

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem  
Geotechnika és Mérnökgeológia tanszék

## Kőzetkárosodási formák térképezése a Citadella kőzetein

**Készítők:**

**Agárdi Tamás**

másodéves építőmérnök hallgató

**Cebula Ágnes Karolina**

másodéves építőmérnök hallgató

**Konzulens tanárok:**

**Dr. Rozgonyi-Boissinot Nikoletta**

adjunktus

**Dr. Török Ákos**

egyetemi tanár

# Tartalomjegyzék

Tartalomjegyzék.....	1
Magyar nyelvű összefoglaló.....	2
Angol nyelvű összefoglaló.....	3
1. Bevezetés.....	4
2. A Citadella elhelyezkedése és történeti áttekintése.....	5
3. Az építőkö fizikai tulajdonságai.....	7
4. A Citadella kőanyagát károsító hatások.....	9
5. Elvégzett vizsgálatok bemutatása.....	12
5.1 Pipás vízbeszívás.....	13
5.2 Kapilláris vízfelvétel vizsgálata.....	14
5.3 Nedvességmérés.....	14
5.4 Schmidt-kalapács és duroszkóp vizsgálat.....	15
5.5 Károsodási térképek készítése.....	18
6. Vizsgálatok eredményei.....	29
6.1 Vízfelvétel eredményei.....	30
6.2 Nedvességmérés.....	34
6.3 Schmidt-kalapács és duroszkóp eredményei.....	35
6.4 Károsodások statisztikai összehasonlítása.....	37
7. Károsodott felületek összehasonlítása a régi állapottal.....	45
8. Következtetések.....	48
Köszönetnyilvánítás.....	49
Ábra- és táblázatjegyzék.....	50
Irodalomjegyzék.....	52
Mellékletek.....	54

## Rövid összefoglaló

### Kőzetkárosodási formák térképezése a Citadella kőzetein

A dolgozat keretén belül a Budapesten, a Gellért-hegy tetején található Citadella kőzetanyagát vizsgáltuk. A körülbelül 220 méter hosszú, 12-16 méteres falmagasságú Citadella építését 1853-ban rendelte el Ferenc József. Az épület máig sem esett át lényeges változáson, de jelentős károkat szenvedett a világháborúk során, illetve 1956-ban, melynek nyomai jól láthatók.

A Gellért-hegy és környéke a turisták által előszeretettel látogatott hely, fontos turisztikai látványosság, az UNESCO 1987-ben a Budai Várral és a dunai panorámával együtt a Világörökség részévé nyilvánította. Ez is hangsúlyozza a helyreállítás szükségességét, azonban az építmény jelenlegi állapotában nem látogatható, felújítása szükséges.

A Citadella durva mészkő kőzetanyagú falainak károsodása jelentős mértékű, amely a kőzet fizikai tulajdonságaira, légszennyezésnek kevésbé ellenálló szövetére is visszavezethető: porózus szerkezetű, vízfelvétele és gipszkéreg képződésre hajlamos. A durva mészkő könnyen megmunkálható jól faragható kőzet. Ennek megfelelően a Budapest környékén előforduló (Sóskút, Diósd, Budafok, Köbánya) változatait széles körben alkalmazták építő- és díszítőköznek a XIX. századtól, így a Citadella, valamint számos más budapesti épület is ebből a kőzetből épült.

A TDK dolgozat bemutatja a legfontosabb kőzetkárosodási formákat. Ezen felül a közel 9000 m<sup>2</sup>-nyi kőfal felületből mintegy 700 m<sup>2</sup>-nyi falszakasz károsodási térképét készítettük el. A falfelületek állapotát a műemléki jelleg miatt roncsolásmentes vizsgálati módszerekkel is meghatároztuk. A kőfelületek állapotát (felületi keménységét) Schmidt-kalapáccsal, valamint Duroszkóppal vizsgáltuk a helyszínen 150-150 méterrel, valamint laboratóriumi körülmények között hasonló, de üde kőzetten is méréseket végeztünk. A falakon 16 felületen pipás vízbeszívással állapítottuk meg a kőzet vízfelvételeit, amihez laboratóriumban még további 14 mérést készítettünk. Károsodási térképek elemzésével meghatároztuk a leggyakoribb kőzet elváltozási formák arányát és felületi elterjedését az eredeti kőelemekre és a cserélt kőelemekre vonatkozóan is, s ezt százalékos formában értékeljük ki. Kimutatható volt a falak eltérő károsodása, a károsodási formák eltérő aránya és az uralkodó szélirány (csapóeső) közötti összefüggés. A károsodás mértékének időbeli változása a történeti fényképek és a mostani időszakban készített fényképek összehasonlítása alapján is jól nyomon követhető.

Mindezek alapján a károsodási formák elterjedése és azok fizikai tulajdonságai alapján javaslatot lehet adni a szükséges beavakozások mértékére lehetséges restaurálási megoldásokra.

kulcsszavak: kőzetkárosodási térkép, műemlékvédelem, gipszkéreg, durva mészkő

## Abstract

### Stone damage mapping on the Citadel of Budapest

The present work describes the building stones of the fortress Citadel, which is located on the top of Gellért-hill, Budapest.

Francis Joseph ordered the construction of the fortress in 1853. The structure is a 200 m long and 12-16 m high. Although the building was severely damaged during the World Wars and the revolution of 1956, it has not been renovated significantly so far. The Gellért-hill and its area is one of the most touristic sights of the city. The UNESCO announced the Citadel together with the Buda Castle and the river view of the Danube as part of the World Heritage. This emphasizes the importance of the restoration, especially because the building can not be visited safely in its current condition.

The visible damages of the oolitic limestone walls of the Citadel are significant. The high porosity and sensitive micro-fabric of the stone makes it prone to air pollution related weathering. Common weathering forms are gypsum crusts. Besides the Citadel, several other buildings were constructed from this stone in Budapest. Several quarries were operating in the area of Budapest and its surroundings (Sóskút, Diósd, Budafok, Kőbánya), and due to the high workability the stone have been intensively used as construction material from the 19<sup>th</sup> century onward.

As a part of this research nearly 700 m<sup>2</sup> of the 9000 m<sup>2</sup> severely damaged walls were mapped and the weathering forms were recorded. The damaged wall surfaces were analysed by non-destructive tests such as surface hardness by using Schmidt hammer and Durosokop. On site tests included 150-150 tests by using each method. Additional laboratory tests were also made to assess the surface strength of quarry fresh porous limestone. 16 water absorption tests of weathered walls were measured on site and further 14 tests were made under laboratory conditions by Rilem tubes. By analyzing damage maps the percentage of damage forms were calculated both for original and for replaced stone surfaces. From these damage maps it was possible to differentiate in between the walls facing to the prevailing wind and located in the leeward side. The damage categories and percentage of damage forms were different according to the wall orientation. Comparison of historic photographs and present day images clearly demonstrate the different percentages of weathering forms of selected walls in time.

Based on the distribution of damage forms and their physical properties suggestions are given for possible restoration methods and interventions.

keywords: stone damage map, monument protection, gypsum crust, porous limestone

## 1. Bevezetés

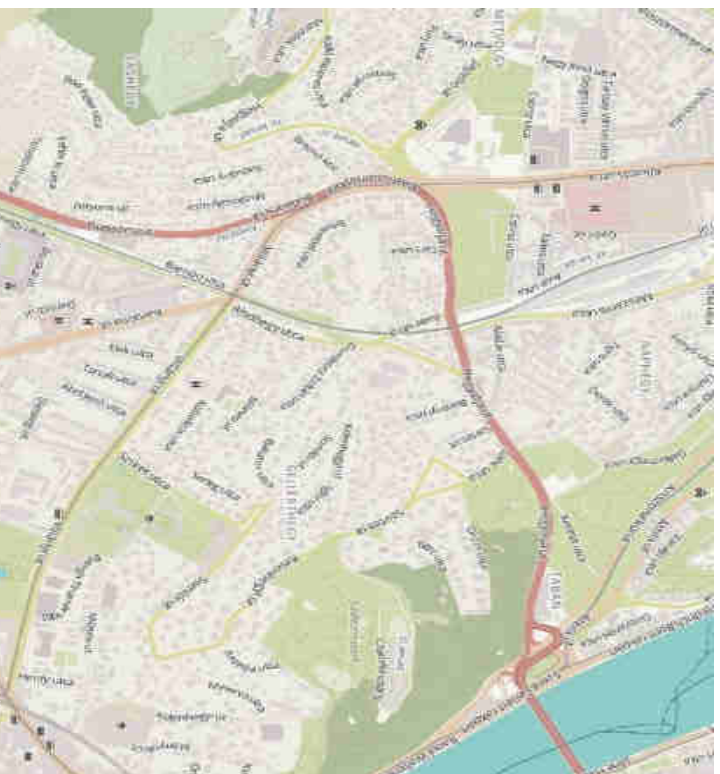
Dolgozatunk témája a Gellért-hegy tetején 235 m-es magasságban található erődítmény, a Citadella kőzetkárosodási formáinak vizsgálata volt. A Gellért-hegy és környéke a turisták által előszeretettel látogatott hely, fontos turisztikai látványosság, az UNESCO 1987-ben a Budai Várral és a dunai panorámával együtt a Világörökség részévé nyilvánította. [1]

Az építmény jelenlegi állapotában nem látogatható, felújítása szükséges. Az erőd átlagosan 3-4 m széles falai ooidos durva mészkőből készültek, amely feltehetőleg a fővároshoz közeli sósúti bányából származik. A köfajtából finom, középfinom és durva szemű durva mészkő termelhető ki, azonban ennek minősége a régen bányászott kőanyagnál már jóval gyengébb [2]. A sósúti durva mészkövet Budapest területén széles körben alkalmazták épületek homlokzati díszítőköveként, valamint műemlékek építőanyagaként (pl.: Lánchíd, Citadella, BME „K” épület, Mátyás templom, Parlament, Operaház). Az épületek kőzetanyagában nagymértékű pusztulás tapasztalható, melyek kiváltó oka részben a szennyezett levegő, valamint az ezzel járó kémiai és fizikai folyamatok. Nem elhanyagolhatóak a meteorológiai tényezők (savas eső, csapó eső, fagy), valamint a durva mészkő vízzel szembeni viselkedése sem. Ezek a károsodási folyamatok a kőzetek folyamatos és nagymértékű pusztulásához vezetnek [3]. A kőzet nem elégti ki sem az esztétikai, sem a szilárdságtani kívánalmakat. Műemléki épületek vizsgálatakor roncsolásmentes vizsgálatokat alkalmazunk és az ezekből nyert adatokra támaszkodunk, annak érdekében, hogy a kőzet állapotáról képet tudjunk alkotni. A Citadella falfelület- restaurálásának megkezdése előtt el kellett végezni a kőzetanyag teljes körű vizsgálatát, diagnosztikai elemzését.

Dolgozatunk tárgya a Citadella falfelületének általunk kiválasztott 600m<sup>2</sup>-nyi részéről kőzetkárosodási térképek rajzolása. Ezeken a térképeken jól elkülöníthetők a különböző károsodási formák. A helyszínen pipás vízbeszívás vizsgálattal megmértük a kötőmbök vízfelvétel képességét, mely előtt nedvességmérő műszerrel is megvizsgáltuk az egyes építőköveket. A falszakaszok építőkövein roncsolásmentes szilárdsági vizsgálatot (duroszkóp, Schmidt-kalapács) végeztünk. Mindezek után a laboratóriumban üde, nem károsodott durva mészkő tömbökön is elvégeztük ezeket a méréseket, és a kőzet kapilláris vízfel szívását is megvizsgáltuk. A károsodási térképeket felhasználva meg tudtuk állapítani a károsodási formák százalékos jelenlétét az egyes falszakaszokon, valamint a vizsgálati eredményekből nyert adatokat felhasználva pontos képet kaptunk a falszakaszokról valamint az egész építmény kőzetanyagáról.

## 2. A Citadella elhelyezkedése és történeti áttekintése

TDK dolgozatunk keretén belül a Citadella kőzetanyagát vizsgáltuk. Az építmény Budapest szívében, a Gellért-hegy tetején található. A Gellért-hegy a Dunántúli középhegység, azon belül a Budai-hegység legkeletebbi csücske. Az első illetve a tizenegyedik kerületben, a Duna jobb partján áll, 235 méter magas. A Sas-hegy, a Naphegy és Várhegy (1. ábra) határolják. A hegy belsejében kéregmozgások hatására üregek, hasadékok, barlangok találhatóak. Fő



1. ábra: Térképrészlet a Gellért, Sas és Naphegyről [4]

hegységalkotó kőzete a triász tenger üledéke: a dolomit. Ez a vegyi/biogén eredetű üledékes kőzet matt, a mészkőnél ridegebb megjelenésű. Fehéres-sárgás színű, repedezett, éles törésű kőzet. A Gellért-hegy ma a Duna-Ipoly Nemzeti Park részét képezi [5].

A Citadella szó olaszul kis várost jelent. A helyes magyar megfelelője valójában „fellegvár”, azaz várszerű magaslati erődtűményt vagy egy város legmagasabb pontján emelt, fallal körülvett, védhető részt [6].

A középkorban a Citadella helyén csak egy kisebb török őrhely volt. A Gellért-hegy tetején álló erődöt az 1848-49-es szabadságharc leverése után, 1850-54 között Haynau építtette. A mai Citadella építését 1853-ban rendelte el Ferenc József. A tervet Zitta Emánuel (mérnökkari főigazgató) készítette, Kasselik Ferenc és Zittelbach Mátyas kiviteleztek [6]. Az építmény egy országos erődhálózat része lett volna, melynek többi tagja végül is nem épült meg. Költséget nem kímélve 7 évig építették, s azóta sem esett át lényeges változtatásokon.

A körülbelül 220 méter hosszú, 60 méter széles, 4 méter vastag, 9m magas kőfalakkal védelmezett erőd lörései mögé 60 darab korszerű ágyút helyezhettek el. 1897-ben a Citadella a



2. ábra: Bontási munkálatok [7]

Városi Tanács birtokába került. Ekkor katonai okok miatt a főváros megbontattatta (2. ábra) jelképesen a pesti polgárok által is gyűlölt erődítmény falát. [7] 1919-ben a proletárdiktatúra idején a forradalmárok ágyúállásként vették igénybe. Jelentős károkat szenvedett a világháborúk során, illetve 1956-ban, melynek nyomai ma is jól láthatók. A II. világháborúban a Citadella lengyel menekülteknek átmeneti szállásként, táborként szolgált. Az évek során többször is tervezték az építmény felújítását, átadását. Az épületet a Budapest Tourist vette birtokába, telekkönyvileg 1974-ben, valójában sokkal korábban. Az 1960-as években szállót és vendéglőt nyitottak benne, azóta jelentős turisztikai látványosság Budapesten (3. ábra). Vonzerjét elsősorban a gyönyörű kilátásnak köszönheti.



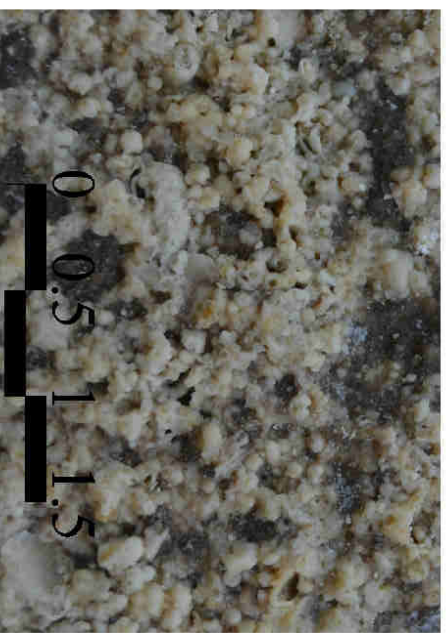
3. ábra: A Citadella belülről 1962-ben [8]

### 3. Az építőkö fizikai tulajdonságai

A Ciadella építőanyaga durva mészkő. Ez a kőzet az üledékes, azon belül a vegyi vagy biogén eredetű üledékes kőzetek csoportjába tartozik. A vegyi üledékek többsége vízi környezetben képződik, képződésük „nedves” reakció eredménye. Az üledék képződéséhez az oldatnak az adott komponensre nézve túltelítetté kell válnia. Ez bekövetkezhet úgy, hogy az oldat hőmérséklete megváltozik, vagy úgy, hogy egy másik oldattal keveredik, vagy a parciális nyomása változik stb. A kicsapódást vagy kiválást kémiai és biológia folyamatok kontrollálhatják [9].

A mészkövek legfőbb kőzetalkotója a kalcium-karbonát (90%), amely nagyrészt kalcit ( $\text{CaCO}_3$ ). Kristályai trigonálisak, szürkés-fehéres színű, kis keménységű ( $K=3$ ), jól hasad. A durva mészkő egy tengeri eredetű kőzet, gyakran tartalmaz ősmaradványokat és sok esetben kis kerek szemcséket (4. ábra) (ooidokat) is [10]. Sárgásfehér színű, kis testűrségű, kis szilárdságú (1. táblázat), puha kőzet, melynek nagy a porozitása (a 35 %-ot is meghaladhatja), aminek köszönhetően nagy vízfelvétele képes. [11, 12]

A kőzet porozitása nagyon különböző, tág határok között mozog, még az egy helyről származó kőtömbök esetében is. Török, Pápay [11] megvizsgálta a finomszemű, közép szemű és durvaszemű sóskúti durva mészkő porozitását, és megállapították, hogy az ooidos mészkő porozitási értékei szövetszerkezettől nagymértékben függenek. Eredményeik szerint a



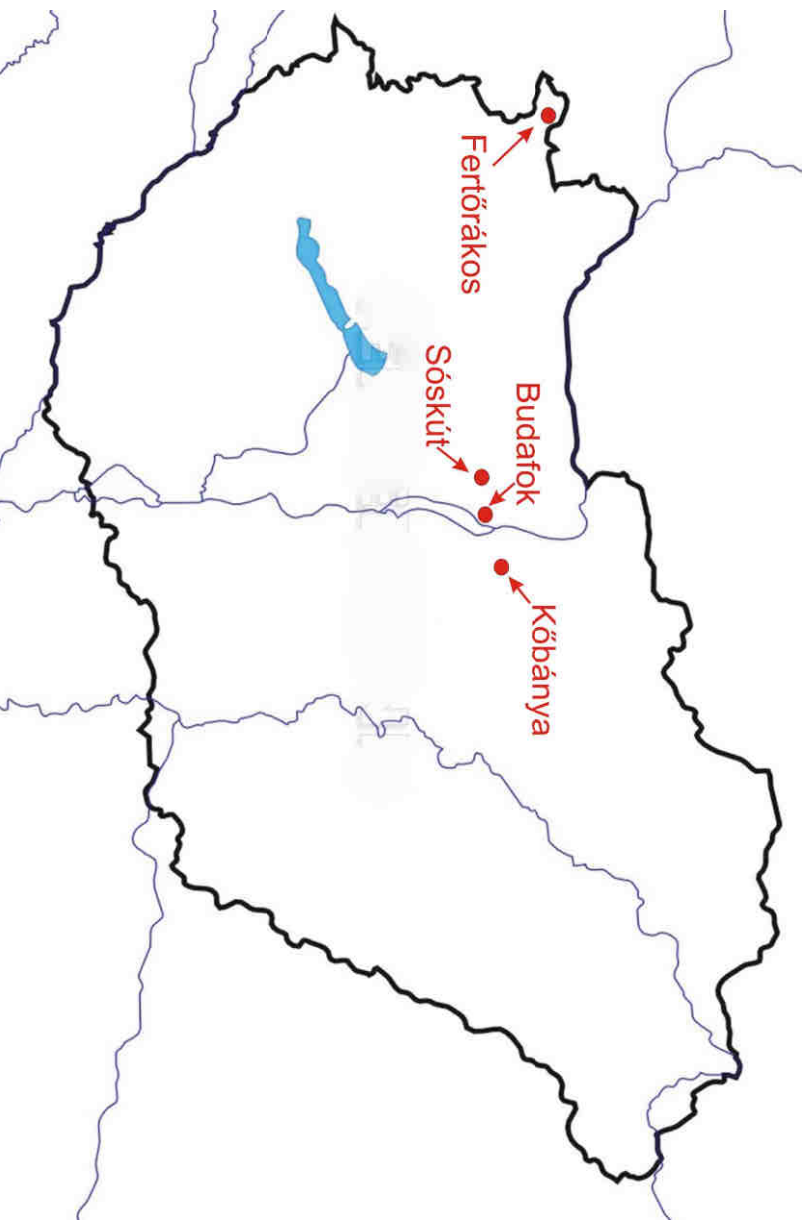
4. ábra: Durva mészkő felülete ősmaradványokkal

1. táblázat: Magyarországai durva mészkő változatok fizikai tulajdonságai [12]

Lebőhely	Testűrség g/cm <sup>3</sup>	Vízfelvétel V%	Nyomószilárdság	
			légszáraz MPa	vízzel telített MPa
Budatók	12,0-18,0	12,0-18,0	2-9	3-5
Nagyvétény	13,5-18,7	13,5-18,7	48-57	39-45
Kőbánya	5,5-14,8	5,5-14,8	8-28	5-19
Sóskút	10,8-19,1	10,8-19,1	4-97	5-14
Tárnok	11,2-22,6	11,2-22,6	5-19	3-12
Elyek	13,4-25,1	13,4-25,1	5-15	3-8
Bicske	2,8-21,6	2,8-21,6	5-81	3-41
Bia	1,3-25,7	1,3-25,7	5-73	6-51
Tök	8,8-34,6	8,8-34,6	3-31	2-11
Zámбек	11,3-28,6	11,3-28,6	1-6	1-3
Tapolca	6,7-19,3	6,7-19,3	3-18	2-4
Pécs	8,5-21,1	8,5-21,1	4-24	3-6



finomszemű ooidos mészkő porozitása a legnagyobb (36,24 V%), a két vizsgált közép szemű változaté közel azonos (24,11 V% és 27,20 V%,) míg a nagy pórusokat tartalmazó, durvaszemű ooidos mészkő porozitása a legalacsonyabb (20,13 V%). A károsodási kérgéken a porozitás értéke és ezzel a vízáteresztő képesség csökken [11]. A durva mészkő nem polírozható, de jól faragható. Díszítőként, tömbként, burkolóként és lábazatként használják fel. Előfordulási helyei Magyarországon: Budai-hegység (Sóskút, Bia, Diósd), Budapest (Kőbánya, Budafok), Soproni-hegység (Fertőrákos) (5. ábra).



5. ábra: Térképrészlet a bányák helyeiről

#### 4. A Citadella kőanyagát károsító hatások

A Citadella kőzetanyagában nagymértékű pusztulás tapasztalható. Kőzetkárosodást biológiai, kémiai és mechanikai okokra vezethetjük vissza, melyek sok esetben egymástól élesen nem különülnek el. A kőzetek felületén kialakuló kérégek és az ezzel járó mállás, hatással van a kőzet fizikai tulajdonságaira. [13] Az egyik fő kőzetkárosító hatás nagyvárosokban található építményeken a szennyezett levegő és az ezzel járó kémiai és fizikai folyamatok. Budapest területén az elmúlt évszázadban a korábbihoz képest jelentősen megnövekedett a légszennyezettség értéke. A város nagysága ugrásszerűen megnőtt, a 20. század nagy részében a széntüzelés volt az elsődleges fűtési technika. Bár a széntüzelés az elmúlt 50 évben hátrébe szorult, ezzel közel egy időben a járműforgalom többszörösére emelkedett. A légkörben található legfontosabb szennyezőanyagok közül a szállópor koncentráció és a nitrogén-dioxid koncentrációjának értéke a többszörösére növekedett, a kén-dioxid mennyisége fokozatosan csökkent. A légszennyezettség az őszi-téli időszakban megnövekszik a gyakori köd miatt. [14] A kén dioxid kémiai folyamat során a kőzetben található nedvességgel reagálva kénsavvá alakul, amely az építmény felszínén, és pórusaiban a kalcitot gipszzé alakítja:



Ez vezet a fekete és fehér gipszes kéreg kialakulásához. A szállópor színezi feketére a fekete kérégeket. Ezek a gipszkérégek a durva mészkő kőanyagánál tömöttebb, zártabb szerkezetűek, vízáteresztő képességük sokkal kisebb, mint az alatta lévő kőzetnek. A légszennyezés hatására a felületen kialakult kérégek miatt az építőelemek nehezebben tudják leadni a csapadék után bennük lévő vízmennyiséget, így az ilyenkor esetlegesen bekövetkező fagyás a kőzet további mállásához vezet. Amikor a kéreg mögötti kőanyag teljesen elhroncsolódott, már nem tudja megtartani azt, és leválik a kötömbőről. Ez a folyamat a kötömbök teljes visszahátrálásáig folytatódhat. A kőzetbe kapilláris úton a talajból kb. 1-2 méter magasságig is felemelkedhet a víz. A téli hónapokban a kőzetek átfagyásakor a bennük lévő víz szétrepeszti a kőzetet, Magyarországon egy télen akár 70-80 fagyos nap is lehet. [14] A jég térfogata 1/11 résszel nagyobb a víz térfogatánál, ezért amikor a kőzetben lévő víz megfagy a pórusok falain akár 2143 bar nyomás is felléphet [3], ez 214MPa nyomásnak felel meg (1 bar=0,1 Mpa). A 3. fejezetben leírt szilárdsági értékekből jól látszik, hogy ez a kőzet nyomószilárdságának többszöröse. Az így kialakuló nyomást a kőzet nem képes elviselni, a kőzet elreped, tönkremegy.

A talajból felemelkedett víz ásványi sókat és a téli síkosság mentesítésből származó oldott sókat is tartalmaz. Ezek a tavaszi és nyári hónapokban a fal száradásával a fal felszíne felé

vándorolnak, és amikor a víz elpárolog a kőzet felületén kicsapódnak. A falfelületek vizsgálatakor találtkoztunk olyan szakaszokkal, amelyen több négyzetméteres sókiváltások voltak megfigyelhetők a fal teljes magasságában (6. ábra). Ennek feltételezhetően az az oka, hogy a belső oldalon a terepszint, ezáltal a talajvízszint is jóval magasabb szintet üt meg.



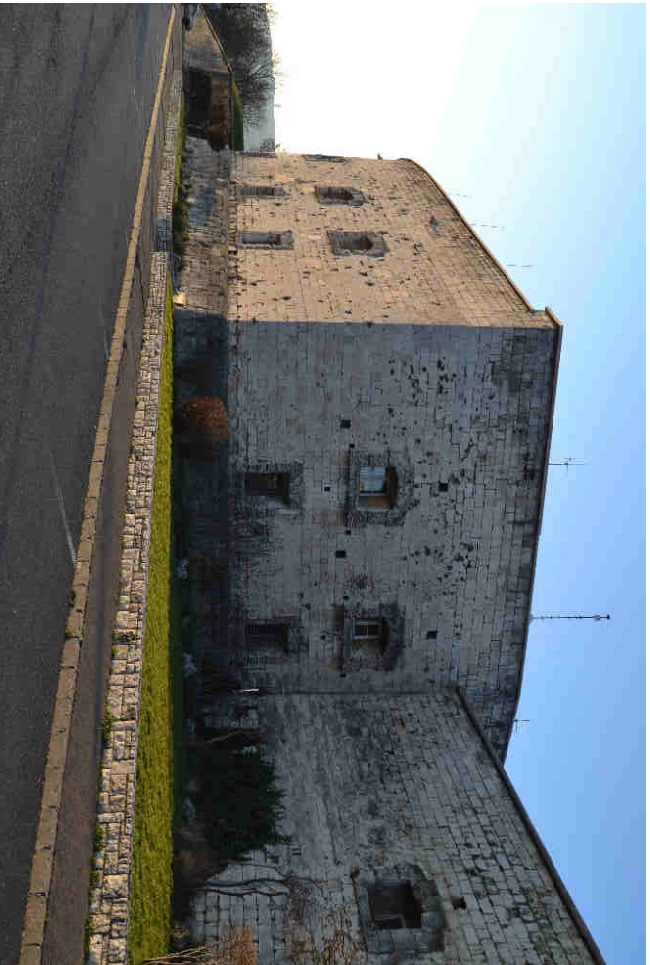
6. ábra: Nagy felületre kiterjedő sókivirágzás (Citadella D-i oldal, D-i fekvés)

Számos helyen megfigyelhetők a világháborúk és az 1956-os forradalom okozta sérülések is. A belövések, sortűzök nagy felületen roncsolták a kőzet felszínét, ezekben a lyukakban fekete kéreg megrepedése figyelhető meg (7. ábra).

Mindezek mellett a falfelületekre kúszó, egyenesen a fugákból kinövő vagy a fal előtt burjánzó növények szerepe sem elhanyagolható. Sok esetben borostyánszerű kúszónövények telepedtek meg a falakon, amelyek gyökereikkel apró lyukakat mélyítettek a kőzet felszínén, és eközben kőzetkárosító anyagokat választhatnak ki. A lábazati területeken a mohák és zuzmók megrepedése általános. Ezek a növényvel benőtt felületek nehezebben száradnak, így a kőzet nedvesség tartalma tartósan magasabb marad, ami a fagykárokat növelheti.

Gyakori a károsodások egymásra halmozódása is, pl.: belövés vagy visszamállott felületen megjelenő fekete gömbös kéreg, a talajhoz közelebbi részeken a talajvíz miatt nedvesebb kőzeteken megrepedülő moha (7. ábra). Ezek a károsodási folyamatok a kőzetek

folyamatos és nagymértékű pusztulásához vezetnek. A kőzet nem elégíti ki a vele szemben támasztott esztétikai és szilárdságtani kívánalmakat.



*7. ábra: Belövéses nyomai (D-i oldal, nyugati rondella eleje, K-i fekvés)*

## 5. Az elvégzett vizsgálatok bemutatása

A vizsgálatokat falszakaszonként végeztük el, amelyeket K\_01-K\_21 jelöléssel láttuk el. A falszakaszok elhelyezkedését a 6. fejezetben, a 31. ábrán mutatjuk be.

Műemleki épületek kőzetanyagának vizsgálatához túlnyomó többségében, amennyiben a fal megfűrésára nem nyílik lehetőség, csak roncsolásmentes vizsgálatot alkalmazunk. A Citadella az UNESCO világörökség részét képezi, ezáltal nem károsíthatjuk az épület kőanyagát, a szükséges vizsgálatok elvégzésére számos roncsolásmentes módszer áll a rendelkezésünkre. Ezekkel meg tudjuk becsülni az építőkö fizikai tulajdonságait.



8. ábra: Laboratóriumban vizsgált üde kőtömbök szöveve

A kőzetanyag vízfelvételi és szilárdsági tulajdonságait Sósktútról származó, üde kőtömbökön vizsgáltuk. A 8. ábra mutatja be a 4 vizsgált szövettípust: egy közép szemű (1. tömb), két durvaszemű (2. és 3. tömb) és egy finomszemű változatot (4. tömb).

### 5.1 Pipás vízbeszívás

A mérés célja a kőzetanyag vízáteresztő képességének, a csapó eső falon történő kőzetbe szivárgásának modellezése. A vizsgálat előkészítése során a Karsten pipákat agyaggal úgy kell a felületre rögzíteni, hogy a víz a pipa alsó átmérőjének megfelelő felületen jusson a kőzetbe (9. ábra). A falra történő felragasztáshoz agyagot használtunk, felragasztásakor ügyeltünk arra, hogy elkerüljük az eszköz szivárgását.

A pipák feltöltése után a pipákon található mm osztás segítségével mértük a víz beszivárgását a kőzetbe, rögzítettük a beáramló vízmennyiséghez tartozó időegységeket. A pipákat minden alkalommal egyégesen 140 mm magasságba töltöttük fel vízzel. 100mm vízoszlop magasság 140 km/h sebességű csapóeső hatásának felel meg a felületen. [16].



9. ábra: Pipás vízbeszívás vizsgálata

A Citadella falán és a Laboratóriumban, üde kőzeteken is megmértük a pipás vízfelvételt, mindkét esetben 2 db Karsten (Rilem) típusú, egy 11,7 mm és egy 8,6 mm átmérőjű pipás eszközt használtunk. A Citadella falán, a K\_06-os falszakaszon a vizsgálatot a nedvességméréssel egyezőt napon végeztük. Különböző típusú károsodási felületeken összesen 16 db vízbeszívási vizsgálatot végeztünk el. A Laboratóriumban 4 db, Sósokútról származó, háromféle szövétű, ooidos durva mészkő tömböket vizsgáltunk (8. ábra). A kapott eredményeket grafikonokon ábráztoltuk.

## 5.2 Kapilláris vízfelvétel vizsgálata

A vizsgálatot az MSZ EN 1925:2000 szabvány szerint a BME Geotechnika és Mémöképlőgía Tanszék Közvetvizsgáló laboratóriumában végeztük el. A vizsgálatot 3 darab sósktú bányából származó, úde durva mészkő próbatesten végeztük el. A mérés során a próbatesteket 3mm mély vízbe kell állítani, és a kapillárisokon keresztül felvett víz hatására bekövetkező tömegváltozást és a felületen megjelenő átnedvesedő közetmagasságot is meg kell határozni (10. ábra). A minták vízfelvételét a vizsgálat elején 10, 20, 30 másodperces, később 2, 4 és 10 perces időközökkel tömegméréssel állapítottuk meg. A vizsgálatot tömegállandóságig folytattuk. A kapott eredményeket a következő képlet alapján, grafikokon ábrázoltuk:

$$C = \frac{m_i - m_d}{A} \text{ ahol,}$$

$m_i$ : vizsgált időponthoz tartozó tömeg

$m_d$ : légszáraz tömeg

A: próbatest keresztmetszeti területe és a vízbe bennerített részhez tartozó palást felülete

C: felvett víz tömege a felület arányában



10. ábra: Kapilláris vízfelszívás vizsgálat

## 5.3 Nedvességmérés

A K\_06 falszakaszon vizsgáltuk a kőzet vízzel szembeni ellenállását. A helyszínen először GANN Hydromette típusú elektromos nedvességmérő műszerrel határoztuk meg a korábban kiválasztott kötőbök nedvességtartalmát (11. ábra).

A nedvességmérő műszer a falhoz érintett gömb alakú érzékelő segítségével a kőzet elektromos vezetőképességét méri. Pontos nedvességtartalmat kőzeteken nem lehet vele meghatározni, de relatív nedvességmérésre, nedvesebb és szárazabb falszakaszok kiválasztására alkalmas. Minden kötőmbön egyenletesen elosztva 10 mérést végeztünk. A vizsgálat napján (2016.09.28.) a délelőtti órákban a hőmérséklet 25 °C körüli volt, a vizsgálatot megelőző egy hétben nem volt csapadék. Méréseink során függőlegesen több magasságban végeztük el a méréseket, így függőleges irányú nedvességtartalom változást is meg tudtuk határozni.

#### 5.4 Schmidt-kalapács és duroszkóp vizsgálat

A beépített kőzet szilárdságának becslésére Schmidt-kalapácsot és duroszkópot alkalmaztunk. A vizsgálathoz szabványos N-34 típusú Schmidt-kalapácsot és HAHN & KOLB SK/HSSL típusú duroszkópot használtunk. A Schmidt-kalapácsot eredetileg betonok roncsolásmentes szilárdsági vizsgálatához fejlesztették ki, azonban kőzetek vizsgálására is használják (12. ábra) [17]. A Schmidt-kalapácsos mérés során a készülékben található kalapács egy ütőszegen keresztül dinamikus terhelést ad a kőzet felületére. A készülékben lévő kalapács visszapatтанását mérve következtethetünk a felület szilárdságára. Ahhoz hogy ez az érték helyes



11. ábra: Nedvességmérő készülék alkalmazása



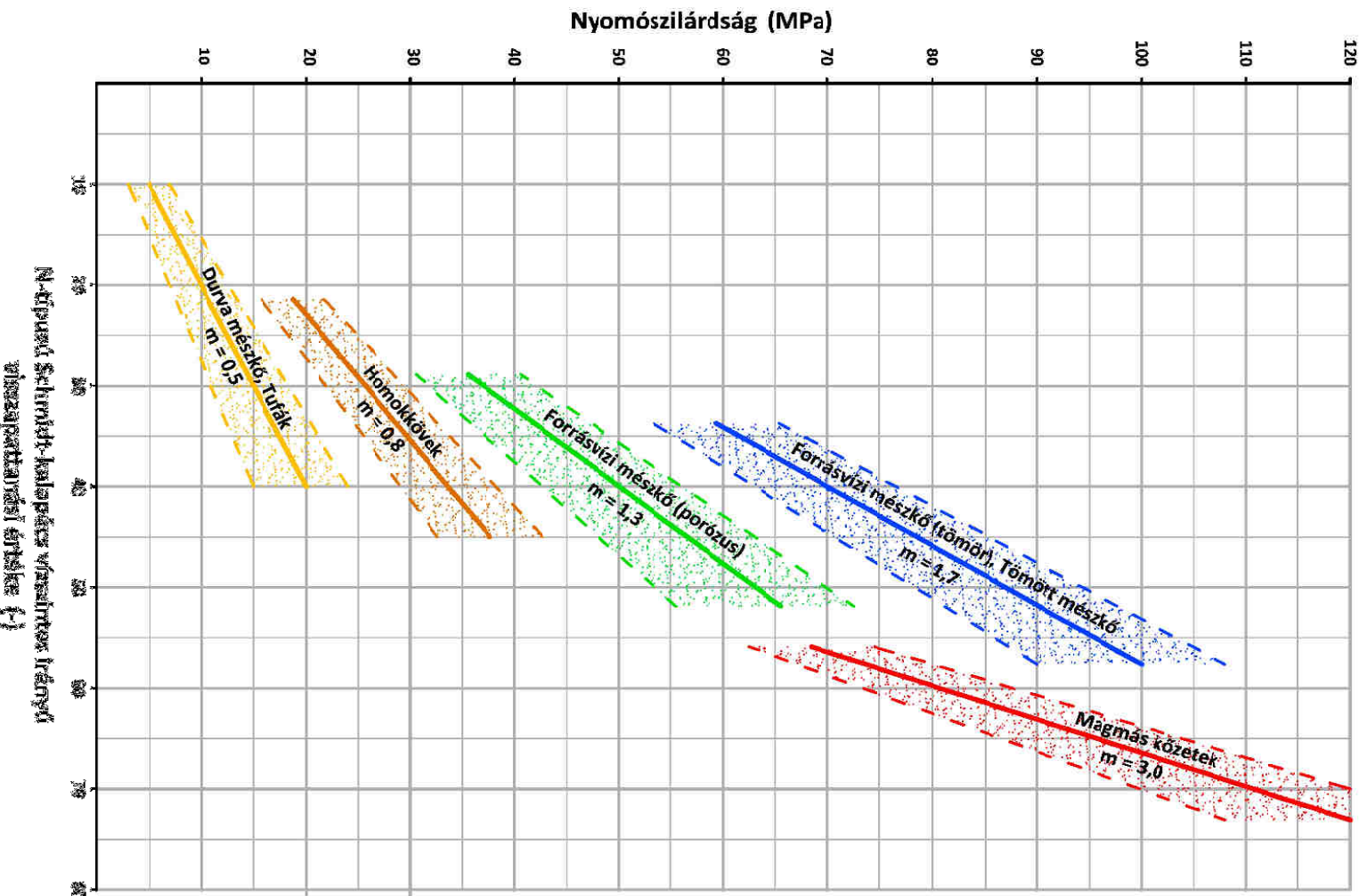
12. ábra: Schmidt-kalapács

legyen, ügyelnünk kell a műszer helyes használatára: egyenletes nyomóerővel a falra



merőlegesen tartva kell a vizsgálatot elvégezni. A vizsgálat elvégezhető függőlegesen és vízszintesen is, a kiértékelésnél az irányt figyellembe kell venni. Ismétlő mérés esetén soha nem szabad ugyanarra a pontra visszahelyezni a kalapács fejét mivel itt már a korábbi ütés hatására a kőzet felülete roncsolódhat. A mi esetünkben az apró ősmaradványok összetörnek a durva mészkö felületén. A visszapattanási érték meghatározásakor a mérhetőség kizárásához a próbatest mérete min. 11 cm kell legyen, mérési helyenként több pontban kell a mérést elvégezni és ezek átlagát számítani [18]. Mi kötömbönként 10 mérést végeztünk, és az eredményeket átlagoltuk.

A fent leírt vizsgálati módszert korábban már több esetben is alkalmazták kőzetek szilárdsági tulajdonságainak becslésére (pincék, pincerendszerek, szálban álló kőzetek szilárdsági tulajdonságainak becslésére). Az eszköz kőzetek vizsgálatára irányuló alkalmazásával kapcsolatos kutatások kimutatták, hogy az egyes kőzetekre a visszapattanási értékek (R) és a kőzet egyirányú nyomószilárdsága ( $\sigma$ ) között empirikus képletek írhatók fel (12. ábra) [20, 21]. A durva mészköre az irodalomban a  $\sigma = 0.883 \cdot R - 4,687$  képlet [21] található, amely segítségével az általunk mért Schmidt-kalapács visszapattanási értékeket MPa egyirányú nyomószilárdsági értékre számítottuk át. Továbbá Gálos, Bögöly [20] alapján is megbecsültük a szilárdságot, amely szerint a szilárdsági értékek egyenesen arányosak a visszapattanási értékek felével (13. ábra).



13. ábra: Különböző kőzettípusok Schmidt- kalapács visszapattandás és egyirányú nyomószilárdság közti összefüggése [20]

A duroszkóp szintén szilárdságbecslésre alkalmas műszer, melyben egy ingára szerelt súly felületre ejtése után, annak visszalendülését mérjük (14. ábra). A felületi keménység függvényében nyelődik el a dinamikus energia, minél kisebb a felület keménysége, annál jobban elnyeli ezt az energiát. A szerkezettel csak függőleges irányban



14. ábra: HAHN & KOLB SK/HSSL típusú duroszkóp

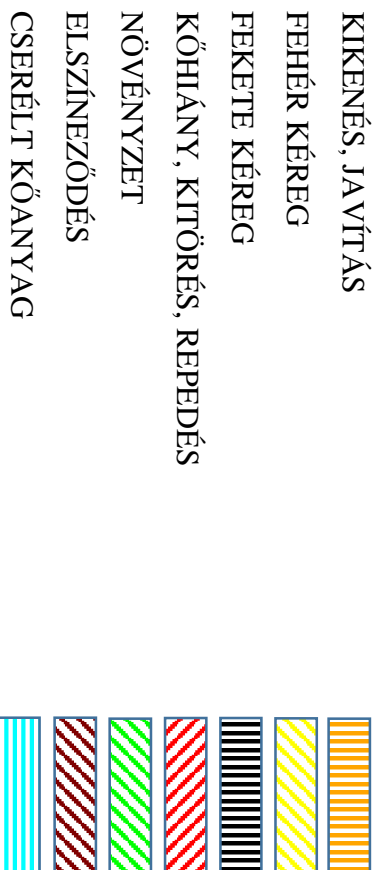
lehet mérni, ferde, vagy visszaugró szerkezeti elemeken nem. A legfontosabb különbség a duroszkóp és a Schmidt-kalapács között, hogy a duroszkópban az ütőerő sokkal kisebb, mint a Schmidt-kalapácsban, ezért ezzel csak a kőzet felszínének szilárdságbecslését lehet elvégezni. A mérést ebben az esetben is egy építőkövön 10-es ismétlési számmal végeztük el. A vizsgálat során ügyelni kell arra, hogy a műszer a vizsgált felületre merőlegesen álljon. Ezzel az eszközzel csak függőleges felületet lehet vizsgálni.

A szilárdsági vizsgálatokat az építmény északi oldalán, a K\_06 megnevezésű falszakaszon kiválasztott kőveken végeztük. Az építőköveket úgy választottuk ki, hogy minden, a durva mészkőre jellemző károsodási forma megtalálható legyen benne. Kötömbönként mindkét műszerrel egyaránt 10 mérést végeztünk, a kőzet felületén egyenletesen elosztva. Meghatároztuk, hogy az adott kőzeten milyen károsodás lehető fel. A nyert adatokkal becsülni tudjuk a károsodott felületek szilárdságát. Duroszkóp esetében a mérések során többször kiugró értéket kaptunk, amikor a tüvel eltaláltuk egy-egy őszállat kemény mészkövészát, ebben az esetben a mérést megismételtük.

### 5.5 Károsodási térképek készítése

A helyszíni vizsgálatok részeként, a roncsolásmentes mérésekkel párhuzamosan végeztük a faltelületek károsodási térképeinek készítését, ez kiterjedt a külső és belső oldalra egyaránt. Ebben a dolgozatban 3 falszakasz károsodási térképének bemutatásán keresztül mutatjuk be ezt a közetiagnosztikai vizsgálatot. A falszakaszokon megfigyelt károsodási formák gyakoriságának elemzésével értékeljük a kőzetek állapotát. A térképeket először a helyszínen a fal pontos megfigyelésével kell elkészíteni, majd ezeket a további feldolgozáshoz digitalizálni kell. A térképek digitalizálásakor a Fotogrammetria Kft. által a Citadelláról készített részletes

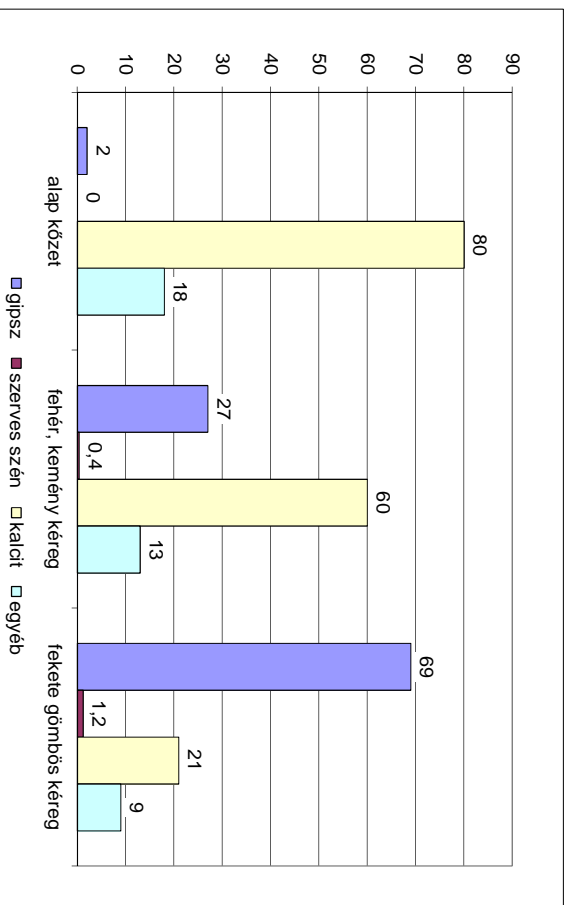
fotoagrammetriai felmérés rajzait használtuk fel. Autocad program segítségével méretarányosan jelöltük a különböző károsodási formákat. A károsodási térképek készítésekor 6 jelenséget különböztettünk meg, ezeket eltérő szín és az egymásra lapoldó felületek könnyebb azonosítása miatt eltérő sraffozással jelöltük (15. ábra).



15. ábra: Kőzetkárosodási térképeken jelölt károsodási formák

### Fekete kérreg

A durva mészkövön fekete kérget vagy gömbös fekete kérget a szélnek kitett oldalon találunk, a levegőben szálló por lerakódik a kőzet felszínére. A porban lévő kén-oxidok gipszképződést eredményeznek, emiatt jelenik meg a kérreg a felszínen, a szálló por pedig feketére színezi ezt a kérget. Fekete kérreg alakul ki a csapóesőtől védett falterületeken is, itt a felszínre rakódott port az eső nem tudja lemosni, és az feldúsul felszínen.



16. ábra: Röntgendiffrakciós és derivatográfus vizsgálattal kimutatott ásványtani összetétel [21 alapján]

A Citadella esetében ez a jelenség a falak tetején végigfutó (tömött mészkőből készült) párkány alatt minden oldalon jól megfigyelhető. Török [21] elemezte és ábrázolta a durva mészkő felszínén található kéregek összetételét (16. ábra). Megfigyelte, hogy a mállott a fekete kéregben legnagyobb a gipsz aránya (több mint a kéreg fele). A térképezés során olyan falszakaszt is találtunk, amelynek nagy része fekete kéreggel károsodott (K\_01). (17. ábra)



17. ábra: Fekete kéreggel fedett falszakasz (K\_03, É-i oldal, Ny-i tőljolás)

### *Fehér kéreg*

A falak felületén megfigyelhető egy vékonyabb 1-2 milliméteres, helyenként pikkelyesen leváló, de jórészt összeoldódott, cementált és egy vastagabb 0,5-1-2 centiméteres fehér kéreg (18. ábra). E kéregek összetétele jelentősen eltér a fekete kéregektől. Gipsztartalmuk [21] 20% körüli, a kérget a légszennyezés hatására oldódó, majd a felszínen újra kiváló kalcit alkotja (60%). A vastag kéregek kialakulásának fő oka a növekvő légszennyezettség illetve a kőzet szövete. A jó vízáteresztő képességű kőzetanyagon mélyebben is kioldódhat a kalcit és a fellazult aprózódott kőzetanyag 1-2 cm-re található a kőzet felszínétől. Fehér kéreg többnyire

olyan falfelületeken alakul ki, amelyeket csapóeső is mos, így a gipszesedésnél katalizátorként működő szálló por nem marad sokáig a felszínen.



18. ábra: Levéló fehér kéreg a K\_14 falszakaszon (D-i oldal, D-i fekvés)

#### *Kőhiány; kőzethátrálás*

A legtöbb falszakaszon megtalálható kőhiány. Jelenlétüket több tényező is befolyásolja. Az építőköveken kialakult fekete és fehér kéreg a kötömbök felületéről lehullva fokozatos



19. ábra: Visszahátrált kötömbök a K\_14 falszakaszon (D-i oldal, D-i fekvés)

hátrálást idéznek elő (19. ábra). A legtöbb élen és sarkon a kötőbök szélei töredezttek. Egyes esetekben több blokk mélységig visszamállott vagy kitöredezett a kőzet.

Az építmény ugyancsak magán viseli a világháborúk, szabadságharcok nyomait (21. ábra). A falak felületén, több helyen, nagy kiterjedésű és rengeteg apróbb belövés okozta sérülés található. A korábban kicserélt kőzetek mellett az eredeti kőanyag nagymértékű pusztulásnak indult, ugyanígy megfigyelhető a helytelenül alkalmazott cementes kikenések és egyéb köpörtlő szerek környezetében található eredeti kőanyag pusztulása is. Statikai problémákból kötőmb átrepedés és kőlaptörés több kőSORON, vagy akár az egész falmagasságban megfigyelhető (20. ábra).



20. ábra: Statikai problémákra visszavezethető kötőmb átrepedés több soron keresztül (K\_14-es falszakasz, D-i oldal, D-i fekvés)



21. ábra: Belövések nyomai a K\_20-os falszakaszon (D-i oldal, K-i tájolás)

### *Kikenés*

Kikenésekkel és javításokkal a falak felületén mindenhol lehet találkozni. Egy részük cement anyagú, amely a kikenés mellett lévő kőzetekre igen rossz hatással van (22. ábra).



22. ábra: Nagy felületen, kikenéssel javított falazat

A tömött cementes habarcs vízáteresztő képessége sokkal kisebb, mint az alapközeté a környezetében, így a nedvesség megreked mögötte, és ezen a területen az alapközet könnyebben károsodik fagyás, illetve sókristályosodás hatására.

Több helyen látunk olyan nagy felületeket, amiket szakszerű kőpótló anyaggal javítottak, mégis újra megfagyhatnak a mállási folyamatok rajtuk. (23. ábra).





23. ábra: Cementkikénés mellett tönkrement kőzet

### *Köcsere*

A vizsgált falszakaszok többségén megtalálható cserélt kötőbökök. A világháború, és forradalmak okozta, helyenként több négyzetméter nagyságú sérülések javításai illetve a



24. ábra: Cserélt kötőbökökből újjarakott falazat

teljesen visszahátrált kőzetek darabonkénti cseréjét értjük alatta. Az előbbi könnyen felismerhető a sorok folytonosságának megszakadásáról, és a fugák hiányáról (24. ábra).

A helyszínen végzett vizsgálatoknál megállapítottuk, hogy bizonyos esetben csak egy vékony 5-6 cm vastag lappal történt a köpötlás. Károsító hatásuk jelentős, mivel a nem szakszerűen cserélt kötömbök mellett az eredeti köanyag azonnal pusztulásnak indul. Ezek a lapok többnyire cementhabarccsal lettek a visszahátrált kőzet elé ragasztva. Ez az anyag sokkal keményebb a durva mészkő tömböknél, nem dolgozik együtt a puhább durva mészkővel. A



25. ábra: Helytelenül rögzített, kiesett kőlap

közvetben lévő víz útját elzárja a cementhabarcs, ezért az ilyen javítások hamar újra leesnek. Mindezek mellett a vékony 5-6 cm kőlap teherviselésére nem alkalmas, csak esztétikai szerepet tölt be, a terhet továbbra is a visszahátrált, meggyengült kőzet viseli. A mintavételezés során találtunk olyan visszahátrált kötömb elé helyezett vékony lapot, amely megkopogtatva kongott,

jelelve, hogy már elvált az alsó köanyagtól a felragasztás. A 25. ábra egy falfelületről kiesett, 5cm vastag kőlapot mutat. A kiesett kőlapot még nem távolították el a fal alól, mögötte, a falon jól látható volt a cementhabarcs ragasztóanyag.

#### *Növények*

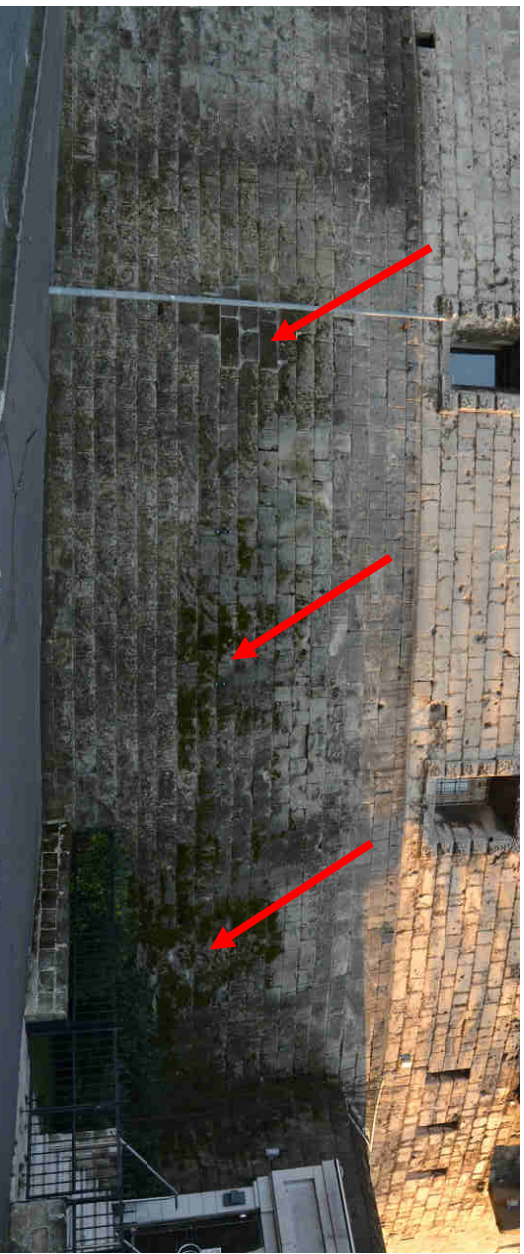
Több helyen található borostyán a fal felületén (26. ábra). Ez a növény a fal felületére felkúszik, a gyökere mentén, a kőzet felszínén, azokon a pontokon, ahol odatapad a kőzethez, apró lyukakat lehet felfedezni. Egyes helyeken csak egy-egy szállal találkozunk, de volt példa teljes falszakasz benövésére is. Levelei alatt a kőzet nehezen szárad, a függőbe benövő gyökerei repeszti a kőzet széléit, a szerves anyag lerakódását a fal felületén elősegíti, viszont a portól megvédi a kőzet felszínét. Mohával az egész építményen találkozunk, szinte minden párkány alatt, vízkivetések és ereszcsonoma körül, talaj menti sávokban megtalálható.



*26. ábra: Nagy kiterjedésű borostyán a K\_09 falszakaszon*

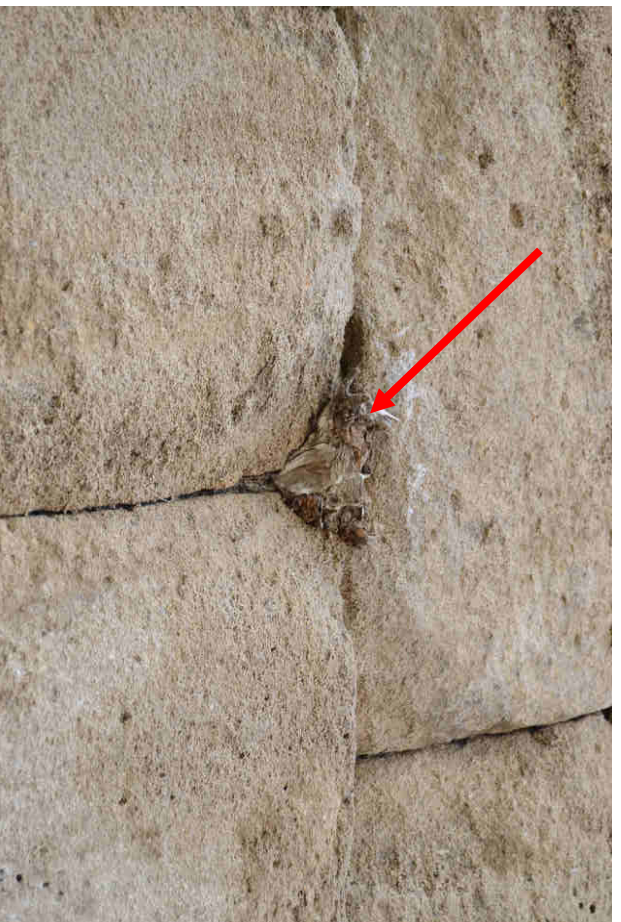
## Kőzetkárosodási formák térképezése a Citadella kőzetein

Mohák és zuzmók jelenléte jellemző volt továbbá az ablakok felett lévő, nagyméretű, durván megmunkált köveken (27. ábra). Számuk az északi oldalon megsokszorozódik, jellemzően minden falszakasz alján, negatív sarokban megtalálható. A fugák között több helyen találhatunk az egészen aprótól akár az ökölnyi méretű élő vagy elszáradt növényekkel (28. ábra). Ezek gyökerei szelíeszítik a kőzetek közötti fugákat, utat nyitva a víznek és ezáltal a további károsodásnak. Néhány esetben a falak előtt növe, nagyméretű bokrok okoznak problémát.



27. ábra: Moha a keleti rondella északi tájolású oldalán

A tétképek kiértékelésekor meghatároztuk a károsodott falfelület nagyságát, illetve az egyes tönkremeneteli formák arányát. A fehér kéreg megtalálható kicserélt, visszamállott és üde közeten egyaránt, fekete kérget cserélt kőanyagon nem találtunk.



28. ábra: Elszáradt növényi szármarradvány a fugában

### *Elszíneződés*

A falakon, sok helyen kisebb nagyobb felületű elszíneződések láthatók, méretük változik a néhány négyzet deciméteres és a több négyzetméteres között (29. ábra). Gyakori a víz lefolyása okozta nagy felületre kiterjedő, barna színű elszíneződés (30. ábra). Sok helyen láthatunk fehér színű sókivirágzásokat (29. ábra) és korom okozta, fekete elszíneződést is. Ezen kívül megfigyelhető még néhány helyen a falba beültött és korrodált fém szegek és geodéziai csapok alatti rozsdatolt. Ezek az elszíneződések szinte minden esetben valamilyen károsodási kérgen helyezkednek el.



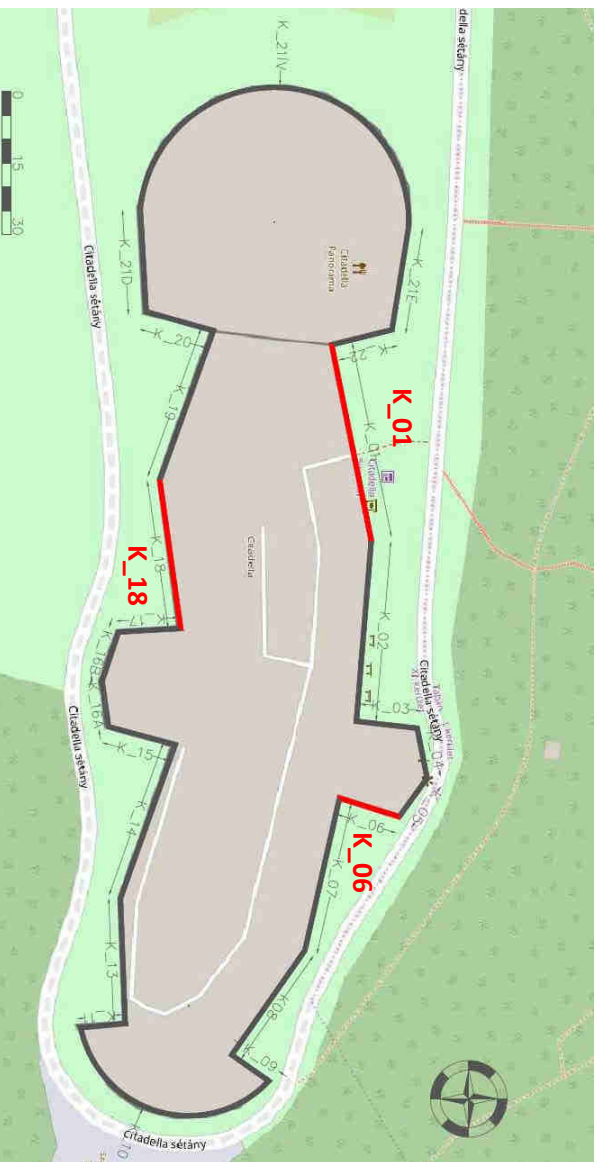
*29. ábra: Sókivirágzás a K\_14 falszakaszon (déli oldal, déli tájolás)*



*30. ábra: Barna elszíneződés a K\_15-ös falszakaszon (déli oldal, keleti tájolás)*

## 6. Vizsgálatok eredményei

Az elvégzett vizsgálatok alapján megkülönböztettük a károsodási formákat, és meghatároztuk azok jellemzőit. Összehasonlítást végeztünk a károsodott és az úde durva mészkő fizikai tulajdonságai közt. Meghatároztuk, hogy a jellemző károsodási formák az általunk vizsgált falszakaszokon milyen arányban jelentkeznek, és ezek a fal tájolásával, elhelyezkedésével hogyan függnek össze (31. ábra). A károsodott falszakaszok részletes elemzésekor megvizsgáltuk az eredeti és a korábbi helyreállításoknál cserélt kőzetanyaggon jellemző károsodási formák arányát.



31. ábra: Kőzetkárosodási térképek falszakaszai (pirossal jelölve)

A 2. táblázat mutatja az elvégzett vizsgálatok mennyiségét. A táblázatban láthatjuk, hogy az esetleges hibák kiküszöbölésének érdekében a helyszínen megvizsgált 15 db és a laboratóriumban megvizsgált 4 db úde kőzetlen, kötőműnként egyösszesen 10 méret végeztünk, Schmidt-kalapáccsal és duroszkóppal egyaránt. Ez 150-150 db helyszíni és 40-40db laboratóriumi Schmidt-kalapáccsal és duroszkópos mérést tett ki.

A helyszínen különböző magasságokban, 13 kötőműnkben, kövönként 10 méréssel ellenőriztük a fal nedvességét, a laboratóriumban kontrollként 4 db kötőműnkben 10-10 db mérest végeztünk a légszáraz érték meghatározásához. A laborban megvizsgált 4 db kötőműnkben összesen 14db (kövönként 3-5db), míg a Citadella falazatán, 6 kötőműnkben összesen 16db pipás vízbesszívási kísérletet végeztünk (melléklet, K\_06 falszakasz mérési eredményei)

Részletes károsodási térképet készítettünk 3db falszakaszon megközelítőleg 660 m<sup>2</sup>-en. A falszakaszokat úgy választottuk ki, hogy mindegyik tájolása különböző legyen, és a károsodási jelenségek az épület teljes falazatára jellemzőek legyenek. Így esett a választás az északi oldalon, az ÉNY-i tájolású K\_01 (385m<sup>2</sup>), a K-i tájolású K\_06 (122m<sup>2</sup>), valamint a déli oldalon a D-i tájolású K\_18 (160m<sup>2</sup>) falszakaszokra (31. ábra, piros falszakaszok). A károsodási térképek helyszínen, kézzel való megrajzolása után elvégeztük ezek digitalizálását, kiszámítottuk az egyes falfelületeken lévő károsodási jelenségek felületét, és értékeltük a tapasztalatokat.

	helyszíni	laboratóriumi
Duroszkóp	150 db	40 db
Schmidt-kalapács	150 db	40 db
Nedvességmérés	130 db	40 db
Pipás vízbeszívás	16 db	14 db
Károsodási térképek	666,3 m <sup>2</sup>	-

2. táblázat: Elvégzett vizsgálatok száma

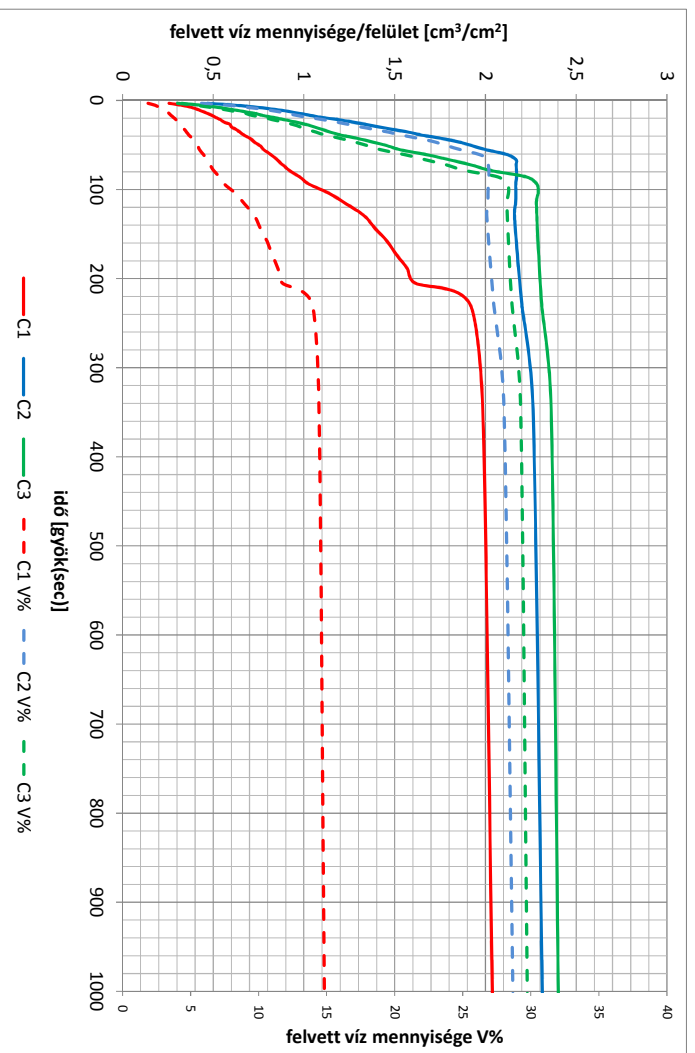
### 6.1. Vízfelvétel eredményei

A pipás vízbeszívás és a kapilláris vízfelszívás kísérlete alatt is ugyanaz a folyamat játszódik le: a víz a közet azon pórusaiban kezd el befelé, illetve felfelé áramlani, amelyek kapilláris hálózattal, egymással összekötettségben vannak, és a felületi feszültség révén a vízmolekulák a közetben messzire tudnak áramlani. A hasonló jelenség miatt az eredményeket összehasonlíthottuk egymással.

A kapilláris vízfelvétel eredményéből szerkesztett görbék a 32. ábrán láthatók. A bal oldali függőleges tengely mutatja az 1 cm<sup>2</sup> felületen cm<sup>3</sup>-ben felvett víz mennyiségét, a jobb oldali tengely a vízfelvétel mértékét V%-ban. Mindkét vízfelvételi ábrázolásnál a vízszintes tengely négyzetgyök idő (másodperc). A C1 számú próbatest magassága közel kétszer akkora (19cm), mint a C2 és C3 próbatestek magassága (10cm). A C1 átmérője kb. 40mm volt, míg a C2 és C3 próbatesté 50mm. A 32. ábrán a folytonos vonalak mutatják az 1 cm<sup>2</sup> felülethez tartozó kapilláris vízfelvétel eredményeit, a szaggatott vonalak a vízfelvételt V%-ban.

A C1 próbatest keskenyebb, mint a többi, ezért ez a minta később érte el a maximális vízfelvételi sebesség értéket, az ábra eleje laposabb, mint a másik kettő. Ennek ellenére a maximális vízfelvétel cm<sup>3</sup>/cm<sup>2</sup>-ben mind a 3 mintánál közel azonos, 2-2,4 cm<sup>3</sup>/cm<sup>2</sup>. Ha a vízfelvételt V%-ban ábrázoljuk, akkor azt látjuk, hogy a C2 és C3 minta kapilláris úton (29V% és 31 V% közt vett fel vizet. Korábban említettük, hogy a durva mészkő porozitása 30% körüli, a 35%-ot is elérheti. Tehát ez a 2 próbatest majdnem teljesen telítődött ezzel a vizsgálattal. A C1-es próbatest nem telítődött annyira. Itt a vízfelvétel maximuma 15 V% volt. Mint említettük

ennek a próbatestnek a magassága kétszerese, és az átmérője kisebb volt, mint a C2, C3 próbatesteké. A 40mm átmérőjű alapterület nem volt elegendő ahhoz, hogy 19cm magasságig kapilláris úton feltöltjön a kőzet, a próbatest felületén a száradás hatása jelentős volt a relatív nagy felület miatt. Elmondhatjuk ezek alapján, hogy a durva mészkő kapilláris vízfelvétellel gyorsan, nagy mennyiségű vizet képes magába raktározni, akár feltöltődéshez közeli állapot is kialakulhat anélkül, hogy a kőzet teljesen vízbe merülne, vagy nyomás (pl. szélnyomás) alá kerülne.



32. ábra: Kapilláris vízfelvétel eredményei

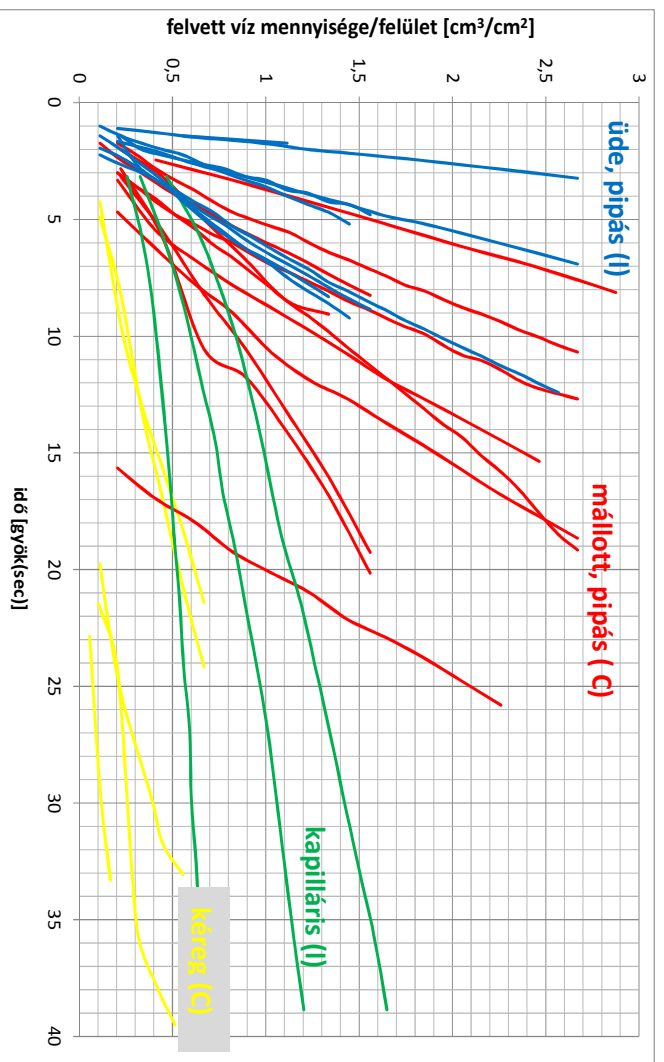
A kapilláris vízfelvétel és a pipás vízbeszívás eredményeiből kitűnik, hogy a kőzet károsodása és vízfelvételi tulajdonságai közt szoros összefüggés van (33. ábra). Ebben az ábrában a pipás vízbeszívás eredményei mellett a kapilláris vízfelvétel méréséből szerkesztett görbék (C1, C2, C3 jelű) első felét, az úgynevezett telítési szakasz elejét, (240s mérési időig) is láthatjuk. Ebben az időtartományban a kapilláris vízfelszívásnál sem feltöltődtek még a pórusok vízzel, így hasonló a víz áramlása a kőzetben a pipás vízfelvételben tapasztalhatóhoz.

A K\_06 jelű mérések a Citadellán végzett helyszíni pipás vízbeszívás eredményeket, a C-vel jelölt mérések az úde kőzeten mért, kapilláris vízfelszívással kapott, laboratóriumi mérési eredményeket mutatják. Az ugyanazon kővön mért mérési eredmények ábrázolása azonos színnel történt. A pipás vízfelszívást két átmérőjű Karsten pipával mértük, egy 8,6 mm (P1 jelű mérések) és egy 11,7 mm átmérőjűvel (P2 jelű mérések). A pipák alsó átmérője mindkét esetben



25.8mm volt. A grafikonon a meredekségük alapján, egyértelműen elkülöníthető négy különböző görbecsoport, amelyeket különböző színnel is jelöltük: A középső részen, zöld színnel jelölve helyezkednek el a laboratóriumban, üde kőzeteken végzett kapilláris vízbeszívási kísérletek eredményei (C1, C2, C3, zöld vonal 33. ábra). Jól megfigyelhető, hogy az üde kőzetek kapilláris vízfelvétele 240s alatt, 7-1,7 cm<sup>3</sup>/cm<sup>2</sup> közé esik. Üde kőtömörökön mért pipás vízfelszívás eredményeit két vonalak jelölik. Szemmel látható a vízfelvételi sebesség- különbség. Pipás vízfelszívás vizsgálatakor a kőzetfelszínbe víznyomás alatt áramlik be a víz, ezért gyorsabb a vízfelvétel. Ez a jelenség lép fel szeles, esős napokon, amikor a szélnek kitett felületekre szélnyomás is hat.

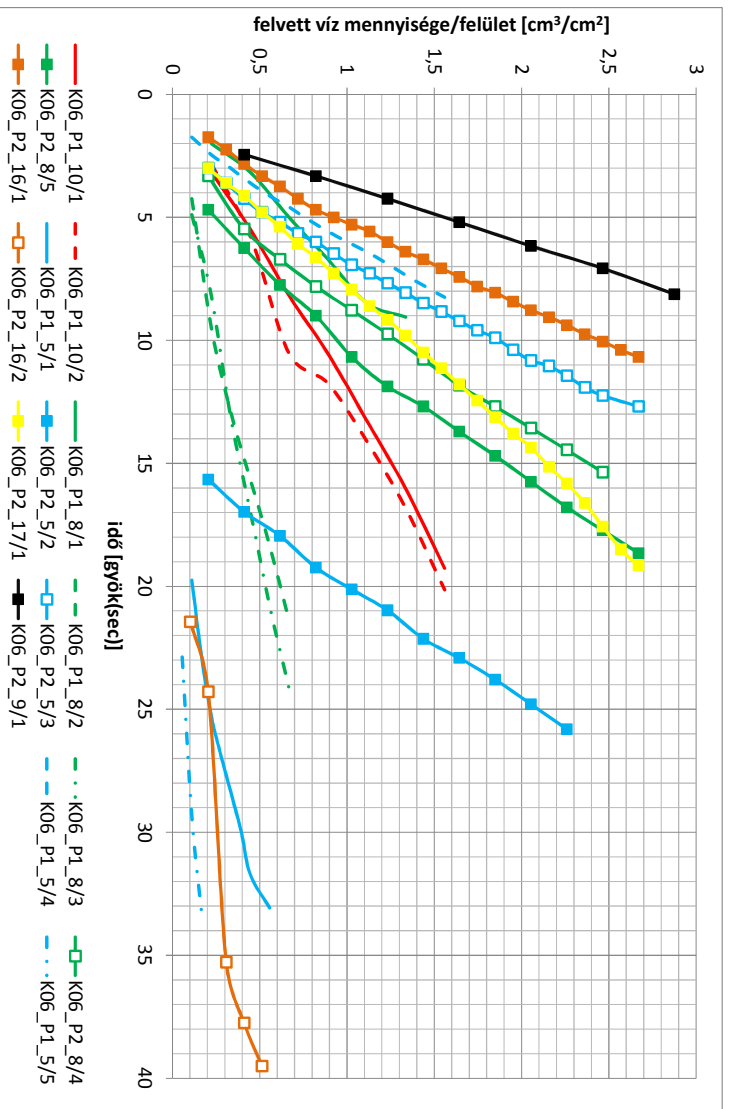
A két másik csoportba tartoznak a kemény, cementált, tömör kéregkehez (sárga vonalak) és a levált kéreg mögötti, fellazult mállott kőanyaghoz (piros vonalak) tartozó mérési eredmények. Utóbbi vízfelvétele megközelíti az üde kőzetét. A kéreg tömörségi fokától függően csökken a görbék meredeksége, mert a kéregképződés során kalcit oldódik ki a felszín közeli régióból, ebből alakul ki a felszínre vándorolva kémiai reakció hatására a gipsz és másodlagos kalcitkéreg. A kéreg a felszínen annak tömörségi fokától függően gátolja a víz



33. ábra: Pipás és kapilláris vízbeszívás eredményei mállott és üde, durva mészkövön (I- labor mérés, C- helyszíni mérés)

beszívását. Ezt a jelenséget láthatjuk a 34. ábra K06\_P2\_5/3, K06\_P1\_5/4, K06\_P1\_8/1, K06\_P2\_8/4, K06\_P2\_8/5, K06\_P2\_9/1, K06\_P2\_16/1, K06\_P2\_17/1 görbéin.

A K06\_P1\_16/2, K06\_P1\_5/1, K06\_P1\_5/5 görbék a laboratóriumi, üde kőzeteken mért eredményeket mutató görbék alatt helyezkednek el. Ezeken a felületeken tömött fekete (16-os tömb) vagy tömött, cementált fehér réteget (5-ös tömb) figyeltünk meg. A víz nem, vagy csak nehezen tudott keresztültörni a kérégeken, még 6 perc után is csak 2-3cm<sup>3</sup> víz jutott be a felületbe (34. ábra). Ezek a kérégek zárt, még összefüggő szerkezetük miatt nem engedték át a vizet. A K06\_P2\_5/2-es diagram eleje a tömör kéréghez hasonló, míg vége a fellazult kőzetfelszínhez hasonló viselkedést mutat. A víz kezdetben nehezen jutott át a vékony kérégen, miután a vékony kérég átnedvesedett, a vízfelvitel sebessége a már fellazult kőzetanyagban megfigyelhetőének megfelelő volt.



34. ábra: Pipás vizbeszívás eredményei a Citadella mállott kőzetanyagán

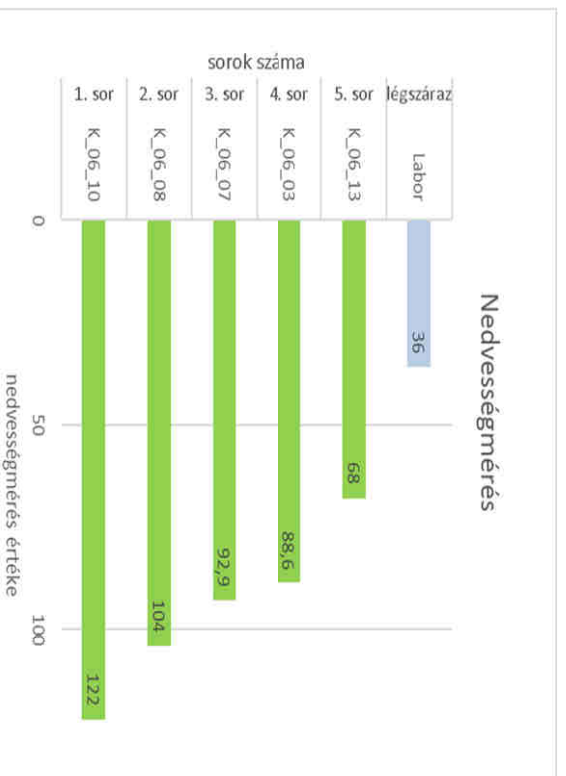
A K06\_P1\_10/1 és K06\_P2\_10/2 mérés eredménye az üde és nagyon mállott felülethez tartozó görbék közé esik. Ezeken a tömbökön is fekete kérég található. A vizsgálatból szerkesztett görbe alakjára magyarázatot ad a kő felületének megfigyelése. Ezen jól látható, hogy a rajta lévő fekete kérég helyenként pikkelyes, töredezett, ezért itt a víz nagyobb mennyiségben tud beáramlani a mészkőbe, mint a mellette lévő kemény fekete kérégen.

A K06\_P1\_8/2 és K06\_P1\_8/3 mérésből kapott görbe meredeksége jóval kisebb az ugyanezen a kővön mért többi három mérésénél (K06\_P1\_8/1, K06\_P2\_8/4, K06\_P2\_8/5). Az építőkö egyik oldalán nagyon erősen, míg a másik oldalán kevésbé cementált fehér kérég található (34. ábra).

A götbék jelöléséből és színéből megfigyelhető, hogy egy kötőmbön belül találtunk olyan területeket, ahol a kéreg korábbi leválása miatt már fellazult kőzetanyag, és még tömör, zárt kéreg is megtalálható (5-ös és 16-os tömbök). Az 5-ös tömbön sikerült azon az átmeneti helyen is mérni, ahol a kéreg ellenére a vízfelvétel a kezdeti nehézség után felgyorsult, és a mállott mészkőnek megfelelő volt. A pipák közti méretkülönbség a vízfelvétel sebességét nem befolyásolta, vékony és vastagabb pipával mért eredmények megtalálhatók a lassú és a gyors vízfelvételhez tartozó csoportokban egyaránt. A mérés kivitelezésében viszont számottevő különbséget jelentett, hogy a vastagabb pipán a vízbeszívást könnyebb volt leolvassni, mert az egy cm-hez tartozó vízmennyiség nagyobb volt.

## 6.2 Nedvességmérés

A K\_06 falszakaszon megvizsgáltuk a kőzetek nedvességtartalmát. Megállapítottuk, hogy kapilláris úton milyen magasságba emelkedik a víz. A 35. ábrán a kötőmbökön az első öt sorban mért nedvességtartalmakat a mellékletben láthatjuk. Az egyes sorokban lévő nedvességértékek is egyezést mutatnak, erre jó példa a K06\_1 és a K06\_10 köveken mért nedvességtartalom, az előbbi tömbön 94 utóbbin 93 értéket olvastunk le. Mindkét tömbkö a talajsztintól számított

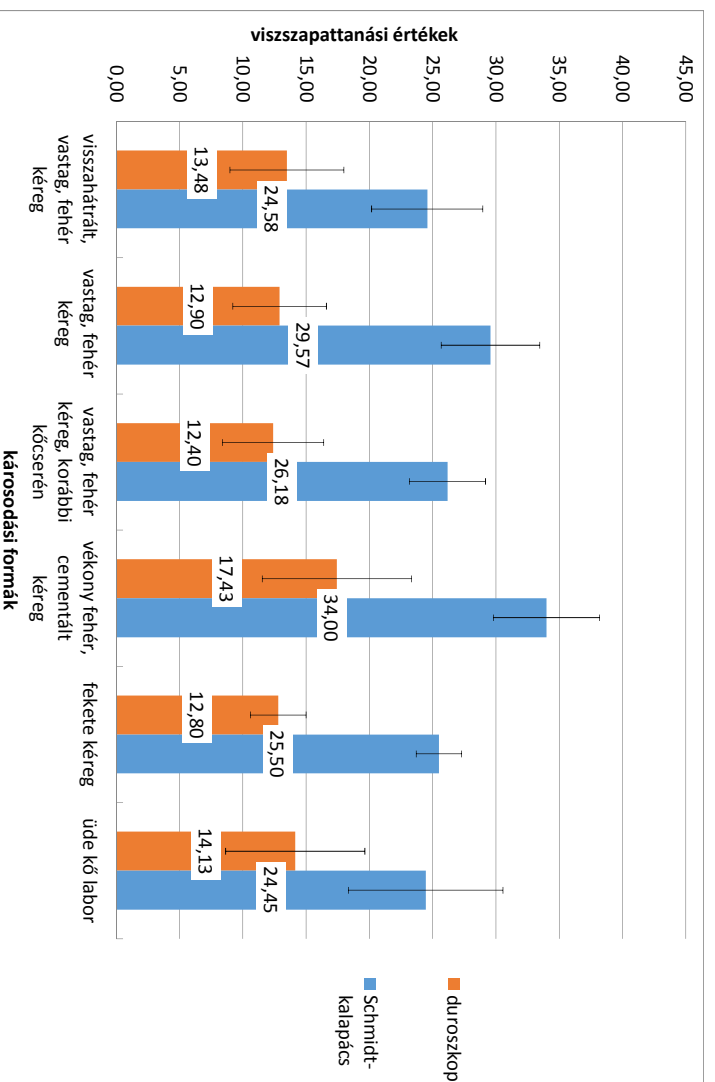


35. ábra Nedvességértékek sorok szerint

harmadik sorban helyezkedik el. Az 35. ábrán összefoglaltuk az általunk mért nedvesség értékeket, a földtől azonos magasságban lévő kötőmbök nedvesség értékeit átlagolva. A vizsgált kövekből megszerkesztett diagramról egyértelműen leolvasható, hogy a falban lévő kötőmbök a talaj közelében nedvesebbek, felfelé haladva a tömbök víztartalma csökken. A helyszínen mért nedvességi értékek mellett, kontrollként megvizsgáltuk a laboratóriumban lévő minták nedvességét légszáraz állapotban, ennek értéke átlagosan 36 volt. Az ötödik sor (soronként 30cm-es tömbmagassággal számolva 150cm-re) a talaj felett) értékei megközelítőleg kétszer akkora, mint a laboratóriumi, légszáraz állapotú tömbökön mért értékek, tehát a talajtól 150cm-re még jelentős a kötőmbök nedvességtartalma.

### 6.3 Schmidt-kalapács és duroszkóp mérési eredmények

A Schmidt-kalapács és duroszkóp visszapattnási értékekből (36. ábra) kitűnik, hogy a vékony, cementált, fehér kéreg visszapattnási értékei (duroszkóp 17, Schmidt-kalapács 35) sokkal nagyobbak a többi mállott felület és az eredeti, üde kőzet értékeinél. Ez azzal a jelenséggel magyarázható, hogy a felületen a kalcit visszaoldódik, majd kicsapódik újra, és ez a porusokat eltömi, egy kemény, tömött réteget hozva létre. A többi kéreg duroszkópos eredményei közt nincs jelentős különbség (12,4 és 13,5 közti átlagok). A vastag fehér kéreg Schmidt-kalapács visszapattnás értéke ugrik ki még a sorból (29,5), a többi kéreg 24,5 és 26,1-  
es átlagértékei közül.



36. ábra: Duroszkópos és Schmidt-kalapács eredmények

Meglepetésre a laboratóriumban, üde kőzetben mért visszapattnási értékek csak a középsemű (T1, Schmidt-kalapács: 32) tömb esetén közelítette meg a legkeményebb mállott felület értékét (3. táblázat). A többi esetben ezek a kőzetek puhábbnak bizonyultak a Ciadella mállott, kérgesedett felületeinél.

A Schmidt-kalapáccsal végzett mérésekből kapott visszapattnási értékekből két különböző módszer felhasználásával tudtuk megbecsülni a beépített és üde kőzetek egyirányú nyomószilárdságát. Az átszámítást az 5.4 fejezetben leírtak szerint végeztük. A Fodor- Kleb [12] által publikált táblázatból látjuk, hogy egy Sós-kúttról származó kőanyag nyomószilárdsági értéke igen tág határok között mozoghat (4-97 MPa). Török, Pápay [11] Sós-kúttról származó kőveken végzett légszáras egyirányú nyomószilárdság vizsgálatának eredménye durva szemű esetben 2,64 MPa, középszemű esetén 15,41 MPa és 11,63 MPa, finomszemű esetén 6,29 MPa volt. Az általunk a laboratóriumban Schmidt-kalapáccsal megvizsgált 2 db durva szemű kőtömbön (T2, T3) mért visszapattnás értékek Gálós [20] képletével átszámítva 13 MPa és 12 MPa, középszemű (T1) tömbön mért értékek 24 MPa, finomszemű (T4) tömbön 19 MPa egyirányú nyomószilárdságot eredményeznek (3. táblázat). A Gálós, Bögöly [19] regressziós összefüggés alapján, ugyanezen értékek a középszemű tömbön 16MPa, a durvaszemű tömbökön 10 és 9MPa míg a finomszemű tömbön 14MPa-ra számolhatók át.

3. táblázat: Schmidt kalapács és duruskóp eredmények málított és üde durva mészkő felületeken

	duruskóp visszapattnás átlag	duruskóp szórás	Schmidt-kalapács átlag	Schmidt-kalapács szórás	Gálós (2003) képlettel Schmidt-kalapács átszámítva nyomószilárdságra MPa	Gálós, Bögöly (2016) Schmidt-kalapács átszámítva nyomószilárdságra MPa
visszahírtált, vastag, fehér kőreg	13	5	25	4	17	12
vastag, fehér kőreg	13	4	30	4	21	15
vastag, fehér kőreg, korábbi kőcsőserén	12	4	26	3	18	13
vékonyfehér, cementált kőreg	17	6	34	4	25	17
fekete kőreg	13	2	26	2	18	13
üde kőzet labor átlag	14	6	24	6	17	12
T1. tömb, középszemű	17	2	32	2	24	16
T2. tömb, durvaszemű	15	8	20	4	13	10
T3. tömb, durvaszemű	14	5	19	2	12	9
T4. tömb, finomszemű	11	4	27	2	19	14

A laboratóriumban megvizsgált kőtömbök Schmidt-kalapács visszapattnás értékei a Török, Pápay [11] által publikált nyomószilárdsági tendenciákhoz hasonlítanak. Legkisebb szilárdságú a durvaszemű, legnagyobb szilárdságú a középszemű típus, a finomszemű típus szilárdsága az előző kettő közt van. A Török-Pápay [11] által mért nyomószilárdsági értékekhez az általunk a Gálós, Bögöly [20] összefüggéssel számolt nyomószilárdsági értékek közelítenek jobban, de a durvaszemű ooidos mészkő Török-Pápay által mért 2,64 MPa értékéhez képes az általunk átszámított szilárdság mintegy ötszörös.

A megvizsgált üde, ooidos mészkő kőzetek Schmidt-kalapács visszapattnási értékei, és ezzel a nyomószilárdságai közül csak a középszemű változat éri el a Citadellán mért károsodott

kötőmök szilárdsági értékeit, de a többi típus visszapattanási értékei alulmaradnak azokhoz képest. Ez arra utal, hogy a napjainkban bányászható ooidos, durva mészkő rétegek szilárdsága, nem minden esetben éri el a Ciriadella építésénél felhasznált eredeti kőanyag szilárdságát.

#### 6.4 Károsodások statisztikai összehasonlítása

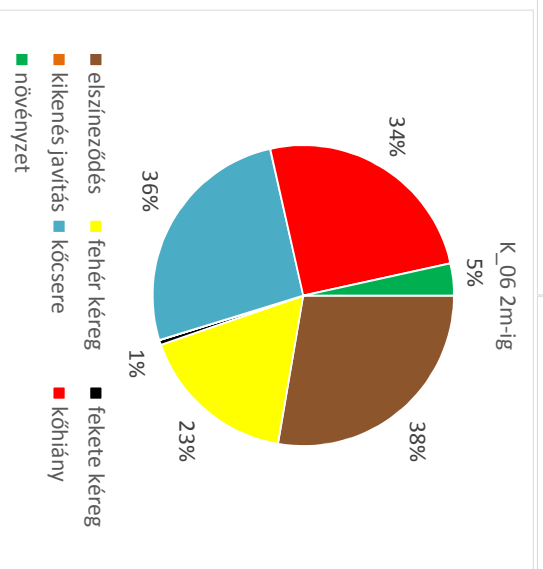
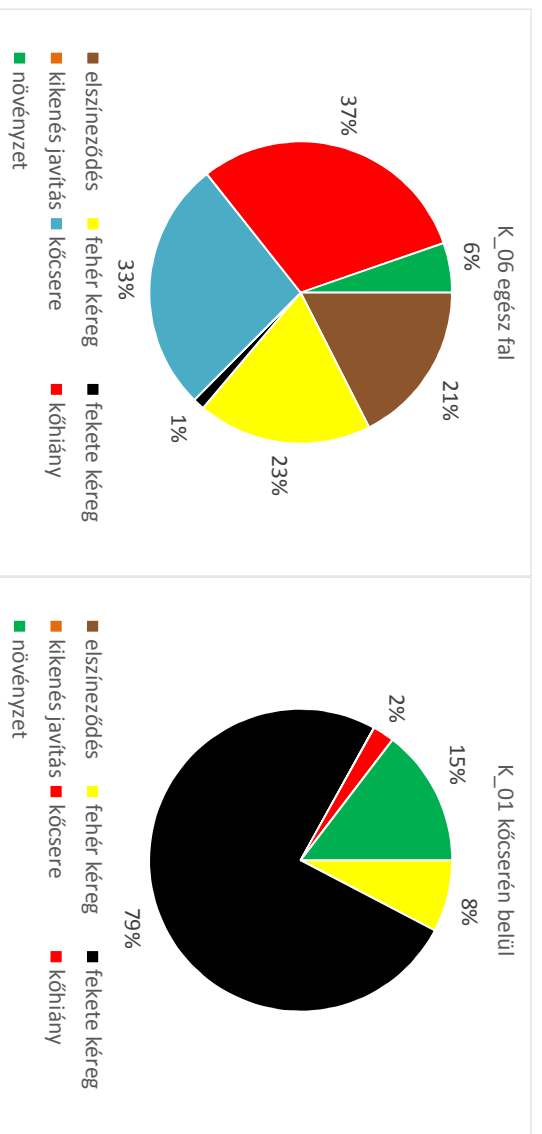
Három külső falfelületet választottunk ki ehhez a vizsgálathoz. Az északi oldalon lévő K\_01-es észak-nyugati, a K\_06-os keleti fekvésű, valamint a déli oldalon lévő, déli fekvésű K\_18-as falat. A helyszíni kőzetkárosodási térkép rajzolása után AutoCad-ben digitalizáltuk a károsodási térképeket. Ezek után megmértük a fal felületét, szétválogattuk a károsodási formákat és megmértük, hogy milyen arányban fordulnak elő a károsodások ezeken a falakon. Külön vizsgáltuk a talajtól 2 méteres magasságig a károsodásokat. Összehasonlítottuk a teljes falfelületen lévő eredeti kőzetanyag és a falakon előforduló korábban kicserélt kötőmőkön keletkezett károsodások megjelenési gyakoriságát.

#### 4. táblázat: Károsodási jelenségek gyakorisága a K\_01, K\_06 és K\_18 falazatokon

	elszíneződés	fehér kéreg	fekete kéreg	kikénés javítás	kőcsere	kőhiány	növényzet	összesen	felkérés
K_01	egész fal m <sup>2</sup>	13	79	173	0	18	67	16	385
	%	3%	20%	45%	0%	5%	17%	4%	
	2m-ig m <sup>2</sup>	1	38	3	0	1	6	19	65,24
	%	2%	58%	5%	0%	2%	9%	29%	
K_06	kőcsereán belüli m <sup>2</sup>	0	1	14	0	-	0	3	18
	%	0%	8%	79%	0%	-	2%	15%	
	egész fal m <sup>2</sup>	26	27	2	0	40	45	8	122
	%	21%	23%	1%	0%	33%	37%	6%	
K_18	2m-ig m <sup>2</sup>	10	6	0	0	10	9	1	27
	%	38%	23%	1%	0%	36%	34%	5%	
	kőcsereán belüli m <sup>2</sup>	24	3	0	0	-	0,1	0,3	39,89
	%	60%	8%	0%	0%	-	0%	1%	
D	egész fal m <sup>2</sup>	18	70	1	0	33	54	10	160
	%	11%	44%	0%	0%	20%	34%	6%	
	2m-ig m <sup>2</sup>	0	29	0	1	1	9	9	64
	%	0%	45%	0%	1%	1%	14%	14%	
K	kőcsereán belüli m <sup>2</sup>	11	9	1	0	-	4	1	33
	%	33%	27%	2%	0%	-	11%	4%	

A K\_01-es fal az északi falon, a Duna menti oldalon található, a Ciriadella bejárata ezen a falszakaszon helyezkedik el. Fekete kéreg borítja a fal 45%-át, fehér kéreg a fal 20%-át. 17%-os a kőhiány, és 3-4-5%-ban van még a falon elszíneződés, növényzet és kőcsere (4. táblázat, 37. ábra, 38. ábra).

A cserélt kőanyagon a fekete kéreg aránya igen nagy, közel 80%-os, 15% növényi betelepülés, 8% fehér kéreg és egy kevés kőhiány (2%) tapasztalható még. A fekete kérges kőzetek a falszakasz felső felében, 2m-es magasság felett helyezkednek el. 2m-es magasság alatt, a bejáratától jobbra visszabontott épület nyomai láthatók. A többi fallal ellentétben ezen a falon azt figyelhetjük meg, hogy a fal alsó, körülbelül 3 méterét zömében fehér kéreg fedi, a fekete kéreg a falszakasz felső felében jelenik meg, ott viszont majdnem a teljes felület felét



37. ábra: K\_01 falszakasz károsodásai

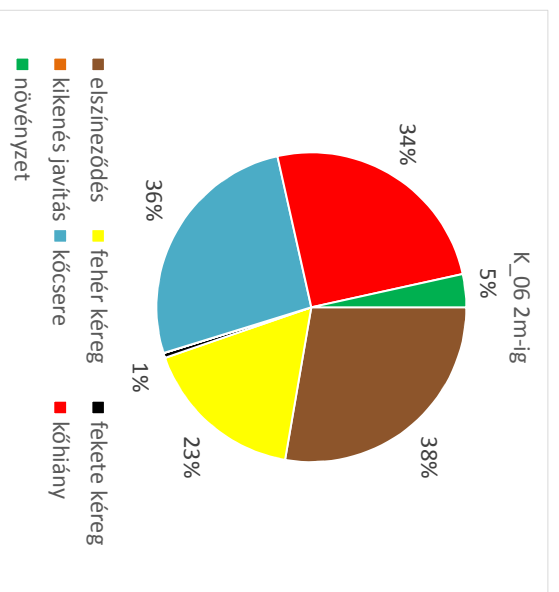
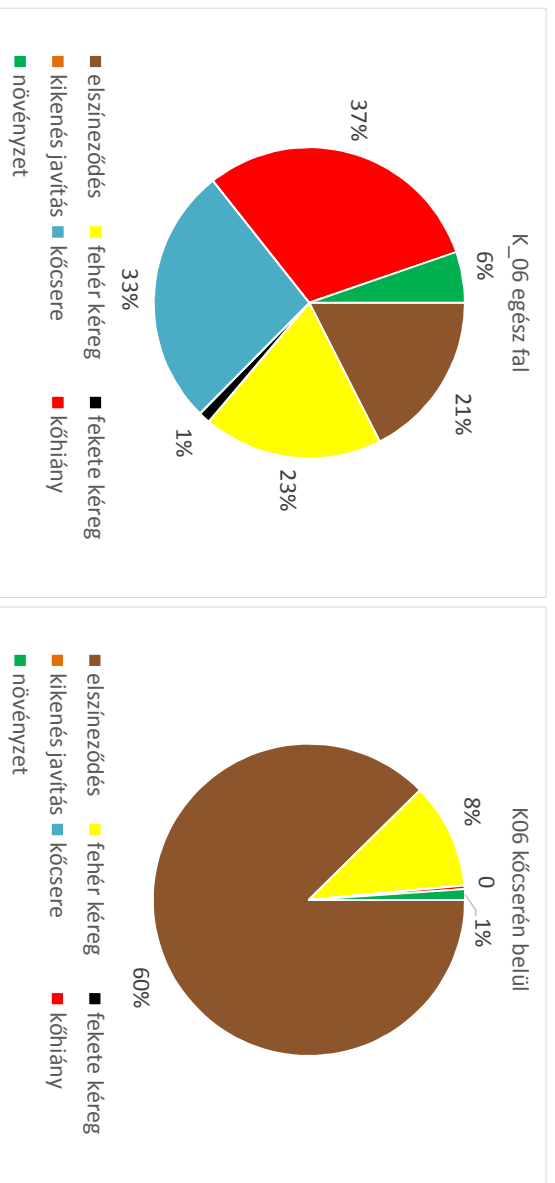
borítja (38. ábra). A 2 méter alatt lévő károsodásokat vizsgálva kitűnik, hogy a falon a fehér kéreg mellett a növényzet aránya igen magas, 29%. Északi oldal révén nagy felületet fed moha a falon, a talajhoz közeli nedvesebb köveken és a durván megmunkált ablak boltövein.



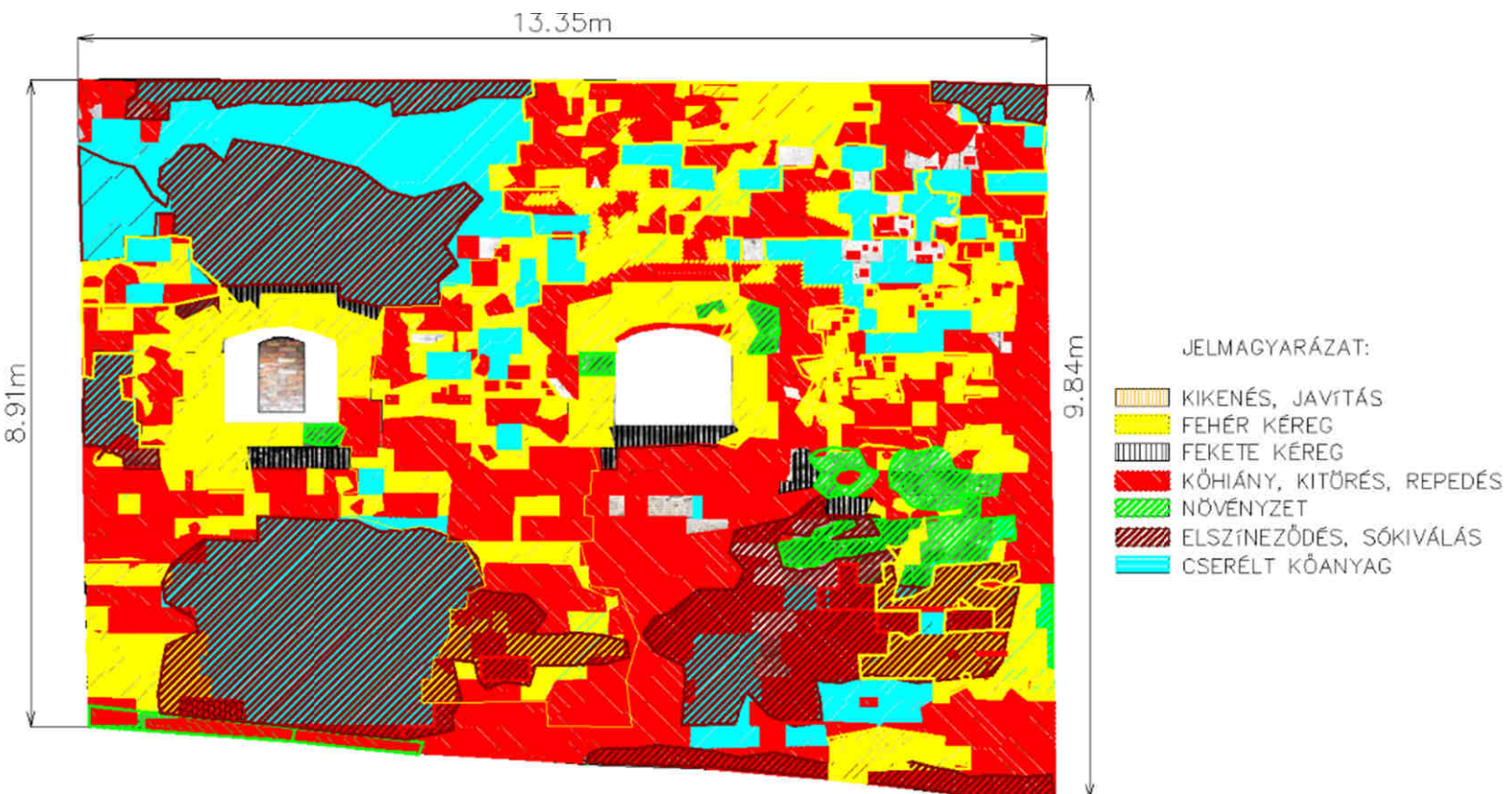
38. ábra: K\_01-es falszakasz kőzetkárosodási térképe (lekicsinyített rajz, A/3 formdtumban K\_01 falszakasz károsodásai, a mellékletben található)



A keleti oldalon lévő K\_06-os falon vehetjük észre a legnagyobb mértékű kőhiányt (37%) a három kiemelt falszakasz közül (39. ábra). 33%-ban látható kicserélt kőzet, 21-23%-ban elszíneződés és fehér kéreg, 6% növényzet és egy picit fekete kéreg (1%). Megnéztük ezen a falon, hogy a talajtól 2 méterig milyen károsodások láthatók. Legnagyobb arányban az elszíneződés (38%), a kőcsere (36%) és a kőhiány (34%) fordul elő, megjegyezve, hogy az elszíneződés nagy része a cserélt kőanyaggon található. 23%-ban látható fehér kéreg, 1 %-ban fekete kéreg. Ezek aránya a teljes falszakaszon is ugyanennyi. Ezen kívül még van 5% növényzet . A teljes falfelületen a kőcserek túlnyomó többségén, 59%-án elszíneződés látható, 8%-ban fehér kéreg található rajta. A többi károsodási forma nincs vagy nem számottevő mértékben van jelen a cserélt kőömbökön. A kőcsere körülbelül 30%-a üde állapotú (40. ábra).

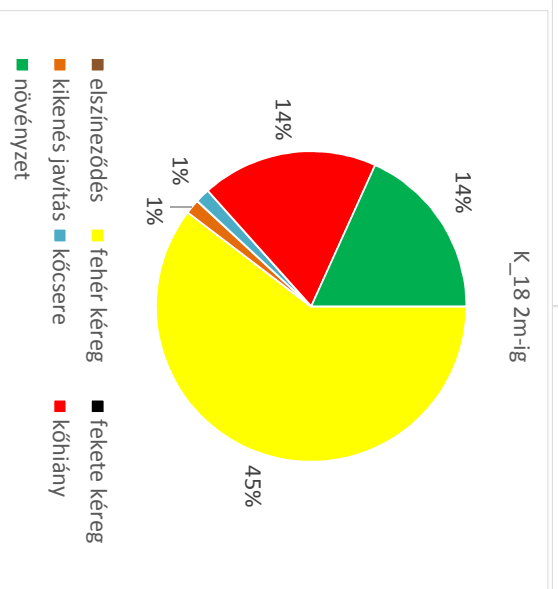
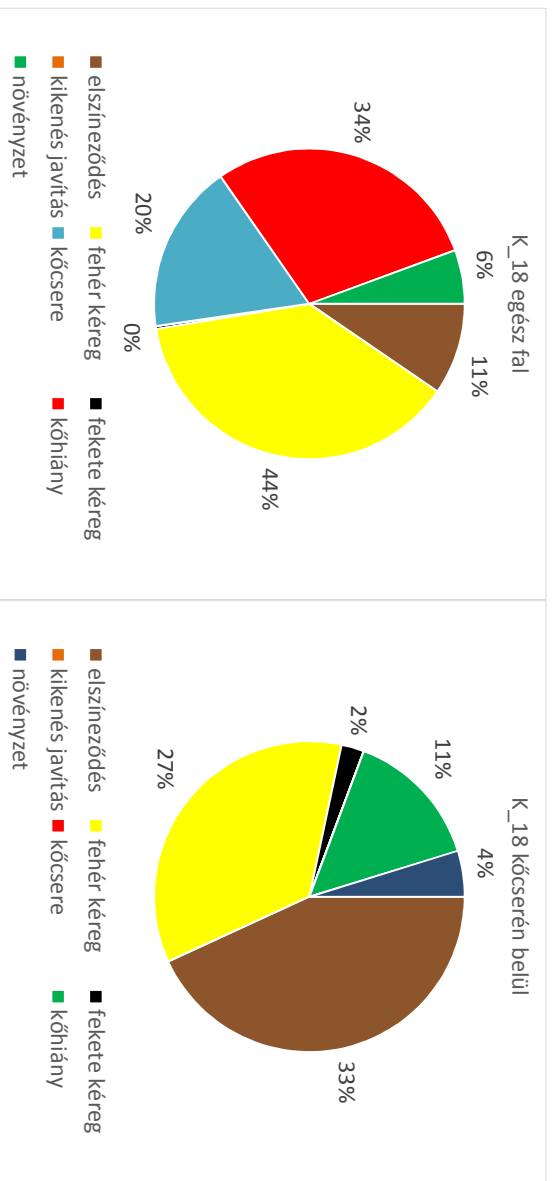


39. ábra: K\_06 falszakasz károsodásai



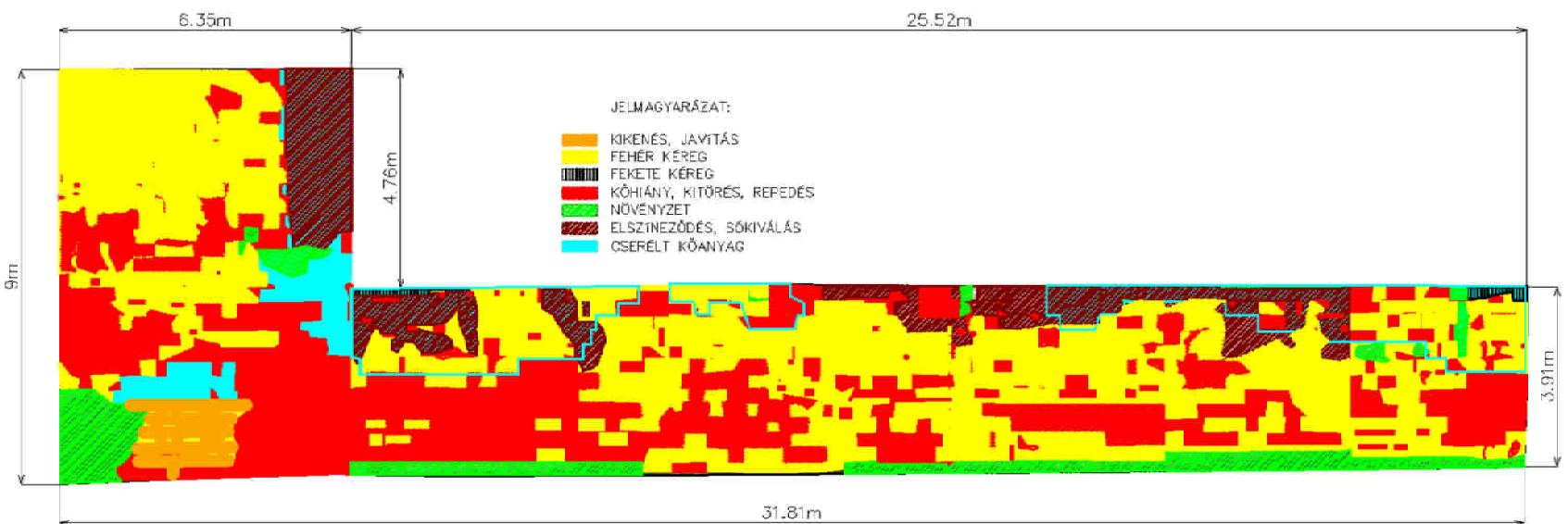
40. ábra: K\_06-os falszakasz kőzetkárosodási térképe, É-i oldal, K-i tájolás (lekicsinyített rajz, A/3 formátumban K\_06 falszakasz károsodásai, a mellékletben található)

A déli oldalon található K\_18-as falszakaszon 44% fehér kéreg található, fekete kéreg nincsen rajta. 34%-os a kőhiány, 11% az elszíneződött felület, a kőzet 20%-át pedig korábban kicsérték (41. ábra). Ezen a falon is található növények, ez a fal területének 6%-át teszi ki. 2 méterig vizsgálva a kőzetet azt tapasztaljuk, hogy a teljes felülethez hasonló arányban fordul elő fehér kéreg (45%), kőhiányból (14%) és kőcsereből (1%) sokkal kisebb az arány, mint a teljes felületen. Ezen az alsó sávon található a növényzet nagy része, az alsó 2m 14%-át érinti ez (42. ábra).



41. ábra: K\_18 falszakasz károsodásai

A teljes falfelületen és a cserélt kőzeteken található károsodási formák arányát vizsgálva, a K\_18-as falon megállapítottuk, hogy a cserélt kötömbökön a fehér kéreg aránya kisebb (27%), de az elszíneződés aránya jóval nagyobb (33%), mint az egész falszakaszon mért károsodási arányok. A kőhiány (11%) és a növényzet (4%) kevesebb.



42. ábra: K18-as falszakasz kőzetkárosodási térképe (lekcinyített rajz, A/3 formátumban K\_18 falszakasz károsodásai, a mellékletben található)

Az uralkodó szélirány és emiatt a csapóeső is északnyugati, ezért keletkezett a K\_01-es falon nagy arányban fekete kéreg, míg a széltől védettebb oldalakon fehér kéreg található. A K\_01-es falszakasz alsó része nem károsodott jelentősen, ezen a területen fehér kéreg figyelhetünk meg. Ezen a falszakaszon a korábbi hozzáépítés nyomai a második



*43. ábra Panoptikum helye a bejárat mellett [22]*

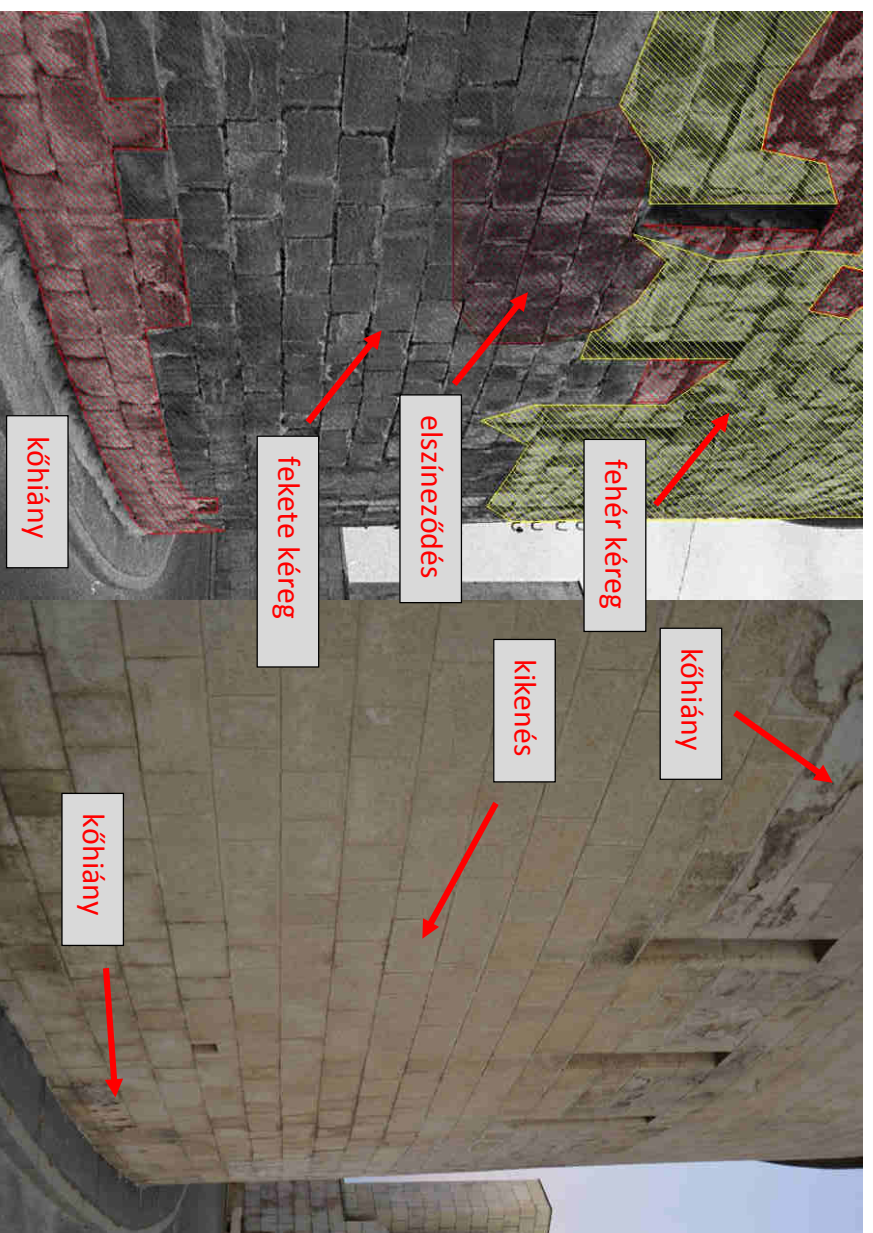
világháborúban háromszintes légvédelmi bunkerként szolgáló épületrészben berendezett Panoptikum és bunker múzeum (43. ábra) azóta lebontott bejáratát mutatják [22]. Vizsgálatainkból megállapíthatjuk, hogy az északi, északnyugati oldalon (K\_01-es fal, 38. ábra), azaz az árnyékosabb helyeken kevesebb kőtömb cserére volt eddig szükség, mint a napos keleti és déli tájolású falszakaszokon. A keleti oldalon sok a kicserélt kőzet, a kövhány, valamint sok a fehér kéreg is (K\_06-os fal, 40. ábra). Délen közepes mennyiségű kicserélt kőzet van, s itt is sok a kövhány meg a fehér kéreg (K\_18-as fal, 42. ábra). A D-i és K-i falszakaszokon a nap sütötte órák száma nagyobb, ezért a napi hőingás nagyobb, s ez a téli periódusban a nagyon hideg napokon is okozhat ezeken a részeken olvadást. A nyári hónapokban pedig a kőtömbök felülete jelentősen felmelegedhet. A hőtágulás és a hőingás hatására a kőzet szövete gyorsabban károsodik.

A cserélt kőtömbökön tapasztalható eredmények azt mutatják, hogy a kőzet károsodása elszíneződéssel kezdődik, utána a falazat és kőtömb elhelyezkedésétől függően fehér vagy fekete kéreg alakul ki. A kérgesedés előrehaladtával, azok leválásával kövhány, felülethátrálás jön létre.

### 7. Károsodott felületek összehasonlítása a régi állapottal

Ahhoz, hogy nagyságrendi képet kapjunk a falakon több évtized alatt lejátszódó folyamatokról, megvizsgáltunk néhány a [www.fortepan.hu](http://www.fortepan.hu)-ról származó a Ciadellát ábrázoló nagy felbontású fényképet. A portálról származó minden fényképek megtalálható a készítés éve. Egy a helyszínen tett séta során sikerült a régi képeken található falszakaszok többségének az azonosítása. A fényképek sajnos fekete- fehérek, de nagy felbontásúak. Azonban több esetben is egyértelműen elkülöníthetők a fal felületén megjelenő kőzethiányok, fekete és fehér kérgék valamint az elszíneződések.

A dolgozatban a [www.fortepan.hu](http://www.fortepan.hu)-ról származó 55005 és 50186 valamint az 51898 számú képen szereplő, azonosított falakat dolgoztuk fel. Természetesen a két állapot statisztikai összehasonlítása nem lehetséges, de a képek alapján megállapítható a kőzetanyag pusztulásának előrehaladása. Megfigyelhetők a legjellemzőbb területeken lévő károsodások is. Ilyen például a lábazati részen a víz kapilláris emelkedése miatt bekövetkező folyamatos és nagymértékű kőzetpusztulás, hátrálás, ugyanilyen továbbá az ablakok díszítőköveinek, éleinek letöredezése, visszaoldódása, az ablak és a fal tetején lévő párkányok alatt megjelenő fekete kéreg, elszíneződés. Ezeken túl megfigyelhető az is, hogy a belővések okozta hatalmas kráterek a

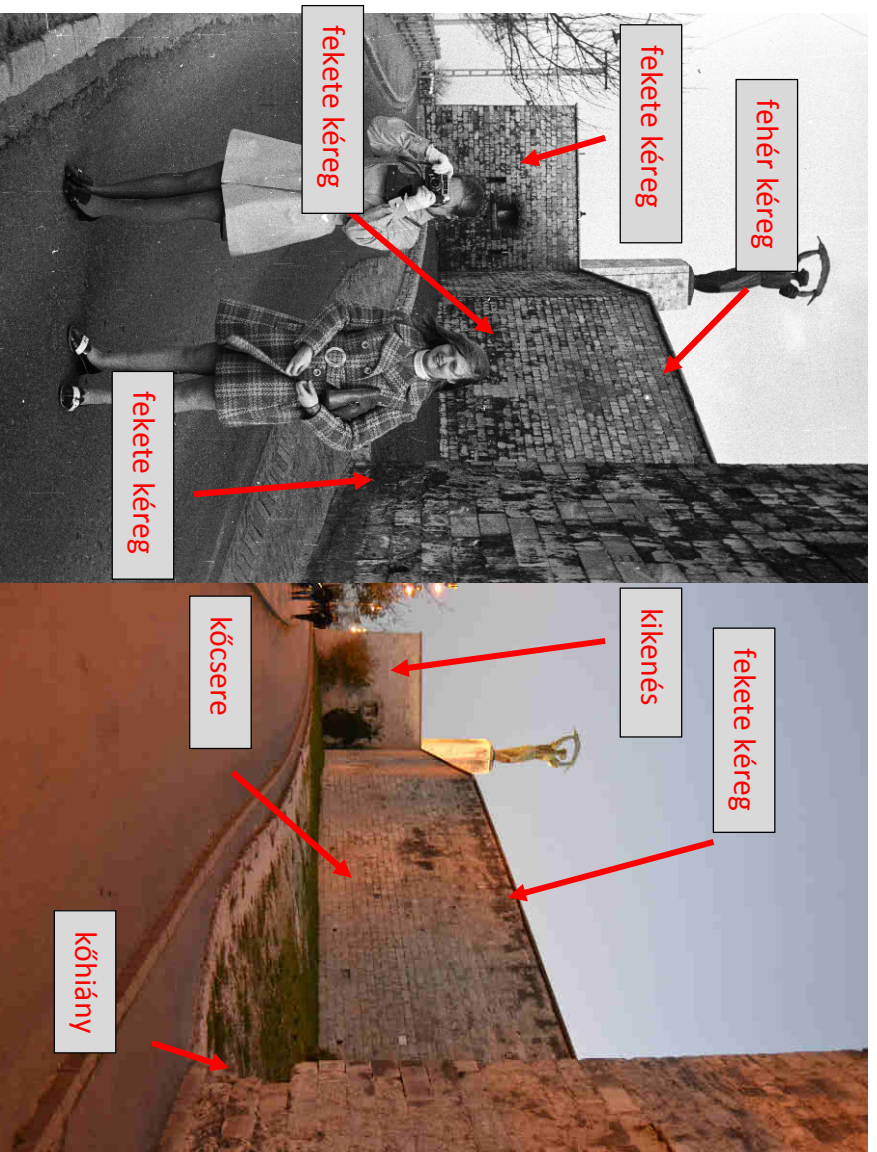


44. ábra A Ciadelláról 1988- ban (bal) és 2016-ban készült képek (jobb)

falban a mai károsodási térképeinken már kőcseréként jelennek meg. Így meg tudjuk becsülni a beépített kőzet és az azon keletkezett kérégek korát.

A 44. ábrán egy a Citadelláról 1988-ban és egy 2016-ban készült képet láthatunk a Szabadság szobor mögött lévő íves falfelületről (K\_101V). A régi fényképre [23] ebben az esetben megközelítően rárajzoltuk az akkor a falon lévő károsodásokat. A fal lábazati részén a kötőmök teljesen visszaoldódtak körülbelül 60-80 cm magasságig. Fellette nagy kiterjedésben fekete kéréget majd fehér kéréget láthatunk. Az ablakok élei lecsorbultak, elkülöníthető volt néhány nagyobb elszíneződés is. A 2016-ban készült fényképen azt látjuk, hogy a teljes falfelületen megtörtént a javítás, a fal rossz állapota és a növekvő turista forgalom miatt. Azonban az is látszik a felvételen, hogy a javítás helyenként lepattozott már a javítás óta.

A 45. ábra képeit összehasonlítva látjuk, hogy a K\_09 falszakaszt felújították és most nagy részét borostyán borítja. A K\_08 és K\_09 falszakaszon a régi állapothoz képest a teljesen tönkrement kőzetek helyén most nagy kiterjedésű kőcserék vannak. A falak mai állapota is rossz, tovább romlott az első kép készítése óta [23]. A K\_06 fal sarkán, ahol 1971-ben még

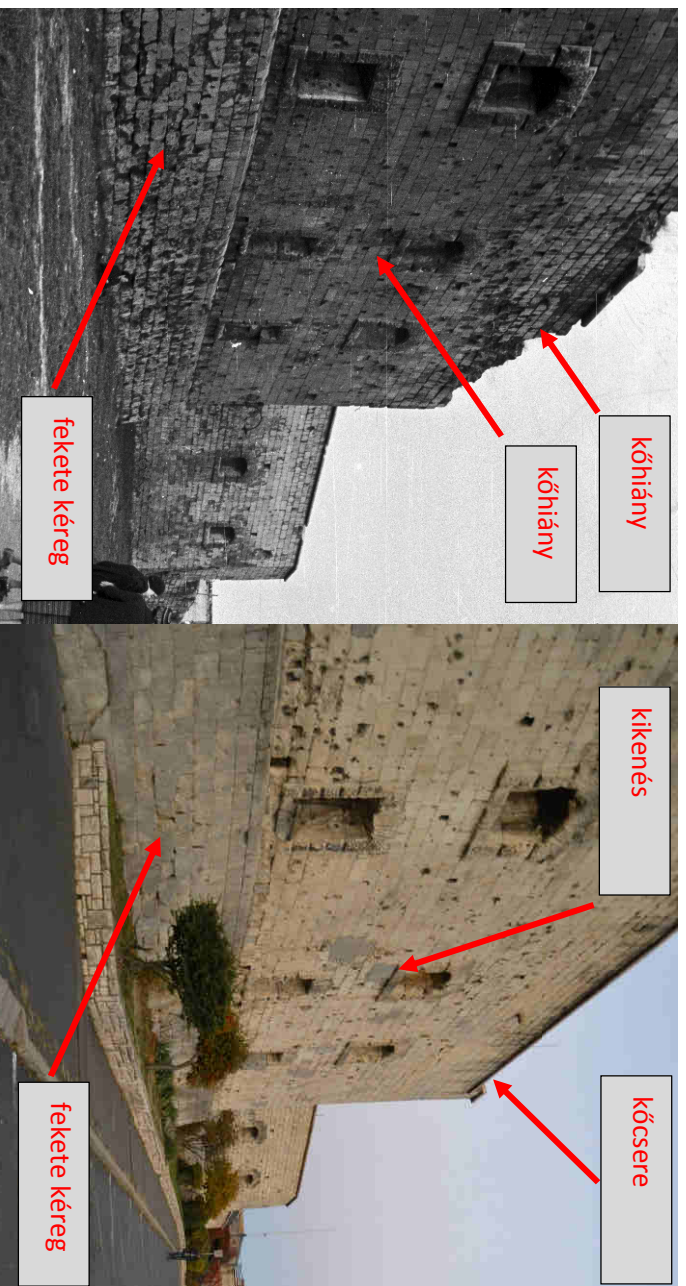


45. ábra K\_07 és K\_09 falszakasz, É-i oldal, 1971-ben (bal) és 2016-ban készült képek (jobb)

fekete kéreg látható a kötőmbökön, mára a kőzetanyag teljesen visszahátrált, több tömbnyi kötőmb hiányzik, itt már statikai problémák is felmerülhetnek.

A harmadik összehasonlítás a déli oldalt mutatja a képen a K\_21D és fal látszik 1953-ban [23] és 2016-ban. A lerobbantott felső éleket köpötlásokkal javították. A többi kőzeten csak egy-két helyen van cementes kikenés, de az eredeti köanyag látható alatta. Mindkét képen a falon megfigyelhetők a belövések nyomai, amiket azóta sem javítottak. A lábazat nagy részét fekete kéreg fedi, egy-két köcsserén kívül 1953-óta sem történt javítás (46.ábra).

A harmadik összehasonlítás a déli oldalt mutatja a képen a K\_21D és fal látszik 1953-ban és 2016-ban. A lerobbantott felső éleket köpötlásokkal javították. A többi kőzeten csak egy-két helyen van cementes kikenés, de az eredeti köanyag látható alatta. Mindkét képen a falon megfigyelhetők a belövések nyomai, amiket azóta sem javítottak. A lábazat nagy részét fekete kéreg fedi, egy-két köcsserén kívül 1953-óta sem történt javítás (46.ábra).



46. ábra K\_21D falszakasz, déli oldal, 1953-ban (bal) és 2016 (jobb)



## 8. Következtetések

A Citadella kőanyagát uralkodóan durva mészkő alkotja, amely az egykori budapesti és Budapest környéki bányákból származik.

A helyszíni vizsgálatok elvégzésével megállapítható volt, hogy a köfület legnagyobb része jelentős károsodást mutat.

A károsodási formák közül a felértékelgetett mintegy 700m<sup>2</sup>-es falszakaszon a leggyakoribbak a közéhiány, a fehér mállási kéreg és fekete mállási kéreg.

A köccserével jellemezhető szakaszokon jelentős arányban (akár 79%) megjelennek a fekete mállási kérgék, ami arra utal, hogy a köccserét követő időszakban is jelentős légszennyezettség volt, ami a fekete mállási kérgék kialakulásához vezetett, akár 60 év alatt is teljesen befeketedett a durva mészkő falazat.

A köfületetek felületi szilárdság mérése alapján a mállási kérgék egy az alapkőzetnél nagyobb visszapatтанási értékű felületet képeznek.

A pipás vízbeszivási kísérletek igazolták, hogy a mállási kéreg jóval kevésbé vízáteresztő, mint a kéreg alatti mállott fellazult és porózus kőzet.

A történeti fényképek és a jelen állapot fényképeinek összehasonlításával jól nyomon követhető a kőzet mállási formáinak változásai.

A kőzetanyag és a fal természetes állapotának megőrzéséhez javasolható beavatkozásként a dokumentált kőhiányokat az eredeti bányahelyükről származó kőzetelemek beépítésével kell pótolni.

Azokon a falelemeken, ahol a kőzetek pusztulása, a felületek hátrálása nem ér el azt a szintet, hogy köccserét kell alkalmazni, ott megfelelő a durva mészkőhöz hasonló tulajdonságú kőkiegészítő anyagokat (pl. restauráló habarcsokat) kell alkalmazni.

A Citadella köelemeinek leromlott állapota miatt minél sürgősebb beavatkozás javasolható, ennek hiányában a kőzetanyag még nagyobb mértékű és látványosabb lepusztulása várható. Az építmény szakszerű helyreállítását sürgeti a már egyébként is meglévő turisztikai vonzereje.

## **Köszönetnyilvánítás**

Köszönettel tartozunk a Deák Zoltánnak (Várgondnokságnak), akitől a kőzetkárosodási térképek alapját képező homlokzati fényképeket kaptuk meg. Köszönjük Pálincás Bálint (BME Geotechnika és Mémökgeológia Tanszék) segítségét a laboratóriumi mérések során.

## Ábra- és táblázatjegyzék

1. ábra: Térképrészlet a Gellért, Sas és Naphegyről [4]	5
2. ábra: Bontási munkálatok [7]	6
3. ábra: A Citadella belülről 1962-ben [8]	6
4. ábra: Durva mészkő felülete ősmaradványokkal	7
5. ábra: Térképrészlet a bányák helyeiről	8
6. ábra: Nagy felületre kiterjedő sókivirágzás (Citadella D-i oldal, D-i fekvés)	10
7. ábra: Belövések nyomai (D-i oldal, nyugati rondella eleje, K-i fekvés)	11
8. ábra: Laboratóriumban vizsgált üde kőtömbök szövege	12
9. ábra: Pipás vízbeszívás vizsgálata	13
10. ábra: Kapilláris vízfelszívás vizsgálat	14
11. ábra: Nedvességmérő készülék alkalmazása	15
12. ábra: Schmidt-kalapács	15
13. ábra: Különböző közettípusok Schmidt- kalapács visszapattanás és egyirányú nyomószilárdság közti összefüggése [20]	17
14. ábra: HAHN & KOLB SK/HSSL típusú duroszkóp	18
15. ábra: Kőzetkárosodási térképeken jelölt károsodási formák	19
16. ábra: Röntgendiffrakciós és derivatográfós vizsgálattal kimutatott ásványtani összetétel [21 alapján]	19
17. ábra: Fekete kéreggel fedett falszakasz (K_03, É-i oldal, Ny-i tájolás)	20
18. ábra: Leváló fehér kéreg a K_14 falszakaszon (D-i oldal, D-i fekvés)	21
19. ábra: Visszahátrált kőtömbök a K_14 falszakaszon (D-i oldal, D-i fekvés)	21
20. ábra: Statikai problémákra visszavezethető közettömb átrepedés több soron keresztül (K_14-es falszakasz, D-i oldal, D-i fekvés)	22
21. ábra: Belövések nyomai a K_20-as falszakaszon (D-i oldal, K-i tájolás)	22
22. ábra: Nagy felületen, kikenéssel javított falazat	23
23. ábra: Cementkikenes mellett tönkrement kőzet	24
24. ábra: Cserélt kőtömbökből újarakott falazat	24
25. ábra: Helytelenül rögzített, kiesett kőlap	25
26. ábra: Nagy kiterjedésű borostván a K_09 falszakaszon	26
27. ábra: Moha a keleti rondella északi tájolású oldalán	27
28. ábra: Elszáradt növényi szármadvány a fugában	27
29. ábra: Sókivirágzás a K_14 falszakaszon (déli oldal, déli tájolás)	28
30. ábra: Barna elszíneződés a K_15-ös falszakaszon (déli oldal, keleti tájolás)	28
31. ábra: Kőzetkárosodási térképek falszakaszai (pirissal jelölve)	29
32. ábra: Kapilláris vízfelvétel eredményei	31
33. ábra: Pipás és kapilláris vízbeszívás eredményei mállott és üde, durva mészkövön (I- labor mérés, C- helyszíni mérés)	32
34. ábra: Pipás vízbeszívás eredményei a Citadella mállott kőzetanyagán	33
35. ábra: Nedvességértékek sorok szerint	34
36. ábra: Duroszkópos és Schmidt-kalapács eredmények	35
37. ábra: K_01 falszakasz károsodásai	38
38. ábra: K_01-es falszakasz kőzetkárosodási térképe (lekicsinyített rajz, A/3 formátumban K_01 falszakasz károsodásai, a mellékletben található)	39
39. ábra: K_06 falszakasz károsodásai	39
40. ábra: K_06-os falszakasz kőzetkárosodási térképe, É-i oldal, K-i tájolás (lekicsinyített rajz, A/3 formátumban K_06 falszakasz károsodásai, a mellékletben található)	39

41. ábra: K_18 falszakasz károsodásai.....	39
42. ábra: K18-as falszakasz kőzetkárosodási térképe (lekicsinyített rajz, A/3 formátumban K_18 falszakasz károsodásai, a mellékletben található) .....	39
43. ábra Panoptikum helye a bejárat mellett [22] .....	39
44. ábra A Citadelláról 1988- ban (bal) és 2016-ban készült képek (jobb) .....	39
45. ábra K_07 és K09 falszakasz, É-i oldal, 1971-ben (bal) és 2016-ban készült képek (jobb).....	40
46. ábra K_21D falszakasz, déli oldal, 1953-ban (bal) és 2016 (jobb) .....	40
1. táblázat: Magyarországi durva mészkő változatok fizikai tulajdonságai [12] .....	7
2. táblázat: Elvégzett vizsgálatok száma.....	30
3. táblázat: Schmidt kalapács és durroszkóp eredmények mállott és üde durva mészkő felületeken ..	36
4. táblázat: Károsodási jelenségek gyakorisága a K_01, K_06 és K_18 falazatokon .....	37

## Irodalomjegyzék

- [1] <http://whc.unesco.org/en/list/400>
- [2] Schafarzik F, Vendl A, Papp F: Geológiai Kirándulások Budapest Környékén, p. 265, Bp. 1964
- [3] Török Á., Pápay Z.: Durva mészkövek időállóságának és szövetszerkezetének kapcsolata, In: Mérnökgeológia-Kőzetmechanika 2006, pp. 185-196, Bp. 2006
- [4] <http://www.openstreetmap.hu>
- [5] <http://www.dunaiopoly.hu/hu/helyek/vedett-terulet/budai-tajvedelmi-korzet/budai-tajvedelmi-korzet>
- [6] Citadella falán lévő tábla
- [7] [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/cc/Citadel\\_of\\_Buda\\_partial\\_demolition\\_works\\_in\\_1897.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/cc/Citadel_of_Buda_partial_demolition_works_in_1897.jpg)
- [8] <http://www.fortepan.hu> képszám: Fortepan / Budapest Főváros Levéltára, Magyarország Budapest XI. Citadella, szemben a Szabadság szobor
- [9] Török Á: Geológia mérnököknek, Műegyetemi kiadó, Budapest, p. 383, 2007
- [10] Török Á., Hajnal G., Emszt Gy., Árpás E. L.: A Mátyas-templom kőzetanyagának állapota, in: Építőanyag, 57/3, pp. 74-80, 2005
- [11] Török Á., Pápay Z.: Durva mészkövek vízfelvételi tulajdonságai, in: Mérnökgeológia-Kőzetmechanika 2006, pp. 197-208, Bp. 2006
- [12] Fodor T., Kleb B.: Magyarország mérnökgeológiai áttekintése, p. 199, Bp. 1986
- [13] Török Á., Siegesmund S., Müller C., Hüpers A., Weiss T.: Az országház homlokzatát és a Citadellát alkotó durva mészkövek szövetének hatása időállóságukra, In: Mérnökgeológia-Kőzetmechanika 2006, pp. 235-244, Bp. 2006
- [14] Smitha B.J., Török A., McAlistera J.J., Megarry Y.: Observations on the factors influencing stability of building stones following contour scaling: a case study of oolitic limestones from Budapest, Hungary, in: Building and Environment, V. 38, pp. 1173–1183, 2003
- [15] Zichler Sz., Ocskay R., Salma I.: Budapest levegőszennyezettségének története, Levegő Munkacsoport, 2007
- [16] <http://protectionhydrofuge.com/index.php?section=application&ss=1&langue=en17MSZ EN 1925:2000>
- [17] Kleb B.: Kőzetminősítés Schmidt kalapáccsal építésföldtani térképezés keretében, Földtani közlöny, 101, pp. 55-61, Bp., 1971.

- [18 ] S. Demirdag , H. Yavuz, R. Altindag: The effect of sample size on Schmidt rebound hardness value of rocks, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 46, pp. 725–730, 2009
- [19] Gálos M., Bögöly Gy.: Kőzetek roncsolásmentes helyszíni szilárdsági vizsgálata Schmidt- kalapáccsal, *Kő*, 2016/2, pp. 30- 34, 2016
- [20] Gálos M.: Kőzeteszilárdsági tulajdonságok meghatározása roncsolásmentes vizsgálati módszerrel, *Építőanyag* 55. évf./2., pp. 55-57, 2003
- [21] Török Ákos: Műemlékek kőzeteinek anyagvizsgálata, *Anyagvizsgáló lapja*, 2004/1, pp 3-4, 2004
- [22] <https://www.flickr.com/photos/tags/panoptikum1944>
- [23] <http://www.fortepan.hu képszám: 55005, 50186, 51898>

## Mellékletek