



**Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Építőmérnöki Kar**



**LÁNCHÍD LÁNCCLEMEZEK KORRÓZIÓS
ÁLLAPOTÁNAK ELEMZÉSE**

TDK DOLGOZAT



Készült a BME Hidak és Szerkezetek Tanszékkal együttműködve, TDK dolgozat keretein belül.

2022/2023 I. félév

Konzulensek: Dr. Dunai László
Dr. Kövesdi Balázs

Készítette: Szabó Bence
ATV6UK

Tartalomjegyzék

1.	Bevezetés	4
2.	A Széchenyi lánchíd története.....	5
2.1	Építésének előzményei	5
2.2	Kivitelezési munkálatok	6
2.3	Lánchíd első átépítése.....	8
2.4	Lánchíd második átépítése.....	9
2.5	Napjainkig tartó időszak	10
2.5.1	Korróziós mérések a hídon.....	10
2.5.2	Numerikus modellek létrehozása és validálásuk.....	11
2.5.3	A korrózió figyelembevétele, korrodált láncszem teherbírása.....	13
2.6	Jelenlegi munkálatok	14
2.7	Lánchíd acél anyaga, anyagtulajdonságai	15
3.	Korróziós jelenség	16
3.1	Korróziós alapfolyamatok	16
3.2	A korrózió megjelenési formái	16
3.3	Korróziós vizsgálatok	17
3.3.1	Graviometria.....	18
3.3.2	Ellenállásmérés alapú vizsgálat.....	18
3.3.3	Mechanikai vizsgálatok - anyag belsejében létrejövő korróziós elváltozások.....	18
3.4	Korrózióvédelem	19
3.4.1	Inhibitorok	19
3.4.2	Katódikus védelem (aktív korrózióvédelem)	19
3.4.3	Védőbevonatok (passzív korrózióvédelem)	19
3.5	Felületelőkészítés.....	20
3.6	Korróziós modellek	22
3.6.1	1. modell: A korrodált acéllemez szilárdságának és deformálhatóságának mérése a korrózió morfológiája alapján.....	22
3.6.2	2. modell: Fejlett módszer az empirikus modell kifejlesztésére és az időfüggő korróziós veszteség előrejelzésére	25
3.6.3	3. modell: Homokfúvásnak és csiszolópapíros tisztításnak alávetett korrodált acélminták szakítószilárdságának kísérleti értékelése és összevetése a tisztítatlan elemmel ..	26

3.6.4	4. modell: Korrodált acéllemezek mechanikai tulajdonságai romlásának vizsgálata felületi topográfia alapján	27
3.6.5	5. modell: A korrodált elemek kihajlási ellenállása	27
4.	Korróziós mérések a láncokon.....	28
4.1	Mérőműszer bemutatása	28
4.2	Mérőhelyek, a mérés folyamata.....	29
5.	Mérési eredmények feldolgozása a Tanszék által.....	31
6.	Az adatok feldolgozásának folytatása.....	32
6.1	Budai befolyási oldal	35
6.1.1	Budai befolyási oldal alsó és felső lánckötegének összehasonlítása.....	36
6.2	Budai kifolyási oldal.....	37
6.2.1	Budai kifolyási oldal alsó és felső lánckötegének összehasonlítása	38
6.3	Budai oldal összefoglalás	39
6.4	Pesti befolyási oldal.....	42
6.4.1	Pesti befolyási oldal alsó és felső lánckötegének összehasonlítása	43
6.5	Pesti kifolyási oldal	44
6.5.1	Pesti befolyási oldal alsó és felső lánckötegének összehasonlítása	45
6.6	Pesti oldal összefoglalása	46
7.	Teljes adatbázis kiértékelése.....	50
8.	Összefoglalás	54
9.	Köszönetnyilvánítás	55
	Irodalomjegyzék.....	56
	Ábrajegyzék	58

1. Bevezetés

A TDK dolgozatom témája a felújítás alatt álló Széchenyi lánchíd korróziós méréseihez kapcsolódóan az acélszerkezetek korróziós jelenségének mérés alapú vizsgálata, matematikai statisztikai alapú korróziós modellek vizsgálata. A Lánchíd felújítása során a pályaszerkezet újjáépítése, a hídtartozékok és hídfők megújítása mellett, az acélszerkezetek – beleértve a lehorgonyzó lánc elemeket is – korrózióvédelme is megújul. A jelenleg zajló korrózióvédelmi munkálatok lehetőséget teremtenek a hídon a lánc elemek korróziós állapotának alapos felmérésére, azoknak a korábbi mérésekkel való összehasonlítására, valamint a korrózió jelenségének alaposabb megismerésére.

A TDK dolgozatom keretében elsőként a Lánchíd viselkedésének és erőjátékának megismerésével foglalkoztam. Emellett a történetét, az építésének körülményeit és felújításait is áttekintettem, mert ahhoz, hogy tisztában legyek a híd mostani állapotával és felújításának szükségességével, fontos, hogy tudjam, hogy hogyan épült a híd, és milyen vizsgálatok történtek rajta a múltban.

Ezután a korróziót, mint jelenséget tanulmányoztam. Megismertem a korrózió folyamatát, fajtáit, illetve a megjelenési formáit. Ezt követően a korrózió elleni védekezési módokat ismertem meg, és foglaltam össze a dolgozatomban.

A BME Hidak és Szerkezetek Tanszék a Széchenyi lánchídon már többször végzett korróziós méréseket, és most is részt vesz a felújítási munkálatokban. A dolgozatomban konzulenseimtől kapott adatok alapján bemutatom a Lánchíd jelenlegi felújítása során történt korróziós állapotfelmérési vizsgálatokat, annak eredményeit, valamint ismertetem a mérési adatok általam végzett statisztikai kiértékelését. A Lánchídon végzett korróziós méréseken szerencsém volt személyesen is részt venni, kint lehettem az egyik láncköteg mérésén.

A TDK dolgozatom végcélja egy olyan matematikai statisztikai korróziós modell kifejlesztése, amely acélhidak korróziós folyamataira használható, és valós, mért adatok kiértékelésén alapszik.

2. A Széchenyi lánc hídtörténete

2.1 Építésének előzményei

A híd megépítésének ötletével gróf Széchenyi István állt elő. 1820-ban apja temetése miatt kellett volna átkelnie a Dunán, de a jégzajlások ezt nem tették lehetővé. Ekkor döntött úgy, hogy felajánlja egyévi jövedelmét egy Pestet Budával összekötő híd építésére [1].

A vállalkozás pénzügyeit a görög származású bécsi bankár, Sina György báró kezelte Széchenyi megkeresésére. A híd becsült költségeinek a fedezéséhez egy részvénytársaságot hoztak létre. Egyedülálló megvalósítás volt ez a maga korában, mivel akkor Magyarországon nem voltak még ilyenféle gazdasági társaságok. A híd összköltsége (6,575 millió aranyforint) meghaladta a Magyarország akkori évi adóbevételeinek a felét [1]. Emiatt az ország súlyos tökehiánnyal küzdött azokban az időkben, ezért egy hídvám rendszert találtak ki Széchenyiék. A vámot mindenkinek be kellett fizetnie, ha át szeretett volna kelni a hídon. Ez azért volt példátlan döntéshozás, mert a XIX. század eleji Magyarországon a nemesek adómentesek voltak. A részvénytársaság és a hídvám rendszer is jó döntésnek bizonyult, mivel 1870-re megtérült a híd építésének a költsége. A díjfizetés 1918-ban szűnt meg [2].

Egy Duna felett átívelő híd építését sokan ellenezték abban az időben, arra hivatkozva, hogy a magyar mérnökök még nem rendelkeztek olyan tapasztalatokkal, melyek egy folyami híd építéséhez szükségesek lennének. A lakosok okkal ódzkodtak a jégfeltorlódásoktól, árvizektől, mivel a Dunán ezekben az időkben több nagyobb árvíz, jeges ár pusztított. Ilyen volt a 1775-ös árvíz, vagy az előbb említett 1820-as jégzajlás, de idesorolható a tárgyalások alatt levonuló 1838-as árvíz is [2].

Sina György báró indítványozására William Tierney Clark angol mérnököt kérték fel a tervek elkészítésére, mert neki volt már tapasztalata függőhidak építésében. 1827-ben adták át a Temzehidat Hammersmith-ben, mely az angol mérnök munkája volt [3]. Clark három tervváltozatot mutatott be, rajta kívül pedig egy másik neves angol mérnök, George Rennie is beadott négy tervjavaslatot [2].

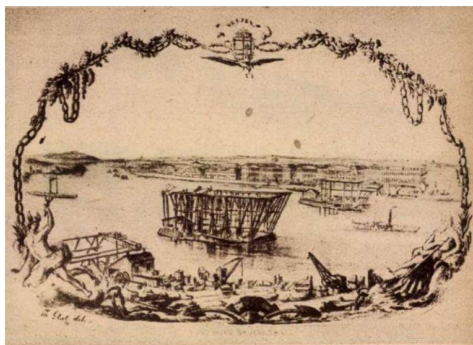


1. ábra: Hammersmith-i Temze-híd [4].

A tervek közül a Clark által tervezett 380 méter hosszú, háromnyílású verziót fogadták el, mert így csak két pillér jelent akadályt jégzajlás idején a mederben. A híd helyének a kiválasztása már nem volt ennyire szerencsés, hiszen a budai oldalon a Várhegynek tartott, ezért a híd átadását követően megépítették a Várhegyi alagutat 1857-ben [5]. Ennek a két létesítménynek a megépítésével sokszorosára csökkent a hegy túloldaláról hozott mezőgazdasági termékek szállítási ideje és költsége [1]. A fentebb említett pénzügyi, politikai, műszaki és társadalmi komplikációk megvitatására és leküzdésére fordított két évtized után 1842. augusztus 24-én V. Ferdinand királyt képviselő József nádor tette le a Lánchíd alapkövét [5].

2.2 Kivitelezési munkálatok

William Tierney Clark nem tudott folyamatosan jelen lenni a hídépítés helyszínén, mivel a munkája Angliához kötötte. Emiatt – a később Magyarországon letelepedett skót gépészt –, Adam Clarkot kérte fel az építkezés vezetésére [1]. Az építkezés 1839-ben kezdődött el, míg az alapozási munkákat 1940. nyarán indították. A Duna vizének a kiszorítása céljából először jászolgátakat építettek. A zárógátat cölöpökből készítették, viszont ezek leverése – a korabeli technikák miatt – két évbe telt. Miután elkészültek a szádfalak, és a víztelenítés is lezajlott, akkor kezdték el építeni a híd pillérjeit és a hídfőket [2].



2. ábra: Lánchíd pillérjeinek alapozása [2].

A híd építéséhez a legjobb minőségű nyersanyagokat használták fel, viszont ezek beszerzése nem volt egyszerű feladat, komoly logisztikát igényelt [1]. A vasszerkezet legnagyobb része Angliában készült, az öntött vas keresztartók és az egyéb öntvényelemek hazai gyártmányúak. Az építkezésen – beleértve az építőanyagok előállítását és szállítását is – 1000-1200 munkás dolgozott. Többüket Angliából szerződtették, sokan közülük később is Magyarországon maradtak, és Adam Clarkhoz hasonlóan letelepedtek az országban [3]. A hídfalak, illetve a pillérek építése 1847 nyarára fejeződött be. Ezt követte a háromnyílású felépítmény megépítése. Egy évre rá indult a láncszemek szerelése [2]. A Lánchidat 1849. november 20-án az a Julius Haynau adta át, aki másfél hónappal azelőtt kivégeztette az aradi vértanúkat. Az átadón nem hangzott el beszéd, a hangulat komor és nyomasztó volt. Az eseményen Széchenyi István nem tudott részt venni, mert ekkor őt már egy ideggyógyintézetben kezelték. A híd megálmodója a későbbiekben sem kelt át a hídon [5].



3. ábra: Az elkészült Lánchíd [5].

2.3 Lánchíd első átépítése

1876-ig, a Margit híd megépüléséig egyedül a Lánchíd biztosított átkelést Pest és Buda között, viszont a közúti forgalom egyre növekedett. Emiatt a híd az 1880-as évek végén, 1890-es évek elején részletes statikai vizsgálaton esett át, melyek során azt vették észre, hogy a híd eredeti fa, illetve vasszerkezete nagy mértékben elhasználódott. A vizsgálatokat és a számításokat Kherndl Antal, műegyetemi tanár végezte [1]. A munkálatokat viszont csak az Erzsébet híd átadását (1903) követően lehetett elkezdni, hogy a forgalmat megfelelő módon el lehessen terelni. A tervezési folyamatok elhúzódása következtében a hídon a felújítás csak 1913-ban kezdődött el, míg a munkavégzést 1914-ben indították [6]. A láncokon vízszintes és függőleges lengéseket is megfigyeltek, ezért a korábbi fa merevítőtartót korszerű acél merevítőtartóval helyettesítették [2]. Emellett arra is fény derült, hogy a kovácsoltvas láncszemek elhasználódtak [6]. Az új elemek beépítésével nagy mértékben nőtt a híd tömege (2139 tonnáról 5194 tonnára), így a láncok cseréje mellett a hídfőket is meg kellett erősíteni. A pesti, illetve a budai oldalon a lehorgonyzótömbökhöz keszonokra alapozott 5000 köbméteres betontömböket csatlakoztattak terepszint alatti építéssel, hogy a hídfők képe ne változzon [2]. A régi láncok 3,5 méteresek voltak, az újakat kicsit több, mint a duplájára (7,2 méter) [6] gyártották a diósgyőri MÁVAG gyárban. A többi vasszerkezet a budapesti Állami Gépgyárban készült. A láncok hosszának növelésével a függesztőrudak távolsága is megkétszereződött (1,8 méterről 3,6 méterre). A szemek magasságának növekedése mellett az egy csomópontba befutó szemek száma 21-ről 25-re változott: egyik oldalon 12 db 29 mm vastagságú, másik oldalon 11 db 29 mm vastagságú, míg a két szélén egy-egy 17 mm vastagságú láncszem került beépítésre [2].



4. ábra: Lánchíd első átépítése [3].

2.4 Lánchíd második átépítése

A második világháború hatalmas pusztítással járt az egész országban. A rombolás alól a Duna-hidak sem voltak kivételek. 1945. januárban a szovjet előrenyomulás olyan mértékű volt, hogy a németeknek vissza kellett vonulniuk Budára, aminek következtében felrobbantották az összes akkori Duna-hidat, köztük – legutolsó sorban, 1945. január 18-án – a Lánchidat is [7], melyet az 5. ábra mutat.



5. ábra: Felrobbantott Lánchíd [7].

A híd az első világháborút még megúsza egy-két kisebb balesettel, viszont a második világháború végén a 29 éves szerkezete a Dunába zuhant. Szerencse a szerencsétlenségben, hogy csak a pesti hídfő robbant fel, mivel a budai hídfő ekkor el volt árasztva, így nem lépett működésbe az oda elhelyezett robbanóanyag. Ennek értelmében a pesti hídfő, lánckamra és a hídnak ezen oldala szenvedte a legnagyobb károsodást. A láncok elmozdultak, egy részük el is tört, a függesztőrudak is elszakadtak. A budai oldalon ezzel szemben csak a pályalemez tört ketté és csúszott a Dunába [7]. A hidat úgy kellett újjáépíteni, hogy a méretei és a szerkezeti rendszere ugyanolyan legyen, mint az 1915-ben átadott hídé volt [2]. A híd Dunába került elemei közül sokat újra fel tudtak használni. Ilyenek voltak a lánclemezek is, melyek háromnegyedét újra be tudták építeni, mert a vizsgálatok azt bizonyították, hogy csak kis mértékben változott a láncok szilárdsága és kémiai összetétele [7]. A hidat az eredeti átadás 100. évfordulóján, 1949. november 20-án nyitották meg újra a forgalom előtt [2].

2.5 Napjainkig tartó időszak

2.5.1 Korróziós mérések a hídon

Az 1949-es átadást követően először 1973-ban végeztek vizsgálatokat a hídon. A láncok repedésmentességét ellenőrizték, majd cserélték a nem megfelelő szegecseket. Ezenkívül a híd új korrózió elleni bevonatot is kapott [1].

Ezt követően 1986-88-as években foglalkoztak újra a Lánchíd állapotával. Ez a vizsgálat már egy sokkal részletesebb folyamat volt: ellenőrizték a híd teherbírását, megerősítették a pályatartó elemeket, illetve a nem megfelelő függesztő-orsókat is cserélték [1]. Ennek a felújításnak részese volt a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Acélszerkezetek Tanszék is. Feladatuk a láncok szelvénygyengülésének vizsgálata volt a korróziós folyamatok hatására, amihez egy vastagságmérő műszert fejlesztettek ki [2]. A méréseket letisztított láncszemekon hajtották végre, és elsősorban az egyes lánclemek leggyengébb keresztmetszeteit definiálták. Ezt követően határozták meg az átlagos, illetve a teljes keresztmetszeti gyengítést a teljes lánckötegre nézve. Ebből az következett, hogy a láncszemek különböző mértékben szenvedtek alakváltozást, szelvénycsökkenést [1]. A mérésekből a lemezkötegek dolgozó keresztmetszeti arányát állapították meg: ez a budai hídfő északi alsó lemezkötegénél 91% volt, míg a pesti hídfő déli felső lemezkötegénél 95%. Ezekből az adatokból arra jutottak, hogy a számítások során a láncszemek korrózióval terhelt tényleges keresztmetszete 90%-os névleges keresztmetszettel legyen meghatározva [1].



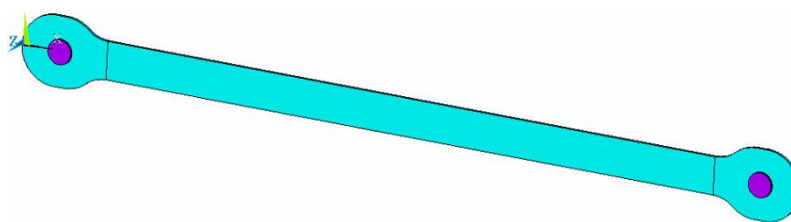
6. ábra: Korrodált lánclemezek [2].

A láncsatornákon kívül a híd teljes acélszerkezetének felületvédelme hagyott kívánni valót maga után. A korlátok, illetve a korlátok környezetében lévő díszítőelemek is korrodáltak. Továbbá több

balesetveszélyes elemet is találtak a hídon. Ezek a dolgok azért is érdekesek, mert 13 évvel ezelőtt újítták fel a hidat, ami akkor új felületvédelmet kapott [8]. A munkálatok során a hidat a rozsdá ellen kezelték, a nagyon elkorrodált részeket cserélték. A vasbeton pályalemez további ázásának megakadályozására szigetelőréteget építettek be [2]. A felújítási munkálatok 1988. első felében értek véget [2]. 2002-ben végezték a következő vizsgálatokat a hídon, melynek végeredménye az lett, hogy a hidat újra fel kell újítani [2]. A vizsgálatból az derült ki, hogy a horgonykamrában és a lánccsatornában erőteljes korróziós károk lelhetők fel. Emellett a korrózió által károsodtak a híd hossztartói is: a középső enyhe mértékben, a szélsők viszont jelentősebben. A vasbeton pályalemezen, illetve a merevítőtartó pályaszint alatti részénél is megfigyelhetők korróziós károk. Ezek esetében a problémát az elkorrodált víznyelők és a pályalemez átázása jelentette [2].

2.5.2 Numerikus modellek létrehozása és validálásuk

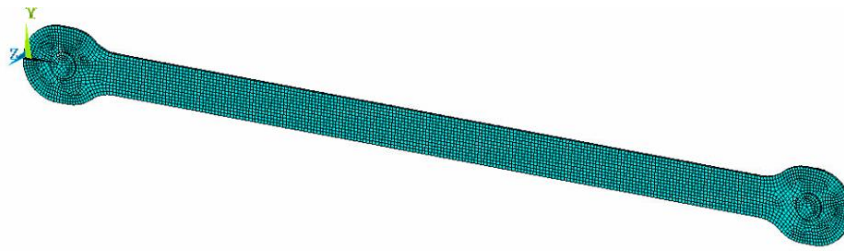
A Hidak és Szerkezetek Tanszék 2016-ban vizsgálta a lánckötegek állapotát és teherbírását. Összesen három numerikus modellt dolgoztak ki a lánccsombok teherbírásának és fáradásának vizsgálatára. A teherbírásvizsgálatot N+M interakcióra is elvégezték a csap befeszülés hatásának figyelembevételével, illetve megállapították a lánccsombok teherbírásának csökkenését a korróziós károk hatására. Az első modell egy speciális lánccsomo modell volt, melynek segítségével vizsgálható volt a lánccsombok teherbírásának csökkenése a korrózió hatására. A modell sematikus ábráját és a végelemez hálóját a 7-8. ábrák mutatják be.



7. ábra: Lánccsomo numerikus modellje [9].

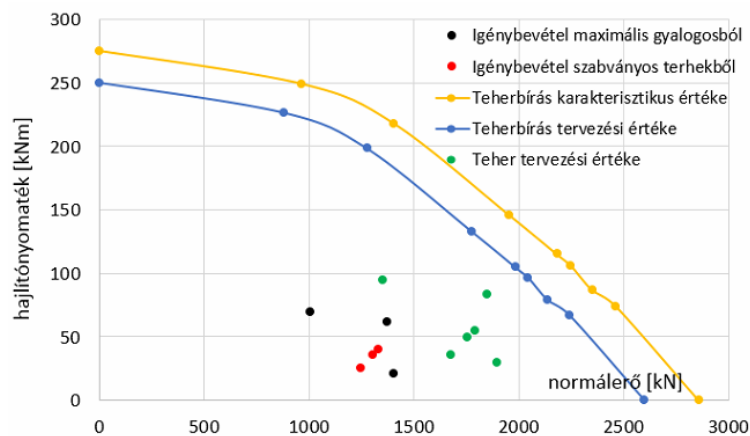
A modell jellemzője volt, hogy valószínűségi paraméterként tudta kezelni a teherbírás vizsgálatához szükséges adatokat, illetve modellezhető volt vele a tényleges korrodált felület, mely a korróziós elemzésnél fontos. A modell validálását szakirodalmi kísérleti eredmények szerint készítették el. A validáláshoz szükséges vizsgálatokat Vértés Katalin PhD dolgozatához előállított egyik tipikus lánccsomon végezték el. A próbatesteket törésig terheltek, majd felépítettek egy numerikus modellt is, amely szinte ugyanolyan eredményt adott, mint a kísérlet. Emiatt kijelenthető volt, hogy

a korlátozatlan folyás határállapotának elérésig a modell tudja a szerkezeti viselkedést kellő pontossággal követni [9].



8. ábra: Láncszem végeselemes hálója [9].

A szakirodalmi kísérletek és az elkészített numerikus modellek azt az eredményt adták, hogy a lánclemez húzóerő hatására az egyenes szakaszon következik be a tönkremenetel, viszont jelentős nyomaték keletkezik az iránytörő saruknál, ezért tiszta nyomatékra és N+M interakcióra is ellenőrizni kell a csomópontot. Elsőként elvégezték a megengedett feszültségek alapján az ellenőrzést, majd előállították a pontosított normálerő és hajlítónyomaték interakciójából meghatározott diagramot, melyet a 9. ábra mutat be.

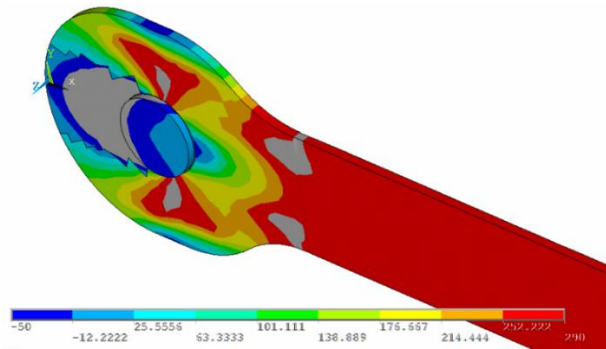


9. ábra: Pontosított N+M interakciós diagram [9].

Az ábrán megfigyelhető, hogy a mind a maximális gyalogos, mind a szabványos terhekből számolt igénybevételek a teherbírás tervezési értékének vonala alatt maradtak. Ugyanakkor a szerkezet megfelelőségének értékeléséhez nem volt elegendő csak ennek a megállapítása: a halmozódó képlékeny alakváltozások korlátozásának a vizsgálatát is el kellett végezni, mivel a pontosított módszer számításba veszi a szerkezet részleges képlékenyedését is. A vizsgálat eredményei azt mutatják, hogy ismétlődő terhelések hatására nem halmozódnak a képlékeny deformációk, ezáltal a szerkezet megfelel normálerő és hajlítónyomaték interakciójára [9].

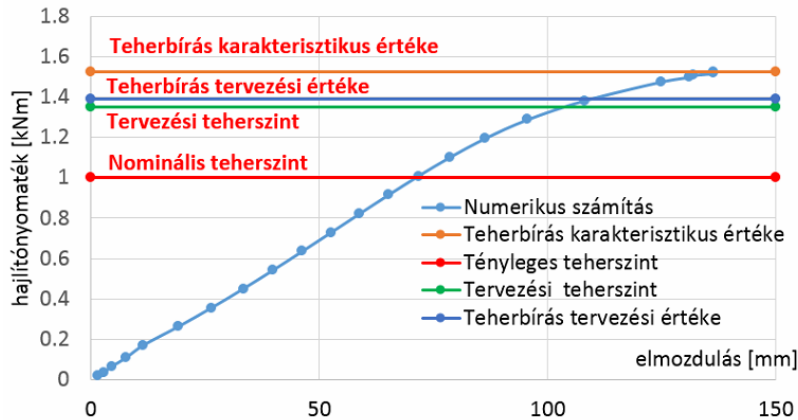
2.5.3 A korrózió figyelembevétele, korrodált láncszem teherbírása

A láncszemek korrodáltsága nagy bizonytalanságokkal határozhatóak csak meg, ezért 2002-es lánclemez vastagságmérési eredmények alapján a károsodás mértékének megállapításához teljes valószínűségi analízist használtak a Tanszék munkatársai. A numerikus modell elkészítéséhez meghatároztak egy korrodált felületet a láncszem egyenes szakaszára a jellemző korróziós eloszlásfüggvény segítségével. Ezt követően a vizsgálatot a láncszem fejrészen is elvégezték azzal a közelítéssel, hogy a nyakrésznél mért feszültségértékekkel számoltak. A szimuláció lefuttatása után, az alábbi ábrán látható módon alakultak a láncszemben a normálfeszültségek.



10. ábra: Normálfeszültségek eloszlása a korrodált láncszemen [9].

A korrodált láncszem átlagos teherbírása 7%-kal csökkent a teljes keresztmetszet teherbírásához képest, főleg a nyakrésznél megnövekvő feszültségek miatt. A teherbírás csökkenés ellenére is megfelel a korrodált láncszem teherbírási határállapotra. Ezt követően az N+M igénybevételekre is elvégezték a vizsgálatot ugyanolyan módon, mint a nem korrodált lemez esetében, viszont itt figyelembe vették a korrózió hatását is. Kétféle módon hajtották végre a numerikus számításokat. Az első esetben a következő diagramot kapták eredményül, melyen látszik, hogy a teherbírás tervezési értéke nagyobb, mint a tervezési teherszint, tehát a korrodált láncszem statikai szempontból megfelel. A második esetben pedig a teljes valószínűségi analízist végezték el korrodált modellen szintén ugyanúgy, mint a nem korrodált kísérletben. Ezen vizsgálat alapján is megfelelt a korrodált láncszem, a maximális kihasználtság értéke 98% volt [9].



11. ábra: Mértékadó $N+M$ erőpárra vonatkozó numerikus szimuláció eredménye [9].

2.6 Jelenlegi munkálatok

2021. március 17-én lezárásra került a gyalogos forgalom elől a Lánchíd. Az előkészítő munkálatok ezen a napon kezdődtek meg. Az autósok június közepéig használhatták még a hidat [10]. A felújítás legfontosabb elemei a következők:

- meglévő közúti pályalemez, illetve a gyalogos pályák újjáépítése,
- megmaradó acélszerkezetek javítása, korrózió elleni védelme,
- földalatti lehorgonyzókamrák szigetelése és felújítása.

A TDK dolgozatom szempontjából a második pont a leglényegesebb. A munkálatok során körülbelül 80 ezer négyzetméternyi felületet fognak korrózió elleni bevonattal ellátni [11]. Ebből 23 ezer négyzetméternyi csak a láncszemek, illetve a függesztőrudak rozsdásodás elleni védelme. A láncok csuklóinál olyan flexibilis bevonatrendszert használnak, amely a legtöbb esetben le tudja követni a láncszemek helyváltoztatásait is [12]. A munkálatok során először megtisztították a javításra szoruló elemeket. Ebben az állapotban volt lehetőség a láncok állapotának felmérésére, és a lemezek vastagságának megmérésére is [13]. Idei év elején kezdték el a lánccsatornában és a lánckamrákban az injektálást és a korrózió elleni munkálatokat, mivel ezek a javítások az időjárástól függetlenül voltak végezhetőek [14].

A BME Építőmérnöki Kar Hidak és Szerkezetek Tanszéke is részt vesz a hídon folyó munkálatokban. A munkálatok során monitoring rendszerrel követték a szerkezet viselkedését, valamint a függesztő orsók laboratóriumi vizsgálatával és a láncelemek vastagságmérésével is

foglalkoztak. Az utóbbi vizsgálat szükséges ahhoz, hogy megállapításra kerüljenek a korróziós károk az egyes láncelemeken [15]. Ezen mérésnek az adatait használtam a TDK dolgozatomban.



12. ábra: Lehorgonyzó láncköteg a felújítás előtt [10].

2.7 Lánchíd acél anyaga, anyagtulajdonságai

Az eredeti Lánchíd lánclemezei angliai kovácsoltvasból készültek. Abban az időszakban – mikor a hidat építették – mindenhol hegeszvasat alkalmaztak. Az anyag jó szilárdsági tulajdonságokkal rendelkezett, viszont fáradással szemben nem viselkedett jól, és gyorsan rideggé is vált [16]. A híd első átépítésekor megerősítették a láncokat: 20% nyúlású, 4200-5600 kg/cm² szakítószilárdságú karbonacél váltotta a kovácsoltvas elemeket [17]. A második világháború utáni újjáépítés során több lánclem is használható állapotban maradt, így ezeket visszaépítették, a meghibásodott elemeket pedig cserélték [2]. A merevítőtartók szerkezetét viszont teljes mértékben kicserélték a második átépítés alkalmával: A.36.24.12 minőségű folytacélból készítették el őket, így 40%-kal nagyobb teherbírású szerkezetet értek el ezzel [17]. A Lánchídnak eleinte főleg teherbírási problémái voltak az egyre növekvő forgalom miatt. Később viszont egyre jobban felerősödtek a korróziós gondok a híd kapcsán. A rozsdásodás mértéke minden egyes lánclemezen, illetve a többi acél elemen más és más volt. A második világháború utáni újjáépítést követően többször is kezelték a hidat korrózió elleni bevonattal, viszont a rozsdásodás mindig újra fellépett. A mostani felújításnak is a korrózióvédelem az egyik legfontosabb eleme [2].

3. Korróziós jelenség

A szerkezeti anyagok kölcsönhatásban vannak a velük érintkező környezettel. Ezt a környezetet korróziós közegnek hívjuk. Ez a közeg és a szerkezeti anyag között lejárló kémiai vagy elektrokémiai folyamatok következtében létrejövő károsodást nevezzük korróziónak [18]. A tönkremenetel főleg a levegő oxigénje és nedvességtartalma, illetve a levegőben lévő szennyeződések – különböző gázok, por, füst – hatására alakul ki [19]. Ha nem figyelünk oda a korrózióra kellő mértékben, akkor az is előfordulhat, hogy a szerkezeti anyag elfogy, hiszen a korrózió egy önmagától végbemenő és energiafelszabadulással járó folyamat [18]. A károsodás mindig az anyag felületén indul meg, és halad egyre mélyebbre. Egy acélszerkezet felületén először vörösesbarnás foltok, majd egyre csak növekvő összefüggő felületek képződnek. Ez a folyamat addig folytatódik, amíg a teljes anyag lyukacsos, porózus és lemezes szerkezetű nem lesz [19]. A fémek korróziója egy bonyolult folyamat, mivel az acélok összetételükben és szemcseszerkezetükben nagyon eltérőek lehetnek. Emellett különböző szennyező anyagok is megtalálhatók bennük, illetve szerkezeti hibák is felléphetnek [19].

3.1 Korróziós alapfolyamatok

A fémkorrózióknak nevezzük a fémionoknak és az egyenértéknyi mennyiségű elektronoknak a fémrácsból való kilépését. Ezentúl fontos megjegyezni, hogy az ion- és az elektronkilépés helyileg elkülönülhet [20]. A kémiai korróziós folyamatok általában nagy hőmérsékletű gázközegben mennek végbe. Ilyenkor az elektronok csak a molekulák nagyságrendjében mozognak [20]. Elektrokémiai korrózió akkor alakul ki, ha a folyamatban jelen van egy elektrolit, egy anód, illetve egy katód. Az elektrolit az anód és a katód közötti elektromos áramot közvetíti. A korrózió sebessége annál nagyobb, minél kisebb az anód felülete a katódéhoz képest [19].

3.2 A korrózió megjelenési formái

A korrózióknak számos megjelenési formája van, melyek közül a lényegesebbeket szeretném bemutatni:

- egyenletes korrózió: megközelítőleg egyenletes az anyagvesztés a felület mentén, száraz gázok okozta kémiai korrózió, illetve anód, katód állandó eltolódása esetén lép fel;



13. ábra: Egyenletes korrózió [18].

- repedéses korrózió: nagy húzófeszültség is jelen van a korróziós folyamat mellett;
- berágódásos korrózió: szennyezett környezetben a mechanikai és a vegyi hatás erősíti egymást súrlódó, koptató igénybevétel esetén, túlnyomóan fárasztó igénybevétellel terhelt csavar- és szegecskapcsolatnál, saruknál és csuklóknál jellemző [18];
- lyukkorrózió: az egyik leggyakoribb korróziós jelenség, a fémek felületén lokálisan szabálytalan alakú lyukak képződnek;



14. ábra: Lyukkorrózió [21].

- rés-korrózió: nehezen elérhető helyeken lelhető fel, ami emiatt, illetve az anyag szétválása miatt nagy károkat tud okozni [21].



15. ábra: Rés-korrózió [21].

3.3 Korróziós vizsgálatok

A korróziós jelenségek nagyon szerteágazó folyamatok, mivel minden egyes szerkezet más és más, illetve a korróziót elősegítő körülmények is különbözőek. Emiatt a vizsgálatuk is másfajta eljárásokat követel. Amennyi korróziós folyamat létezik, legalább annyi korróziós vizsgálati módszer is ismert. Nagyon fontos, hogy a korróziós jelenségekkel foglalkozni kell, hiszen így nagyobb baleseteket és anyagi veszteségeket lehet megelőzni. Elsőként fel kell ismerni ezeket a folyamatokat, amihez az is elég, hogy meghatározzuk a fémekben történő változásokat. Ennek a

módszernek a neve kvalitatív eljárás. Ez a művelet nagyon jól használható felületi rozsdásodás esetén, viszont kristályhatárok mentén kialakuló folyamatok jellemzésére nem alkalmazható.

Ahhoz, hogy egy folyamatot minél pontosabban le lehessen írni, mérhető adatokra van szükség. Egy korróziós jelenség esetén viszont nagyon nehéz megfelelő korróziós mérőszámot megadni, mert a fémek anyagi viselkedését számtalan tényező befolyásolja: különböző igénybevételek, változó időjárási körülmények, pH tartalom, fémek összetétele. A szakemberek arra jutottak, hogy elsősorban a korrózió sebességét kell megállapítani. Ebben az esetben is nagyon sokrétű vizsgálatokat kell elvégezni, hiszen így adható meg a lehető legpontosabban a fémek tönkremenetelének a folyamata [22]. A következőkben a korróziós méréseket és vizsgálatokat mutatom be.

3.3.1 Graviometria

Ez az egyik legjobban bevett módszer, mely azt adja meg, hogy a fémek mekkora hányada módosul a korróziós folyamatok alatt, és válik oxidokká, sókká, illetve fémes anyagokká. A mérés lényege ebben az esetben az, hogy az adott fém mennyit veszített a súlyából vagy mennyit gyarapodott. Ezt a változást egy időtől is függő mennyiség adja meg. A módszer csak egyenletes korrózió esetén alkalmazható, lokális korróziós jelenségek esetén nem. A fémen belüli rozsdásodásról sem lehet kideríteni sok információt ennek a módszernek a segítségével [22].

3.3.2 Ellenállásmérés alapú vizsgálat

Ez a vizsgálat a fémek vezetőképességén alapul. A fémek a korrózió miatt oldódni kezdenek. A folyamat közben létrejövő első és másodlagos korróziótermékek meg tudják változtatni az anyag elektromos tulajdonságait. Erre legjobban a fémek fajlagos ellenállásának változásából lehet következtetni. A módszerrel kimutatható a kristályközi elválkozás is, mivel ekkor mindig megváltozik az anyag belsejében a fajlagos ellenállás. Emellett automatizálható is [22].

3.3.3 Mechanikai vizsgálatok - anyag belsejében létrejövő korróziós elválkozások

Az anyag belsejében létrejövő korróziós elválkozás a legveszélyesebb tönkremeneteli forma, mivel az anyag belsejében kezdődik a rozsdásodás, ami szabad szemmel nem látható. A felület közelében az anyag szemcsehatárán kezdődik el a korróziós folyamat, amely az anyag mélyebb rétegei felé terjed tovább. Ezekben az esetekben a fémek mechanikai tulajdonságait méri, mert ilyenkor azok változnak meg főként. Ezen vizsgálatok közé tartozik a szakítószilárdság és a nyúlás

csökkenésének a mérése. Az anyagok tanulmányozását próbatesteken végzik. A mechanikai tulajdonságokat a korróziós igénybevételek után is meghatározandó, hiszen ebből fejezhető ki a változás mértéke. Kristályközi korróziót speciális esetekben ütőmunka meghatározással, keménység méréssel és nyomószilárdsági jellemzők definiálásával is meg lehet határozni [22].

3.4 Korrózióvédelem

A korrózió az egyes anyagoknál biztosan bekövetkezik, viszont az számít igazán, hogy milyen gyorsan zajlik le a folyamat. Megfelelő műszaki megoldásokkal a korróziós károk csökkenthetők gondos, körültekintő részlettervezéssel, vagy megfelelő karbantartási eljárásokkal, melyek a következők:

- a szerkezetek megfelelő elhelyezése, elrendezése az adott területen,
- az anyagáramok vezérlése,
- a kiáramló anyagok célszerű kezelése,
- réskorrózió megakadályozása,
- kémiai ellenálló fém, ötvözet, illetve műanyag alkalmazása [19].

Továbbá a rozsdásodás lassítására találták ki a korrózióvédő szereket, illetve eljárásokat, melyekkel ugyan a folyamat nem állítható meg, viszont terjedési sebessége csökkenthető [18].

3.4.1 Inhibitorok

Az inhibitorok vegyi anyagok, melyekkel csökkenthetők a korróziós problémák. Az acél vizes közegbeni rozsdásodásának lassítására szilikátokat, foszfátokat és kromátokat tartalmazó inhibitorokat alkalmaznak. Főként az olajiparban használják [19].

3.4.2 Katódikus védelem (aktív korrózióvédelem)

A védendő fémhez ebben az esetben egy aktívabb fémek csatlakoztatnak elektromosan. Továbbá egy inert anód használatával és elektromos áram bevezetésével is létrejöhet ilyen védelem. Vízalatti berendezések és víztartályok megóvására alkalmazzák széles körben [19].

3.4.3 Védőbevonatok (passzív korrózióvédelem)

A korrózióvédelem legelterjedtebb módszere a védőbevonatok felhasználása. Ezek a bevonatok nagymértékben csökkentik, vagy akár meg is akadályozzák, hogy a védendő anyag felületéhez oxigén és vegyi anyagok érintkezzenek. A felületvédő bevonatok vastagsága néhány mikrométertől

egy-két milliméterig terjed. Széleskörben alkalmazzák, hiszen nagyon sokféle variációja ismert, mindegyik más tulajdonságokkal rendelkezik, illetve viszonylag olcsók.



16. ábra: Korrózió elleni védőbevonat felvitele [23].

- Korróziógátló bevonatok

A fémek felületével kémiaiilag reagáló pigmenteket tartalmaz, melyek ionokat juttatnak egy olyan oldatba, mely a bevonati filmbe bekerül. Az ionok a fémek felületén az anód vagy a katód polarizációjának a növelésével mikroszkopikus védőréteget alakítanak ki.

- Áldozati bevonatok

Cinkben dús bevonatok, melyek a fém cink beágyazódásán alapszik. A cink előbb korrodál el, így megvédi a fémet a rozsdásodástól.

Mielőtt ezeket a bevonatokat felvinnénk, rendkívül fontos, hogy felületek megfelelően elő legyenek készítve, mivel egy rossz alapozással bármilyen jó bevonatunk is lehet, nem fog jól működni [19].

3.5 Felületelőkészítés

A védendő felületen általában megtalálhatók oxidációs termékek: acélnál reve, rozsdá, illetve mechanikai szennyeződések: zsírok, olajok. Ezekről a fémeket elsősorban meg kell tisztítani. Ahhoz, hogy a bevonat megfelelően működjön, jó tapadásra van szükség a festék és az alapanyag között. A bevonat tapadását az alap és az érintkező felület között ható erők adják meg.

Az előbb említettekkel szemben ma már léteznek olyan bevonatok is, melyeket szennyezett felületekre is fel lehet hordani, hogy az adhézión és a bevonati film belsejében ható, kohéziós erők egyensúlyba kerüljenek.



17. ábra: Felületelőkészítés [24].

Mielőtt ezt megtennénk, vizsgálattal kell megbizonyosodni arról, hogy megfelelő-e még a régi bevonat. Ilyen vizsgálat a rácsvágás, melynek lényege, hogy a régi bevonatba egymást valamilyen szögben metsző egyeneseket vágunk, és ha az egyenesekkel határolt kis rombuszok a helyükön maradnak akkor megfelelő az előző bevonat. Ha viszont felpattannak, akkor a régi bevonat már nincs jó állapotban.

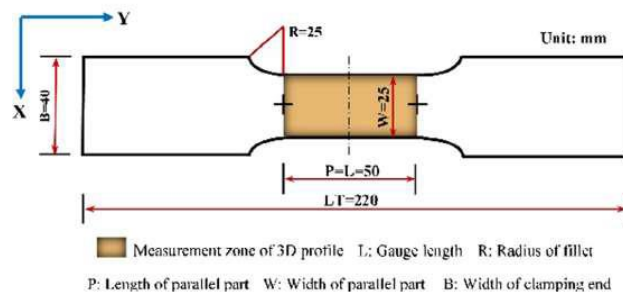
A levegő oxigénje, szennyeződései, nedvességtartalma, az időjárás (napfény, csapadékok) és a környezeti hatások mind rontják a bevonati filmet. A film a keletkezésétől kezdve folyamatosan változik: máshogyan viselkedik a levegő páratartalmának és a levegő hőmérsékletének változásával egyetemben. Ha párás a levegő duzzad a bevonat, ha viszont száraz akkor zsugorodik. A fagypont alatti hőmérséklet térfogatnövekedéssel jár, ami tönkreteszi a film szerkezetét. Az ultrahang sugárzás sincs jó hatással a filmre nézve, mivel kémiai bomlást, depolimerizációt eredményez, melynek következtében csökken a bevonat szilárdsága és érzékenyebb lesz a légköri változásokra. Az adhéziós és kohéziós erők egyensúlyának felbomlásából keletkező belső feszültségek miatt apró repedések keletkeznek a filmben, melyek térfogatváltozás következményei. Lehetnek duzzadási repedések, ha térfogatnövekedés lép fel, illetve zsugorodási repedések, ha térfogatcsökkenés alakul ki. A film zsugorodása lehet a felülettel párhuzamos, rá merőleges vagy mindkét irányú is. Ha merőleges akkor nem keletkeznek feszültségek, viszont, ha párhuzamos akkor a filmben feszültségek jönnek létre [19]. Összefoglalásként tehát akkor lesz kiváló felületvédelmünk, ha a felület megfelelően van előkészítve, és az adott felülethez a legjobb bevonatot használjuk.

3.6 Korróziós modellek

Ahhoz, hogy minél kevesebb roncsolásos vizsgálatot kelljen véghez vinni a szerkezetek minél részletesebb megismeréséhez, szükség van numerikus korróziós modellekre, melyek hűen követik a kísérleti úton is meghatározható szerkezeti viselkedéseket [25]. A következőkben ilyen modelleket szeretnék bemutatni.

3.6.1 1. modell: A korrodált acéllemez szilárdságának és deformálhatóságának mérése a korrózió morfológiája alapján

Ehhez a kísérlethez egy 8 éve a természetben lévő acél rácsos tartó H-szelvényű gerendáinak az egyes elemeit használták. Ezek a gerendák 0,2% széntartalmú acélból készültek. Több mérést is végrehajtottak a szakemberek az elemek helyétől és helyzetétől függően. Vizsgáltak vízszintes, függőleges és ferde rácsrúdakból kivágott elemeket, és külön nézték a gerincből, a felső, illetve az alsó övből kiemelt részeket. Emellett készítettek egy korróziómentes mintát is, amelyből az anyag a szerkezet elkészítésekor megfigyelhető tulajdonságait kapták meg. A mérések előtt a próbatesteket megtisztították a rozsdától, majd készítettek egy referenciaszelvényt belőlük. Ehhez az ábrán megfigyelhető módon az elemek mindkét szélén 7,5 mm-t martak be. A vizsgált próbatest geometriai kialakítását a 18. ábra mutatja be.

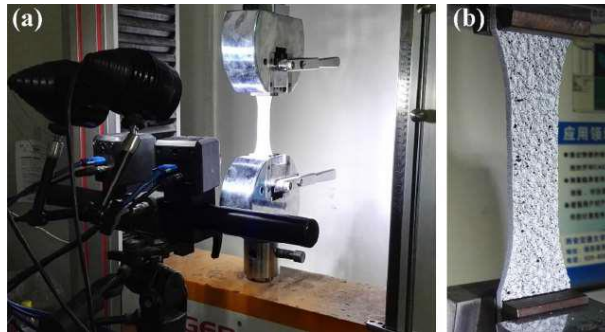


18. ábra: Próbatest geometriai kialakítása [25].

A korrodált felületek 3D-s morfológiájának megadásához egy érintésmentes 3D szkennert használtak. A műszer meghatározott egy húzószilárdsággal párhuzamos felületet, illetve egy referenciasíkot, melyek egy felületi rácsot alkottak. A referenciazónát vastagságmérővel definiálták.

A próbatestek geometriájának és szakítószilárdságának megállapításához a mintákat laboratóriumi levegőben, szobahőmérsékleten, illetve feszültség, felületi károsodás és deformáció nélkül

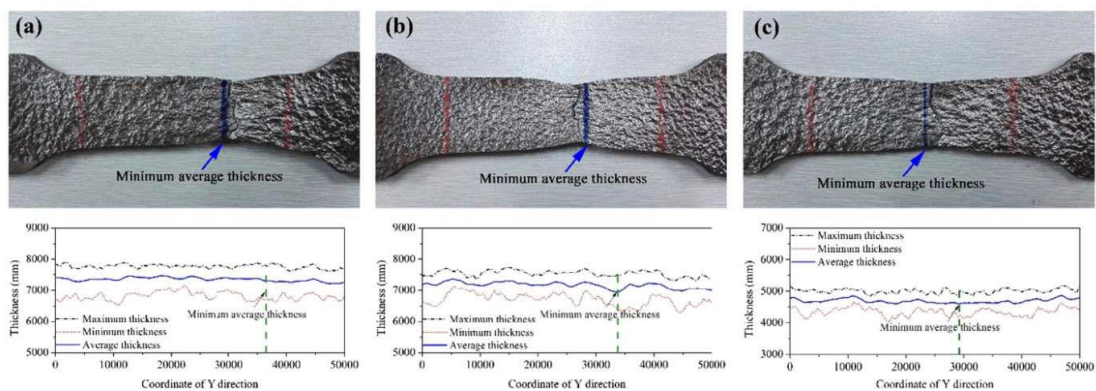
teszteltek. Emellett fontos megjegyezni, hogy a próbatesteket mindkét végén rögzítették, és a vizsgálat állandó feszültszabályozás mellett ment végbe törésig.



19. ábra: Korrodált elem 3D szkennelése [25].

Ezt követően a korrózió miatt létrejött gödrök mélységeit vették szemügyre. Arra a következtetésre jutottak, hogy a vízzel érintkezett felületek gödre mélyebbek, de ritkább elhelyezkedésűek.

Ezalapján minden egyes különböző helyről vett minta esetében meghatároztak egy átlagos szelvényvastagságot a próbatestek sárgával jelölt 50x25 mm-es zónájában. Ezt követően a térfogatvesztések arányát számították ki, melyből arra a következtetésre jutottak, hogy a teherbírás veszteség egyenes arányos a térfogatvesztéssel. Ezentúl megfigyelték azt is, hogy az inkább lokális, de nagyobb gödrökkel jellemezhető szelvények máshogy viselkedtek a szilárdsági vizsgálatokra. A próbatestek szakadása minden esetben a minták minimális felületeinél következett be, melyet a 20. ábra mutat be.



20. ábra: Különböző próbatestek tönkremenetele [25].

Ezen megfigyelések alapján azt állapították meg, hogy a korrodált szelvények teherbírását a leggyengébb keresztmetszetben kell meghatározni. Ezenkívül bevezettek egy károsodási indexet is, amely a lehetséges maximális teherbírást adja meg.

$$R_m = \frac{T_0 - T_{ma}}{T_0}$$

$$F_u = W * T_0 * f_{u0} * (1 - R_m)^{0,73}$$

A képletben az F_u a teherbírás, W a párhuzamos rész szélessége, T_0 az acéllemez kezdeti vastagsága, f_{u0} a korrózió mentes lemez végső szilárdsága, míg az R_m pedig a károsodási tényező. Az index kiszámításához szükséges T_{ma} pedig a minimális keresztmetszet átlagos vastagságát adja meg. Ezenkívül egy másik többváltozós regresszióanalízisen alapuló empirikus képletet is meghatároztak:

$$\delta' = -1,589R_t - 0,3 * R_a + 0,32$$

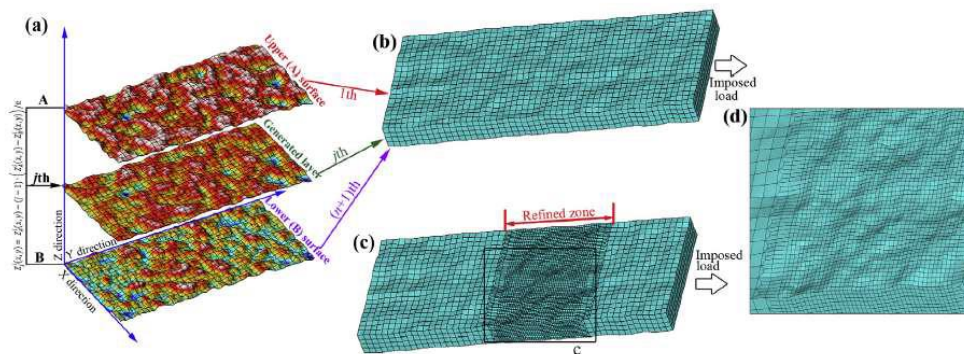
$$R_t = \frac{T_0 - T_{min}}{T_{ma}}$$

$$R_a = \frac{A_p}{W * L}$$

Úgy gondolták, hogy a gödrök mélységei és sűrűségei befolyásolják legjobban a korrodált acéllemez alakváltozókéességét. A képletben a R_t a gödörmélységi, az R_a a gödörsűrűségi tényező, míg A_p a gödrök területét fejezi ki a szelvényeken.

Korrózió végelelemes modellezése

A modell kitalálói a feszültség-nyúlás meghatározásához egy DIC-technikát, illetve egy FE-szimulációt alkalmaztak. Az acél anyag valódi konstitutív kapcsolatának előállításához a DIC-technikával mért átlagos tengelyirányú alakváltozás – átlagos feszültséggörbét vették számításba, majd ezt importálták a numerikus modellbe. Ezt követően a modellre a valódi feszültség-nyúlás görbét használták, viszont a FE modellezési megközelítés nem alkalmazható, mivel nagyon változatos a korróziós morfológia. A modellben emiatt a héjelemek helyett a testelemeket használták, mert ez az elmélet megfelelt azoknak a feltételeknek, melyek hatására a végelelemes háló pontosabban adja vissza a korróziós elváltozások részleteit. Ezután meghatározták a korrodált felületek és a két felület közötti rétegek csomópontjainak Z koordinátáit a szkennelt felmérés és a létrehozott háló segítségével, majd minden ilyen csomópontot hozzá rendelték a testelemek csomópontjaihoz.

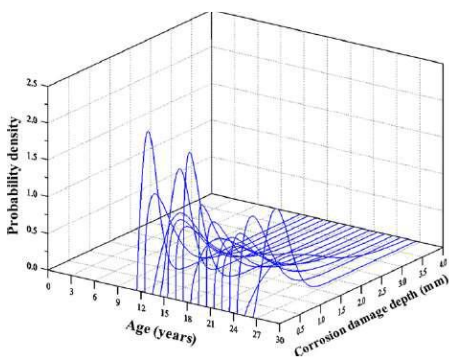


21. ábra: Numerikus modell megalkotása [25].

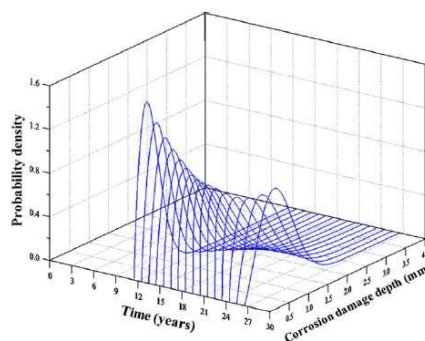
A módszer előnye, hogy roncsolásos és kísérleti vizsgálatok nélkül is nagy pontossággal feltételezhető a korrodált acél elemek maradék teljesítménye, szilárdsága és deformálhatósága is. Az eredmények összefoglalását tartalmazza a [25]. forrás.

3.6.2 2. modell: Fejlett módszer az empirikus modell kifejlesztésére és az időfüggő korróziós veszteség előrejelzésére

Jelen példában a modell kitalálói 11 és 27 év közötti hajók tengervíz ballaszt tartályszerkezeteinek korrózióját vizsgálták, melynek időbeliségére egy empirikus modellt fejlesztettek ki. Bármely időpontban a korróziós veszteségek statisztikai szórása széles tartományban mozog, viszont a szórás meghatározására nagyon oda kell figyelni, hiszen ennek a mérésnek az alapossága adja a korróziós modell pontosságát. Ebben a módszerben a korróziós veszteség statisztikai szórását több időpontban felmérték, és ezek alapján egy időtől függő Weibull-függvénnyel jellemezték. A modellalkotás első lépése az eltérő korróziós időpontokban történő adatok gyűjtése volt a korrodált szerkezeten. Ezt követően ezek az adatok egy statisztikai elemzésen estek át, ahol megállapításra került a korróziós károk átlagértéke és szórása. Ezután kezdődött meg a sűrűségfüggvény megalkotása a statisztikai elemzés eredményei alapján. A következő lépésben ezen függvény együtthatóit definiálták, majd végezetül ezen együtthatók alapján a korróziós empirikus modell kifejlesztése zárta a folyamatot. Fontos megjegyezni, hogy minden lépést az egyes időpontokban külön-külön meg kellett határozni. Az eredeti idő – korróziós mélység grafikon közel azonos volt a modell alapján kapott diagrammal, mivel a modell tekintettel van a valószínűségi sűrűségeloszlási minták időbeli alakulására. Az eredeti, illetve a mért, általános idő – korróziós mélység grafikonok láthatóak a 22-23. ábrákon [25].



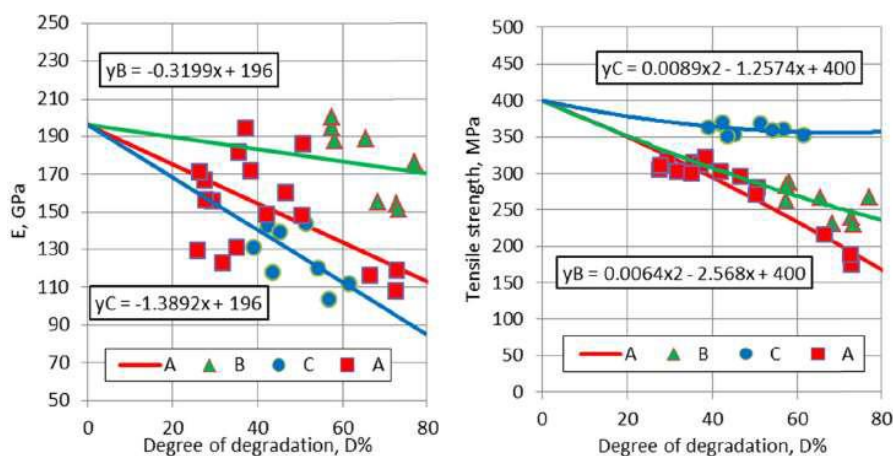
22. ábra: Eredeti idő – korróziós mélység diagram [25]



23. ábra: Általános idő – korróziós mélység diagram [25]

3.6.3 3. modell: Homokfúvásnak és csiszolópapíros tisztításnak alávetett korrodált acélminták szakítószilárdságának kísérleti értékelése és összevetése a tisztítatlan elemmel

A kísérletet végző személyek egy szekrénytartóból kivágott három próbatestet vizsgáltak, melyek tengervíz által korrodáltak voltak. A minták közül kettőt kezeltek: egyiket homokfúvással, míg a másikat csiszolópapírral tisztították meg, a harmadikat pedig meghagyták eredeti korrodált állapotában. A kísérlet során a próbatesteken végzett feszültségvizsgálatokkal állapították meg az egyes minták rugalmassági modulusát, folyási feszültségét, szakítószilárdságát, teljes egyenletes nyúlását. A két módszer különböző módon befolyásolta az anyag mechanikai tulajdonságait és a feszültség-nyúlás összefüggését. Emiatt az eredmények szórása is máshogy alakult, melyet a 24. ábrán bemutatott két grafikon mutat be.



24. ábra: Rugalmassági modulus és a szakítószilárdság a degradáció fokának függvényében [25].

Az állapították meg, hogy a rugalmassági modulus jobban csökken a csiszolópapíros megtisztítás alá eső próbatest esetén, mint a homokfúvott, illetve a korrodált minta esetében. Ugyanez a trend mutatkozik meg a teljes egyenletes nyúlásnál is. Ezzel szemben a szakítószilárdság éppen fordítva változik az egyes próbatestek esetében: a nem karbantartott és homokfúvott mintáké csökken nagyobb mértékben [25].

3.6.4 4. modell: Korrodált acéllemezek mechanikai tulajdonságai romlásának vizsgálata felületi topográfia alapján

A vizsgálathoz egy Q235-ös (0,2% széntartalmú) acéllemezt használtak, melyen mesterséges sópermet segítségével gyorsított korróziót indukáltak. Ezt követően meghatározták a lemez korrodált felületének alakváltozásait, illetve feszültség-nyúlás görbéit és mechanikai tulajdonságait. Ezután végeselemes módszerrel elemezték a kapott adatokat, grafikonokat. Az eredményekből az következett, hogy egyenes arányosság van a korrózió sebessége és a folyási plató, folyáshatár, határszilárdság, illetve a szakítószilárdság között. Az acéllemezek rugalmassága az előbb felsoroltak növekedésével nagymértékben csökken. A folyamat gyorsabb lefolyása miatt a feszültségkoncentráció is nagyobb, ami a képlékeny zóna gyorsabb kialakuláshoz vezet. Ezek végeredményét a modellel foglalkozó személyek egy egyszerű képlettel adták meg:

$$\epsilon_{br} = 0,380 - 0,00459 * \rho_w$$

ahol ϵ_{br} a szakadónyúlás, a ρ_w az elkorrodált keresztmetszetet fejezi ki %-os formában [25].

3.6.5 5. modell: A korrodált elemek kihajlási ellenállása

Oszvald Katalin PhD disszertációjában korrodált szögacélokra dolgozott ki egy algoritmust, amely a lyukkorrózió egyenletes vagy véletlenszerű eloszlásának modellezésére alkalmazható. A jelenség modelljét Ansys végeselemes szoftver segítségével készítették el, melyhez egyenletes, Gauss és Béta eloszlásfüggvényeket alkalmaztak, illetve lineáris rugalmas felkeményedő anyagmodellt használtak a numerikus számítások során. A modell megalkotása előtt kísérlettel is meghatározták a korrodált szögacélok szerkezeti viselkedését, majd a modellel a keresztmetszeti veszteségek, geometriai tökéletlenségeket és a korrózió lehetséges helyeit vizsgálták. A modellel ugyanazt a szerkezeti viselkedést lehetett megállapítani, mint amit a kísérleti eredmények is mutattak [25].

4. Korróziós mérések a láncokon

Egy megfelelő korróziót is figyelembe vevő modell megalkotásához elengedhetetlen, hogy legyenek mérési adataink a modellezni kívánt szerkezeten. Ahogy fentebb említettem, a Lánchíd korróziós méréseiben a Műegyetem többször is részt vett már, és a jelenlegi felújítás során is szerep hárult a Hidak és Szerkezetek Tanszék munkatársaira. Az elsődleges feladatuk a lánclemezek aktuális vastagságának a mérése a lánckamrákban a lehorgonyzásoknál. Majd ezután az adatok feldolgozása és dokumentálása.

A vizsgálatokat teljes mértékben ugyanúgy végezték el, mint ahogy azt tették 1986-ban és 2002-ben is. A mérések ugyanazon a helyen, ugyanazon vastagságmérő műszerrel és mérési stratégiával mentek végbe. Így a mostani mérési eredmények egyszerűen összehasonlíthatóak a régebbi vizsgálatok értékeivel. A vizsgálatok 2022. áprilisában és májusában zajlottak mind a négy lánckamrában. Egy lánckamrában kettő láncköteg helyezkedik el, így összesen nyolc láncköteg valamennyi lánclemeze megmérésre került. A mérések a láncok megtisztítása után történtek. A budai oldalon a fémtiszta, viszont a pesti oldalon már az új festékréteggel ellátott lánclemezeken tudták a méréseket elvégezni. Természetesen a lánclemek valós vastagságának meghatározásához levonták a felhordott festékréteg vastagságát, melynek a mértékét statisztikai módszerrel állapították meg.

Az egyik ilyen mérés alkalmával szerencsém volt nekem is a helyszínen lenni, és betekintést nyerni a mérés részleteibe. Érdekes volt látni, hogyan megy végbe egy ilyen vizsgálat, mikre kell odafigyelni a mérési folyamat alatt [26].

4.1 Mérőműszer bemutatása

Az 1986-os első mérés óta – ahol ugyanezt a mérőműszert használták – az eszköz mérőrendszerét továbbfejlesztették, így a mostani felújítás során már egy korszerűbb technikával tudtak dolgozni a szakemberek. Ez a műszer egyébként egy speciális, egyedi eszköz, amely csak a Lánchíd lánclemezeinek vastagságmérésére szolgál.

A mérőeszköz fésűszerűen fér be a lánclemezek közé. Egy lánclemen végig tolva a lánc magassága mentén a hét mérőszenzora segítségével hét mérési vonalon tudja rögzíteni a láncok lemezvastagságának értékeit. A mérőműszer a 25. ábrán látható.

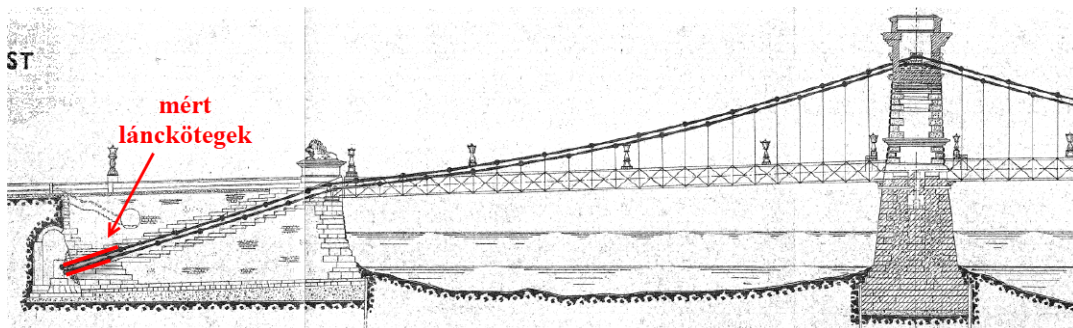


25. ábra: Mérőműszer [26].

A korábban használt mérőműszer a lánclemezek felületén csak előre meghatározott pontokban tudta elvégezni a vastagságméréseket. A jelenlegi mérőeszközön már megtalálható egy olyan adatgyűjtő rendszer, amely folyamatosan tud méréseket végezni, így a hét mérési vonalon egyszerre, megszakítások nélkül tudta a lemezvastagságok adatait szolgáltatni. Emiatt az előző mérésekhez képest sokkal több értéket lehetett rögzíteni, melyek megadták a korróziós gödrök mélységét és kiterjedését. Ahhoz, hogy a mérések a lehető legpontosabbak legyenek, minden mérés előtt megtörtént a mérőműszerek kalibrációja egy etalon lemezen. Emellett a mérések kétirányban hajtották végre: a lehorgonyzófej irányából a híd felé, majd ugyanezen az úton vissza. Ezáltal az összes pontra két mért adatot kaptak, melyek közel azonosnak tekinthetők [26].

4.2 Mérőhelyek, a mérés folyamata

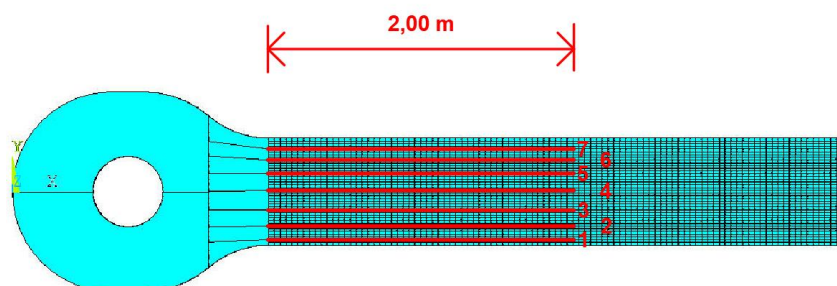
A lánclemezek vastagságát a lánckamrákban a lehorgonyzófejektől kezdődő részekben mérték, melynek helyét a 26. ábra szemlélteti.



26. ábra: Mérések helye hosszszelvényben [26].

Egy-egy lánclemezen hosszirányban 1,8-2 méteres szakaszokon történtek a mérések a lehorgonyzófej nyakrészétől kezdődően. Ez a távolság azért egy intervallum, mert a budai kifolyási

oldal lehorgonyzókamra alsó lánckötegénél kb. 20 cm-re a lehorgonyzófejtől tudták a mérést kezdeni. A többi esetben a mérőműszer be tudott érni teljesen a lehorgonyzó szelvényig. A mérőeszköz hét mérőszenzora a láncclemez felső élétől számított 10, 70, 130, 190, 250, 310 és 370 mm távolságban gyűjtötte az adatokat. A mérési zónát, illetve a mérési vonalak elhelyezkedését mutatja a 27. ábra.



27. ábra: Mérési vonal, mérési zóna sematikus ábrája.

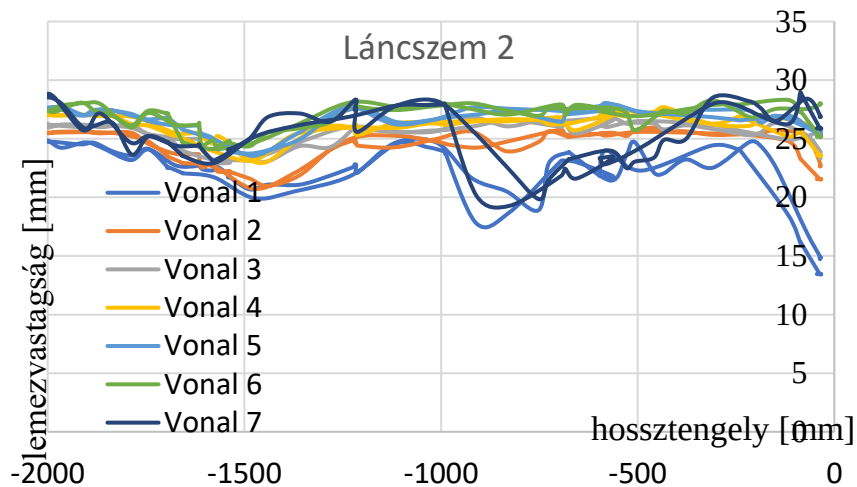
A méréseket a lentebb lévő ábrán bemutatott a láncclemezek egyenetlen felületén végezték. Ezeken a felületeken tolták végig a mérőműszert, melynek használata közben végig oda kellett figyelni arra, hogy a lemezek alakváltozásai ne dobják meg egy kicsit se a műszert, mert ezek az mérések pontatlanságához vezettek volna [26].



28. ábra: Láncclemezek jellemző felülete [26].

5. Mérési eredmények feldolgozása a Tanszék által

A mérési eredmények feldolgozását elsősorban a Hidak és Szerkezetek Tanszék munkatársai végezték. Én ezt a kiértékelést folytattam. A mérés eredményeinek megjelenítése céljából, minden egyes lánclemez hét mérési vonalán mért adataira illesztettek egy-egy görbét. Ezek a diagramok a jelenlegi lemezvastagságokat mutatják a mérési hossz függvényében. Példaként szeretném bemutatni a budai befolyási oldal alsó lánckötegének ilyen diagramját, melyet a 29. ábra mutat.



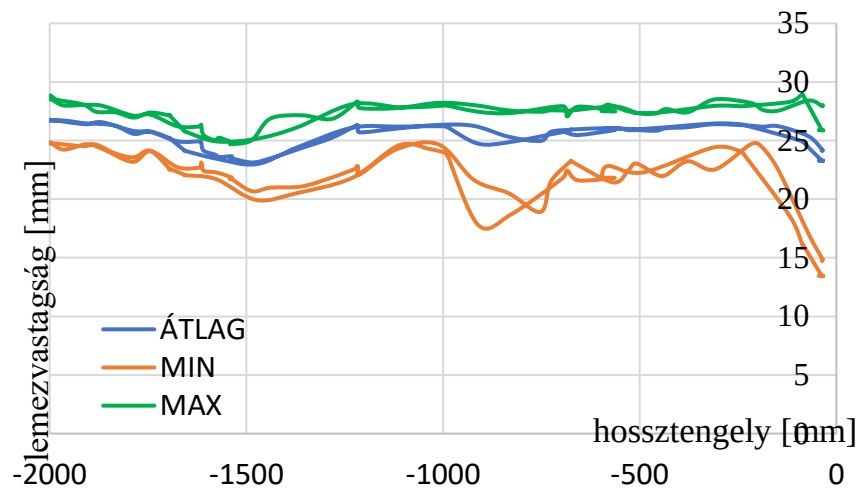
29. ábra: Mérési eredmények a budai befolyási oldal alsó láncköteg 2. számú lánclemezén [26].

A diagramon megfigyelhető, hogy a lánclemek lehorgonyzó fejbe való csatlakozásánál alakultak ki a legnagyobb szelvényfogyások. Ilyenfajta lemezfogyások a lehorgonyzófej közvetlen környezetében nagyjából az összes lánclemezen megjelentek, viszont ezek általában csak a szélső mérési vonalakat érintik. Ezenkívül látható még az is, hogy a legnagyobb lokális fogyást az 1-es és a 7-es vonalnál mérték ~850 mm-re a lehorgonyzófejtől. Továbbá azt is mutatja a diagram, hogy a teljes lánclemez esetében kialakult kb. 1500 mm-re a lehorgonyzófejtől egy kisebb kráter.

Ilyen diagram mind a négy lehorgonyzókamra mindkét lánckötegeire készült, így összesen 88 db diagram alapján dolgozták fel az adatokat a Tanszék munkatársai. Ezen diagramok alapján határozták meg a szelvényfogyások mértékét.

Ahogy ezt már a mérőműszer leírásánál említettem, a mérést az adott hosszon oda és vissza is elvégezték, így egy pontra két mért adat áll rendelkezésre. Megállapítható, hogy ezek az eredmények közel vannak egymáshoz, de pontosság miatt a két adat átlagértéke alapján határozták meg a lemezvastagságokat. Az egyes vonalakon mért lemezvastagságokból minden egyes

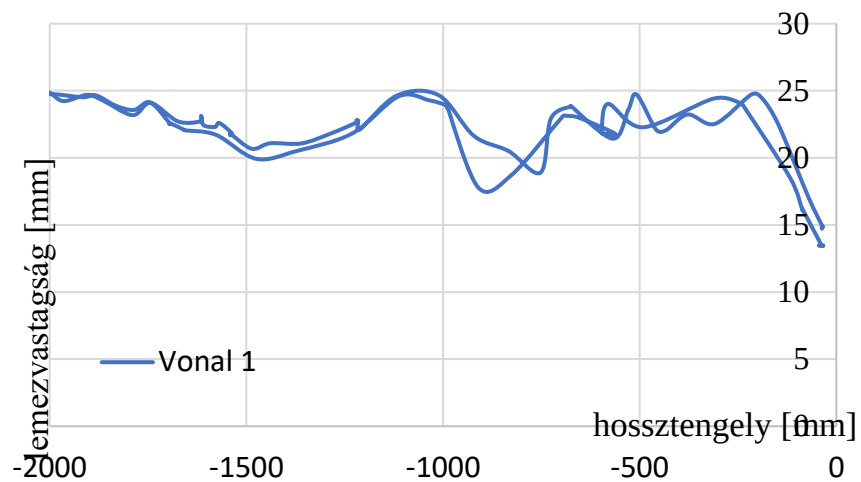
láncköteg minden egyes lánclemezére megadták a mért adatok minimum, maximum és átlag értékét. Ezek közül egyet mutat a 30. ábra. Ahhoz, hogy a kiértékelt adatok is összehasonlíthatóak lehessenek a korábbi (1986, 2002) mérések feldolgozott eredményeivel, az átlagérték számításánál az két szélső mérési vonalat 2-es, míg a belső vonalakat pedig 3-as súllyal vették számításba. A diagramon megfigyelhető, hogy a narancssárgával jelölt minimális érték nagyobb gödröket és szelvénycsökkenést mutat, mint a súlyozott átlagérték, mely a lánclemezek húzási ellenállásának meghatározásához szükséges. Ez az átlagértékek súlyozása miatt van így [26].



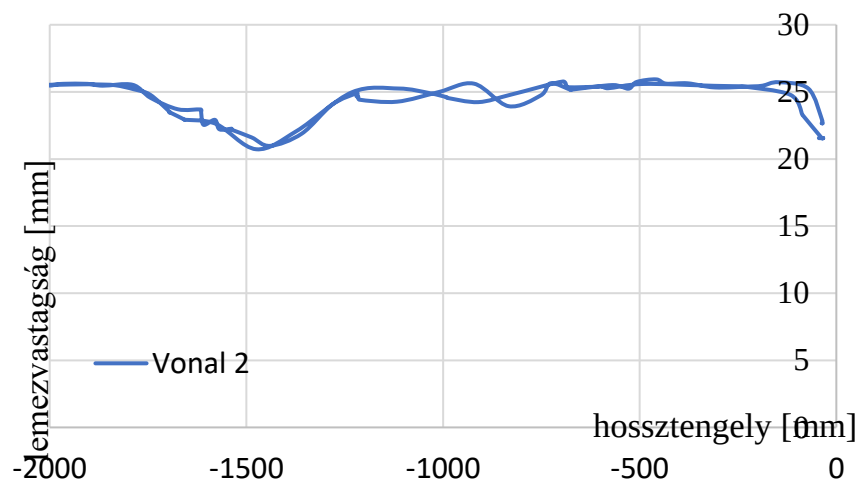
30. ábra: Budai befolyási oldal, alsó láncköteg, 2-es lánclemez [26].

6. Az adatok feldolgozásának folytatása

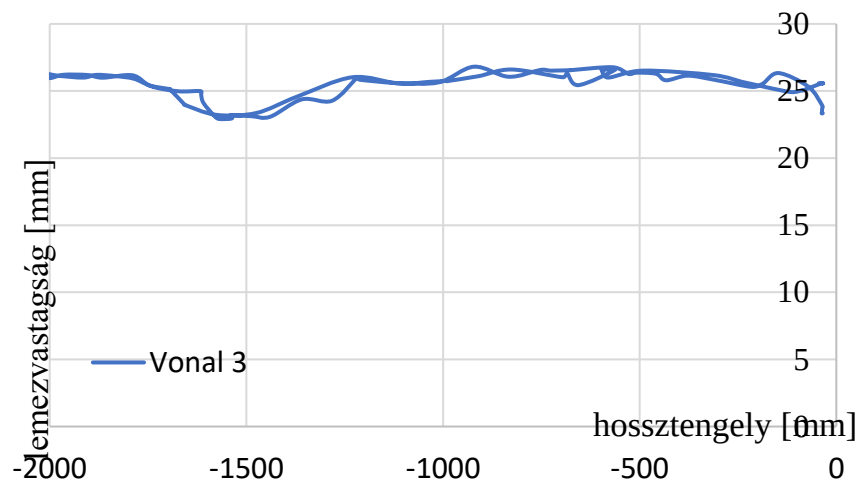
Ezeket követően kezdtem el foglalkozni a mért adatokkal. Elsőként elkészítettem minden egyes lánclemez minden vonalán mért adatok saját lemezvastagság – hossz diagramját. Így még lokálisabban tudtam az adatok kiértékelésnek nekikezdeni. Az összes diagram esetében ezt követően meghatároztam korróziós kráterek amplitúdóját és ezeknek a krátereknek a kiterjedést. A 31. ábra - 37. ábra mutatják be a budai befolyási oldal alsó láncköteg 2-es lánclemez 7 vonalán megjelenő valós lemezvastagságokat.



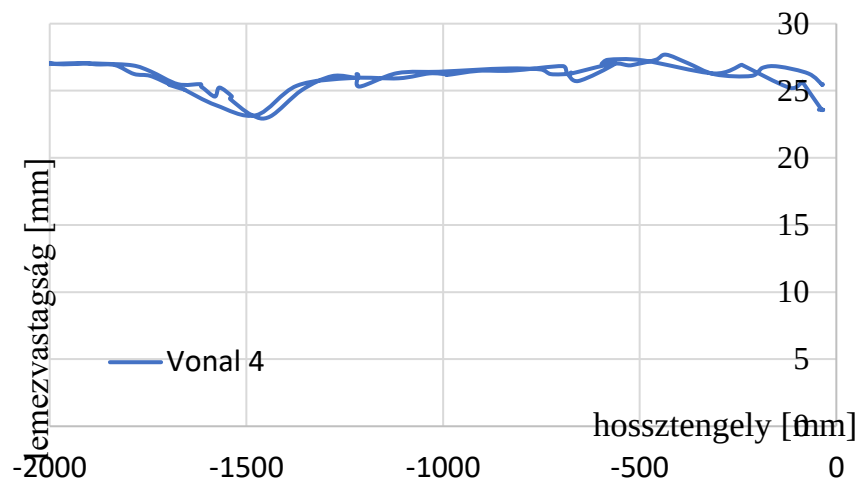
31. ábra: Budai befolyási oldal, alsó láncköteg, 2-es lánclemez, 1. vonal.



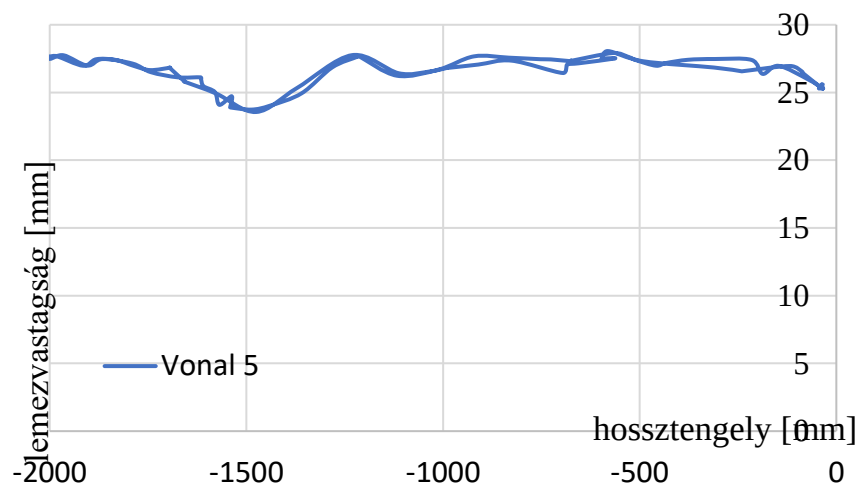
32. ábra: Budai befolyási oldal, alsó láncköteg, 2-es lánclemez, 2. vonal.



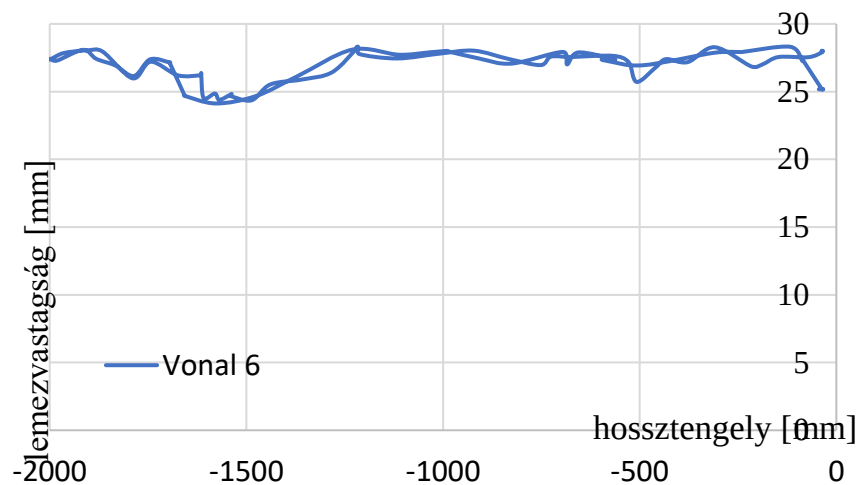
33. ábra: Budai befolyási oldal, alsó láncköteg, 2-es lánclemez, 3. vonal.



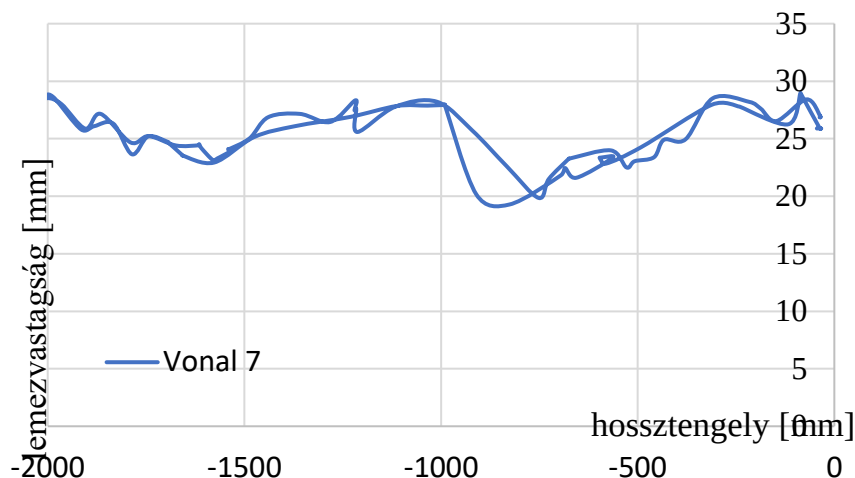
34. ábra: Budai befolyási oldal, alsó láncköteg, 2-es lánclemez, 4. vonal.



35. ábra: Budai befolyási oldal, alsó láncköteg, 2-es lánclemez, 5. vonal.



36. ábra: Budai befolyási oldal, alsó láncköteg, 2-es lánclemez, 6. vonal.



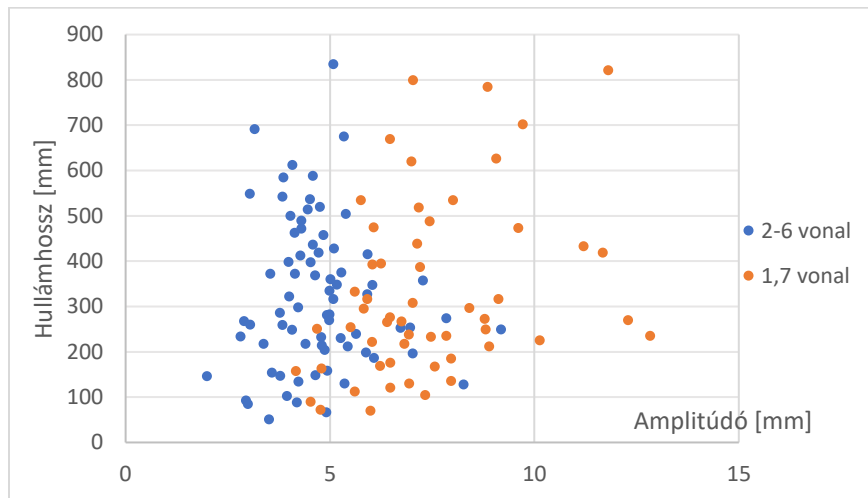
37. ábra: Budai befolyási oldal, alsó láncköteg, 2-es lánclemez, 7. vonal.

Ezen diagramok összesűritése volt látható a 29. ábra diagramján. Ahogy azt már a közös diagramnál is írtam, megfigyelhető az 1-es és a 7-es vonal esetében 850 mm-re a lehorgonyzófejtől egy-egy nagyobb szelvényfogyás. Ezenkívül 1500 mm környékén minden egyes vonalon látható egy nagyobb hullámhosszú kráter. A lehorgonyzófejtől kb. 1200 mm-es távolsáig húzódó szakaszt vizsgálva észrevehető még, hogy amíg az 1-es és a 7-es vonalon több kisebb korróziós gödröcske található, addig a 2-6-os vonalak esetében szinte semmilyen szelvényfogyás nem látszik. Ezekből arra lehet következtetni, hogy a lánctalagút ezeken a helyeken beázik, és cseppkő-szerűen csöpög le a víz az említett helyekre. A létrehozott diagramok elemzését minden egyes lánclemeznél elvégeztem, ezeknek az eredményeknek az összefoglalását szeretném a továbbiakban bemutatni.

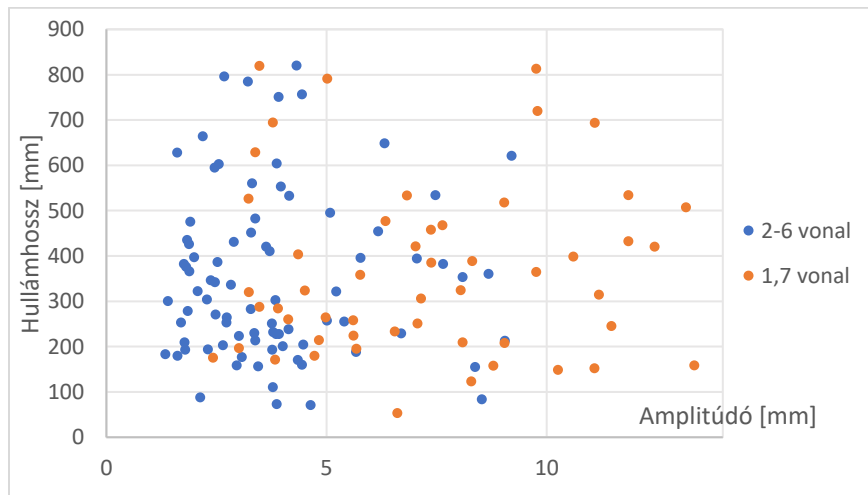
6.1 Budai befolyási oldal

Azért a budai befolyási oldallal kezdek, mert ezen az oldalon összeségében nagyobb a korrózió mértéke, mint a budai kifolyási oldalon és az egész pesti oldalon. A budai befolyási oldalnál nagyobb amplitúdójú kráterek találhatóak, az átlagos szelvényvastagság pedig 25,72 mm. Ezenkívül mind a felső, mind az alsó lánckötegről elmondható az, hogy szinte minden lánclemezüknél az 1-es, illetve a 7-es vonal korrodál a legjobban lokális szinten, ezt mutatja a 38-39. ábra, viszont átlagos szinten az 1-es vonalnál a legnagyobb a szelvényfogyás, amely monoton módon nő a 7-es vonal felé. A 7-es vonalról az is megállapítható, hogy ez a legegyenetlenebb vonal az összes közül, hiszen ez a mérési vonal a lánclemezek felső síkjánál található. A diagramok vízszintes tengelye a korróziós kráterek amplitúdóját, a függőleges tengely a hullámhosszt mutatja.

Látható, hogy a 2-6-os mérési vonalak mentén lényegesen kisebb a korróziós kráterek amplitúdója, mint az 1-es és a 7-es jelű mérési vonalak mentén.



38. ábra: Budai befolyás alsó lánckötegének hullámhosszai az amplitúdók függvényében



39. ábra: Budai befolyás felső lánckötegének hullámhosszai az amplitúdók függvényében

6.1.1 Budai befolyási oldal alsó és felső lánckötegének összehasonlítása

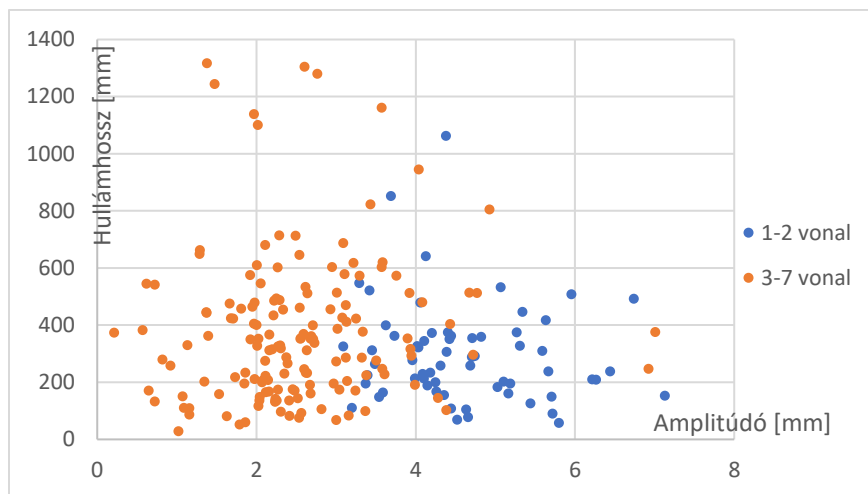
Általánosságban elmondható, hogy a legnagyobb lokális szelvényfogyások a lehorgonyzófej közvetlen környezetében figyelhetők meg. Ez ennél az oldalnál is igaz, viszont míg az alsó láncköteg esetén legfőképpen csak az 1-es vonal esetében igazolható ez az állítás, addig a felső lánckötegnél az 1-3-as vonalaknál látható a diagramokon a nagyobb csökkenés.

850 mm-re a lehorgonyzófejtől előfordulnak mind az alsó, mind a felső láncköteg esetében kráterek, melyek nagyobb kiterjedésűek, és a lehorgonyzófej környezetétől eltekintve, a

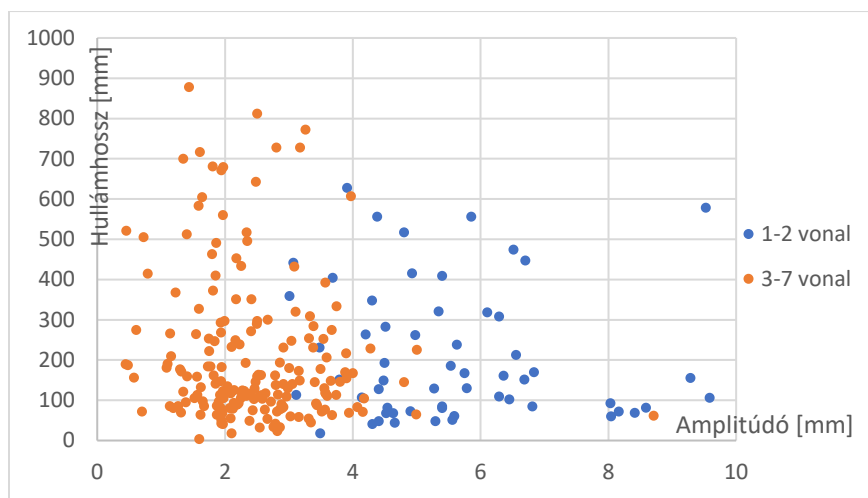
legmélyebb gödrök is. Az alsó lánckötegnél ezek az első 5 láncszem esetén láthatóak, és ezeknél is főleg az 1-es és a 7-es vonalnál. Ennek ellenére a felső láncoknál ez a jelenség mindegyik lánclemeznél megfigyelhető, a 10-es és a 11-es láncszem esetén az 1-es és a 7-es vonalaknál, viszont a többi láncszemnél inkább csak az 1-es vonalnál tűnnek fel ezek a szelvényfogyások. Az viszont mindkét lánckötegre igaz, hogy a 2-estől a 6-os vonalig sokkal egyenletesebbek a láncszemek oldalfelületei. Mindkét láncköteg esetében 1500 mm-re a lehorgonyzófejtől is észrevehetőek kráterek, viszont ezek nagyobb kiterjedésűek, mint amik 850 mm-re vannak. Az alsó láncköteg esetében ezek a gödrök az 1-estől a 6-os láncszemig szinte minden egyes vonalnál megállapíthatóak, viszont a 7-estől a 11-es láncszemig már csak inkább a 6-os, illetve a 7-es vonalnál. A felső lánckötegnél ugyanakkor ezek a nagy hullámhosszú szelvényfogyások csak a 4-es és az 5-ös lánclemezeknél figyelhetőek meg. Különbségnek mondható ezenfelül az is, hogy az alsó lánckötegnél a 2-es és a 3-as, ezzel szemben a felső lánckötegnél a 4-es és az 5-ös lánclemez korrodál a legjobban, mind átlagos, mind lokális szinten.

6.2 Budai kifolyási oldal

A korrózió mértéke kisebb a kifolyási oldalon a budai lánckamráknál, mint a befolyási oldalon. A kifolyási oldalon több kráter található, viszont ezek átlagosan kisebb amplitúdójúak, mint a befolyási oldalon. Ezt támasztja alá, hogy ezen az oldalon több, mint 1 mm-tel (26,85 mm) kisebb az átlagos szelvényfogyás. Az megegyezik a befolyási oldallal, hogy a korrodáltság az 1-es vonaltól a 7-es vonal felé monoton csökken, viszont ennél az oldalnál az 1-es és a 2-es vonalon lehet találni nagyobb korróziós krátereket. Ami szintén hasonlóság, hogy itt is a 7-es vonalak a legegyenletlenebbek. Ezek összefoglalását mutatja a 40-41. ábra.



40. ábra: Budai kifolyás alsó láncköteg ének hullámhosszai az amplitúdók függvényében.



41. ábra: Budai kifolyás felső láncköteg ének hullámhosszai az amplitúdók függvényében.

6.2.1 Budai kifolyási oldal alsó és felső lánckötegének összehasonlítása

A legnagyobb különbség a két láncköteg között az, hogy a Hidak és Szerkezetek Tanszék munkatársai az alsó láncköteg esetében kb. 20 cm-re a lehorgonyzófejtől tudták elkezdni a mérést, mivel a mérőműszer nem tudott benyúlni a lehorgonyzó szelvényig.

A másik nagy differencia, hogy a felső láncköteg láncclemezeinek felülete – egy-két kivételtől eltekintve – sokkal egyenletesebb, sokkal kevesebb kráter képződött, szemben az alsó láncokkal, melyeknél többféle változás figyelhető meg a szelvényfogyás tekintetében.

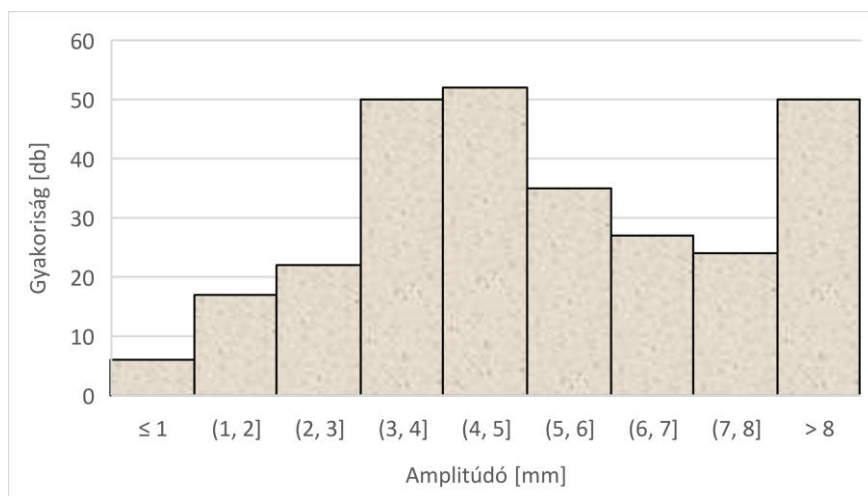
Két láncköteg között hasonlóságot is lehet találni: 1300-1500 mm-re a lehorgonyzófejtől mind az alsó, mind a felső láncok között észrevehető egy emelkedés a grafikonokon. Ez a jelenség az alsó

lánckötegnél látványosabb, minden láncszemnél megjelenik, az 1-es és a 7-es vonalakat kivéve szinte minden mérési vonalon találkozni velük. Ezt az okozhatja, hogy a beszivárgó víz ezen helyek alatt és felett érheti el a lánclemez felületét. Ezt támasztja alá, hogy a lehetséges víz érte helyeken kráterek képződését is meg lehet figyelni. Szintén egyezés, hogy a legkorrodáltabb láncszemek közé mindkét lánckötegből a 4-es és a 11-es lánclemez is beletartozik. Az alsó láncköteget tekintve kb. 500 mm-re és 1250 mm-re a lehorgonyzófejtől lehet találni két olyan helyet, melyeknél szinte az összes lánclemezen megfigyelhető valamiféle korróziós fogyás. A lehorgonyzófejhez közelebbi részen egy-két láncszemtől eltekintve, általában az 1-es és a 7-es vonalakon láthatóak a kráterek, viszont a távolabbi résznél a belső vonalak is jobban szerepet játszanak. 8-astól a 11-es lánclemezig minden vonalon szemrevételezhető a fogyás, míg a 1-estől a 7-es láncszemekig a 7-es vonal kivételével szinte mindenhol.

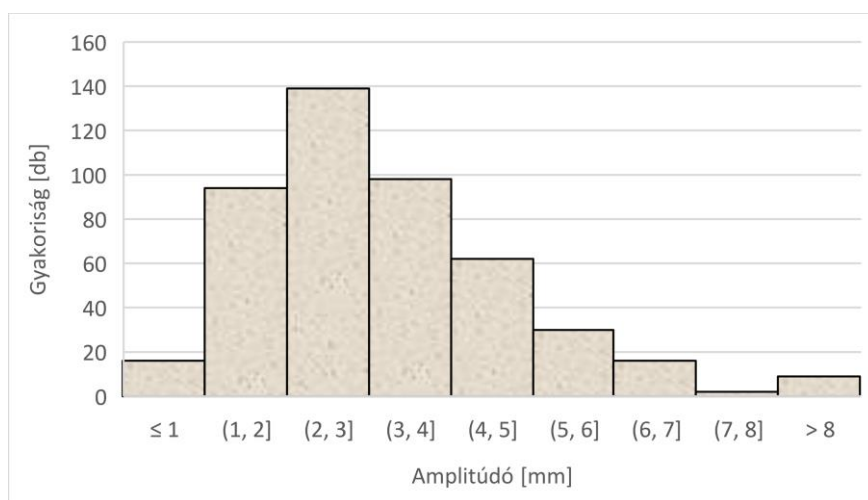
Ezzel szemben a belső vonalak az felső láncokon sokkal egyenletesebbek. A külső vonalakról az mondható el, hogy a 7-es vonalakon szinte minden lánclemezen több kisebb kráter található, ennek ellenére az 1-es vonalakon csak egy-két lánclemezen figyelhető meg egy-egy kráter. Ezeken a helyeken feltehetőleg a lánckamra beázásának következtében közvetlen vízfolyás érhet a lánckötegeket.

6.3 Budai oldal összefoglalás

Az eredmények kiértékelése alapján a legfőbb észrevételem, hogy a korrózió mértéke a befolyási oldali láncokon jóval nagyobb, mint a kifolyási oldaliakon, melyet jól szemléltetnek az 42-43. ábrák diagramjai. A diagramok vízszintes tengelyén a krátermélység [mm], a függőleges tengelyen az adott krátermélységhez tartozó gyakoriság (darabszám) látható.

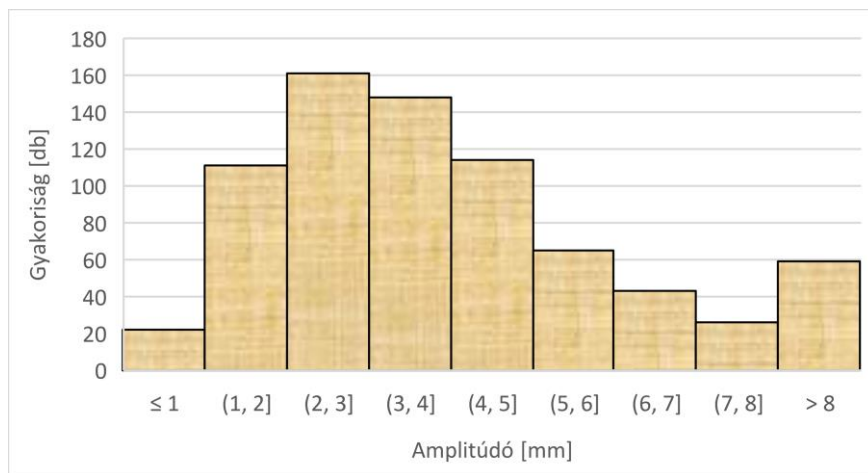


42. ábra: Budai befolyás oldal krátermélységeinek szórása.



43. ábra: Budai kifolyás oldal krátermélységeinek szórása.

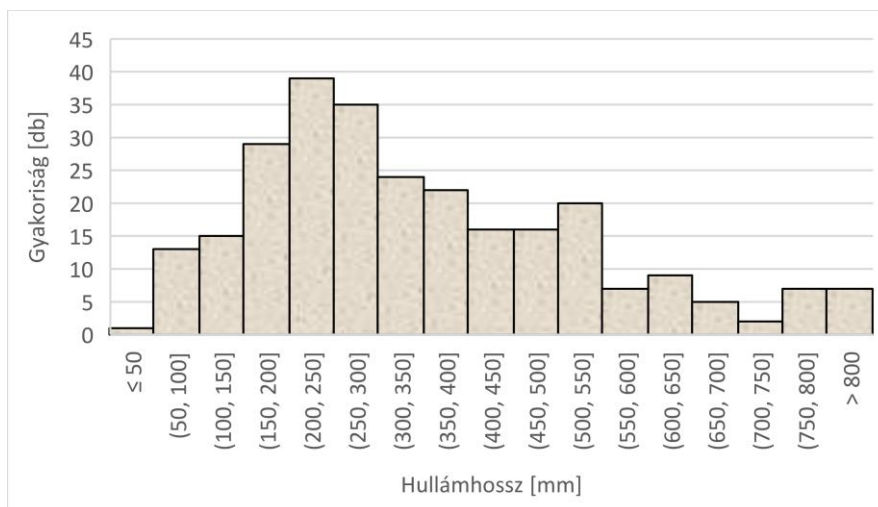
Jól látszik, hogy befolyási oldalon lényegesen kevesebb kráter van, viszont azok nagyobbak, mint a kifolyási oldalon. Összegezve az alábbi ábra mutatja a korrodált felület statisztikai kiértékelését a krátermélység szempontjából.



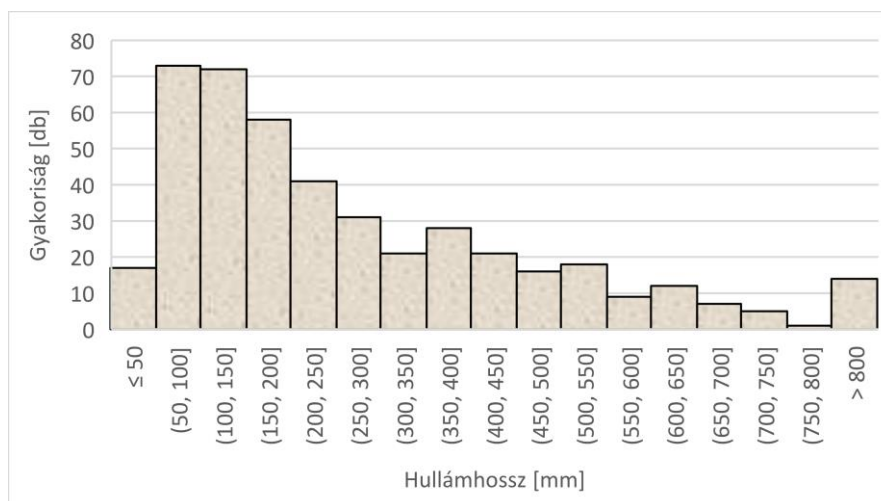
44. ábra: Budai oldal krátermélységeinek szórása.

Másik nagy különbség, hogy amíg a befolyási oldalon a lánclemezek 1-es és 7-es vonala korrodált jobban, addig a kifolyási oldalon az 1-es és a 2-es vonala a láncszemeknek. A különbség abból adódhat, hogy a kifolyási oldalon több víz juthat le a lánclemezek alsó síkjáig, ezért korrodál jobban az 1-es és a 2-es vonal.

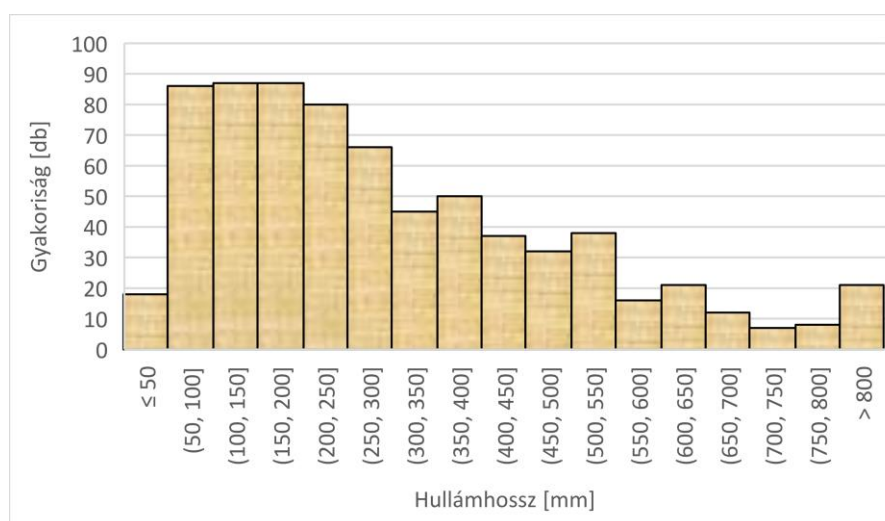
A kráterek kiterjedése is eltér egymástól, ha a befolyási és a kifolyási oldalt vizsgáljuk. A befolyási oldal nagyobb kráteramplitúdói nagyobb kráterkiterjedéssel is járnak. Ebből az állapítható meg, hogy a befolyási oldalon több víz folyhatott be a láncokhoz. A 45-46. ábrákon ezeket lehet látni, majd egy összefoglaló ábra mutatja be a teljes adatbázist a 47. ábrán.



45. ábra: Budai befolyás oldal kráterkiterjedéseinek szórása.



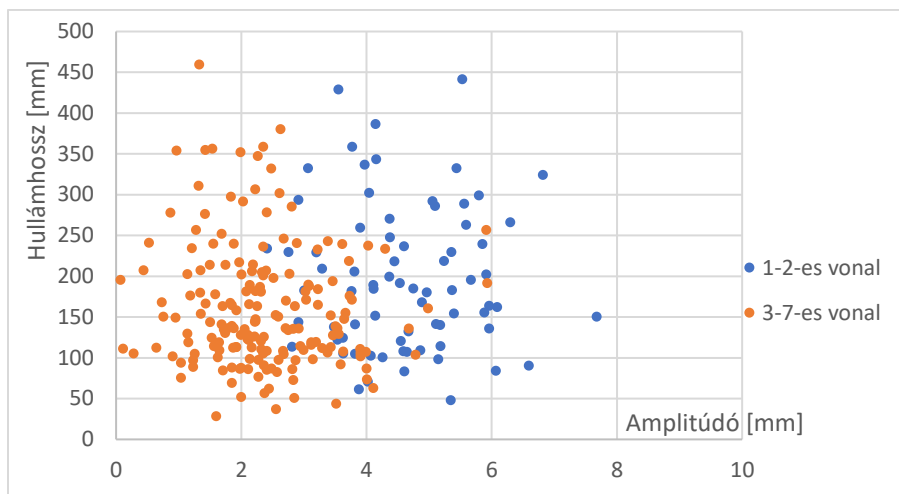
46. ábra: Budai kifolyás oldal kráterkiterjedéseinek szórása.



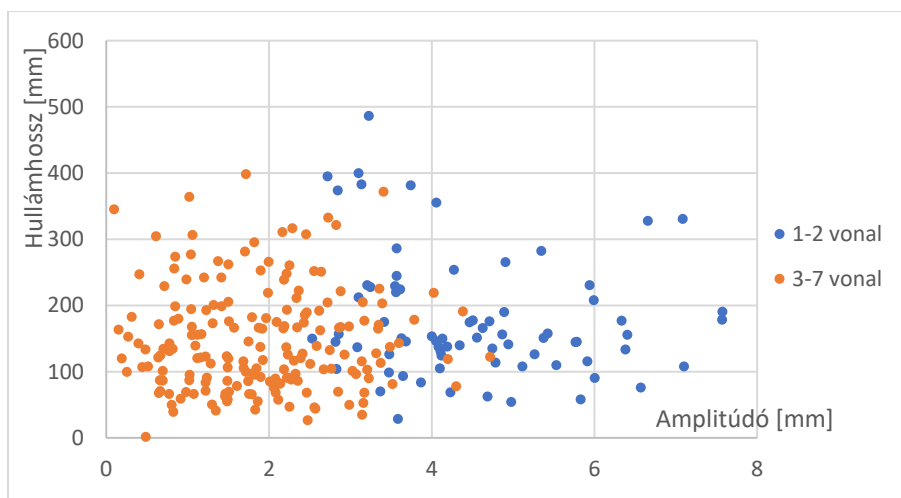
47. ábra: Budai oldal kráterkiterjedéseinek szórása.

6.4 Pesti befolyási oldal

A korrózió mértéke a pesti befolyási oldalon nagyjából ugyanakkora, mint a budai kifolyási oldalon, viszont kisebb, mint a budai befolyási oldalon. A szelvényfogyás átlagos értéke a kettő közé tehető, de a kifolyási oldalhoz közelebb, értéke: 26,71 mm. A korrózió átlagos mértékéről az mondható el, hogy minden láncszem esetében az 1-es vonal a legkorrodáltabb, utána a 7-es vonal irányába pedig monoton csökken. Lokálisabban nézve az 1-es, illetve a 7-es vonalokon lehet találni nagyobb mélységű krátereket. Ezeket az állításokat összefoglaló pontdiagrammok láthatóak az 48-49. ábrákon.



48. ábra: Pesti befolyási oldal alsó lánckötegének hullámhosszai az amplitúdók függvényében.



49. ábra: Pesti befolyási oldal felső lánckötegének hullámhosszai az amplitúdók függvényében.

6.4.1 Pesti befolyási oldal alsó és felső lánckötegének összehasonlítása

A legtöbb észrevétel a két láncköteg esetében azonos. Az első ilyen a korrózió mértéke a lehorgonyzófej környékén. Mind az alsó, mind a felső láncoknál megfigyelhető egy nagyobb szelvényfogyás az összes láncszem 1-es és 2-es vonalán. Az alsó lánckötegnél a 8-astól a 11-es lánclemezig inkább már csak az 1-es vonalon látható ez a jelenség, viszont a felső láncok esetében több láncszemnél a 3-as vonalnál is szemrevételezhető a fogyás mértéke. A lánclemezek nyakrészeinél könnyebben meg tud állni a víz, ez okozhatja a nagyobb korróziót ezeken a helyeken. Ami még a hasonlóságokhoz tartozik, hogy mindkét lánckötegnél 850 mm-re a lehorgonyzófejtől megfigyelhető egy-egy nagyobb kráter. Ezek az alsó és a felső láncok mindegyikén észrevehetőek, általában az 1-es és/vagy a 7-es vonalon, viszont néhol a 6-os vonalon is látszanak.

1500 mm-re a lehorgonyzófejtől is felfedezhető néhány nagyobb kráter. Ezek sokkal inkább az alsó lánckötegre jellemzőek, ott is a 2-es és a 6-os láncszem 1-es és 7-es vonalán. Ezzel szemben csak a 3-as felső lánclemezen esetén találhatóak meg ezek a gödrök, viszont ott az összes vonalon megfigyelhetők.

Érdekességnek mondható még az is, hogy az alsó láncok esetében az 1-es és a 7-es vonalak a legegyenetlenebbek, rajtuk szinte végig több, kisebb kráter található, mint a belső vonalokon. A 2-6-os vonalak 800-1000 mm-re a lehorgonyzófejtől a mérési szakasz végéig egyenletesebb felületűek az összes láncszem esetében, viszont a lehorgonyzó szelvény és az előbb megadott távolság között rajtuk is több, kisebb gödröcske észrevehető. Egy-két esetben a 2-es vonalon is végig megfigyelhető több kráter, ez jelenti az átmenetet az első és a többi vonal között.

A felső láncokat vizsgálva, azt láthatjuk, hogy a 2-estől a 8-as láncszemig ugyanez mondható el róluk, viszont a 9., 10. és a 11. lánclemezek minden vonala 1000 mm felett egyenletesnek mondható.

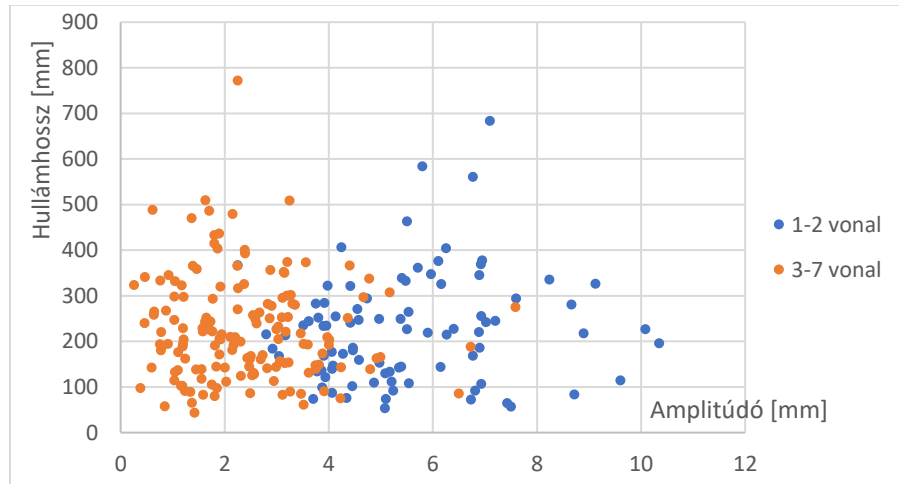
Ami különbségnek tekinthető még, hogy az alsó közül a 2-es és az 5-ös, míg a felső láncok közül pedig a 3-as és a 8-as korrodált a legjobban.

Összefoglalva a befolyási oldalt, az mondható el, hogy az 1-es vonalon a legnagyobb átlagos korrózió, mely a 7-es felé csökken, viszont lokálisan a 7-esen is megfigyelhetők nagyobb mélységű kráterek. Ez a két vonal a legegyenetlenebb, míg a többi vonal sokkal egyenletesebb. Emellett a nagyobb szelvényfogyás a lehorgonyzófejhez közeli résznél és ettől a szelvénytől 850 mm-re vehető észre. Ezek szintén arra utalnak, hogy a lánclemezek alsó és felső síkjánál tud a víz jobban megállni, illetve a víz lokálisabb bejutása is megfigyelhető (850 mm-re a lehorgonyzófejtől).

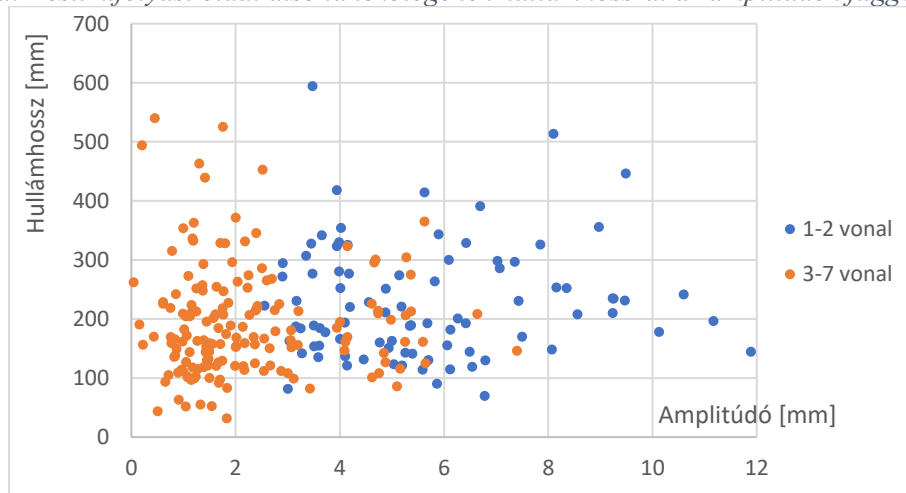
6.5 Pesti kifolyási oldal

A pesti kifolyási oldalon a korrózió mértéke nagyjából megegyezik a pesti befolyás átlagos értékével, a kifolyás oldalnál a szelvényfogyás átlagos értéke számszerűen: 26,76 mm. Az egyes mérési vonalakra ez ugyanazt jelenti, mint a korábbiakban: az első vonal esetében a legnagyobb a korrodáltság, utána pedig egyre csökken átlagosan a korrózió mértéke. Az alsó láncoknál főleg a 7-es vonalnál találhatók nagyobb lokális kráterek, viszont a felső láncok esetében több olyan láncszem is van, ahol minden vonalon megfigyelhetők ilyen nagyobb szelvényfogyások. Emellett

a lehorgonyzófejnél lévő nagyobb korrózió is látható mindkét láncköteg esetében minden láncszemnél főleg az 1-es, de több esetben a 2-es vonalnál is. A szokásos pontdiagrammok szemléltetik a kiértékelés eredményét, melyeket az 50-51. ábrákon mutatok be.



50. ábra: Pesti kifolyási oldal alsó lánckötegének hullámhosszai az amplitúdók függvényében.



51. ábra: Pesti kifolyási oldal felső lánckötegének hullámhosszai az amplitúdók függvényében.

6.5.1 Pesti befolyási oldal alsó és felső lánckötegének összehasonlítása

Mind a két láncköteget tekintve elmondható, hogy az 1-7-es lánclemezeket nézve nagyobb a korrózió a lehorgonyzófejtől mért 1000 mm-ig, mint a második mért részen. Ez a jelenség a 8-11-es láncszemeknél annyira nem szembetűnő. A lehorgonyzó szelvénytől kb. 800 mm-ig a legtöbb belső vonal minimálisan, nem nagy mértékben, de emelkedik, és 800 mm környékén csúcsosodik ki. Itt van a legtöbb vonal esetében egy globális maximum. Ez az többi oldalhoz képest egy nagy különbség, ott általában a korrózió mértéke egyenletes volt. Egy-két kivételtől eltekintve a

lehorgonyzófejtől 700-900 mm-re mindkét láncköteg esetében megfigyelhető – főleg az 1-es és a 7-es vonalaknál – egy-egy valahol kisebb, valahol nagyobb mélységű gödör. Több láncszemnél másik vonalokon is, pár lánclemez esetében pedig az egész felületen láthatóak ezek a fogyások. Ezek a lokális kráterek egy-két esetben inkább 500-600 mm-re a lehorgonyzó szelvénytől fedezhetők fel.

A felső láncok közül a 6-os, 7-es, 8-as és a 11-es számúnál 1200 mm-re is találhatóak nagyobb szelvényfogyások az összes mérési vonalon.

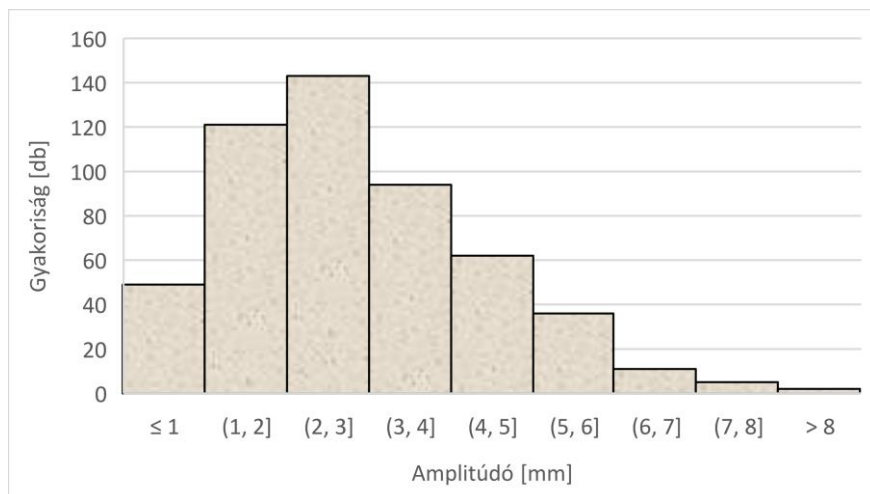
1500 mm környékén van még egy ilyen lokálisabb, jobban korrodált hely, amely az alsó láncokat figyelembe véve a 5-östől a 11-esig, míg a felső láncok közül pedig a 6-ostól a 9-esig található. Egyes láncszemknél az összes vonalon megfigyelhetők, máshol általában csak a 7-es vonalon. Vannak olyan lánclemezek melyeken nagyobb mélységű, máshol nagyobb kiterjedésűek inkább.

Az alsó láncok közül a 7-es és a 11-es, míg a felsők közül a szintén a 7-es és a 8-as korrodált a legjobban. Érdekesség, hogy a két minimum láncszem átlagfogyása között (alsó 11, felső 7) 1 mm eltérés van.

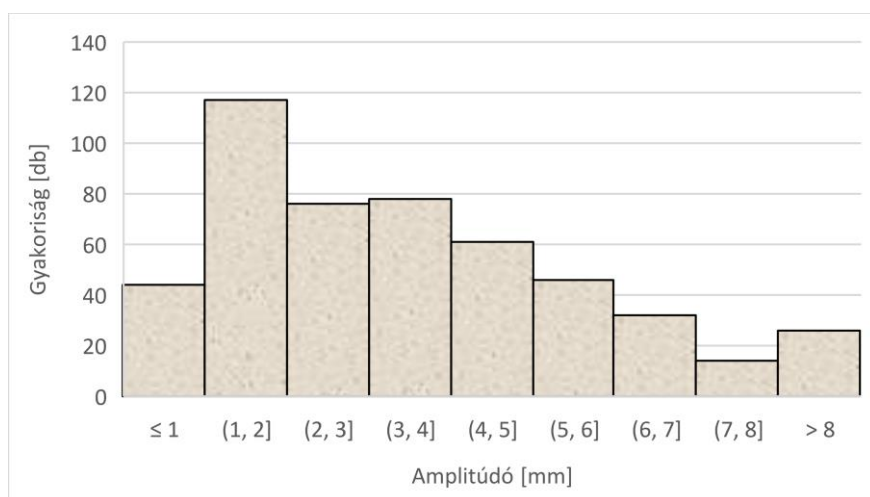
A kifolyási oldalt összefoglalva azt lehet mondani, hogy az alsó láncszemek úgy korrodáltak, mint az ezelőtt vizsgált lánckötegek legtöbbje: 1-es vonal legjobban korrodált, 7-esen több nagyobb lokális kráter; belső vonalak pedig egyenletesebbek 1000 mm felett. A felső lánckötegnél ez nem annyira egyértelmű: 1, 5, 10 láncszem korróziója hasonló az előbbiekhöz, viszont a 6-ostól a 9-esig, illetve a 11-es láncszemnél nem különülnek el ennyire a belső vonalak a külsőktől. Több nagyobb kráter is található ezen lánclemezek belső vonalain. Ezt az okozhatja, hogy a felső láncköteget több víz érheti, melyekből kialakuló korrózió a belső vonalakon is megfigyelhető.

6.6 Pesti oldal összefoglalása

A két oldali lánckötegek átlagosan szinte ugyanúgy korrodáltak, hiszen mindössze 0,05 mm az eltérés átlagos szelvényfogyásuknál, viszont mindkét esetben a kifolyási oldali láncok rozsdásodnak jobban, hiszen ott nagyobbak a krátermélységek. A pesti oldalon a kráterek mélységéről az mondható el, hogy a befolyási oldalon sokkal jobban hasonlít az eloszlásuk egy haranggörbéhez, a kifolyás amplitúdók inkább egyenletesebbek. Ezeket demonstrálja az 52-53. ábra.

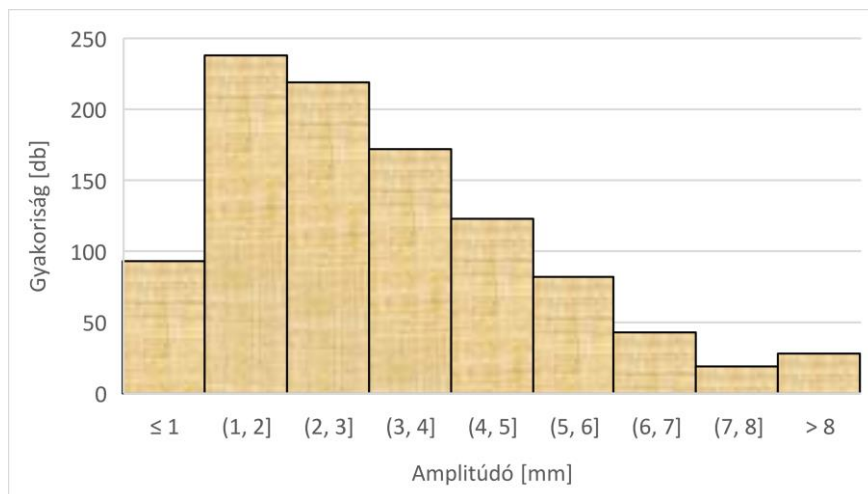


52. ábra: Pesti befolyás oldal krátermélységeinek szórása.



53. ábra: Pesti kifolyás oldal krátermélységeinek szórása.

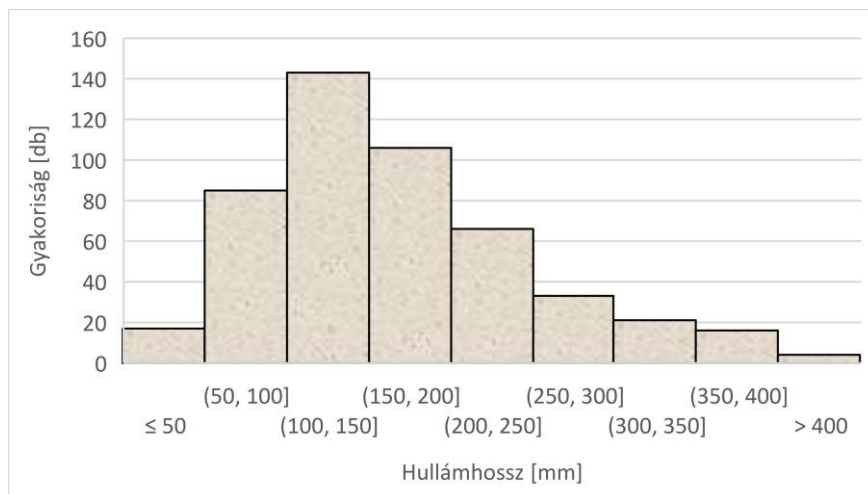
A teljes adatbázis kiértékelését pedig az 54. ábra mutatja be.



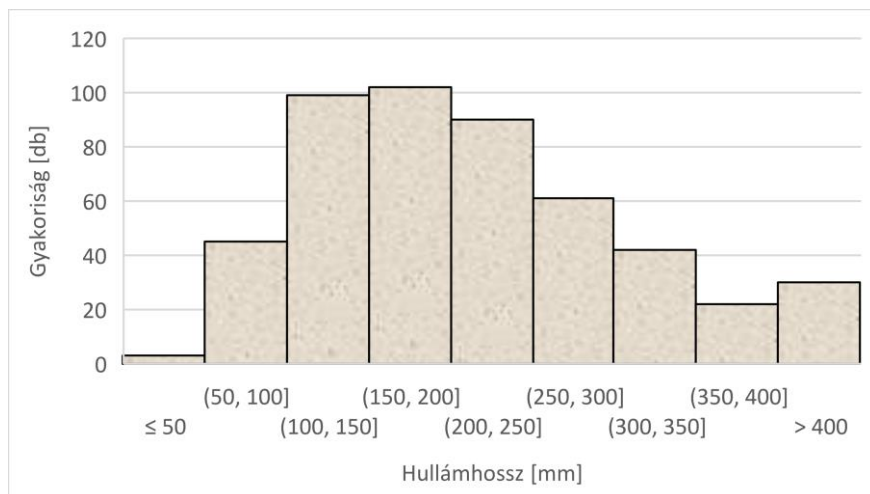
54. ábra: Pesti oldal krátermélységeinek szórása.

Összeségében mindkét láncköteg lánclemezeinek az 1-es vonala korrodál a legjobban átlagos szinten, de a 7-es vonalon is lehet találni egy-két nagyobb szelvényfogyást. Ezen oldalon az alsó lánckötegnél igaz az, hogy a külső vonalak eltérnek egyenletesség szempontjából a belső vonalaktól, viszont a felső láncok esetében – főleg a kifolyási oldalon – nem látszik annyira ez a különbség.

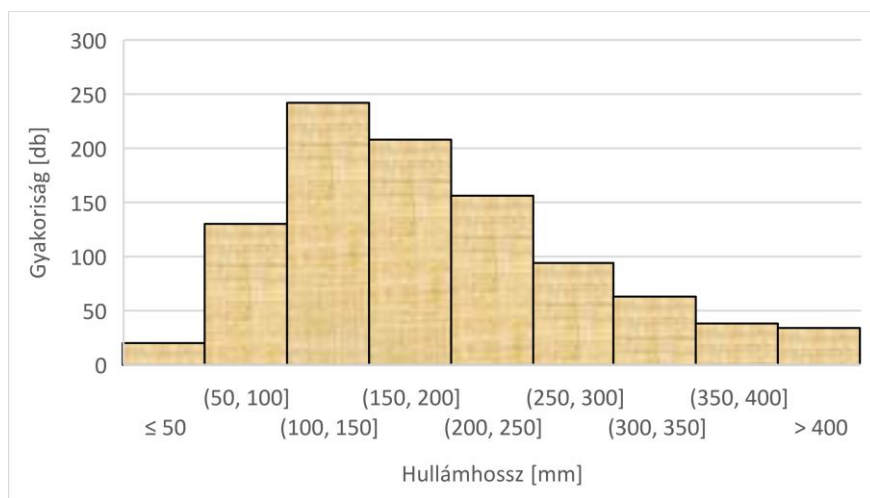
A kráterek hullámhosszát nézve ugyanaz látszik, mint az amplitúdók esetében: a befolyási kráterszélességek haranggörbével közelíthetők inkább, addig a kifolyásiak pedig egyenletesebben oszlanak meg. Ezt mutatják be az 55-56. ábrák, az 57. ábra pedig összegzi azokat.



55. ábra: Pesti befolyás oldal kráterkiterjedéseinek szórása.



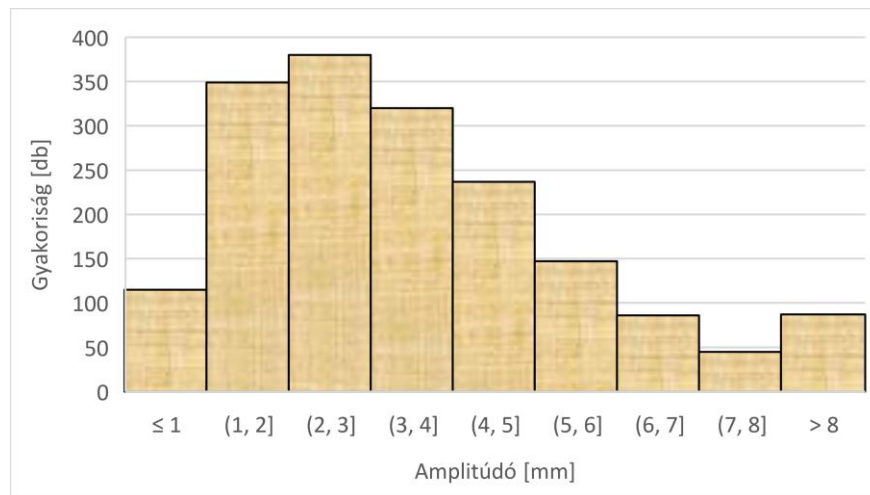
56. ábra: Pesti kifolyás oldal kráterkiterjedéseinek szórása.



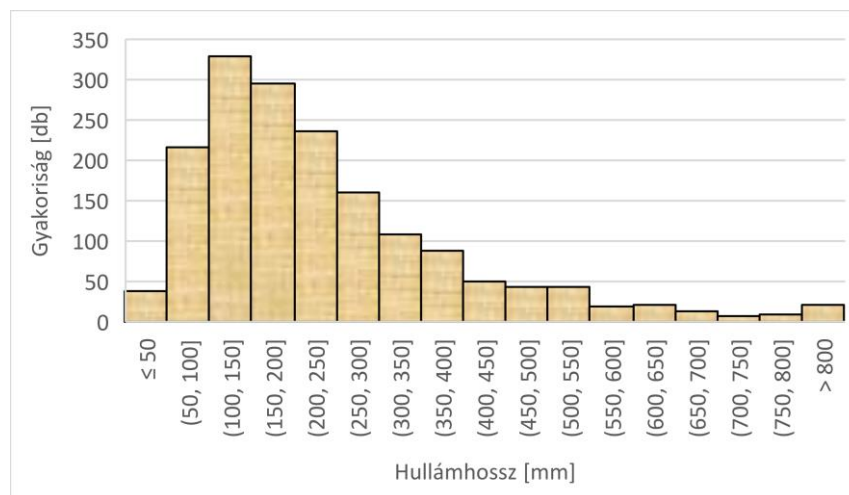
57. ábra: Pesti oldal kráterkiterjedéseinek szórása.

7. Teljes adatbázis kiértékelése

A Lánchíd összes lánclemezének krátermélységeinek statisztikai kiértékelését a 58-59. ábrák mutatják be. Látható, hogy mind a krátermélység, mind a kráterkiterjedés jól közelíthető sűrűségfüggvényt mutat, melyet matematikai statisztikai alapokon lehet leírni; erre tettem javaslatot a TDK dolgozat keretében.



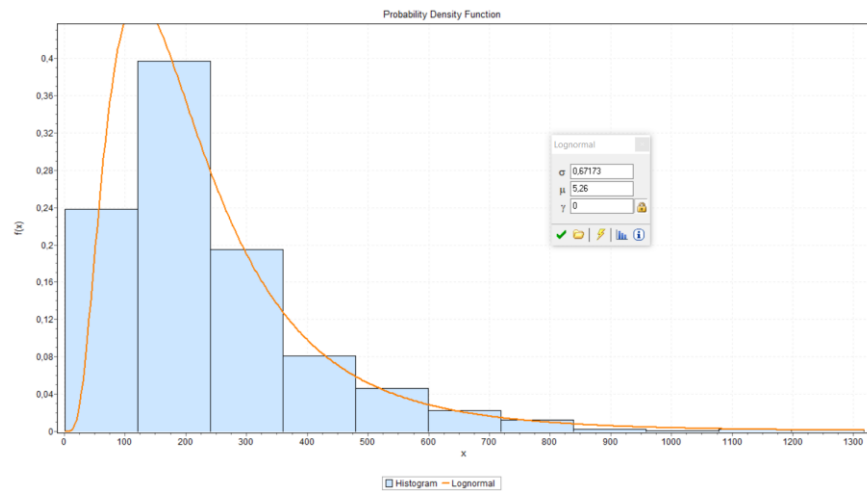
58. ábra: Az összes lánclemez krátermélységeinek szórása



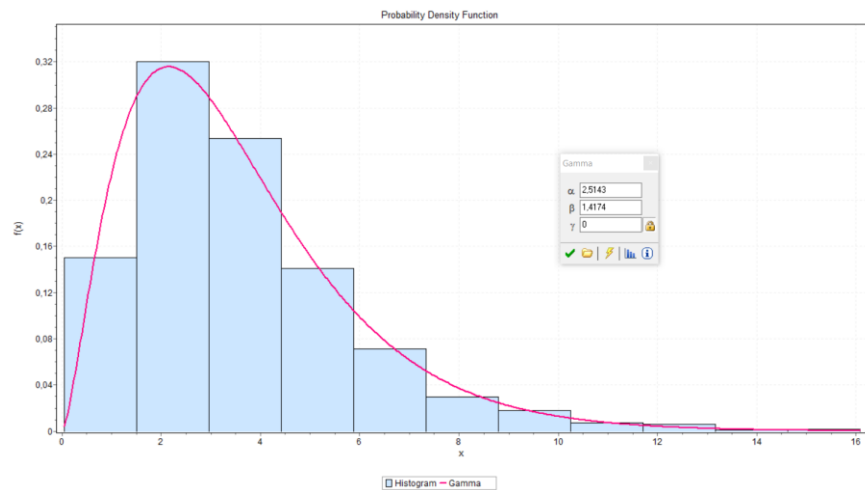
59. ábra: Az összes lánclemez kráterkiterjedésének szórása

Ehhez először az Easyfit program segítségével egy-egy eloszlásfüggvényt illesztettem mind a teljes lánclemez hullámhosszait, mind az amplitúdóit összefoglaló diagramokra. A hullámhosszoknál Lognormal görbével, míg az amplitúdóknál Gamma görbével közelítettem az eredményeket, mivel

ezen eloszlásfüggvényeknek volt a legjobb a Kolmogorov-Szmirnov tesztje. A teljes adatbázisra illesztett eloszlásfüggvényt mutatják be a 60-61. ábrák.



60. ábra: A teljes láncszerkezet kráterkiterjedéseinek közelítő diagramja.



61. ábra: A teljes láncszerkezet krátermélységeinek közelítő diagramja.

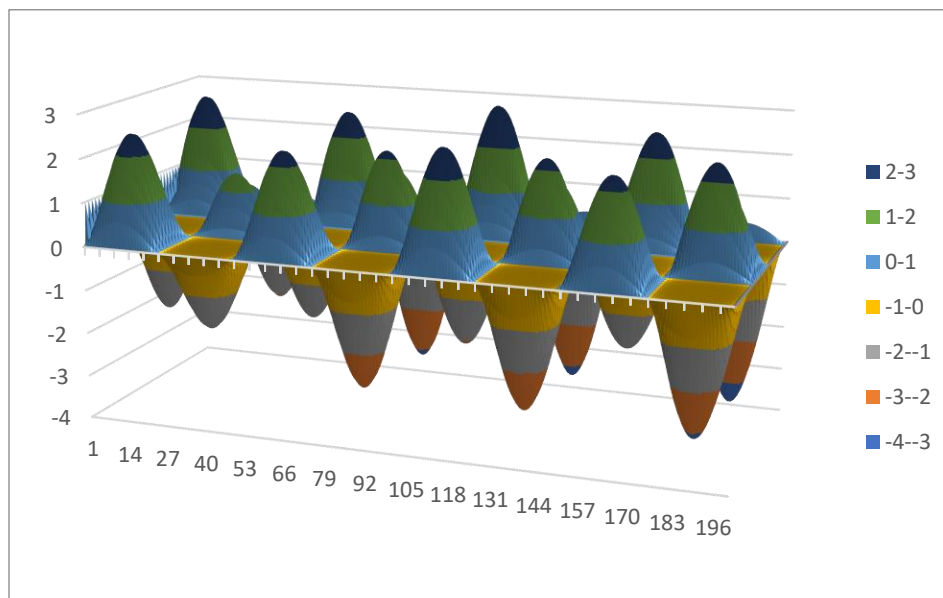
Ezekről leolvasva, az eloszlásfüggvények csúcsának maximumai kráterkiterjedés esetén 125 mm-nél, míg amplitúdó esetén 2,15 mm-nél vannak.

Ezt követően Matlab programmal, a függvények paramétereivel és a latin hiperkocka módszerrel meghatároztam 8 db kráterkiterjedéshez, és 3 db amplitúdóhoz tartozó szorzótényezőt, melyek a korróziós felület statisztikai alapú felírásához szükségesek. Ezután a mért felület felére – 380 mm x 1000 mm-es részre a lehorgonyzófejtől – állítottam elő Excel és az alább látható képlet segítségével egy 200x38-as mátrixot. Így látható, hogy x irányban, a lánclemez hossza mentén 5

mm-enként, y irányban, a lánclemez magassága mentén pedig 10 mm-enként vettem fel egy-egy pontot. A korrodált felületet leíró függvényt a következő formában írtam fel:

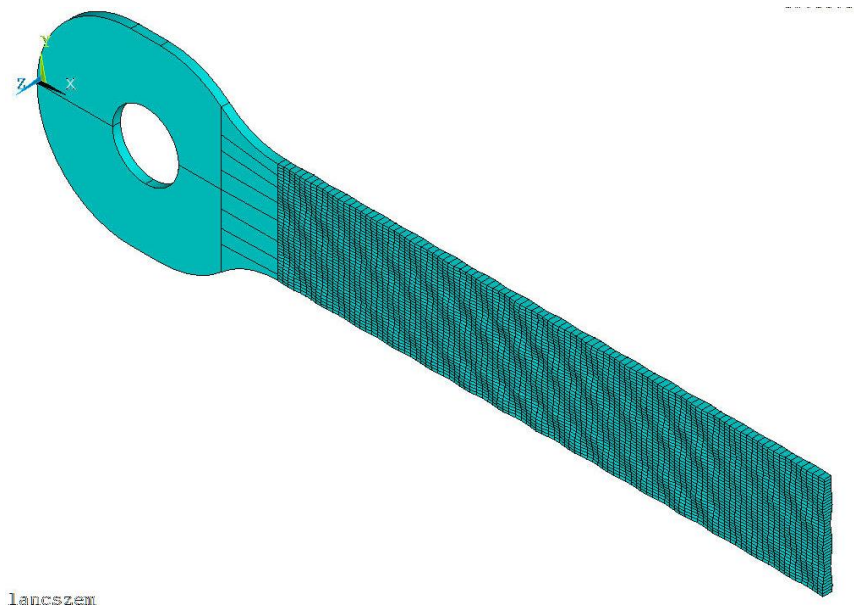
$$amp_{\text{átl}} * \left[\sin\left(\frac{\pi * x}{hullámh_{\text{átl}}}\right) * \sin\left(\frac{\pi * y}{hullámh_{\text{átlag}}}\right) \right] * hullámh_{\text{szorzó}} * apl_{\text{szorzó}}$$

Ezáltal összeállt egy, a 62. ábrán a jobb áttekinthetőség érdekében felskálázva bemutatott felületkép.



62. ábra: Excelben létrehozott korrodált felület.

Ezt a felületet Ansys programba beillesztve és a korrodált felületet egy testelemes numerikus modellre konvertálva a 63. ábrán látható numerikus modellt kaptam.



63. ábra: Korrodált lánclemez numerikus modellje a statisztikai alapon felvett korróziós paraméterek (krátermélység és kiterjedés) alapján.

Ezzel azt szerettem volna bemutatni, hogy a mérések statisztikai kiértékelése alapján általam kidolgozott korróziós modell alkalmazható numerikus számítások során a numerikus modellbe való valószínűségelméleti módon való beépítés révén. Ez a modellezési technika bizonyos esetekben kiválthatja a költséges lézerszkennelést, és lehetővé teszi a korrodált elemek fejlett numerikus modell alapú teherbírásvizsgálatát.

8. Összefoglalás

A TDK dolgozatom első részében áttekintettem a Széchenyi lánchíd történetét, megismertem a felújításainak részleteit, illetve a láncok korrózió elleni védekezéséről is képet kaptam. Ezt követően utánanéztem a korrózióknak, mint általános jelenségnek. Tanulmányoztam a korrózió fajtáit és az ellene való védekezési módokat. Ezután bemutattam néhány nemzetközi szakirodalomból vett korróziós modellt, majd ismertettem a BME Hidak és Szerkezetek Tanszék által a lehorgonyzó lánclemezekon végzett mérések folyamatát, illetve ezen eredményeknek a kiértékelését. A TDK tevékenységem során végrehajtott önálló kutatómunkámat és annak eredményeit a lánclemezek korróziója kapcsán az alábbiakban foglalom össze.

Megismertem a láncszemekon végrehajtott mérések módszertanát, lehetőségem volt személyesen is résztvenni a méréseken. Alaposan áttekintettem valamennyi lánclemez mérési adatait. A mérési vonalakra állított vonaldiagramok segítségével megismertem a láncszemek korrodáltságának mértékét és jellemző helyeit. Összeségében az mondható el a lánclemezek korróziójáról, hogy a legtöbb esetben mutatnak olyan tendenciákat is, melyekből következtetéseket lehet levonni a láncalagút kialakításáról, illetve a beszivárgó víz útjáról egyaránt. A kutatómunkám eredményeit a következő pontokban összegzem:

- A mért nagy mennyiségű adatot részletesen áttekintettem, és értékeltem.
- Ezek alapján következtetéseket vontam le az általam készített krátermélység – kráterkiterjedés diagramok alapján a tapasztalt tendenciákra.
- A kiértékelt adatokat feldolgoztam és a korrózió eloszlására statisztikai függvényeket javasoltam.
- A statisztikai modell kiterjesztésével létrehoztam a lánclemez korrodált felületét.
- A korrodált felület alapján megalkottam a károsodott lánclemez numerikus vizsgálatára alkalmas végeselemes geometriai modellt.

A továbbiakban szeretném az elkezdett munkát folytatni, szeretném magam még jobban beleásni az acélszerkezetek korróziós folyamataiba és a korrodált szerkezeti elemek teherbírásvizsgálatába. Úgy gondolom a jelenlegi numerikus modell továbbfejlesztése révén a későbbiekben a korrodált lánclemezek teherbírásának időbeli változása követhető lesz, ami alapján a híd élettartama a jelenleginél nagyobb pontossággal becsülhető lesz.

9. Köszönetnyilvánítás

Szeretnék köszönetet mondani Dr. Dunai László tanár úrnak a lehetőségért, hogy megírhattam ezt a TDK dolgozatot. Áprilisban, mikor megbeszéltük a témát, nem is gondoltam, hogy egy ilyen nagy kaliberű dolognak vágok neki.

Továbbá szeretném megköszönni Dr. Kövesdi Balázs minden munkáját, amit ebbe a dolgozatba fektetett bele. Az idejét nem sajnálva segített, amikor elakadtam vagy válaszolt a kérdéseimre, amikor nem volt tiszta valami.

Ezenfelül köszönöm a barátaimnak a támogatást, a biztatást; sokat jelentett ez is számomra a dolgozat megírásának sikerességében.

Irodalomjegyzék

- [1] *A Széchenyi lánchíd rekonstrukciója*, bkk.hu.
- [2] Vitányi B.: *Széchenyi lánchíd viselkedésének elemzése a rekonstrukció során*, TDK dolgozat, Budapest, 2021, 1-29. o.
- [3] *Lánchíd*, budavar.btk.mta.hu
- [4] *The original Hammersmith Bridge*, thehistoryoflondon.co.uk
- [5] *A Lánchíd története*, cultura.hu
- [6] *A Lánchíd felújítása 1914–1915-ben*, bparchiv.hu
- [7] *75 éve robbantották fel a budapesti Duna-hidakat*, pestbuda.hu
- [8] *35 éve teljesen felújították a Lánchidat, de a Kádár-címert nem cserélték le*, pestbuda.hu
- [9] *BME Hidak és Szerkezetek Tanszék: Szakértői jelentés - A Széchenyi lánchíd független statikai ellenőrzése*, 2016.
- [10] *Acél pályaszerkezet és részletekre is kiterjedő restauráció: így újul meg a Lánchíd*, magyarepitok.hu
- [11] *Lánchíd-felújítás: indul a munka, először a gyalogosok elől zárják le a hidat*, magyarepitok.hu
- [12] *Lánchíd: már láthatják a budapestiek az első új színébe öltöztetett láncszakaszt is*, magyarepitok.hu
- [13] *Lánchíd: így javítanak ki ezernyi hibát a közel 400 méteres átkelőn - friss képek*, magyarepitok.hu
- [14] *A téli hidegben is folytatódik a Lánchíd felújítása*, magyarepitok.hu
- [15] *Galériánkban megmutatjuk, milyen munkák folynak jelenleg a Lánchídon*, magyarepitok.hu
- [16] Páll G.: *Rövid áttekintés a Duna-hidak építésének fejlődéséről*, *A budapesti Duna-hidak története*, Budapest, Első Lánchíd Bt., 1956 (lektorálva: 2007), 168-171. o.

- [17] Zsámboki G.: *A vasszerkezetű hidak anyagai, Lánchíd története, Acélszerkezetű közúti hidak építése hazánkban 1945-1969 között*, Budapest, Első Lánchíd Bt., 1969 (lektorálva: 2007), 11-13, 18-24. o.
- [18] Kún Cs.: *A korrózió. Felületvédelem, felületek előkészítése, mázolás, lakkozás*, Budapest, Nemzeti Szakképzési és Felnőttképzési Intézet, 2008
- [19] *Korrózióvédelem*, geniusmbt.hu
- [20] Németh Gy.: *Korrózióvédelem*, egyetemi jegyzet, Széchenyi István Egyetem, Szerkezetépítési és Geotechnikai Tanszék, 2012.
- [21] *Szemtől szembe a korrózióval - 2.rész*, cromkontakt.hu
- [22] Haraszti F.: *Korrózió vizsgálatok alapjai*, Műszaki Tudományos Közlemények 5., Kolozsvár, EME Kiadó, 2016, 185-188.o.
- [23] *Tűz- és korrózió elleni védelem*, hun.sika.com
- [24] *Felület előkészítés*, szinvonalbau.hu
- [25] Sallai B.: *Korrózió időbeni hatása szerkezeti elemekre*, Budapest, 2022, (összefoglaló mű a benne leírt nemzetközi numerikus modellekről)
- [26] Dunai L. és Kövesdi B.: *Vizsgálati jelentés a budapesti Széchenyi lánchídon a lánclemezek vastagságának méréséről*, Budapest, 2022

Ábrajegyzék

1. ábra: Hammersmith-i Temze-híd [4].....	6
2. ábra: Lánchíd pillérjeinek alapozása [2].	7
3. ábra: Az elkészült Lánchíd [5].	7
4. ábra: Lánchíd első átépítése [3].....	8
5. ábra: Felrobbantott Lánchíd [7].....	9
6. ábra: Korrodált lánclemezek [2].....	10
7. ábra: Láncszem numerikus modellje [9].	11
8. ábra: Láncszem végeselemes hálójá [9].	12
9. ábra: Pontosított N+M interakciós diagram [9].....	12
10. ábra: Normálfeszültségek eloszlása a korrodált láncszemen [9].....	13
11. ábra: Mértékadó N+M erőpárra vonatkozó numerikus szimuláció eredménye [9].	14
12. ábra: Lehorgonyzó láncköteg a felújítás előtt [10].....	15
13. ábra: Egyenletes korrózió [18].	17
14. ábra: Lyukkorrózió [21].	17
15. ábra: Réskorrózió [21].....	17
16. ábra: Korrózió elleni védőbevonat felvitele [23].	20
17. ábra: Felületelőkészítés [24].....	21
18. ábra: Próbatess geometriai kialakítása [25].	22
19. ábra: Korrodált elem 3D szkennelése [25].	23
20. ábra: Különböző próbatesszök tönkremenetele [25].	23
21. ábra: Numerikus modell megalkotása [25].	25
22. ábra: Eredeti idő – korróziós mélység diagram [25]	26

23. ábra: Általános idő – korróziós mélység diagram [25]	26
24. ábra: Rugalmassági modulus és a szakítószilárdság a degradáció fokának függvényében [25].	26
25. ábra: Mérőműszer [26].	29
26. ábra: Mérések helye hosszmetsetben [26].	29
27. ábra: Mérési vonal, mérési zóna sematikus ábrája.	30
28. ábra: Lánclemezek jellemző felülete [26].	30
29. ábra: Mérési eredmények a budai befolyási oldal alsó láncköteg 2. számú lánclemezén [26].	31
30. ábra: Budai befolyási oldal, alsó láncköteg, 2-es lánclemez [26].	32
31. ábra: Budai befolyási oldal, alsó láncköteg, 2-es lánclemez, 1. vonal.	33
32. ábra: Budai befolyási oldal, alsó láncköteg, 2-es lánclemez, 2. vonal.	33
33. ábra: Budai befolyási oldal, alsó láncköteg, 2-es lánclemez, 3. vonal.	33
34. ábra: Budai befolyási oldal, alsó láncköteg, 2-es lánclemez, 4. vonal.	34
35. ábra: Budai befolyási oldal, alsó láncköteg, 2-es lánclemez, 5. vonal.	34
36. ábra: Budai befolyási oldal, alsó láncköteg, 2-es lánclemez, 6. vonal.	34
37. ábra: Budai befolyási oldal, alsó láncköteg, 2-es lánclemez, 7. vonal.	35
38. ábra: Budai befolyás alsó lánckötegének hullámhosszai az amplitúdók függvényében	36
39. ábra: Budai befolyás felső lánckötegének hullámhosszai az amplitúdók függvényében.....	36
40. ábra: Budai kifolyás alsó lánckötegének hullámhosszai az amplitúdók függvényében.....	38
41. ábra: Budai kifolyás felső lánckötegének hullámhosszai az amplitúdók függvényében.	38
42. ábra: Budai befolyás oldal krátermélységeinek szórása.	40
43. ábra: Budai kifolyás oldal krátermélységeinek szórása.	40

44. ábra: Budai oldal krátermélységeinek szórása.	41
45. ábra: Budai befolyás oldal kráterkiterjedéseinek szórása.....	41
46. ábra: Budai kifolyás oldal kráterkiterjedéseinek szórása.	42
47. ábra: Budai oldal kráterkiterjedéseinek szórása.	42
48. ábra: Pesti befolyási oldal alsó lánckötegének hullámhosszai az amplitúdók függvényében..	43
49. ábra: Pesti befolyási oldal felső lánckötegének hullámhosszai az amplitúdók függvényében.	43
50. ábra: Pesti kifolyási oldal alsó lánckötegének hullámhosszai az amplitúdók függvényében. .	45
51. ábra: Pesti kifolyási oldal felső lánckötegének hullámhosszai az amplitúdók függvényében.	45
52. ábra: Pesti befolyás oldal krátermélységeinek szórása.....	47
53. ábra: Pesti kifolyás oldal krátermélységeinek szórása.	47
54. ábra: Pesti oldal krátermélységeinek szórása.	48
55. ábra: Pesti befolyás oldal kráterkiterjedéseinek szórása.	48
56. ábra: Pesti kifolyás oldal kráterkiterjedéseinek szórása.	49
57. ábra: Pesti oldal kráterkiterjedéseinek szórása.	49
58. ábra: Az összes láncclemez krátermélységeinek szórása.....	50
59. ábra: Az összes láncclemez kráterkiterjedésének szórása.....	50
60. ábra: A teljes láncszerkezet kráterkiterjedéseinek közelítő diagramja.....	51
61. ábra: A teljes láncszerkezet krátermélységeinek közelítő diagramja.	51
62. ábra: Excelben létrehozott korrodált felület.	52
63. ábra: Korrodált láncclemez numerikus modellje a statisztikai alapon felvett korróziós paraméterek (krátermélység és kiterjedés) alapján.	53