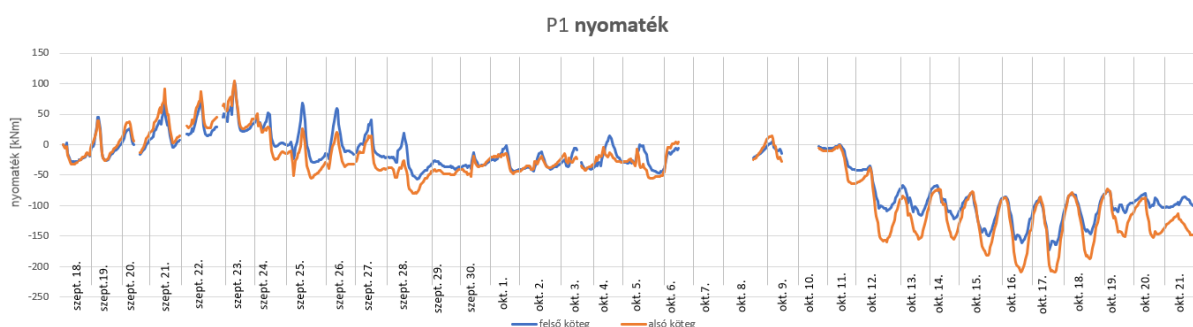
6.7. ábra: P1 felső köteg mérési eredményei (ősz).



6.8. ábra: P1 alsó köteg mérési eredményei (össz).

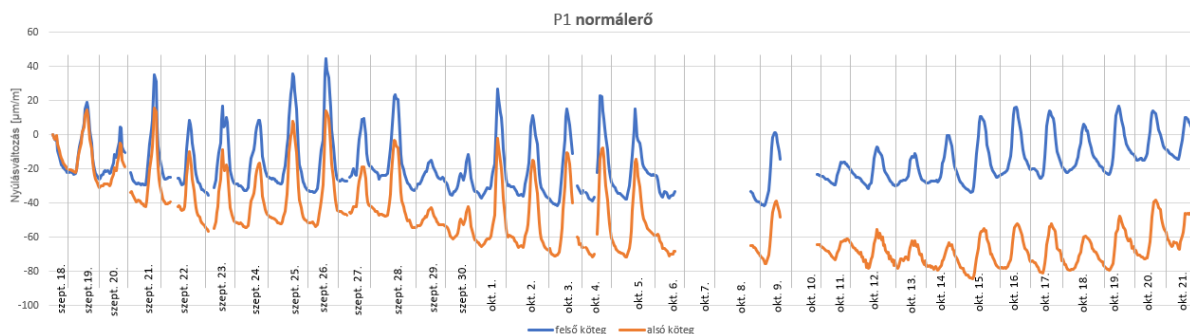
Az alsó és felső köteg diagrammait együtt kiértékelve látható, hogy a két köteg azonos tendenciát mutat. Az alsó (3,4,7,8) és felső (1,2,5,6) szélső szálak külön-külön a II. és V. intervallumban mozognak együtt, az V. szakaszban pedig jelentősebb nyomaték keletkezik bennük. A napon belüli feszültségváltozás (a kiugró értékektől eltekintve) a két lánckötegben legfeljebb 10-12 MPa, ami jelentősen kisebb a nyáron tapasztalt 20-24 MPa-nál. Ennek oka az évszaktól adódó kisebb napi hőingás.

A lánckban kialakuló nyomaték szemléltetésére diagrammot készítettem (6.9. ábra) úgy, hogy vettem a felső és alsó szélső szál nyúlásértékeinek különbségét, majd ezt beszoroztam a köteg keresztmetszeti modulusával ($W = 7749000 \text{ mm}^3$) és az acél rugalmassági modulusával ($E = 210 \text{ GPa}$). A diagramm szemléletesen mutatja a 6.7. és 6.8. ábrákon látott nyomatéknövekedést, melynek értéke a vizsgált időszak végén 100-140 kNm. Látható, hogy az október 10-től megfigyelt nyomaték kialakulása előtt az ábrázolt nyomatékérték 0 körül mozog.

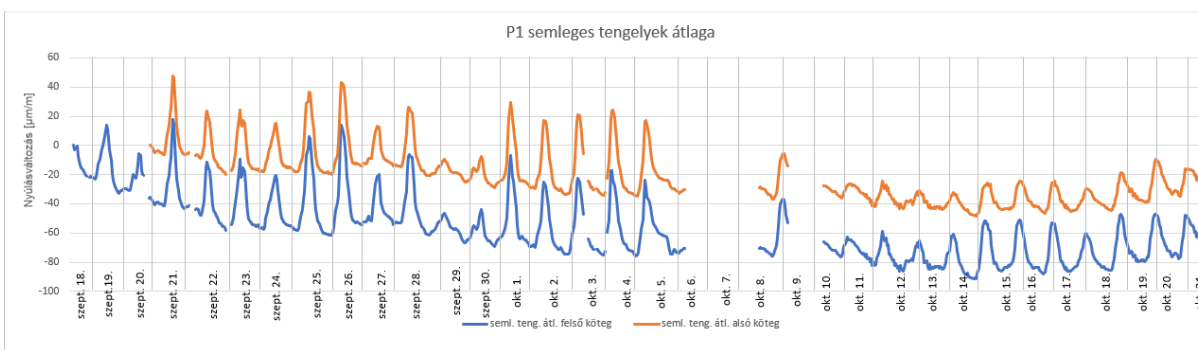


6.9. ábra: P1 mérőhelyen kialakult nyomaték.

Hasonló módon kiértékeltem a normálerő tendenciájának változását is két módszer alkalmazásával: elsőként a semleges tengelyek bélyegein mért értékeket átlagoltam külön az alsó és felső lánckötegen (6.10. ábra), másodsor pedig az egyes kötegek felső és alsó szálain mért adatok átlagát vettem (6.11. ábra). A két módszerrel létrehozott diagrammok egyezést mutatnak, a normálerő az elmúlt 1-1,5 hónapban jellemzően csökkent a lánckötegekben.



6.10. ábra: Normál feszültség bemutatása a szélső szálak átlagából.



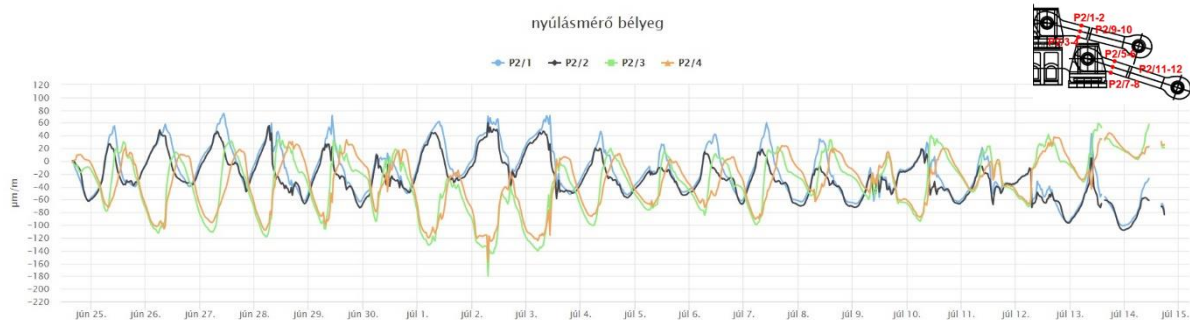
6.11. ábra: Normál feszültség bemutatása a semleges tengelyek átlagából.

Ez látszólag ellenmondás lenne, ha a szerkezet a tervezett statikai rendszere szerint működne, mivel az új acél pályaszerkezet beépítésének hatására mindenképpen nőnie kellene a lánckötegben lévő normálrónek. Ennek fizikai magyarázata még további vizsgálatokat igényel, de előzetesen két magyarázata lehetséges: (i) a merevítőtartó hosszirányú elmozdulást biztosító sarui be vannak feszülve, így az elmúlt 1-1,5 hónapban bekövetkezett hőmérsékletváltozás (lehűlés) a merevítőtartót lefelé mozdította el, ami megnövelte a láncköteg belógását, aminek következtében a másodrendű hatások és a kötél szerkezetek speciális viselkedési sajátosságai miatt a lánckötegben lévő húzófeszültség csökken, (ii) a koronaszaruk nyáron, a pályalemez bontása során befeszült állapotban voltak, azonban augusztusban ezek a saruk tudott módon megmozdultak, aminek következtében a saruk a parti nyílások felé mozdultak el, így a parti nyílásokban a lánckötegek lazultak. Ennek hatását látjuk a feszültségmérési diagramokon.

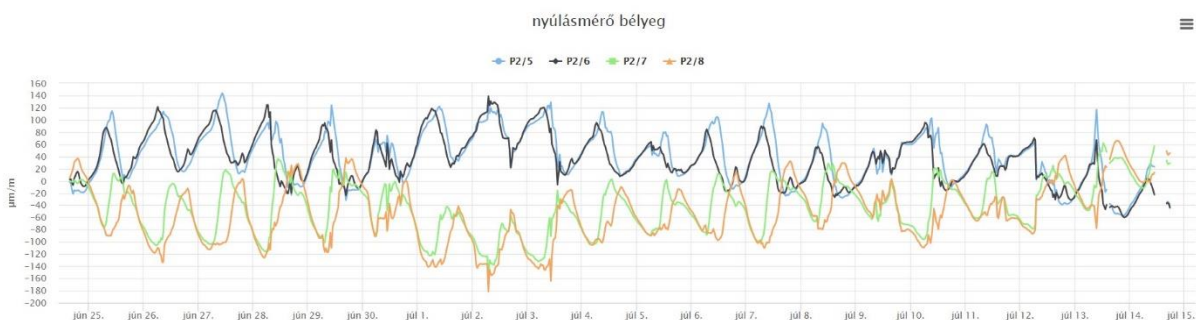
Fontos megjegyezni, hogy a grafikonokon ábrázolt számértékek csak a feszültség változását mutatják, nem a lánckötegekben létrejövő konkrét normál feszültség értékeket, így nem nyomás alakult ki a lánckötegekben, csak húzóerő csökkenés.

6.3.2. P2 mérőhely

A P2 mérőhely a P1-hez hasonlóan a befolyási oldalon található, de a meder nyílás felőli oldalon. A két egymás alatti láncköteg nyúlásváltozás-idő grafikonját a 6.12. és 6.13. ábra mutatja, mindkettőnél az alsó és felső szélső szálakat jelenítettem meg.

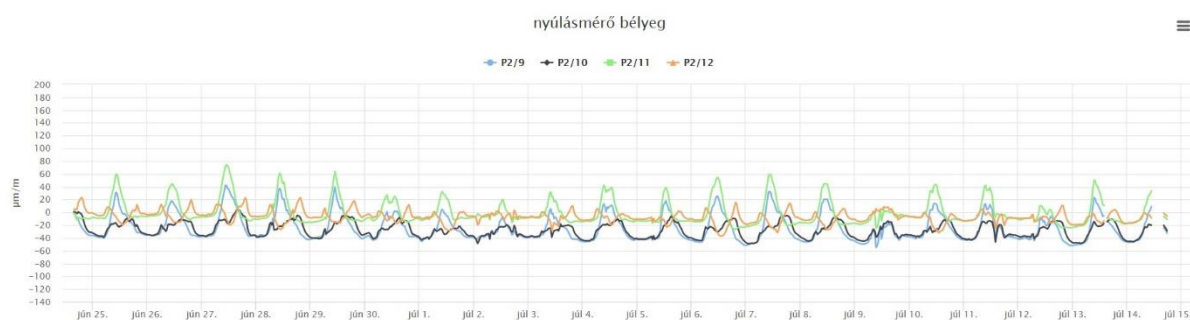


6.12. ábra: P2 felső köteg mérési eredménye (nyár).



6.13. ábra: P2 alsó köteg mérési eredménye (nyár).

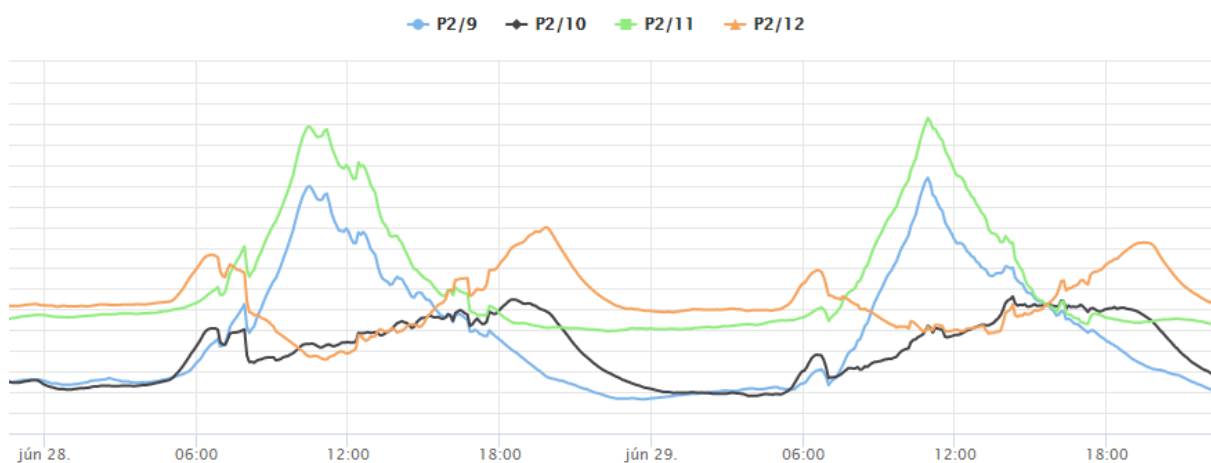
Az alsó és felső köteg grafikonjai hasonló tendenciát követnek, mint a P1 mérőhely nyári eredményei. A két kötegben kialakult legnagyobb feszültségkülönbség egyezik, ez 28-32 MPa és szintén a hőmérsékletváltozásból adódik. A nyomatékok nem mutatnak jelentős változást, nagyságuk a vizsgált időszakban állandónak tekinthető.



6.14. ábra: P2 semleges tengelyek mérési eredménye (nyár).

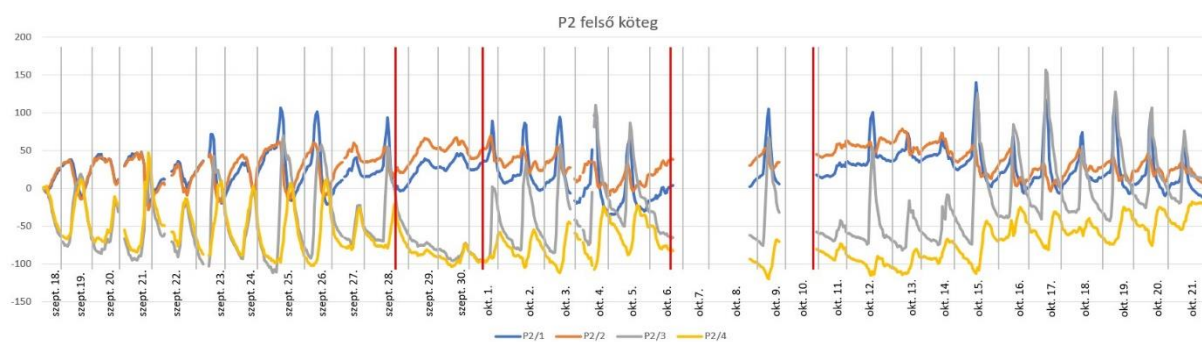
A 6.14. ábrán bemutatott diagramon a semleges tengelyeket vizsgálva azt vehetjük észre, hogy nincs teljes együtt mozgás a négy bélyeg grafikonjain, az egy oldalon lévő láncok szélső szálai közt konzekvensen ugyanabban a napszakban keresztirányú nyomaték alakul ki (6.15. ábra). Ez abban mutatkozik meg, hogy a 9-es és 10-es, valamint a 11-es és 12-es bélyegek közt is nyúláskülönbség látható. A nyúláskülönbség a délelőtti órákban jelenik meg, tehát a keresztirányú nyomaték oka a nap közvetlen hatása a befolyási oldali nyúlásmérő bélyegekre, mely dominánsan a felkelő nap hatására alakul ki a hídon.

nyúlásmérő bélyeg

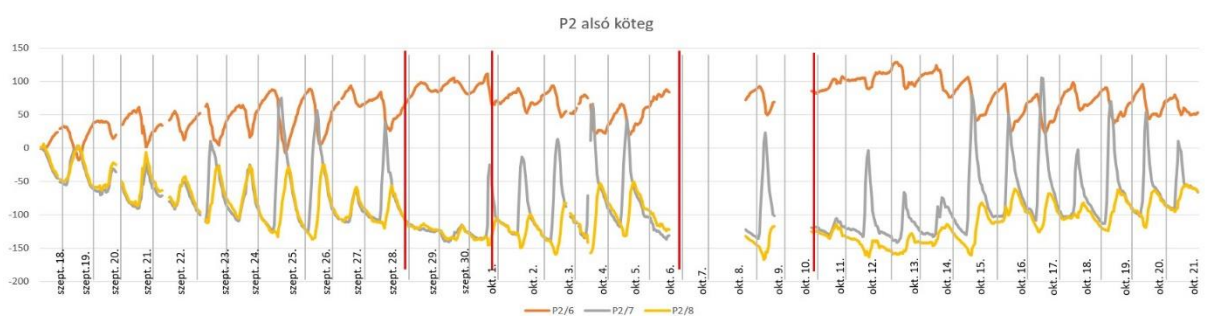


6.15. ábra: Keresztirányú nyomaték P2 semleges tengelyén.

A P2 mérőhely őszi adatait kiértékelve a 6.16. és 6.17. ábrákon közel állandó nyomatékot látunk.

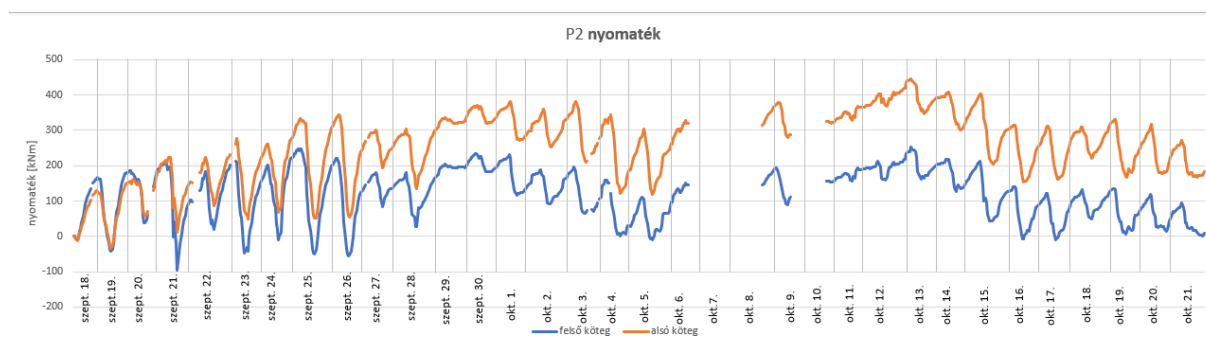


6.16. ábra: P2 felső köteg mérési eredménye (ősz).



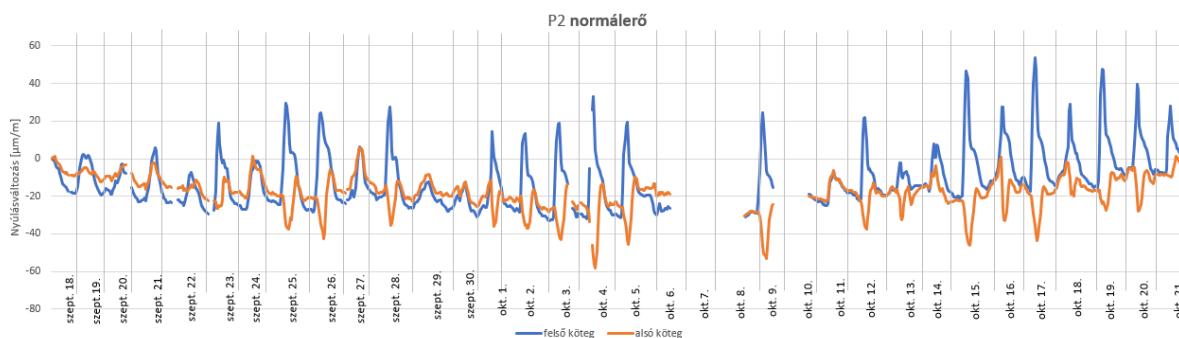
6.17. ábra: P2 alsó köteg mérési eredménye (ősz).

Az egyes láncok alsó és felső szélső szálai most is együtt mozognak, bár a 3-as és 7-es bélyeg, tehát a kötegek befolyás oldali alsó szélső szálai az V. intervallumban itt is kiugró értékeket adnak. A láncokban lévő nyomaték az I. és II. intervallumban növekszik, majd rövid csökkenés után újra nagyobb lesz. A mérési időszak végéhez közeledve újra lecsökken, melynek oka az abban az időszakban mért hirtelen hőmérsékletesés. Az I. intervallumban az egyes bélyegeken mért feszültségváltozás legfeljebb 18-20 MPa, míg ez az érték az V. intervallumon csak 8-10 MPa. A nyomaték változásának szemléltetését a P1 mérőhelynél ismertetett módon végeztem el.



6.18. ábra: P2 mérőhelyen kialakult nyomaték.

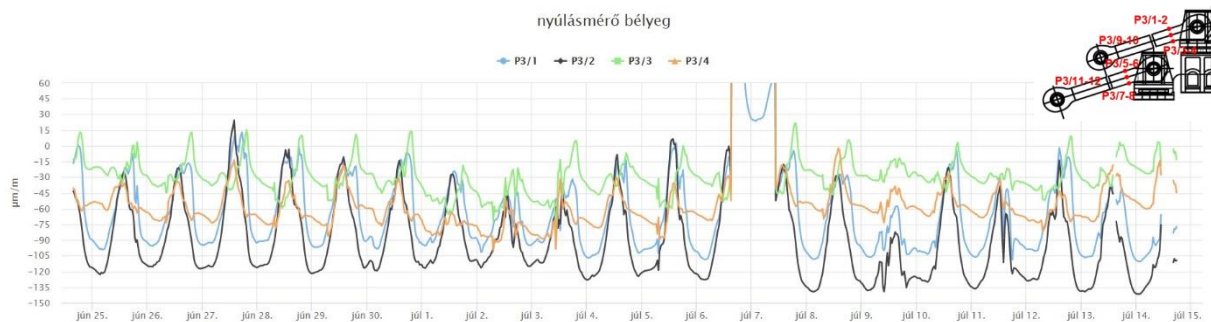
A fent leírt nyomatékváltozások tendenciáját a 6.18. ábra is mutatja, valamint az is megfigyelhető, hogy az alsó lánckötegben nagyobb nyomaték alakul ki. A lemezkötegben kialakuló normálerő változást a 6.19. ábra grafikonja mutatja, melyben látható, hogy a hosszútávú hőmérsékletváltozás és az építés hatására keletkező normálerő változás összege közel kiegyenlíti egymást, így az elmúlt 1-1,5 hónapban számottevő normálerő változást a lánckötegekben a P2 mérőhelyen nem tapasztaltunk.



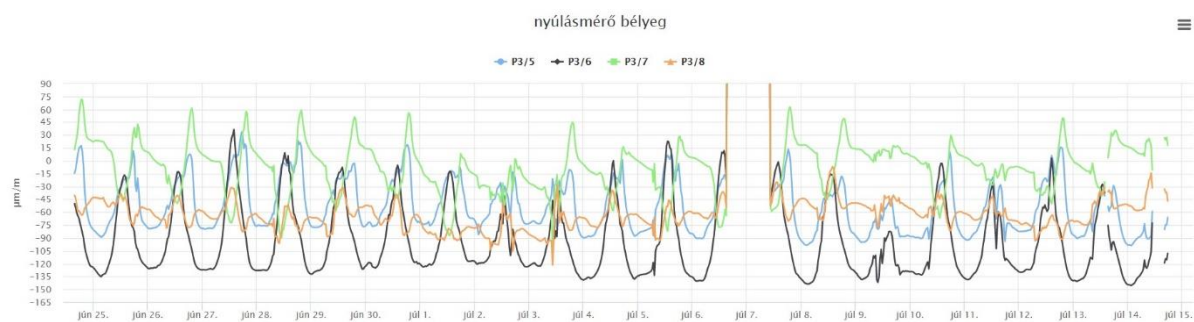
6.19. ábra: Normálfeszültség bemutatása a szélső szálak átlagából.

6.3.3. P3 mérőhely

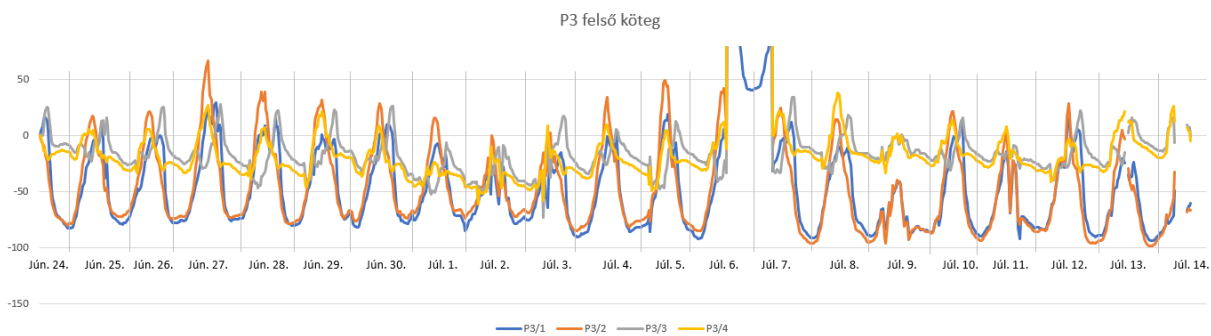
A P3 mérőhely estén a nyári intervallum adatait az online felületen vizsgálva azt látjuk, hogy a kezdeti nullázás nem sikerült teljes mértékben (6.20. és 6.21. ábra), ezért a lehívott számszerű nyúlásértékekből új grafikonokat készítettem mindkét kötegre (6.22. és 6.23. ábra).



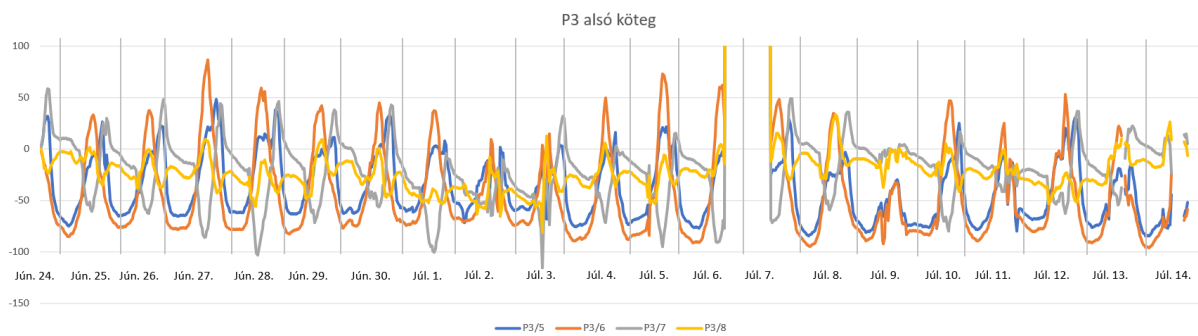
6.20. ábra: P3 felső köteg mérési eredménye (nyár).



6.21. ábra: P3 alsó köteg mérési eredménye (nyár).

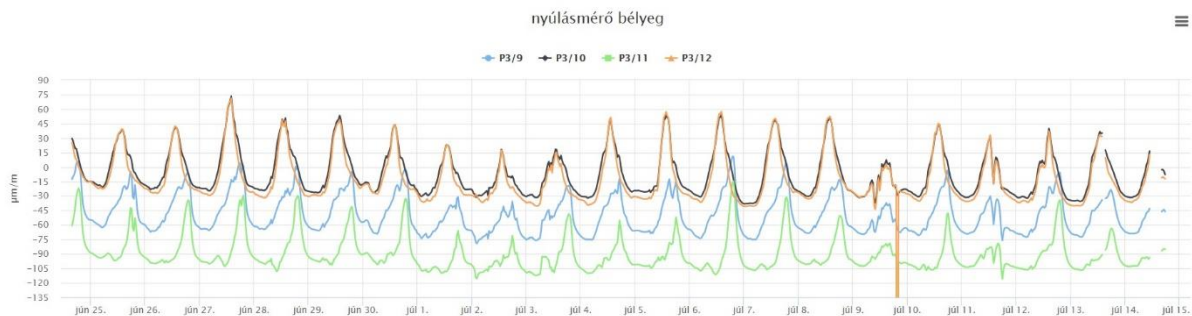


6.22. ábra: P3 felső köteg mérési eredménye (nyár) – korrigált.



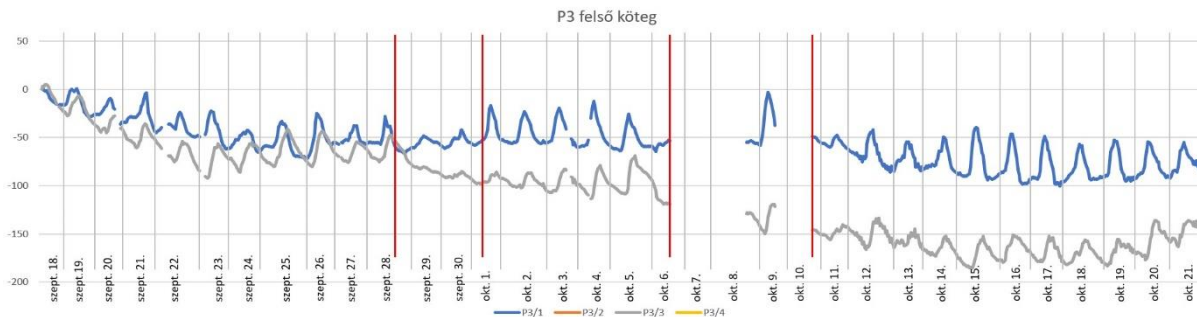
6.23. ábra: P3 alsó köteg mérési eredménye (nyár) – korrigált.

Az alsó és felső lánckötegek eredményét együtt vizsgálva nagyon hasonló viselkedést figyelhetünk meg. Mindkét helyen közel azonos mértékű nyomaték ébred a szerkezetben napi ingadozásban, az alsó kötegben azonban az alsó szélső szálban keresztirányú nyomaték is jelentkezik. Láthatjuk, hogy a befolyás (7-es bélyeg) és kifolyás (8-as bélyeg) oldali mérések grafikonja napi ismétlődéssel ellentétes mozgást végeznek. Ilyen jelenséget a P1 hely alsó kötegénél is észleltünk. A normálfeszültség ingadozása is megegyezik a P1 helyen mért értékkel, ez 100-120 $\mu\text{m/m}$ (20-24 MPa). A 6.24. ábra mindkét láncköteg semleges tengelyeinek mérési eredményét mutatja be. Ezek alapján látható, hogy közel azonos nyúlásingadozások ébrednek az egyes lánckötegekben, tehát ezen bélyegeken domináns normálerő ébred napi ingadozással. A nyúlásváltozás a hőmérsékletváltozásból ered, az építés hatása ezen esetben sem látható a nyári időszak mérésein.



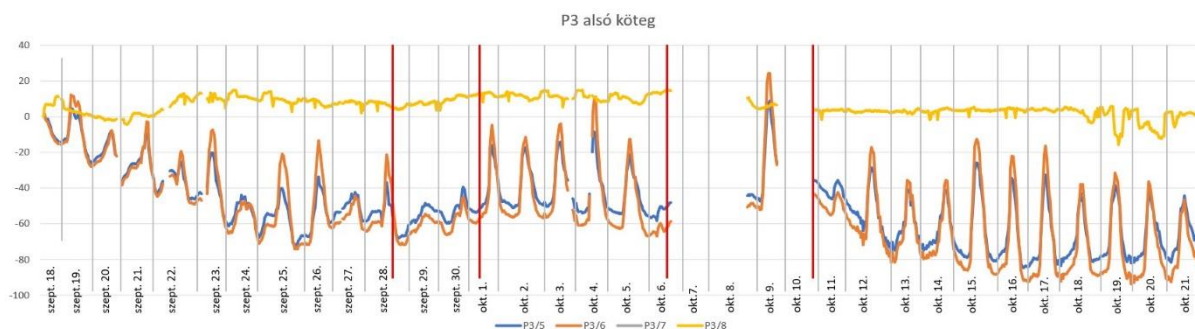
6.24. ábra: P3 semleges tengelyek mérési eredménye (nyár).

Az őszi időszak mérési eredményei hiányosak, a felső kötegben a 2-es és 4-es bélyegek nem működnek, az alsó kötegben a 7-es bélyeg nem szolgáltat adatot, a 8-as pedig láthatóan hibás értékeket mutat. A többi nyúlásmérő bélyeg mérési eredményeit azonban kiértékeltem és bemutatom a 6.25. és 6.26. ábrákon.



6.25. ábra: P3 felső köteg mérési eredménye (ősz).

Az 1-es és 3-as bélyeg eleinte együtt mozog, de a II. intervallumot elérve látható, hogy jelentős nyomaték kezd kialakulni bennük.



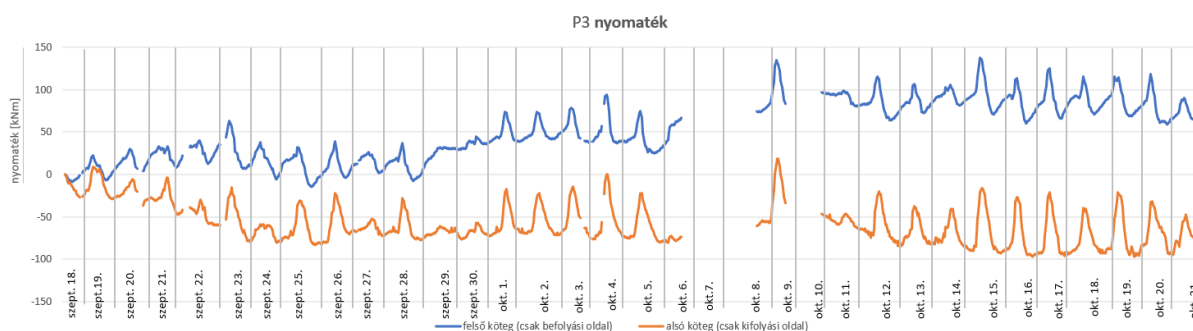
6.26. ábra: P3 alsó köteg mérési eredménye (ősz).

Az alsó kötegen csak a felső szélső szálak nyúlásértékei megjeleníthetők, ezek kis differenciával most is együtt mozognak, de az alsó szélső szálak eredményeinek hiányában a nyomatokra vonatkozó következtetéseket nem vonhatók le. A maximális feszültségváltozás értéke mindkét kötegben 10-12 MPa. A feszültség változása a hőmérséklet ingadozásához hasonló tendenciát mutat, ez a T3 mérőhely adatainak segítségével állapítható meg (6.27. ábra).



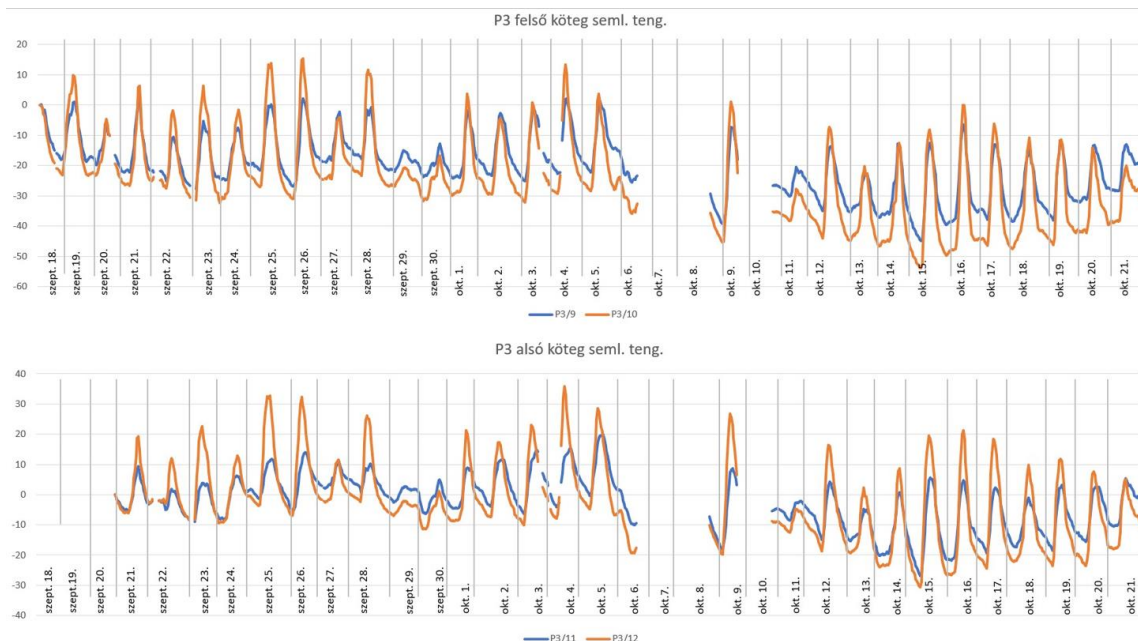
6.27. ábra: Hőmérsékleti változás a P2 helyen (ősz).

A P1 mérőhely őszi adataival összhangban a P3 mérőhelyen is nő a szélső szálak közti nyomaték. Az 1, 3, 6 és 8 jelű bélyegek adataiból nyomatékot számoltam a láncokra, ezek növekvő tendenciáját mutatja a 6.28. ábra diagrammja. A két mérőhely a pilon szélső nyílás felőli oldalán található, így a láncon belül elfoglalt azonos pozíció magyarázhatja a hasonló viselkedést.



6.28. ábra: P3 mérőhelyen kialakult nyomaték.

Az alsó köteg semleges tengelyeinek bélyegei csak pár nappal később kezdtek mérni, így az egységes nulla értékre hozást is csak ekkor végeztem el. Emiatt a két köteg értékeit külön grafikomon ábrázoltam.



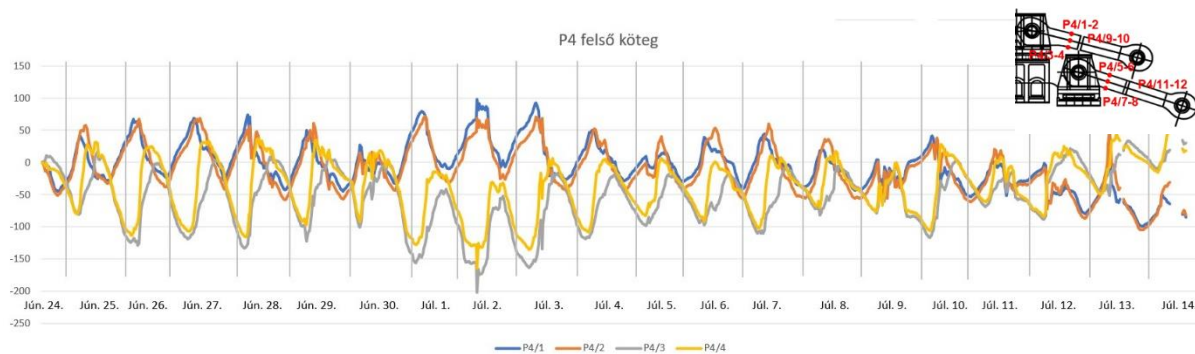
6.29. ábra: P3 semleges tengelyek mérési eredménye (ősz).

A semleges tengelyek nagyjából azonos nyúlásváltozásokat szenvednek, melyek 10 MPa nagyságúak (6.29. ábra).

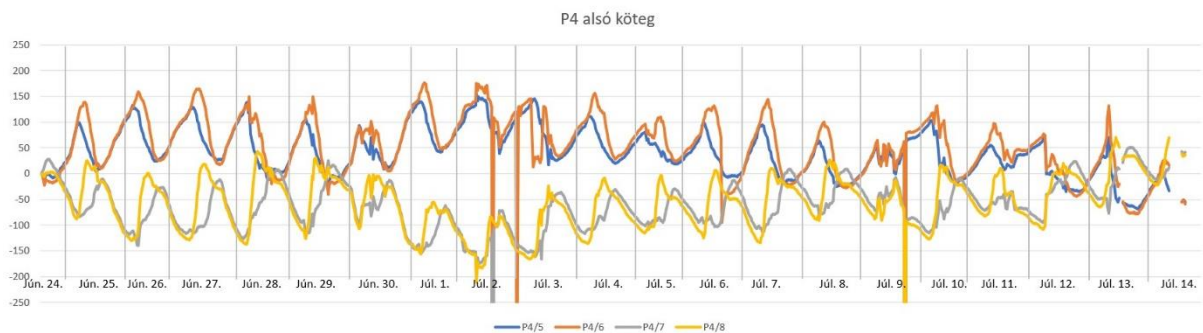
Továbbá látható az eredmények kiértékelésénél, hogy a P1 és a P3 mérőhelyeken mért feszültségváltozási tendenciák azonosak, a parti nyílásban lévő két mérőhely azonos szerkezeti viselkedést mutat.

6.3.4. P4 mérőhely

A P3 helyhez hasonlóan a P4 mérőhelyen is egységes nulla értékre hozásra volt szükség, így a 6.30. és 6.31. ábrákon szereplő diagrammok azonos pontból indulnak.

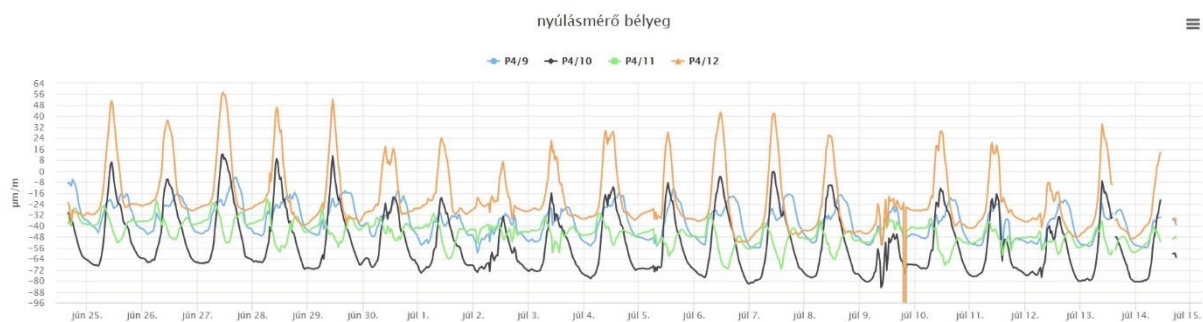


6.30. ábra: P4 felső köteg mérési eredménye (nyár).



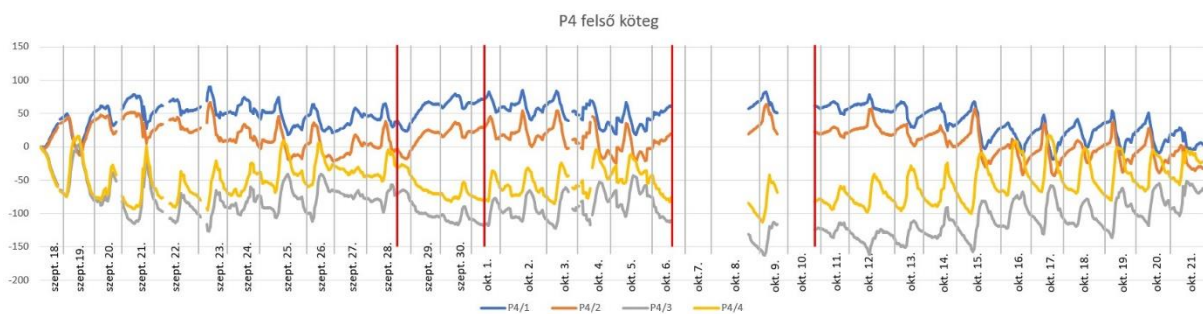
6.31. ábra: P4 alsó köteg mérési eredménye (nyár).

A mérési eredményeken látható, hogy a két láncköteg feszültégváltozási tendenciája megegyezik. Az alsó köteg bélyegeit valamilyen külső hatás érthette, ezért látszanak a grafikonján hirtelen nagy elmozdulások. Nyomaték itt is kialakul a kötegekben napi periodicitással, ez azonban csökkenni látszik az időintervallum folyamán. A legnagyobb mért nyúlásváltozás 100-150 $\mu\text{m}/\text{m}$ (20-30 MPa). A semleges tengely értékei együtt mozognak, azonban kis mértékű keresztirányú nyomaték itt is megfigyelhető az alsó szélső szálban, a 11-es és 12-es bélyegek közt, melyet a 6.32. ábra mutat. Ehhez hasonló jelenség a P2 mérőhelynél is jelentkezett.

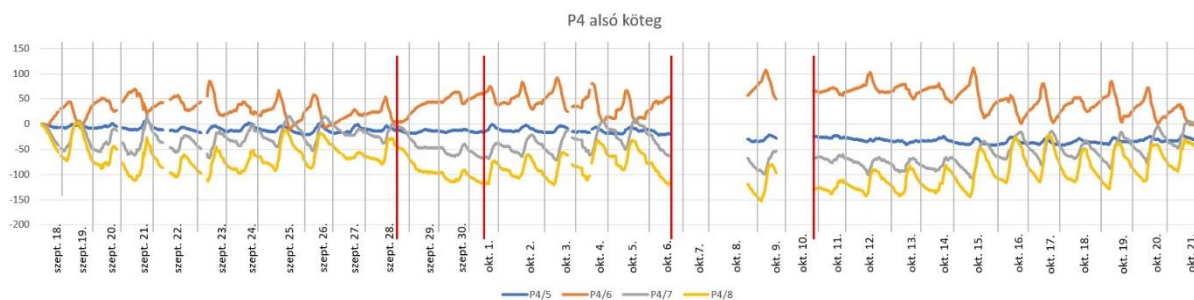


6.32. ábra: P4 semleges tengelyek mérési eredménye (nyár).

A hajlítónyomaték csökkenése az őszi mérések grafikonjain is feltűnik, melyet a 6.33. ábra mutat be.

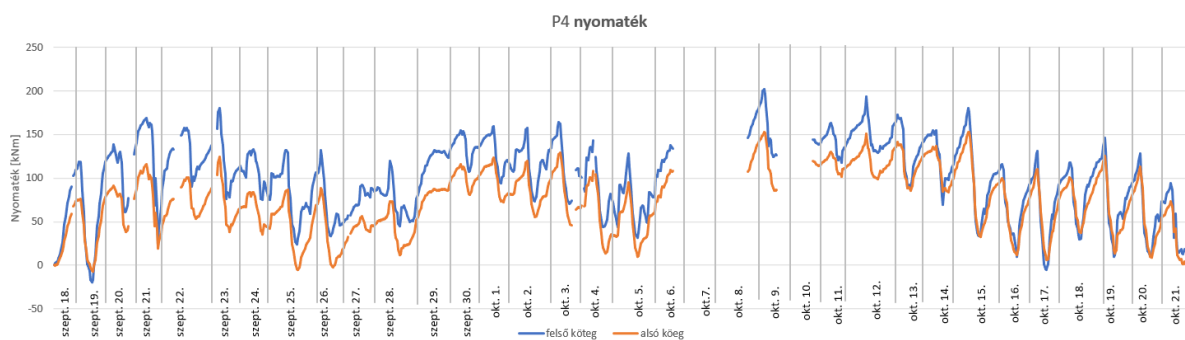


6.33. ábra: P4 alsó köteg mérési eredménye (ősz).



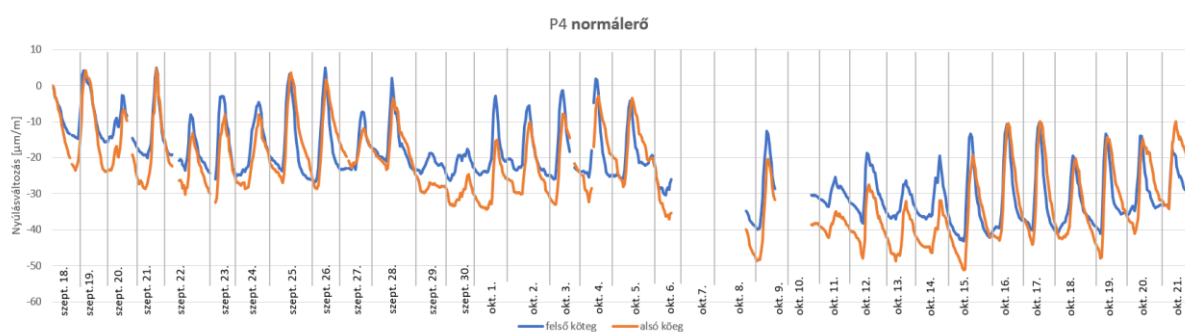
6.34. ábra: P4 alsó köteg mérési eredménye (össz).

Az itt is megfigyelhető nyomatékon kívül a két köteg diagrammjaait összevetve feltűnő, hogy az alsó kötegben az 5 jelű bélyeg értéke szinte alig változik. Az eddigi eredményeket tekintve ezt nagy valószínűséggel mérési hiba okozza. Az alsó szélső szálakban (3-4 és 5-6) konstans differencia figyelhető meg, de a bélyegek nyúlásai azonos módon alakulnak. A feszültségváltozás értéke 14-18 MPa, ami a nyáron mért értékeknél jelentősen kisebb.



6.35. ábra: P4 mérőhelyen kialakult nyomaték.

A nyomaték nagyságának alakulását mutató 6.35. ábrán látható a nyúlásváltozási grafikonokon észlelt viselkedés, az időszakos nyomaték növekedés, majd csökkenés, végül pedig a szinte 0 értékre csökkenés (20-25 kNm).



6.36. ábra: Normálfeszültség bemutatása a szélső szálak átlagából.

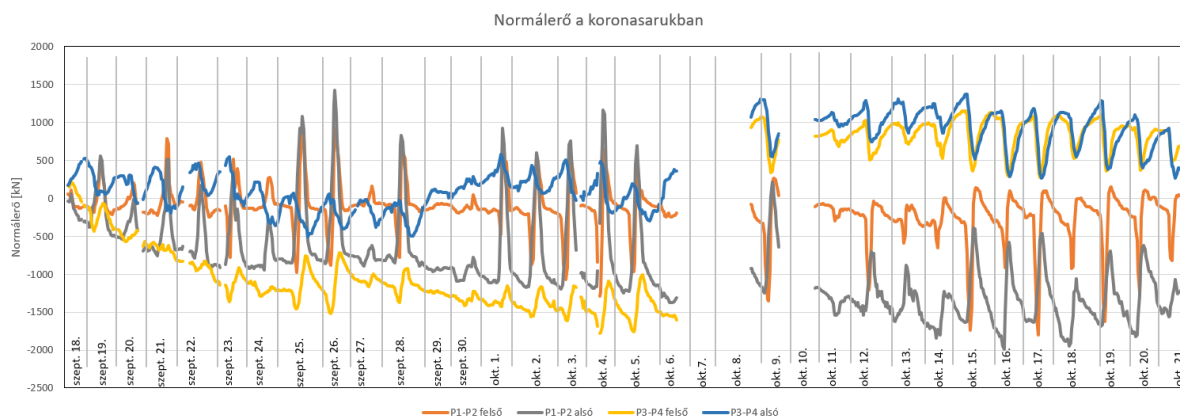
A normálerő nagysága akkor csökken a szerkezetben, amikor a nyomaték növekszik. A 6.36. ábrán az utolsó, csökkenő nyomatéki tendenciát mutató intervallumon ez tökéletesen megfigyelhető, a nyomaték csökkenésével a normálerő növekedni kezd.

6.4. Kiértékelt eredmények összefoglalása

A nyári és őszi mérési időszak eredményei közül mindegyiknél az állapítható meg, hogy csupán a hőmérsékleti hatásból is jelentős nyomatermek keletkeznek a koronasaruk melletti első lánckötegekben. Minden mérőhelyen megfigyelhető a napon belüli hőingásból adódó feszültségváltozás periodikus ismétlődése. Az építés alatti vizsgálati időszakban csupán a medernyílás pályalemezeit bontották ki, valamint az új pályalemezek ~10-15%-a került beépítésre. Így tehát az észlelt feszültségváltozások és abból adódó nyomatermek főként a hőmérsékleti változásoknak tudhatók be.

Az egyes mérőhelyeken észlelt tendenciák hasonlóságot mutatnak más mérőhelyek jellemző viselkedésével. Az őszi adatok grafikonjait elemezve a P4 helyen megfigyelt csökkenő mértékű nyomatermek a P2 mérőhely grafikonjain is jelentkeznek. Hasonló párhuzamot a P1 és P3 mérőhelyek tendenciái közt is láthattunk, ott növekvő nyomatermek figyelhetők meg. A hasonló viselkedésű mérőhelyek a budai pilon azonos oldalán találhatók, P1 és P3 a budai szélső nyílás felől, P2 és P4 pedig a közbelső nyílás felől. Az azonos láncokon lévő mérőhelyek, P1 és P2, valamint a P3 és P4 közti normálerő különbség azt jelentené, hogy az esetlegesen befeszült koronasaru veszi fel a hosszirányú erőt és közvetíti a pilonra. A normálerő változás tendenciája azonban az P1 és P2, valamint a P3 és P4 mérési helyeken párban közel azonos mértéket és előjelet mutattak, ami azt jelenti, hogy a koronasaruk megmozdultak, a szerkezet a várakozásnak megfelelően működik ebből a szempontból.

A 6.37. ábra a koronasarukban lévő normálerő nagyságát mutatja. A befolyási oldal felső lánckötegének koronasaruja alig vesz fel normálerőt, tökéletesen működik, a másik három pedig vesz fel normálerőt, azonban ez nem számottevő nagyságú. Kivételt képez a kifolyási oldal, melynél a felső kötegben 1500 kN normálerő elérése után látható, hogy a koronasaru megmozdul.



6.37. ábra: Normálerő a koronasarukban.

Továbbá látható a mérési eredmények kiértékelése alapján, hogy a P1 és P3 mérőhelyeken a nyomatermek változás előjele negatív és a kiértékelési időszak végéig folyamatosan nő. A P2 és P4 mérőhelyeken ugyanez a nyomatermek ellentétes előjelű és a kiértékelési időszak vége felé értéke csökken. Ez egyrészt mutatja a befolyási és kifolyási oldal szimmetrikus viselkedését, valamint a parti és a medernyílás eltérő viselkedését. A medernyílásban a láncköteg felfelé, a parti nyílásban lefelé mozdult el, mely elmozdulás nyomatermek formájában megjelent az iránytörő saruk melletti első lánckötegen.

A P1 és P3 mérőhelyeken jelentős, napon belül változó keresztirányú hajlítónyomatékok észleltünk a lánckötegekben. Ilyen nyomaték még a P2 és P4 semleges tengelyeiben is keletkezett.

Az egyes mérési helyeken észlelt legnagyobb nyúlásváltozásokat az 2. táblázatban foglaltam össze. Az adatokat a nyúlásmérés eredményeit ábrázoló grafikonokról olvastam le és az acél rugalmassági modulusával szorozva számoltam át feszültséggé. A hozzávetőleges értékek abszolút értékben értendők, azaz nem veszik figyelembe, hogy húzás vagy nyomás keletkezett a lánckötegekben.

Köteg	P1 mérőhely		P2 mérőhely		Normálfeszültség [MPa]
	nyár	ősz	nyár	ősz	
felső	20-24	10-12	28-32	16-20	
alsó	20-24	10-12	28-32	12-16	
felső	20-24	10-12	22-24	14-16	
alsó	20-24	10-12	22-24	16-18	
Köteg	nyár	ősz	nyár	ősz	
	P3 mérőhely		P4 mérőhely		

2. táblázat: A kötegekben ébredő normálfeszültségek.

Szembevetendő, hogy a nyári feszültségváltozások mindig nagyobbak az ősziéknél, illetve az, hogy a modernyílás felőli mérőhelyeken ezek az értékek nagyobbak. A kisebb őszi nyúlásértékek is igazolják a feltevést, miszerint a feszültségváltozás legfőbb oka a hőmérsékletváltozás.

Az őszi mérési szakasz végén (2021. október 22.) keletkezett nyomatékokat a 3. táblázatban hasonlítom össze. Az értékeket úgy kaptam, hogy a szélső szálak nyúlásértékeinek különbségét megszoroztam az acél rugalmassági modulusával ($E = 210 \text{ GPa}$) és egy láncköteg keresztmetszeti modulusával ($W = 7749000 \text{ mm}^3$).

Köteg	P1 mérőhely	P2 mérőhely	Nyomaték [kNm]
felső	100	8	
alsó	140	180	
felső	100	45	
alsó	140	30	
Köteg	P3 mérőhely	P4 mérőhely	

3. táblázat: Kötegekben ébredt nyomatékok a vizsgált intervallum végén.

Az eredmények alapján látható, hogy a mérés október 22-i állása szerint a budai nyílás oldalán lévő koronasaruk melletti lánckötegek nyomatékai növekvő, míg a modernyílás oldalán található lánckötegek csökkenő tendenciát mutatnak. A parti nyílásban lévő két mérőhely (P1 és P3) értékei közel megegyeznek egymással, és jelentősen nagyobbak, mint a modernyílásban fellépő nyomatékok.

A következőkben a pályalemez további építése várhatóan a medernyílás nyomatéki értékét 0 körüli értékre állíthatja vissza, a parti nyílását tovább növelheti, melyet majd a parti nyílásban később sorra kerülő bontás és pályalemez építés építhet le. Ennek figyelése a további monitoring mérések fő feladata.

7. Összefoglalás

Dolgozatom első részében áttekintettem a Széchenyi lánchíd szerkezeti kialakítását és statikai viselkedését, megismertem a híd történetét és bemutattam a jelenleg zajló felújítás okait és céljait. A BME Hidak és Szerkezetek Tanszéknek köszönhetően lehetőségem volt megismerni a hídon működő monitoring rendszer részleteit és helyszíni kialakítását, valamint bekapcsolódhattam a folyamatos mérések eredményeinek kiértékelési folyamatába, melynek keretében a pilon melletti mérési eredményeket dolgoztam fel. Ennek konklúzióit az alábbiakban foglalom össze:

A parti nyílásnál (P1 és P3) és a medernyílásban (P2 és P4) elhelyezkedő mérőhelyek adatai azonos tendenciát mutatnak. A parti nyílásban a lánckötegekben keletkező normálerő enyhén csökkenést mutat az eddigi mérések során. Ez összhangban van azzal a mechanizmussal, miszerint a koronasaruk a mérési eredmények alapján kifelé mozdultak el, így a parti nyílásban lévő lánca lazább lett, tehát a benne lévő normálerőnek csökkennie kellett. Ugyanakkor a mérési eredményeken látható, hogy a felső szélső szálban nyomás, az alsó szélső szálban pedig húzás lép fel, ami azt igazolja, hogy a pilon melletti első csuklók nem elfordulással, hanem nyomatékkal veszik fel a láncköteg deformációját. A medernyílás felőli mérőhelyeknél (P2 és P4) szintén normálerő csökkenést észleltünk, azonban itt a lánccok felfelé mozdultak el és a lánckötegekben fellépő nyomatékok értékei is lényegesen kisebbek, mint a parti nyílásban, ugyanakkor határozott, megmozdulásra utaló jelet a mérési eredmények nem mutattak.

A mérési eredmények azt is mutatták, hogy a koronasaruk két oldalán lévő lánckötegekben eltérő nagyságú normálerő keletkezik, melynek napon belüli és hosszútávú változását meghatároztam. Amennyiben a koronasaruk ideálisan (görgősen) viselkednének, nem keletkezne a lánckötegek között normálerő különbség. A mérések azt mutatják, hogy a koronasaru mozog, ugyanakkor emellett 0-1500 kN tartományban képes súrlódással normálerőt a pilonra közvetíteni. A mérési intervallumban látszódik a kifolyási oldal felső lánckötegénél lévő koronasaru megmozdulása, mely ismételt erőfelvételtre alkalmas.

A mérési eredmények igazolják, hogy a csuklók az átépítés hatására keletkezett igénybevételek hatására nem mozdultak meg, a koronasaru pedig fokozatos erőkiegyenlítéssel látja el feladatát.

A TDK dolgozatom befejezése után is tervezem a mérési eredmények figyelemmel kísérését és a lánckötegek és a koronasaruk építés hatására bekövetkező igénybevételeloszlásának további vizsgálatát, ami válasz adhat a Tervező által a híd erőjátékának bizonytalanságaival kapcsolatban feltett kérdésekre.

8. Köszönetnyilvánítás

Szeretném megköszönni a tanulmány megírásának lehetőségét első sorban Dunai László tanár úrnak. Az ő biztatása nélkül biztosan nem kezdtem volna bele a TDK munkába, nagyon sokat jelentett a bátorítása az egész munkafolyamat során, valamint hogy ezt a kiemelten fontos témát rám bízta. Köszönet illeti továbbá Kövesdi Balázst, aki minden kérdésemre készséggel válaszolt bármikor, amikor szükségem volt rá.

Igazán nagy élmény volt megismerni a Lánchíd építési körülményeit, hogy milyen nehézségekbe ütköztek hazánk nagyjai a tervezés során, milyen kivitelezési problémák adódtak a XIX. század derekán, és ezekre milyen mérnöki válaszokat adtak a kor neves mérnökei, illetve hogyan befolyásolta az 1848-49-es szabadságharc a hídépítés folyamatát. Megtisztelő volt egy ilyen jelentőségű szerkezet viselkedésével foglalkozni, és ezáltal betekintést nyerni az építőmérnöki szakma szépségeibe és a tudományos munka rejtelmeibe.

Irodalomjegyzék

- [1] Dunai P.: *Lánchíd lánclemeinek statikai elemzése és fáradási jellemzőinek vizsgálata*, MSc diplomamunka, Budapest, [2017], 1-41. o.
- [2] Iványi M.: *Hídépítéstan. Acélszerkezetek*, Budapest, [1998], 482-190. o.
- [3] Palotás L.: *Mérnöki kézikönyv II. kötet*, Budapest: Műszaki Könyvkiadó [1984], 1367-1370. o.
- [4] Bán T., Hidvéghi R., Medved G.: *Hídépítés II.*, Budapest: Műszaki Könyvkiadó, [1988], 217. o.
- [5] Vásárhelyi B.: *A Széchenyi lánchíd története*, Közúti és Mélyépítő szemle – 1949/11., Budapest
- [6] BME, Magyar Acélszerkezeti Szövetség: *A Széchenyi lánchíd szerkezetének átépítése 1913-1915 között*, Budapest, [2018]
- [7] *A Lánchíd története*, cultura.hu
- [8] Gáll I.: *A budapesti Duna-hidak*. Budapest: Műszaki Könyvkiadó, [1984.]
- [9] BME Hidak és Szerkezetek Tanszék: *Széchenyi lánchíd terheléses célvizsgálata a csapos kapcsolatok elfordulási képességének ellenőrzésére. Szakértői jelentés*, Budapest, [2018]
- [10] Széchy K.: *A Lánchíd újjáépítése*, Közúti és Mélyépítő szemle – 1949/11., Budapest
- [11] Szittner A., Kálló M., Kaltenbach L., Köröndi L., Kristóf L., Baffia R., Horváth J.: *Az UVATERV megbízásából a budapesti Lánchíd lánclemezeinek vastagságméréséről, I. sz. jelentés*. BME, Acélszerkezetek Tanszék, Budapest, [1986]
- [12] bkk.hu/fejlesztések/lanchid [2021.09.24.]
- [13] BME Hidak és Szerkezetek Tanszék: *Széchenyi lánchíd átépítése alatt a függesztőrudak és a lánckötegek viselkedésének és a csapos kapcsolatok elfordulási képességének ellenőrzésére kidolgozott helyszíni mérési terv*, Budapest, [2021].
- [14] roeblingbridge.org
- [15] facebook.com/ahidzrt
- [16] Fővárosi Szabó Ervin Könyvtár
- [17] Élet és Tudomány - 1961/1. 271.
- [18] Fortepan
- [19] MTI Fotó/MAFIRT: Kozacsek Elek

Ábrajegyzék

2.1. ábra: A Temze-híd perspektivikus- és oldalnézete [1].	4
2.2. ábra: A Finley által szabadalmaztatott lánchíd kialakítás egy korai példája [1].	5
2.3. ábra: John Roebling ferdekábeles hídja az Ohio folyó fölött [14].	5
3.1. ábra: Hajóhíd a Dunán [15].	6
3.2. ábra: A városligeti híd Carl Vasquez metszetén [16].	7
3.3. ábra: A Lánchíd pilléreinek alapozása; Theodor Glatz tollrajza 1842 körül [17].	8
3.4. ábra: Láncok szerelése [5].	9
3.5. ábra: Az 1849-ben átadott híd [16].	10
3.6. ábra: Az 1849-es szerkezet fa járdája és faszerkezetű merevítőtartója [6].	11
3.7. ábra: A felújításban résztvevő szakemberek a híd bontásának kezdetekor (bal oldal) és a forgalomba helyezés előtt (jobb oldal) [1].	12
3.8. ábra: A régi lehorgonyzó saru [6].	13
3.9. ábra: Az új lehorgonyzó saru [6].	13
3.11. ábra: Új nyeregsaru [6].	14
3.10. ábra: Régi nyeregsaru [6].	14
3.12. ábra: A fakockaburkolat romlása [5].	14
3.13. ábra: A felrobbantott Lánchíd 1945-ben [18].	15
3.14. ábra: A budai nyílás kettétört pályalemeze [6].	16
3.15. ábra: Elhajlott láncköteg a Dunában [19].	17
3.16. ábra: A budai lánc ideiglenes felemelésére, stabilizálására és az új merevítőtartó szerelésére szolgáló állványok [5].	17
3.17. ábra: A József Attila úszódarú a budai láncok helyreállítása közben [18].	18
3.18. ábra: Az 1949-en átadott szerkezet [18].	19
4.1. ábra: Helyszíni fotó egy korrodált lánckötegről [1].	20
4.2. ábra: A függesztőrúd és láncköteg kapcsolata [1].	21
4.3. ábra: Korrózió a járdalemezen.	21
4.4. ábra: Új ortotrop pályalemezek az építkezés helyszínén.	23
4.5. ábra: Szinte teljes keresztmetszetben korrodálódott szélrács a merevítőtartóban.	24
5.1. ábra: Nyúlásmérési helyek globális helyzete I.	26
5.2. ábra: Nyúlásmérési helyek globális helyzete II.	26
5.3. ábra: Nyúlásmérési helyek globális helyzete III.	26
5.4. ábra: Nyúlásmérési helyek globális helyzete IV.	27
5.5. ábra: Nyúlásmérési helyek globális helyzete V.	27
5.6. ábra: Nyúlásmérő bélyegek elhelyezkedése az iránytörő saruk mellett.	27
5.7. ábra: H1 mérőhely helyszíni képe.	28
5.8. ábra: Nyúlásmérő bélyegek pozíciója a függesztőrudakon általános esetben.	28
5.9. ábra: Nyúlásmérési hely a függesztőrúdon általános helyen.	29
5.10. ábra: Nyúlásmérési hely a függesztőrúdon merevítőtartón belül.	29
5.11. ábra: Nyúlásmérő bélyegek elhelyezkedése a P1 és P2 mérőhelyeken.	30
5.12. ábra: Nyúlásmérő bélyegek elhelyezkedése a P3 és P4 mérőhelyeken.	30
5.13. ábra: A monitoring rendszer internetes felülete.	31
6.1. ábra: Kezdeti mérési hibák.	32
6.2. ábra: P1 felső köteg mérési eredményei (nyár).	34

6.3. ábra: P1 alsó köteg mérési eredményei (nyár).	34
6.4. ábra: P1 és P2 mérőhelyen mért értékek a nullázás pillanatában.	35
6.5. ábra: Hőmérsékleti változás a P1 helyen (júl. 6-14.).	35
6.6. ábra: P1 semleges tengelyek mérési eredménye (nyár).	36
6.7. ábra: P1 felső köteg mérési eredményei (ősz).	36
6.8. ábra: P1 alsó köteg mérési eredményei (ősz).	37
6.9. ábra: P1 mérőhelyen kialakult nyomaték.	37
6.10. ábra: Normálfeszültség bemutatása a szélső szálak átlagából.	38
6.11. ábra: Normálfeszültség bemutatása a semleges tengelyek átlagából.	38
6.12. ábra: P2 felső köteg mérési eredménye (nyár).	39
6.13. ábra: P2 alsó köteg mérési eredménye (nyár).	39
6.14. ábra: P2 semleges tengelyek mérési eredménye (nyár).	39
6.15. ábra: Keresztirányú nyomaték P2 semleges tengelyén.	40
6.16. ábra: P2 felső köteg mérési eredménye (ősz).	40
6.17. ábra: P2 alsó köteg mérési eredménye (ősz).	40
6.18. ábra: P2 mérőhelyen kialakult nyomaték.	41
6.19. ábra: Normálfeszültség bemutatása a szélső szálak átlagából.	41
6.20. ábra: P3 felső köteg mérési eredménye (nyár).	42
6.21. ábra: P3 alsó köteg mérési eredménye (nyár).	42
6.22. ábra: P3 felső köteg mérési eredménye (nyár) – korrigált.	42
6.23. ábra: P3 alsó köteg mérési eredménye (nyár) – korrigált.	42
6.24. ábra: P3 semleges tengelyek mérési eredménye (nyár).	43
6.25. ábra: P3 felső köteg mérési eredménye (ősz).	43
6.26. ábra: P3 alsó köteg mérési eredménye (ősz).	44
6.27. ábra: Hőmérsékleti változás a P2 helyen (ősz).	44
6.28. ábra: P3 mérőhelyen kialakult nyomaték.	44
6.29. ábra: P3 semleges tengelyek mérési eredménye (ősz).	45
6.30. ábra: P4 felső köteg mérési eredménye (nyár).	45
6.31. ábra: P4 alsó köteg mérési eredménye (nyár).	46
6.32. ábra: P4 semleges tengelyek mérési eredménye (nyár).	46
6.33. ábra: P4 alsó köteg mérési eredménye (ősz).	46
6.34. ábra: P4 alsó köteg mérési eredménye (ősz).	47
6.35. ábra: P4 mérőhelyen kialakult nyomaték.	47
6.36. ábra: Normálfeszültség bemutatása a szélső szálak átlagából.	47
6.37. ábra: Normálerő a koronasarukban.	48

Táblázatjegyzék

1. táblázat: Építési fázisok időbeli eloszlása.	33
2. táblázat: A kötegekben ébredő normálfeszültségek.	49
3. táblázat: Kötegekben ébredt nyomatékok a vizsgált intervallum végén.	49