



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

---

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNY EGYETEM

GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR

GYÁRTÁSTUDOMÁNY ÉS –TECHNOLÓGIA TANSZÉK

## TDK DOLGOZAT

# Mart gránitfelületek éleinek vizsgálata gépészmérnöki gyakorlatban alkalmazott eszközökkel

### Készítették:

Kun Zsuzsanna  
IV. évfolyamos BSc hallgató

Igali Júlia Csenge  
III. évfolyamos BSc hallgató

Hodosán Zsolt  
I. évfolyamos MSc hallgató

### Konzulensek:

Gyurika István Gábor  
Tanszéki mérnök, Gyártástudomány és – technológia tanszék

Dr. Gálos Miklós  
Egyetemi tanár, Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék

.....  
Kun Zsuzsanna

.....  
Igali Júlia Csenge

.....  
Hodosán Zsolt

Budapest, 2013

# Tartalom

|            |                                                                                                                  |           |
|------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1.</b>  | <b>BEVEZETÉS .....</b>                                                                                           | <b>2</b>  |
| <b>2.</b>  | <b>KUTATÁSI IRÁNYVONALAK KÜLÖNBÖZŐ ANYAGÚ MEGMUNKÁLT FELÜLETÉLEK<br/>KITÖREDEZÉSEINEK VONATKOZTATÁSÁBAN.....</b> | <b>4</b>  |
| 2.1.       | AZ ÜVEG ÉLKITÖREDEZÉSEINEK CSÖKKENTÉSÉRE IRÁNYULÓ KUTATÁSOK.....                                                 | 4         |
| 2.2.       | A SZILÍCIUM-NITRID KERÉMIÁKRA JELLEMZŐ ÉLKITÖREDEZÉSI MECHANIZMUSOK VIZSGÁLTA LÉZERES MARÁS ESETÉN .....         | 7         |
| 2.3.       | RIDEG ANYAGOK KITÖREDEZÉSÉNEK VIZSGÁLATA A TERHELÉSI TÁVOLSÁG ÉS AZ ANYAG KEMÉNYSÉGÉNEK FÜGGVÉNYÉBEN .           | 9         |
| 2.4.       | KÖVEK ÉLKITÖREDEZÉSEINEK VIZSGÁLATA.....                                                                         | 10        |
| 2.5.       | IRODALOMKUTATÁSUNK ÖSSZEFOGLALÁSA .....                                                                          | 12        |
| <b>3.</b>  | <b>VIZSGÁLATI RENDSZER KIÉPÍTÉSE .....</b>                                                                       | <b>14</b> |
| 3.1.       | ELVÁRÁSOK A VIZSGÁLATI RENDSZERREL KAPCSOLATBAN .....                                                            | 14        |
| 3.2.       | A RENDSZER TERVEZÉSÉNEK FOLYAMATA .....                                                                          | 15        |
| 3.3.       | A KIÉPÍTETT RENDSZER ELŐNYEI, ALKALMAZHATÓSÁGÁNAK KORLÁTAI .....                                                 | 18        |
| 3.4.       | A RENDSZER ÉRTÉKELÉSE .....                                                                                      | 18        |
| <b>4.</b>  | <b>A VIZSGÁLT KÖVEK BEMUTATÁSA.....</b>                                                                          | <b>20</b> |
| <b>5.</b>  | <b>FELHASZNÁLT ESZKÖZÖK .....</b>                                                                                | <b>26</b> |
| 5.1.       | PRUSSIANI GOLDEN PLUS KÖMEGMUNKÁLÓ KÖZPONT .....                                                                 | 26        |
| 5.2.       | KEYENCE LJ V7080 KÉKFÉNYŰ PROFIL LÉZERSZKENNER .....                                                             | 29        |
| 5.3.       | TOPPER TMV-510T SINUMERIK 840D VEZÉRLÉSEL .....                                                                  | 32        |
| <b>6.</b>  | <b>VIZSGÁLATI FOLYAMATOK .....</b>                                                                               | <b>34</b> |
| 6.1.       | A MEGMUNKÁLÁS MÓDJA.....                                                                                         | 34        |
| 6.2.       | A VÁGÁSI SEBESSÉG SZÁMÍTÁSA A FORDULATSZÁMBÓL .....                                                              | 36        |
| 6.3.       | A KÖVEK ÉLEINEK MEGMUNKÁLÁS UTÁNI VIZSGÁLATA - DIGITALIZÁLÁS ÉS KIÉRTÉKELÉS .....                                | 37        |
| 6.4.       | A DIGITALIZÁLÁS MÓDJA .....                                                                                      | 38        |
| 6.5.       | AZ ADATOK KIÉRTÉKELÉSE .....                                                                                     | 39        |
| 6.6.       | A SZÜKSÉGES SZÁMÍTÁSOK ELVÉGZÉSÉNEK MÓDJA.....                                                                   | 43        |
| <b>7.</b>  | <b>AZ EREDMÉNYEK BEMUTATÁSA.....</b>                                                                             | <b>47</b> |
| 7.1.       | KORÁBBI VÁRAKOZÁSOK .....                                                                                        | 47        |
| 7.2.       | A FELHASZNÁLT ÉS SZÁMÍTOTT ADATOK .....                                                                          | 47        |
| 7.3.       | AZ EGYES KÖVEK MINTAFELÜLETEINEK ÉRTÉKELÉSE [7] .....                                                            | 51        |
| 7.4.       | A VIZSGÁLATOK EREDMÉNYEI .....                                                                                   | 56        |
| 7.5.       | A VIZSGÁLATI RENDSZER KORLÁTAI, A VIZSGÁLAT SORÁN FELLÉPŐ LEHETSÉGES HIBÁK.....                                  | 57        |
| 7.6.       | AZ EREDMÉNYEK JELENTŐSÉGE .....                                                                                  | 58        |
| <b>8.</b>  | <b>KÖVETKEZTETÉSEK.....</b>                                                                                      | <b>59</b> |
| <b>9.</b>  | <b>ÖSSZEFOGLALÁS.....</b>                                                                                        | <b>61</b> |
| <b>10.</b> | <b>IRODALOMJEGYZÉK .....</b>                                                                                     | <b>63</b> |

# 1. Bevezetés

A különböző, széles körben felhasználásra kerülő kőtermékek fontos minőségi jellemzője, a felületet jellemző paramétereken kívül, a megmunkált élek minősége. A különböző megmunkáló eljárásokkal előállított felületek éleinek objektív minősítése ergonómiai és termék-összeállítási szempontból is kardinális kérdés. Jelenleg a világon nem alkalmaznak szabványosított mérési eljárást a megmunkált kövek éleinek minősítésére és a használatos szabványok sem adnak meg olyan paramétereket, amelyek az egyes termékek minőségbeli összehasonlítására alkalmasak lehetnének. A korábbi kutatások folytatásaként, melyek a felületi érdesség és a járásbiztonság vizsgálatára terjedtek ki a mart kőfelületek esetén, jelen TDK munka a mart kereskedelmi gránitfelületek éleinek kitöredezési jellemzőit vizsgálja.

TDK munkánk egyik elsődleges célja volt megvizsgálni, hogy egy ipari szinten is alkalmazható vizsgálati módszer milyen hibával adja vissza a mart gránitfelületek éleinek azon átlagos kitöredezési mértékeit, amelyeket korábbi doktori kutatások eredményeképpen, az elméleti összefüggések meghatározásához használt mérési rendszerrel hoztak létre. A kiépített mérési rendszer segítségével egy átfogó kutatást valósítottunk meg, mely vizsgálatok magukba foglalták valamennyi, a köveket átlagos szemcseméretük szerint csoportosító MSZ szabványban található esetet. A kutatások további célja volt megvizsgálni a belépő és a kilépő élek kitöredezési mértéke közötti kapcsolatot annak érdekében, hogy az előzetes feltevésünket bizonyítsuk, miszerint a kilépő élek kitöredezési mértéke meghaladja a belépő éleken tapasztalhatókat. Az átlagos kitöredezési mérték meghatározását minden kiválasztott kő esetében elvégeztük, hogy lefedve a kereskedelmi forgalomban kapható különböző átlagos szemcseméretekkal rendelkező gránitok szemcseméret-tartományait, a további kutatási lehetőségekhez megfelelő adatokat nyerjünk a szemcseszerkezet hatásáról.

A TDK munkát egy irodalmi áttekintéssel kezdtük, hogy a korábbi következtetéseinkre és feltételezéseinkre, valamint a világban zajló kutatások eredményeire támaszkodva állíthassuk össze a kutatási tervünket és az elvárásokat a kiépítendő rendszerrel kapcsolatban. A vizsgálati rendszer tervezését és kiépítését követte a kísérletek végrehajtása, majd a kapott eredmények kiértékelése és a kitöredezési mértéket jellemző mérőszám alkalmazása. A kísérletekkel a doktori kutatásban tervezett rendszer és a mutatószám alkalmazását is bemutattuk a gyakorlatban.

A mart gránitfelületeket a Woldem Kft. NC vezérlésű kőmegmunkáló központján állítottuk elő. A megmunkálási folyamatok során összesen öt, különböző átlagos szemcseméretekkel rendelkező kereskedelmi gránitot használtunk. A gránit táblák részint már rendelkezésre álltak a tanszéken, de több típust a Vereczkei és fia Kft. diósdai telephelyéről szereztük be. Az alkalmazásra kerülő kövek vékonycsiszolatának vizsgálatát és a szemcseszerkezetek jellemzését a BME Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszéken végezték el. A vizsgálati rendszer kiépítéséhez olyan eszközöket és berendezéseket választottunk, melyeket a mérnöki gyakorlatban széles körben alkalmaznak. Így választottuk az élek digitalizálásához a Keyence kékfényű lézerszkennert, melyet a Gyártástudomány és – technológia Tanszék NC vezérlésű megmunkáló központján rögzítettünk a vizsgálatok idejére. A vizsgálandó élek kiértékelését a Keyence szkennerek saját szoftverével valósítottuk meg.

Munkánk eredményeképpen bebizonyítottuk, hogy a BME Gyártástudomány és – technológia Tanszékén kidolgozott, ipari szintű alkalmazásra szánt, a mart kereskedelmi gránitfelületek éleinek minősítését végrehajtó rendszer nagy pontossággal visszaadja az elméleti kutatások során használt vizsgálati folyamattal kapott eredményeket. A TDK munkánk tartalmazza továbbá a kutatások során bizonyított feltevéseket is a belépő és a kilépő élek kitöredezési mértékének összehasonlításával kapcsolatban. Dolgozatunkkal a kőmegmunkálási folyamatokkal előállított felületek vizsgálatának újabb lépcsőjét kívánjuk bemutatni, valamint használható ismeretanyagot összeállítani egy, a jövőben elkészülő doktori tézis alapkutatásához.

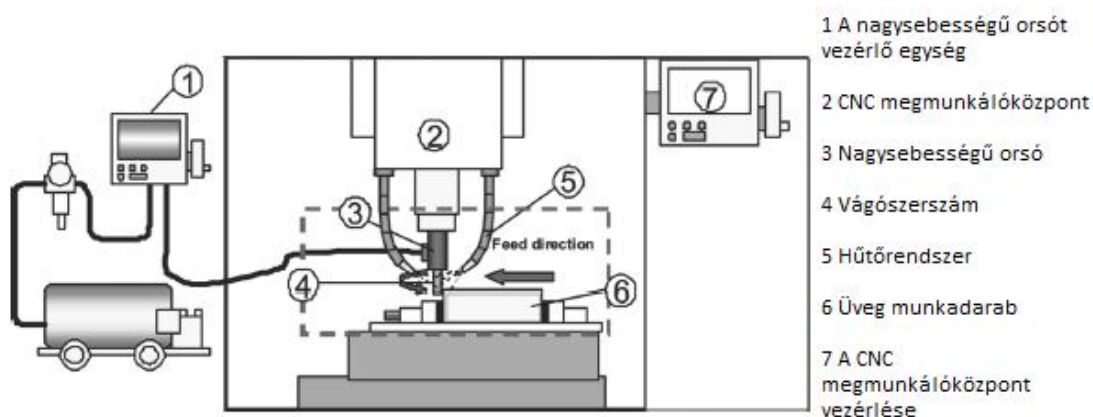
## **2. Kutatási irányvonalak különböző anyagú megmunkált felületelek kitöredezéseinek vonatkoztatásában**

TDK munkánk hangsúlyos részét képezte a különböző anyagok éleinek kitöredezési mechanizmusaira irányuló irodalomkutatás. Elsődleges célunk az volt, hogy elhelyezzük kutatásainkat a világban jelenleg a kövek élkitöredezéseire irányuló kísérletek sorában, illetve olyan információkhoz jussunk, amelyek segítségünkre lehetnek munkánk során. További fontos célként jelöltük meg egy ehhez a tudományterülethez kapcsolódó magyar nyelvű forrásanyag elkészítését, hiszen jelenleg ilyen jellegű tanulmány még nem áll rendelkezésre.

A szakirodalom tanulmányozása során azonban arra a megállapításra jutottunk, hogy napjainkban a különböző kőtípusok éleinek kitöredezésével alig néhány kutató foglalkozik behatóan. Éppen ezért terjesztettük ki kutatásunkat más anyagok ilyen jellegű viselkedésének tanulmányozására is, hogy ezáltal átfogó képet kapjunk a területen zajló vizsgálatok jelenlegi állásáról, illetve olyan információk birtokába kerüljünk, amelyekből következtetéseket levonva saját, kövekre irányuló kutatásainkhoz is segítséget kapjunk. Az alábbiakban bemutatásra kerülő tanulmányok különböző rideg anyagok élkitöredezéseinek mechanizmusát vizsgálják.

### **2.1. Az üveg élkitöredezéseinek csökkentésére irányuló kutatások**

A különböző megmunkálások során fellépő élkitöredezés jelensége fokozottan jellemző a rideg anyagokra, így a különböző üvegekre is. Ezen anyagok ilyen jellegű viselkedését már számos kutató vizsgálta. Karim és társai [9] a Malaya Egyetemen (Kuala Lumpur, Malajzia) folytattak kísérleteket az üveg élkitöredezéseivel kapcsolatban. A kutatók célja az volt, hogy marással történő megmunkálás esetén megtalálják azokat az optimális paramétereket, amelyek mellett az üveg kitöredezése minimális lesz. Vizsgálataikat egy vertikális típusú Cincinnati Milacron Saber TNC750 VMC megmunkálóközponttal végezték, melyhez egy nagysebességű, felszerelhető Model NSK HES510 BT40 típusú orsót csatlakoztattak. A megmunkáló eszköz köbös bórnitridből készült síkmaró volt. A kísérleti rendszer felépítése a 2.1 ábrán látható[9].



**2.1. ábra** Az üveg marásához felállított kísérleti rendszer (forrás: Karim és társai [9], 971. oldal, 1. ábra)

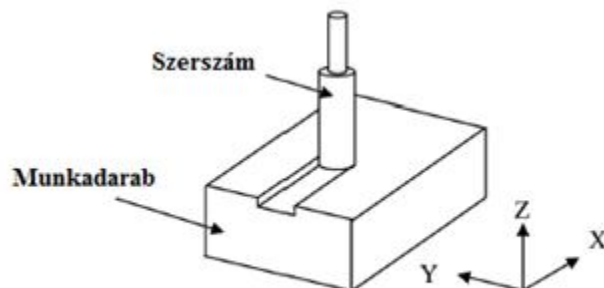
Az üveg az egyik legnehezebben megmunkálható anyag rideg természete és különleges szerkezete miatt, ugyanis a repedés, illetve az élek kitöredezése folyamatosan veszélyt jelent a gyártás során. A megmunkált üveg élkitöredezésének (amely igen gyakori 50 HRC-nél keményebb anyagok esetén) csökkentése érdekében Karim és társai fontosnak tartották, hogy megtalálják a megfelelő paramétereket a gyártási folyamathoz. A tanulmányt író kutatók azt vizsgálták, hogy hogyan lehet a paramétereket a leghatékonyabban optimalizálni.

Az elemzés során a kutatók a Taguchi-módszert használták, amely az egyik leghatékonyabb módja a gyártás során a legjelentősebb paraméterek azonosításának. A módszer szerint a minőségre ható tényezők alapvetően két csoportra, kontroll-és zajfaktorkra oszthatók. A kontrollfaktorkok azok a paraméterek, amelyek különböző értékekre való beállításával tudjuk befolyásolni a gyártás kimenetelét. A zajfaktorkok pedig azok a jellemzők, amelyek hatásán nem tudunk, vagy nem éri meg módosítani az adott folyamat során. A Taguchi módszer lépései:

1. az ún. ortogonális elrendezés kiválasztása (A standard előírás Taguchi szerint  $L_{16}(4^4)$ , amelynek jelentése, hogy tizenhat kísérletet végzünk el, négy kontrollfaktorkkal, minden faktornak négy szintjén, azaz négy különböző értékén);
2. adatelemzés;
3. az optimális paraméterek azonosítása;
4. a választott optimális paraméterekkel ellenőrző kísérletek futtatása.

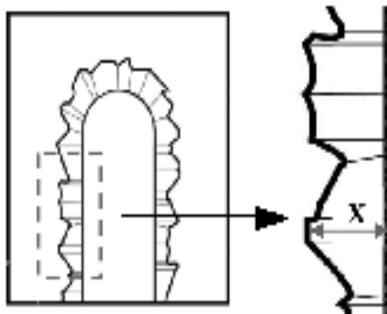
A kutatók kontrollfaktorknak a következőket választották: kenési nyomás, a főorsó sebessége, előtolás, illetve az axiális fogásmélység. Az egyes faktorokhoz tartozó 4 szint

kiválasztása után a következő lépés a kísérletek lefuttatása volt az előírt értékek beállításával. A kutatók ezt az említett Cincinnati Milacron Saber TNC750 VMC megmunkálóközponttal végezték. A szerszám munkadarabhoz viszonyított mozgása az 2.2. ábrán látható [9].



**2.2. ábra** A szerszám mozgása a munkadarabhoz képest (forrás: Karim és társai [9], 971. oldal, 2. ábra)

A vizsgálatok során a köbös bórnitrid szerszám pozitív X irányban állandó fogásmélységgel mozgott 30 mm-t. A kenési rendszer a vágás közben jellemző hőmérséklet kontrollálására, illetve a szerszám és a munkadarab közötti súrlódás csökkentésére szolgált. Mivel a gyártás szempontjából a kitöredezés szélessége a legfontosabb paraméter, ezért a kutatók tanulmányukban a kitöredezést a 2.3. ábrán látható módon annak szélességével jellemezték [1].



**2.3. ábra** A kitöredezés szélessége (forrás: Karim és társai [9], 972. oldal, 3. ábra)

A kapott eredmények kiértékelése az ún, jel-zaj viszony válaszanalízissel, illetve a Pareto ANOVA varianciaanalízissel történt. Mindkét módszerrel arra a következtetésre jutottak, hogy üvegmarás esetén a négy választott faktor közül a legnagyobb befolyással a fogásmélység rendelkezik. Ezt követi az előtolás, a kenési nyomás, végül pedig a főorsó sebessége. A Pareto ANOVA analízis alapján arra a következtetésre jutottak, hogy a legjobb kombináció az A4 B4 C1 D1, azaz hogy a választott kontrollfaktorok közül a főorsó sebességét és a kenési nyomást a négy közül a legmagasabb, míg az előtolást és a fogásmélységet a legalacsonyabb szintre érdemes beállítani a kitöredezések szélességének

minimalizálása érdekében. A fogásmélység és az előtolás ezen beállítása főként azért indokolt, mert ezek csökkentésével a fogankénti anyagleválasztás is kisebb mértékű lesz, amely a szükséges energia, és ezáltal a vágóerő értékét is csökkenti, ez pedig kisebb szélességhez vezet.

A Taguchi-módszer utolsó lépése az ellenőrző kísérletek végrehajtása, amelyet a kutatók a már említett A4 B4 C1 D1 faktorkombinációval hajtottak végre. Az eredmények azt mutatták hogy a kitöredezési szélességek jelentősen csökkentek az optimalizált paraméterek mellett.

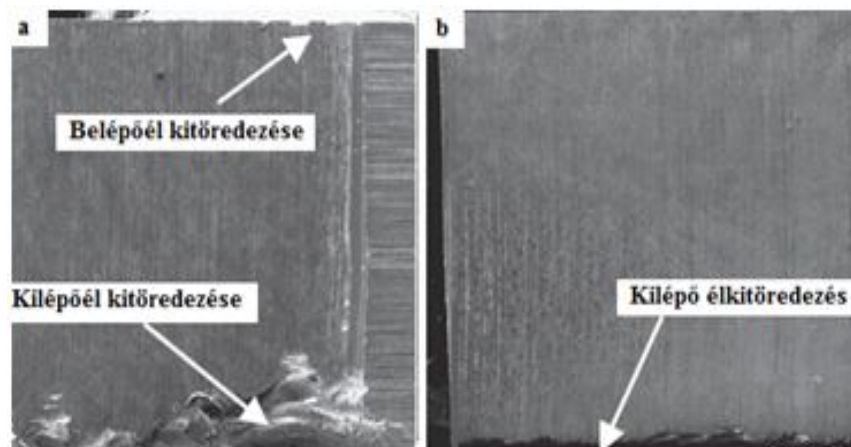
## **2.2. A szilícium-nitrid kerámiákra jellemző élkitöredezési mechanizmusok vizsgálta lézeres marás esetén**

Az élek kitöredezésének jelensége a különböző kerámiákra, mint rideg anyagokra, szintén jellemző. Ezzel a területtel kapcsolatban is érdekes és hasznos kutatások folytak az utóbbi években.

Yang és társai [1] a Kansasi Állami Egyetemen (Manhattan, Amerikai Egyesült Államok) a szilícium-nitrid kerámiák lézeres marás következtében fellépő élkitöredezéseiről írnak kutatásukban. A kerámiák megmunkálásakor fellépő élkitöredezés jelentős korlátot jelent a kerámia elemek dizájnjának és felhasználásának területén. A jelenség fellépésének megértését már évtizedekkel ezelőtt célul tűzték ki egyes kutatók (McCormick és Almond tanulmányozták a különböző anyagok valamilyen külső behatolási folyamat esetén jellemző mechanikai viselkedését, a felszínt a darab valamely éle közelében egy adott eszközzel terhelve).

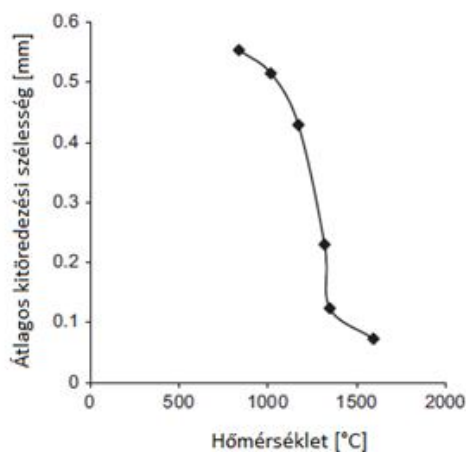
Yang és társai azt vizsgálták, hogy a megemelt hőmérséklet milyen hatással van kerámiák esetén az élkitöredezésekre. A szilícium-nitrid kerámiákra magas keménységük és extrém ridegségük miatt a kitöredezések fokozottan jellemzőek, és szobahőmérsékleten nehezen elkerülhetők, gyakorlatilag a szerszám és a munkadarab is károsodhat ilyen körülmények mellett. A kutatók kimutatták, hogy megemelt hőmérsékleten jelentősen nő az említett anyag megmunkálhatósága. A megemelt hőmérséklet hatásának bizonyítására CNC marógépre olyan eszközt rögzítettek, amely alkalmas nagy erejű lézersugár kibocsájtására – ezzel végrehajthatóvá vált a lézerrel támogatott marást (LAM – Laser-assisted Milling technológia) alkalmazása. Kísérleteket végeztek 838, 1017, 1172, 1319, 1349, 1595 °C-on, amelyek eredményei azt mutatták, hogy a munkadarab magasabb hőmérséklete jelentősen

csökkentheti a kitöredezéseket. Amikor az anyagot a lágyulási pontja alatt munkálták meg, látható volt néhány makroszkopikus kitöredezés a belépő élen. Amikor viszont a lágyulási pont fölötti hőmérsékleten munkáljuk meg az anyagot, akkor a belépőélen nincs makroszkopikus elválkozás, illetve a kilépőn is jelentősen csökkennek a méretek, miközben a hőmérséklet 838-ról (2.4.a ábra) 1349 °C-ra (2.4.b ábra) nő [1].



**2.4. ábra** Az élkitöredezések mérete  $T=838^{\circ}\text{C}$ , illetve  $T=1349^{\circ}\text{C}$  hőmérséklet esetén (forrás: Yang és társai [1], 347. oldal, 4. ábra)

$1000^{\circ}\text{C}$ -ig a kilépő élkitöredezések mérete állandóan csökkent. Amikor a hőmérséklet magasabb az üvegesedési pontnál ( $1150^{\circ}\text{C}$ ), a méretek rohamosan elkezdnek csökkenni a hőmérsékletnövekedéssel, majd  $1300^{\circ}\text{C}$  körül drámai esés tapasztalható. Amint a hőmérséklet tovább növekszik, a méretcsökkenés lelassul. Az előbbieken ismertetett tendencia grafikonja a 2.5. ábrán látható [1].

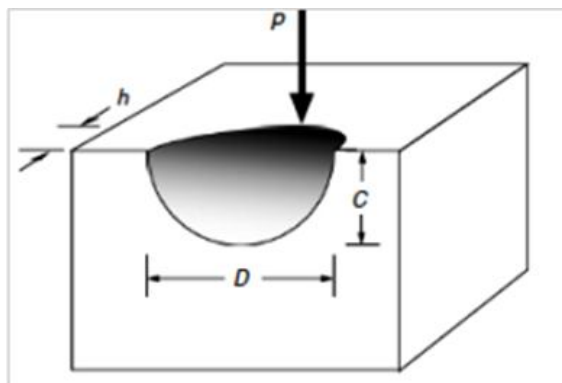


**2.5. ábra** A kilépő élkitöredezések szélességének alakulása a hőmérséklet függvényében (forrás: Yang és társai [1], 347. oldal, 5. ábra)

A kutatók végkövetkeztetésként azt vonták le, hogy teljesen nem szüntethető meg ez a jelenség magas hőmérsékleten sem, azonban LAM megmunkálás esetén 1300 és 1400 °C közötti hőmérsékleten a kitöredezések méretében jelentős csökkenést lehet elérni.

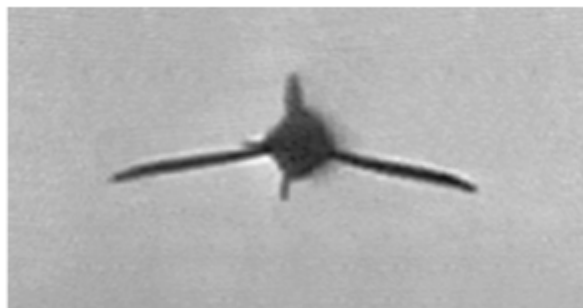
### 2.3. Rideg anyagok kitöredezésének vizsgálata a terhelési távolság és az anyag keménységének függvényében

A rideg anyagok élei közelében azok felszínére ható koncentrált terhelés vizsgálata szintén érdekes eredményeket ad. Chai és Lawn [6] a Tel Aviv Egyetemen (Tel Aviv, Izrael) tanulmányozták a kitöredezések alakulását rideg, szilárd anyagokban, koncentrált terhelést kifejtő eszköz használata mellett. Csiszolt, derékszögű élekkel rendelkező munkadarabok felületét terhelték monoton növekvő, normál irányú, koncentrált erővel ( $P$ ), ahogy az a 2.6. ábrán látható [6].



**2.6. ábra** A terhelő erő és a kitöredezés modellje Chai és Lawn elmélete szerint (forrás: Chai és Lawn [6], 2556. oldal, 1. ábra)

Méréseiket az élektől előre meghatározott  $h$  távolságokban való terheléssel, homogén üveg és kerámia anyagokra végezték. Az üveg esetében a kitöredezés jelenségét kamerával is rögzítették, a felvétel egy képkockáját mutatja a 2.7 ábra [6].



**2.7. ábra** Az üveg anyagokra jellemző, koncentrált terhelés hatására létrejövő, kitöredezéshez vezető repedések jellege (forrás: Chai és Lawn [6], 2557. oldal, 2. ábra)

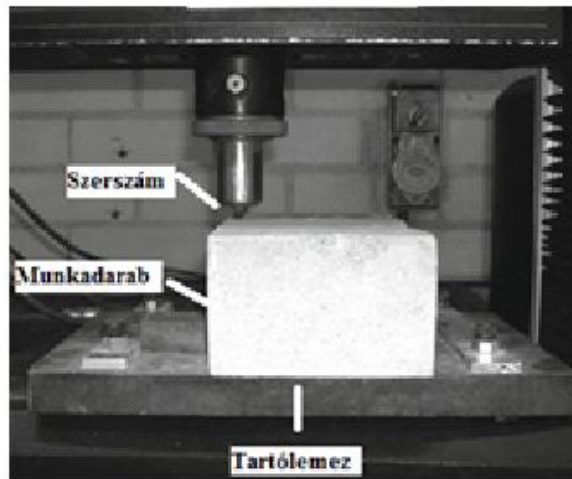
Az eszköz bemélyedése radiális, a terhelési pontból kiinduló repedéseket eredményezett, esetünkben, a képen látható módon felülnézetből a szélekhez képest párhuzamos, illetve merőleges irányban (2.7 ábra). Az éllel párhuzamos hasadás a domináns, lefelé és oldalirányba növekedve, kitörést eredményezve egy kritikus PF terhelésnél. Érdekes eredmény, hogy a kitöredezések alakjában geometriai hasonlóságot fedezhetünk fel anyagtól függetlenül. A kutatók azt is kimutatták, hogy éles szél esetében a hozzá közel eső terhelés akár kifejezetten nagy mennyiségű anyagot is leválaszthat. A kitöredezés alakját negyed-ellipszoiddal közelítették, ahogy az a 2.6 ábrán látható, ahol  $h$  a kitöredezés mélysége,  $C$  a szélessége,  $D$  pedig a hossza.

## 2.4. Kövek élkitöredezéseinek vizsgálata

TDK munkánk elsődleges célja a különböző kőanyagok átlagos kitöredezési mértékének és maximális kitöredezési mélységének meghatározása, valamint a különböző megmunkálási paraméterváltozások élkitöredezésre gyakorolt hatásának vizsgálata. Ennek megfelelően, a tanulmányt író csoport kiemelt figyelmet fordított a kövekkel kapcsolatos élkitöredezési kísérletekre.

### Koncentrált erőhatásnak kitett kőélek vizsgálata

Bao és társai [12] a Rock Mechanics and Rock Engineering (Ausztrália) c. folyóiratban publikált kutatásukban új modellt állítottak fel az élkitöredezésekhez szükséges erők kalkulálására koncentrált terhelést kifejtő eszköz használata mellett. A kutatók kísérleteikkel bizonyítani kívánták, hogy a megmunkálás során kitört darabok anyagtól függetlenül hasonló geometriával rendelkeznek. Céljuk volt továbbá a maximális, a törés megjelenése előtti pillanatban fennálló terhelő erő és a terhelés éltől vett távolsága közötti kapcsolat meghatározása. Számos kísérletet hajtottak végre négy különböző típusú homokkővön. A kísérletekhez használt darabok téglalap alakúak voltak, melyeket a tesztek előtt sütőben hőkezelték 70°C-on kb. 24 óráig, ezzel elérve, hogy mindegyik munkadarabnak ugyanolyan legyen a nedvességtartalma. Hogy minimalizálják a különböző felületek sajátosságainak befolyását, a munkadarabok felülete egyenletesre lett munkálva a teszt előtt. A kutatók a tesztek egy Instron 5567 univerzális tesztingén hajtották végre, a 2.8. ábra szerinti elrendezésben [12].



**2.8. ábra** Kísérleti elrendezés a különböző kövek élkítőredezéseinek vizsgálatánál (forrás: Bao és társai [12], 342. oldal, 4. ábra)

Kísérleteik során a szerszámmal az éltől meghatározott, állandó távolságban fejtettek ki normál irányú, koncentrált terhelést a munkadarabra.

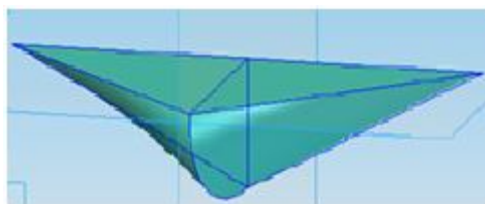
A kutatás kimutatta, hogy a szakirodalomban korábban megjelent elemzések (pl. Evans, 1984) helytelen igénybevételi viszonyokat feltételeznek, ezért az általuk felállított egyenletek a vágóerő helytelen meghatározásához vezetnek. A Bao és társai által kifejlesztett modell a terhelő erő és az energiaeloszlás analízisén alapszik, felhasználva a törés mechanikájával kapcsolatos ismereteket, a kitört darabok geometriai hasonlóságát, illetve a különböző köveken végrehajtott vágási tesztek eredményeit. A vizsgálatok alapján a kutatók azt a következtetést vonták le, hogy a terhelés éltől vett távolsága és a maximális erő között egyértelmű kapcsolat van, ez alapján állítottak fel egy becslési rendszert a mérési eredményekre. Az ehhez használt modelljük hasonló a 2.6 ábrán láthatóhoz: a kitöredezés alakját negyed-ellipszoiddal közelítik. A kutatók kísérleteik alapján további következtetésként vonták le, hogy a vágóerő teljes munkája arányos a terhelési távolság négyzetével, illetve arra az eredményre jutottak, hogy koncentrált terhelés esetén ezen munkának csak közelítőleg 10%-a fordítódik az új felületek kialakulására.

### **A legújabb eredmények kövek élkítőredezésének vizsgálatában**

A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gyártástudomány-és Technológia Tanszékén 2011 óta folynak kísérletek kövek élkítőredezéseinek vizsgálatára, valamint az élkítőredezési jellemzők objektív minősítésére alkalmas mérőszám kidolgozására. Gyurika [5] egy korábbi tanulmányban elemezte az élkítőredezések folyamatát, pontosabban,

hogyan az NC vezérlésű kőmegmunkáló központokkal végzett kőmarások során hogyan törnek ki az egyes mintadarabok élei.

A tanulmányban szereplő kutatás célja egy olyan helyettesítő test megtalálása volt, amelyet hatékonyan alkalmazni lehet a mart gránit termékek éleinél kialakuló kitöredezések minősítő számításaihoz. A helyettesítő test esetében követelmény volt, hogy a test térfogata a lehető legjobban közelítse meg a terméknek az adott kitöredezés által létrejövő térfogatcsökkenését. További igényként merült fel, hogy a test geometriájának meghatározásánál lehetőség szerint minél kevesebb kitöredezési geometriai adatot kelljen felhasználni. A kutató a vizsgálati folyamatban elsőként egy NC vezérlésű kőmegmunkáló központtal, két különböző gránittípuson (Giallo Farfalla és Rosa Beta) alakított ki összesen 10 mintafelületet. Ezt követően az egyes mintafelületeket egy laser scanner segítségével digitalizálta, majd egy gyors prototípus szoftverrel különválasztotta az egyes kitöredezéseket és egyenként meghatározta azok térfogatait. A kiértékelési fázisban összesen három testet vizsgált az alapján, hogy melyik test lenne a legalkalmasabb a kitöredezés által keletkező térfogatcsökkenés leírására. Mind a három test esetében követelmény volt, hogy egyszerűen számíthatóak legyenek a térfogataik, hiszen csak ekkor lehet hatékonyan felhasználni őket a kitöredezési jellemzők számításánál. A kiértékelési folyamat eredményeképpen a kutató megállapította, hogy mart gránitfelületek éleinél a kitöredezést helyettesítő test nem ellipszoid alapú, a megfelelő helyettesítés egy ellipszis-alapú összetett kúptest (2.9. ábra) alkalmazásával lehetséges [5]. Ez a test a két vizsgált gránit esetében nagy pontossággal helyettesíteni tudja a kitöredezett térfogatokat.



2.9. ábra Helyettesítő test (forrás: Gyurika [5], 59. oldal, 4. ábra)

## 2.5. Irodalomkutatásunk összefoglalása

Irodalomkutatásunk eredményeként a különböző anyagok éleinek kitöredezésével kapcsolatosan ismertünk meg néhány kutatási irányelvet. TDK munkánk során ezen anyagok által megismerhettük a tudományterület jelenlegi helyzetét, illetve a kövekkel kapcsolatban fontos eredményeket ismertünk meg, amelyek támpontként szolgáltak kutatásunkhoz. Összefoglalásként a következő tényeket emeljük ki:

1. Az üveg marásakor az optimalizálási módszerek és elemzések azt mutatják, hogy ennek az anyagnak a megmunkálásakor a négy legfontosabb paraméter a fogásmélység, a főorsó sebessége, a kenési nyomás és az előtolás. Kísérleti úton bebizonyosodott, hogy a legjelentősebb hatással a fogásmélység bír, ezt követi az előtolás, a kenési nyomás és végül a főorsó sebessége.
2. Kerámiák lézeres marása (LAM technológia) esetén bebizonyosodott, hogy megemelt hőmérsékleten jelentősen nő az említett anyag megmunkálhatósága. A végső következtetés az lett, hogy ugyan a kitöredezés jelensége teljesen nem szüntethető meg, de LAM megmunkálás esetén 1300 és 1400 °C közötti hőmérsékleten a kitöredezések méretében jelentős csökkenést lehet elérni.
3. Általánosan megfigyelhető jelenség rideg anyagok esetén, hogy monoton növekvő normál irányú koncentrált terhelés mellett a kitört forgácsok geometriája jelentős hasonlóságot mutat anyagtól függetlenül.
4. Különböző gránitokkal végzett kísérletek arra az eredményre vezettek, hogy mart gránitfelületek esetében az ellipszis-alapú összetett kúptest nagy pontossággal helyettesíteni tudja a kitöredezett térfogatokat.

### 3. Vizsgálati rendszer kiépítése

Az eltervezett vizsgálatok megvalósításához egy olyan vizsgálati rendszer kiépítését kívántuk elvégezni, mely a korábbi doktori kutatás alapján, ipari környezetben is könnyen alkalmazható eszközök felhasználásával, gyorsan és hatékonyan képes a minősítő tevékenységhez szükséges adatokat szolgáltatni. Az előző fejezetben bemutatott eszközöket kiválasztva és a rendszerbe integrálva létrehoztuk azt a kísérleti rendszert, amellyel a kutatásaink során dolgoztunk és később az így kapott eredményeket a korábbi, elméleti vizsgálatok adataival is összevetettük annak érdekében, hogy egyértelműen megállapítható legyen a rendszer alkalmazhatósága.

A mérnöki gyakorlatban megfogalmazott igények, valamint a korábbi kutatásaink tapasztalatai alapján megfogalmaztuk az elvárásokat a kiépítendő rendszerrel kapcsolatban, illetve az irodalmi áttekintés is segítségünkre volt abban, hogy a megfelelő eszközöket választhassuk ki a rendszer összeállításához.

#### 3.1. Elvárások a vizsgálati rendszerrel kapcsolatban

A doktori kutatásban megfogalmazott rendszerkövetelmények mellett olyan alapvető igényeknek is eleget kell tennie egy ipari környezetben is alkalmazásra kerülő rendszernek, mint a kezelés egyszerűsége, vagy a hordozhatóság. Az alábbiakban bemutatjuk az általunk összegyűjtött és figyelembe vett elvárásokat a kiépítendő vizsgálati rendszerre vonatkozóan.

Összefoglalva az igényeket elmondhatjuk, hogy a doktori kutatásra alapozva egy hatékony rendszer alkalmazhatóságának vizsgálatát tűztük ki célul. Hatékony rendszerről akkor beszélhetünk, ha az elvégzett vizsgálat megfelelő számú és minőségű adat szolgáltatására képes elfogadható időn belül. Az elfogadható időtartomány az ipari környezetben igen rövid vizsgálati időt szab meg, tehát nagy szerep jut a folyamatfejlesztés részeként tervezett automatizálásnak a vizsgálat időigényének csökkentése szempontjából. Alapkövetelményként azt szabtuk meg, hogy az élek vizsgálata ne vegyen több időt igénybe, mint maga a megmunkálási folyamat. Az elméleti kutatások során alkalmazott rendszer ennek a kritériumnak nem felelt meg, ezért is volt szükség új rendszer tervezésére, amely ezt a követelményt már képes teljesíteni[3].

Amellett, hogy a tervezett rendszernek eleget kell tennie a fenti hatékonysági követelménynek, olyan rendszer megvalósításának bemutatása volt a célunk, amely hordozható, ezáltal nincs szükség telepített mérőállomások fenntartására. A hordozhatóság,

mozgathatóság abból a szempontból is fontos elvárás, hogy kőanyagok esetén a kézzel is könnyen mozgatható kőlapoktól kezdve a több száz kilogrammos kőtömbökig széles skálán mozog a vizsgálandó termékek tömege, tehát sok esetben az eszköznek kell a vizsgálandó darabot megközelítenie. Hasonlóan a szállíthatóság és az egyszerű tárolhatóság is fontos szempontot jelentettek a tervezés folyamán, mivel csak így beszélhetünk valóban hordozható rendszerről[3].

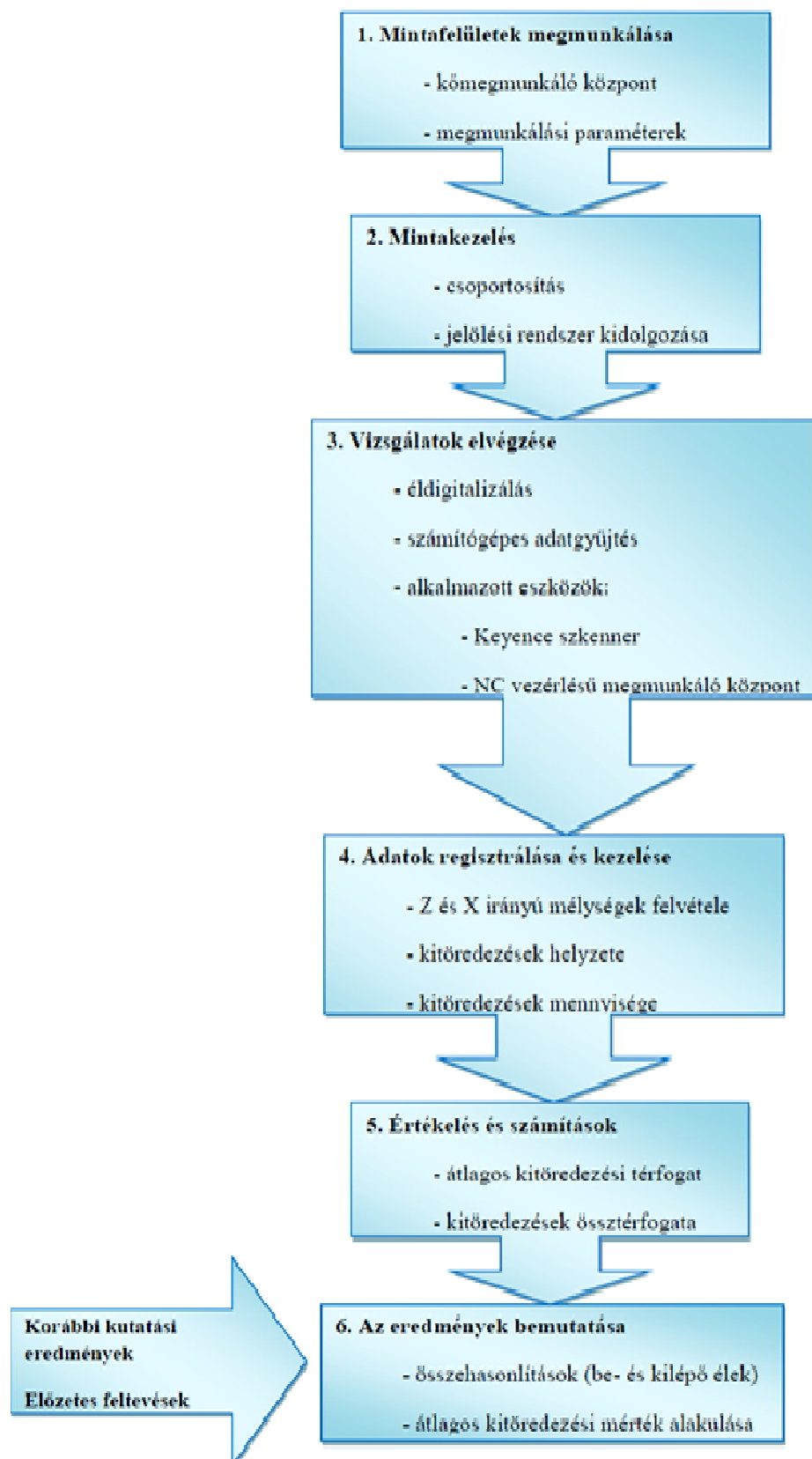
Az eszköz kezelése szintén kritikus pontja a rendszer tervezésének. Olyan eszközt alkalmaztunk, a rendelkezésünkre álló, kékfényű lézerszkennert, amelynek használata nem igényel szaktudást, a hozzá tartozó számítógépes szoftver segítségével a kőelek vizsgálata egyszerűen irányítható, ráadásul a vizsgálati rendszert automatizáló fejlesztésekkel ez a vizsgálati folyamat is automatikussá válhat. Ugyanígy a kapott adatok elemzése sem jelenthet a későbbiekben szaktudást igénylő problémát.

Mivel kereskedelmi forgalomba kerülő kész kőtermékek minősítésére kerülhet sor a rendszerrel, kiemelendő, hogy mindenképpen roncsolásmentes anyagvizsgálatot lehetővé tevő eszközöket alkalmaztunk. Az élek optikai eszközzel történő digitalizálása ennek a követelménynek eleget tesz, a kövek rögzítése pedig szintén nem jelent roncsolódással járó eljárást a folyamat során[4].

A szempontrendszer alapján összeállított rendszerrel az elvárások szerint kellően pontos, objektív értékelést lehetővé tevő adatokat kell kapnia a minősítő személyzetnek. Ezt az elméleti kutatásokkal történő összehasonlítással ellenőriztük. Csak akkor válhat szabványos eljárássá a minősítő tevékenység, ha ezeket az adatokat a mérési környezet változékonysága mellett is reprodukálhatóan képes szolgáltatni a vizsgálati rendszer, tehát az adatok megfelelősége részben a rendszer képességén is múlik, így célunk volt egy ebből a szempontból is alkalmas rendszer bemutatása.

### **3.2. A rendszer tervezésének folyamata**

A tervezési feladat első lépése a vizsgálati rendszer egyes részeinek kijelölése, valamint a köztük felállítandó kapcsolat meghatározása volt. Ebben a szakaszban figyelembe kellett venni a felsorolt elvárásokat valamint a rendelkezésünkre álló eszközöket is annak érdekében, hogy a szükséges pontossági követelményeknek eleget tevő rendszert hozzassunk létre. A vizsgálati rendszer felépítését a 3.1. ábra szemlélteti, bemutatva a teljes kísérleti folyamatot, kezdve a megmunkálástól, egészen a kiértékelésig[5].



3.1. ábra A kísérleti rendszer blokk-diagramja

Ahogy a fenti ábra is mutatja, egy komplex és soklépcsős vizsgálati folyamatról beszélhetünk. A vizsgálati rendszer kiépítése során törekedtünk arra, hogy ezeket a kutatási lépéseket összefoglaló, egységben kezelni képes módszert dolgozzunk ki a doktori kutatás alapján. A megfogalmazott elvárásoknak megfelelő, a minősítést hatékonyan elvégezni képes eszköz-összeállítást kívántunk bemutatni. A megvalósítás során számos tényező összehangolására kellett törekednünk, illetve az eddigi kutatásokban használtaktól eltérő berendezések használatára volt szükség, melyeket az új alkalmazásokhoz kellett illeszteni úgy, hogy közben szem előtt tartjuk: egy ipari környezetben is használható vizsgálati rendszert kívánunk létrehozni[4].

A rendszer kiépítése során problémát jelentett, hogy a korábbi kutatásoktól eltérően, olyan éldigitalizálási módszerre volt szükség, amellyel a kőélek leképezéséből kinyerhetőek az egyes kitöredezések méretei. Így terelődött a figyelmünk a gépészmérnöki gyakorlatban széles körben alkalmazott szkennelési eljárásokra, melyekkel roncsolásmentesen és hatékonyan szerezhetünk adatokat a felületekről, akár azok teljes számítógépes modelljét megalkotva. Ebből kifolyólag a kiértékelést mindenképpen számítógépes szoftverek segítségével kívántuk elvégezni, melyeket az alkalmazott eszközök ismeretében választottunk ki[3].

Az összeállított vizsgálati rendszer egységeit a *3.1. ábrán* is felsoroltuk, valamint a *3.1. fejezetben* részletesen bemutatásra kerültek. Mindezek egységbe foglalását az tette lehetővé, hogy az alkalmazásnak megfelelő eszközök kerültek felhasználásra és a célnak megfelelően használtuk őket a kutatás elvégzése során. Így mintegy visszafelé haladva építettük fel a vizsgálati rendszer elemeit. Ugyanis a kutatási terv elkészítésénél célul tűztük ki, hogy az egyes kitöredezési méreteit kell összegyűjtenünk, így erre a feladatra választottuk ki a kiértékelési módszert is. A kiértékeléshez használt megoldásokhoz pedig olyan adatgyűjtő eszközre volt szükség, amellyel kellően pontos és megfelelő mennyiségű adatot kaphatunk a kőelekről. Az elméleti kutatások során alkalmazott Scantech lézer és az így nyert adatok felhasználását lehetővé tevő RapidForm számítógépes szoftverrel felépített módszer az időigényessége és bonyolultsága miatt alkalmatlannak bizonyult az ipari környezetben való használatra. Így a gépészmérnöki gyakorlatban széles körben alkalmazott kékfényű Keyence profilszkennert alkalmaztuk, ami a doktori kutatás során került kiválasztásra a feladat elvégzésére és amellyel az adatgyűjtési időt jelentősen csökkentettük. A rendszer hatékonyságát önmagában a gyorsaság nem garantálná, ám az elvégzett vizsgálatainkkal alátámasztottuk a rendszer alkalmazhatóságát is, mely a kapott eredmények ismeretében megfelel a felsorolt elvárásoknak.

A Keyence profilszkennert elsősorban méretellenőrzésre használják, de az eszközt irányító és a beállításokat tartalmazó szoftver lehetővé tette számunkra, hogy a digitalizált profilokról a szükséges méreteket meghatározhassuk, így a kőelek minősítési folyamatában is alkalmazható az eszköz. A vizsgálatok idejére a berendezést a Gyártástudomány és – technológia Tanszék NC vezérlésű megmunkáló központján rögzítettük, így garantálva az elmozdulások pontosságát, melyekkel a megfelelő mennyiségű és távolságú profilok digitalizálása vált lehetővé. Az NC vezérlésű megmunkáló központok jelenleg a gyártásautomatizálás mellett a mérésautomatizálásban is teret kapnak, így az eszköz alkalmazhatósága már a próbamérések elvégzése előtt sem volt kétséges számunkra[3].

### **3.3. A kiépített rendszer előnyei, alkalmazhatóságának korlátai**

A doktori kutatásra alapozva TDK dolgozatunkban bemutatunk egy, az ipari körülmények között is hatékonyan alkalmazható vizsgálati rendszert a kövek éleinek kitöredezési mérték szempontjából történő minősítésére. A leírt rendszer előnye a korábban alkalmazott módszerrel szemben a jelentős időigény-csökkenés, valamint a hatékony és egyszerű alkalmazhatóság, továbbá a felsorolt szempontokat és elvárásokat a továbbfejlesztési lehetőségek követésével maradéktalanul kielégítheti. Előnyei közé tartozik továbbá, hogy alkalmazása nem igényel speciális szakmai ismereteket illetve a vizsgálatokkal nyert adatok további felhasználásáig egyszerűen tárolhatók PC-n.

A rendszer korlátait a lehetséges hibaokok keresésével világítottuk meg, melyeket a 6. fejezetben részletesen ismertetünk annak érdekében, hogy a későbbiekben a módszer továbbfejleszthető legyen a felsorolt hibák javítása által.

### **3.4. A rendszer értékelése**

A kiépített rendszer a gyakorlati kutatások során kapott értékek ismeretében bizonyítottan is képes a felsorolt elvárások kielégítésére, megfelelő pontosságot érhetünk el vele az ipari körülmények között is alkalmazott eszközök használatával. Mindezt a 6. fejezetben bemutatott mérési eredményekkel kívánjuk alátámasztani. A megvalósítás költségvonzata is kisebb, mint az elméleti kutatások során alkalmazott eszközöké, mindamelllett a hordozhatóság és az egyszerűbb tárolás további előnyöket jelentenek. Mivel a bonyolult kiértékelési folyamat is egyszerűbbé válik a megfelelő adatregisztrálás és az adatgyűjtés könnyebbsége miatt, különösebb szakértelemre sincs szükség a kezeléshez. Az általunk bemutatott eszközöket a mérnöki gyakorlatban széles körben alkalmazzák, tehát a

vizsgálati rendszer felépítéséhez elérhető, a beszerzésük nem jelent problémát ebből a szempontból.

Összességében a kiépített rendszerről elmondható, hogy az előzetes elvárásoknak megfelelően alkalmazható, a szükséges pontosságot garantálni képes vizsgálati módszerről beszélhetünk. Az elméleti kutatásokhoz használt eljárással összevetve pedig egy hatékonyabb és könnyebben alkalmazható, ipari környezetben is helytálló minősítési lehetőséget kínál.

## 4. A vizsgált kövek bemutatása

TDK munkánk egy kömegmunkálással foglalkozó kutatássorozat része, tehát szükségesnek tartjuk bemutatni, a fémek homogén szerkezetével ellentétben, heterogén szemcseszerkezettel, és így eltérő tulajdonságokkal rendelkező kereskedelmi gránitok főbb jellemzőit. A bemutatásra kerülő kereskedelmi gránitok kőzetmintáit a Vereczkei és Fia Kőfaragó Kft. bocsátotta a rendelkezésünkre. A kőzetszerkezet megismerésére szükség van ahhoz, hogy a kövek megmunkálás során tapasztalható viselkedését értékelhessük, a tapasztalt minőségbeli különbségek okát feltárhassuk. Dolgozatunkban öt különböző átlagos szemcsemérettel rendelkező kereskedelmi grániton végzett kísérleteket mutatunk be, melyek az MSZ szabványban meghatározott szemcseméret-tartományokat lefedve jól reprezentálják a különböző átlagos szemcseméret hatását, valamint bemutathatóak velük azok az általános szabályszerűségek, melyeket ez a tulajdonság nem befolyásol.

Ahhoz, hogy átfogó képet kaphassunk a későbbi kutatások előkészítésénél a szemcseszerkezet hatásáról, valamint jelen munkában bemutathassuk az egyes, különböző szemcsemérettel rendelkező kereskedelmi gránitoknál tapasztalható általános szabályszerűségeket, a választott köveket alapos kőzettani vizsgálatnak vetették alá az Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszéken. Fontos megemlítenünk, hogy mit értünk pontosan a kereskedelmi gránitok fogalma alatt: kereskedelmi gránitnak tekintik a szakemberek és a forgalmazók a természetes gránitokat, illetve gabbrókat, amelyek mélységi magmás kőzetek, ám jelentős eltérés a két kőzet alapvető tulajdonságai között, hogy a gabbrók nem tartalmaznak kvarcot. TDK munkánk kidolgozása során azonban a szabványban foglaltak alapján dolgoztunk a rendelkezésünkre álló kőanyagokkal, így mindenképpen a kereskedelmi gránitok vizsgálata volt az elsődleges cél, nem pedig a természetes besorolás alapján történő értékelés. A részletes kőzettani elemzések alapján az alábbiakban bemutatjuk az általunk vizsgált köveket, ahol a természetes besorolásnak megfelelően ismertetjük a kőzetalkotó ásványokat és a szemcseszerkezetet. Ezeknek a kőzettulajdonságoknak a hatását a 6. fejezetben részletezett értékelés során azonban csak részlegesen érintjük, mivel a kilépő és belépő élek kitöredezési mértékének vizsgálata során ezen paraméterek vizsgálata a kutatás mélyítését igényelné, valamint a doktori kutatáson alapuló vizsgálati rendszer működésének bemutatását ezek a tulajdonságok nem befolyásolják.

### **1-es kő, Rosa Beta (forrás: Fogarassy-Kun, 2012, [2] 46-47. oldal)**

A Rosa Beta olaszországból származó, kereskedelmi forgalomban kapható gránit. Világosszürke színű, kissé rózsaszínes árnyalatú tömött szerkezetű mélységi magmás kőzet. Kőzetszöveve irányítatlan kristályos szemcsés. Fő kőzetalkotó a kvarc, mely a kőzetszövetben csomósan helyezkedik el és a káliföldpát. A kvarcok szemcsenagysága átlagosan 1 mm, a legnagyobb szemcsék elérhetik a 2 mm-t is. Színét a rózsaszínű és fehér káliföldpátok adják, melyek táblás fejlődésűek és szemcsenagyságuk meghaladja a 2 mm-t. A káliföldpátok ikres felépítésűek, melyek jól hasadó felületekkel rendelkeznek. A kvarcok izotermikus törési felületei érdekesek. A kőzetszövetben csomókba rendeződve hintetten színes elegyrészek fordulnak elő, melyeket biotit csillémok és piroxének alkotnak. Ezek szemcsenagysága 0,1 és 0,3 mm közötti. A Rosa Beta gránit porozitása szemcseközi jellegű. A Rosa Beta a vizsgálatainkban a közepes szemcsenagyságú gránitok képviselője.

A laboratóriumi vizsgálat során elvégezték a Rosa Beta légszáras és vízzel telített testsűrűség vizsgálatát, valamint meghatározták hajlítószilárdságát (légszáraz és fagyasztott állapotban), illetve Böhme rendszerrel mérhető kopását. Vizsgálták továbbá a kereskedelmi termék csúszásbiztonságát is.

A Rosa Beta gránitról 30-szoros nagyításban készült mikroszkópos felvétel látható a 4.1. ábrán. A képen megfigyelhetők az egyes kőzetalkotók, és lokális eloszlásuk.



**4.1. ábra** A Rosa Beta gránit megmunkált felülete

A mikroszkópos felvételen (4.1. ábra) megfigyelhetők az egyes, imént felsorolt kőzetalkotók és a jellemző elrendeződésük. A csomókba rendeződött kvarcok mellett hintetten fordulnak elő a fényes biotit szemcsék. A rózsaszínes színt adó káliföldpátok szintén jól láthatók a képen.

## **2-es kő, Giallo Farfalla (forrás: Fogarassy-Kun, 2012, [2] 48-49. oldal)**

A Giallo Farfalla sárgásbarna színű, szürkés árnyalatú, kristályos szemcsés szövetű mélységi magmás kőzet, tömött szerkezetű gránit. Nagy szemű, kissé irányított kőzetalkotójú gránit. Jellegzetes kőzetalkotói a nagyméretű csomókban elhelyezkedő piszkosfehér színű kvarc és a káliföldpát. A kvarcok szemcsenagysága 1 és 10 mm közötti. További fő kőzetalkotóként megjelennek a rózsaszínű ortoklászok, melyek ikres szerkezetűek és táblás kifejlődésűek, szemcsenagyságuk a 15 mm-t is elérheti. A káliföldpátok mellett megjelennek a finomszemű, táblás fejlődésű plagioklászok, melyek szemcsenagysága 1 mm alatti. A kőzet szövetében további színes kőzetalkotók fordulnak elő. A kőzet porozitása szemcseközi, 5 térfogatszázaléknál kisebb értékű. A Giallo Farfalla a kísérleteinkben a nagyobb szemcsés gránitokat képviseli.



**4.2. ábra** A Giallo Farfalla gránit megmunkált felülete

A Giallo Farfalla mikroszkópos képén egyértelműen durvább felület látható, mint a többi vizsgált gránitról készült felvételen. Az égetett gránittábla felülete inhomogén, a szemcsenagyság látványosan nagyobb, mint a Rosa Beta esetén. A nagyméretű csomókban elhelyezkedő kvarcok mellett a szintén nagy szemnagysággal rendelkező ortoklászok láthatók.

### **3-as kő, G684 kereskedelmi megnevezésű gabbró (forrás: BME EAT: [15] 1. oldal)**

Sárgás-zöldes homokszínű, sötét árnyalatú, kristályos szemcsés szövetű magmás mélységi kőzet. Kőzettani neve: gabbró. A kőzet tömött, homogén szerkezetű. Jellegzetes kőzetalkotó ásványa a világosabb színű plagioklász és a piroxén. A hintetten elhelyezkedő táblás, oszlopos kifejlődésű plagioklászok 1-2 mm szemnagyságúak. A plagoklászok mellett megjelenő piroxének finomszeműek, táblás kifejlődésűek, szemnagyságok 1 –3 milliméter. A kőzet szövetében egy-egy egyéb színes kőzetalkotó, olivin és klorit fordul elő. Ezek szemnagysága tizedmilliméter alatti.

A kőzetben irányítottság nem figyelhető meg. A kőzet porozitása szemcseközi, a porozitása 2 térfogat %-nál kisebb. A szemcseközi pórusok nagysága tized milliméter alatti.



**4.3. ábra** A G684-es gabbró megmunkált felülete

#### **4-es kő, GN-1-es gránit (forrás: BME EAT: [15] 1. oldal)**

Világosszürke, rózsaszínes árnyalatú, kristályos szemcsés szövetű magmás mélységi kőzet. A kőzet kőzettani neve: gránit. A kőzet szerkezete tömött. Jellegzetes kőzetalkotó ásványa a kvarc és a káliföldpát. A csomókban elhelyezkedő piszkosfehér színű, izometrikus kvarcok 1-3 mm szemnagyságúak. A fő kőzetalkotóként megjelenő rózsaszínű, hasadásra hajlamos ortoklászok, ikres szerkezetűek. Szemnagyságuk eléri a 6-8 mm-t. A káliföldpátok mellett megjelenő plagioklászok finomszeműek, táblás kifejlődésűek, csomókba rendeződötten fordulnak elő a kőzetszövetben. A kőzet szövetében egy-egy színes kőzetalkotó (biotit csillám) fordul elő. Ezek szemnagysága milliméter alatti.



**4.4. ábra** A GN-1-es gránit megmunkált felülete

A kőzet porozitása szemcseközi, a porozitása 2 térfogat % alatti. A szemcseközi pórusok nagysága tized milliméter körüli.

#### **5-ös kő, GF-1-es gabbró (forrás: BME EAT: [15] 1. oldal)**

Szürke színű, sötét árnyalatú, kristályos szemcsés szövetű magmás mélységi kőzet. Kőzettani neve: gabbró. A kőzet tömött, homogén szerkezetű. Jellegzetes kőzetalkotó ásványa a plagioklász és a piroxén. A hintetten elhelyezkedő sötét színű, táblás, oszlopos kifejlődésű plagioklászok 1-2 mm szemnagyságúak. A plagoklászok mellett megjelenő piroxének finomszeműek, táblás kifejlődésűek, szemnagyságok 1 –3 milliméter. A kőzet szövetében egy-egy egyéb színes kőzetalkotó, olivin és klorit fordul elő. Ezek szemnagysága tizedmilliméter alatti.

A bázikus vegyi jellegű kőzetben irányítottság nem figyelhető meg. A kőzet porozitása szemcseközi, a porozitása 2 térfogat %-nál kisebb. A szemcseközi pórusok nagysága tized milliméter alatti.



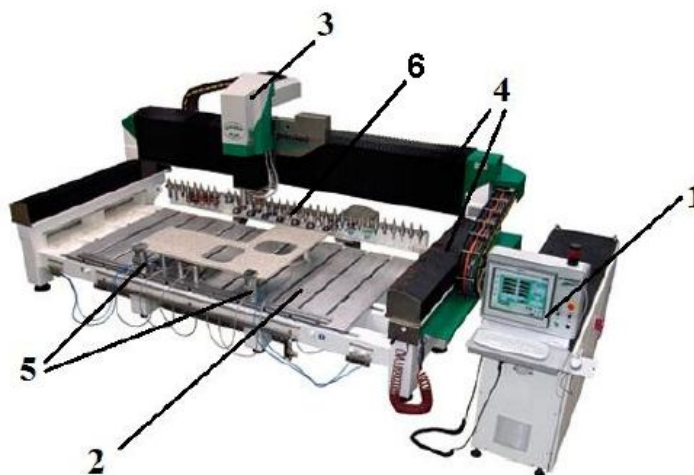
**4.5. ábra** A GF-1-es gabbró megmunkált felülete

## 5. Felhasznált eszközök

A kutatómunka sikeres kivitelezéséhez elengedhetetlen volt számunkra több berendezés megismerése, egyes esetekben a magabiztos kezeléshez szükséges ismeretanyagok megszerzése. Első lépésként egy kőmegmunkáló központra volt szükségünk, amivel a vizsgálandó felületeket elő lehetett állítani. Második lépésként pedig olyan eszközökre, amivel a mintafelületekről történő adatgyűjtést el lehetett végezni.

### 5.1. Prussiani Golden Plus kőmegmunkáló központ

A gránitokon a vizsgálandó felületet egy *Prussiani* által gyártott, *Golden Plus* típusú, speciálisan kövek, gránitok megmunkálására tervezett szerszámgéppel végeztük el (5.1. ábra). Ebben nagy segítségünkre volt a Woldem Kft ügyvezetője, *Gyúró István*. Az ilyen típusú gépek általában nagy munkatérrel rendelkeznek, illetve portálos kialakításúak, mivel a munkaasztal mozgatása (a kövek tömegéből adódóan) csak nagy energiafelhasználással lenne megvalósítható.

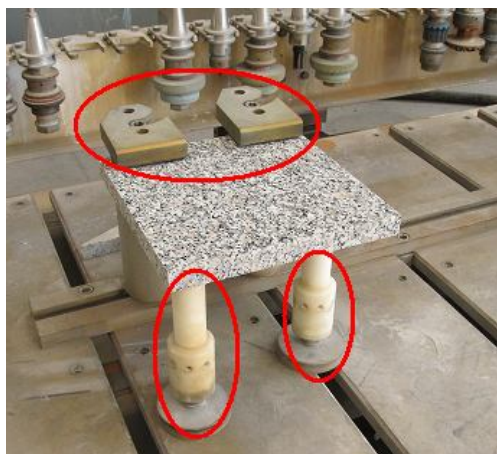


5.1. ábra Prussiani Golden Plus típusú megmunkáló központ részei

(1. vezérlőpanel, 2. munkaasztal, 3. főorsó, 4. szánrendszer, 5. rögzítő elemek, 6. szerszámtár)

(forrás: Fogarassy és Kun [2], 33. oldal, 5.1. ábra)

A készülékezés szinte minden esetben megoldható az asztalra szerelt, megfelelő számú támasztékkal és a munkadarab ehhez való leszorításával (kőrmös leszorítás, vákuumos megfogás, 5.2. ábra). Továbbá a gép az asztal mellett lineárisan elhelyezett 34 db-os szerszámtárral rendelkezik.



5.2. ábra Munkadarab készülékezése körmös szorítással

Lehetőség van megmunkálás közben vízzel történő hűtésre, a jobb kopási paraméterek és felületi minőségek elérése végett. Ennek megvalósítása történhet szerszámon kívül és belül is. Természetesen szerszámon belüli hűtés csak az arra megfelelően kialakított szerszámmal lehetséges. A külső hűtés során a nagy nyomású vizet a főorsó mellett közvetlenül elhelyezett 14 db fűvókán keresztül juttatja a szerszámra és a felületre [2]. További, fontosabb számszerű paramétereket az 5.1. táblázat tartalmazza.

| Típus                                    | Prussiani Golden Plus |
|------------------------------------------|-----------------------|
| X / Y / Z löket [mm]                     | 3300 / 1600 / 250     |
| Főorsó teljesítmény [kW]                 | 15                    |
| Max. főorsó fordulatszám [1/min]         | 10 000                |
| X / Y / Z gyorsmeneti sebesség [m/min]   | 40 / 40/ 10           |
| Szerszámbefogás                          | ISO40                 |
| Szerszámtár kapacitás [db]               | 34                    |
| Gép hossza / szélessége / magassága [mm] | 5630 / 2980 / 2250    |
| Gép tömege [kg]                          | 5200                  |

5.1. táblázat Prussiani Golden Plus kömegmunkáló központ fontosabb paraméterei [11]

Fémek megmunkálásától eltérően a kövek marásához *speciális*<sup>1</sup> szerszámokat kell használni. Ennek megfelelően a szerszám lehet polírkő készlet, vagy az esetek túlnyomó részében szegmenses marószerszám (léteznek lapkás szerszámok is, de elterjedésük igen csekély). A szegmenses marószerszámok geometriai kialakítása sokféle lehet, de a szegmensek mindig két részre bonthatók: a szívósságot biztosító *mátrix anyagra* és a megmunkálást végző (a mátrix anyagban elhelyezkedő) *gyémánt szemcsékre*. A gyémánt szemcsék mérete egy szerszámon azonos [2]. A kövek megmunkálásához használt szerszámot a 5.3. ábra szemlélteti, ami egy 100 mm átmérőjű, 22 szegmensből álló síkmaró szerszám.

<sup>1</sup>viszonyítási alap: fémek megmunkálásához gyakran használatos szerszámok



**5.3. ábra** Kőmaró szerszám (forrás: Fogarassy és Kun [2], 14. oldal, 2.5. ábra)

Az 5.4. ábrán látható a szerszámgépet vezérlő, Stone-CAM 3D programrendszer kezelőfelülete PC és gépi környezetben is. A szoftver kifejezetten kövek megmunkálásra kifejlesztett CAD/CAM rendszer amely a *G kódos*<sup>2</sup> programozáson alapszik. A gránitmarásból adód termékek legjelentősebb felhasználási területe az építőipar, azon belül is konyhai, fürdőszobai terek kialakítása. Ennek megfelelően a program is ilyen megmunkálási stratégiák kidolgozására legalkalmasabb, így ehhez kapcsolódó beépített ciklusokat is találunk. Olyan megmunkálási fajtákra, ahol beépített ciklusokat nem tudunk alkalmazni, a már említett szabványos G kódos programozást tudjuk használni. A többi CAM rendszerhez hasonlóan a StoneCAM-ben is meg lehet tervezni a munkadarab teljes gyártását, kezdve az előgyártmány és késztermék definiálásától, az alaksajátosságok felismerése és hozzá műveletelemek rendelésén, szerszámválasztás és technológiai paraméterek beállításán át, a megfelelő vezérlésre történő posztprocesszálságig. A CAM rendszerektől már minimálisan elvárható követelmény, hogy a komplett gyártást virtuális környezetben is el lehessen végezni, így ennek megfelelően a StoneCAM is rendelkezik szimulációs rendszerrel. Ezekon kívül többféle fájlformátumot képes olvasni, majd abból saját formátumot előállítani, mint például BMP, DXF, STL.



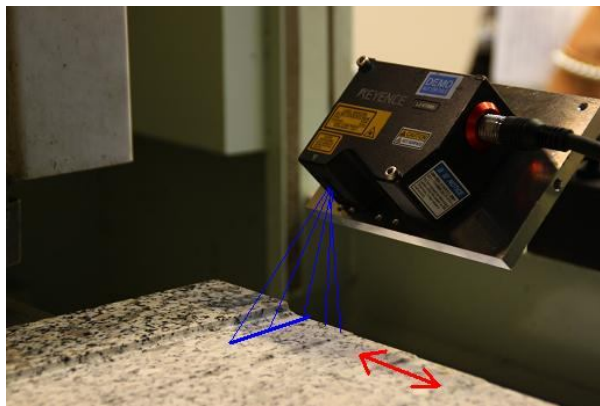
**5.4. ábra** StoneCAM számítógépes környezete és gépi kezelőfelülete (forrás: Fogarassy és Kun [2], 34. és 35. oldal, 5.2. és 5.3. ábra)

<sup>2</sup> ISO6983 szabvány foglalja magába, ami a CNC vezérlések hivatalos szabványa

## 5.2. Keyence LJ V7080 kékfényű profil lézerszenker

Ahogy már említettük a *1. Bevezetésben*, egyik célunk olyan mérési rendszer kidolgozása, ami az ipar számára is hasznosítható (egyszerű eszközekezelés, termelékeny adatgyűjtés/feldolgozás). Az elméleti kutatásokhoz használt eszközökkel az adatok gyűjtése, majd annak kiértékelése során kapott eredmények ugyan megfelelőek voltak, viszont maga az adatgyűjtés és kiértékelés körülményes volt, ipari alkalmazásra aligha használható.

A BME Gyártástudomány és –technológia Tanszék számára 2013 nyarán a *Keyence*<sup>3</sup> japán cég magyarországi képviselője kölcsön adott egy LJ V7080 típusú kékfényű profil<sup>4</sup> lézerszenkernert, amit TDK munkákhoz fel tudtunk használni. A működési elve a következő: szoftveres úton be tudunk állítani mintavételezési jelsűrűséget Hertz formájában, majd az eszköz és a munkadarab között relatív, a lézerfényre merőlegesen egyenes vonalú egyenletes elmozdulást hozunk létre (*5.5 ábra*). A két paramétértől függően az adatgyűjtés sebessége akár nagyon nagy is lehet (másodpercenként akár több ezer metszet). Az eszköz legérdekesebb specialitása, hogy az iparban használatos vörös fény helyett kék fénnel dolgozik. Rendkívüli nagy előnye a kék fénynek, hogy rövid hullámhosszú<sup>5</sup>, ezért az eszköz sokkal nagyobb pontosságot és ismétlési pontosságot tud elérni (*5.2. táblázat kiemelt sora*).



**5.5. ábra** Keyence LJ V7080 profil lézerszenker és működési elve  
(kék: lézerfény szemléltetése; piros: munkadarab elmozdulása)

Hátránya a vörös fényű eszközökkel szemben viszont, hogy élettartama kb. egy nagyságrenddel kevesebb (néhány ezer üzemóra). A berendezés fontosabb paramétereit az *5.6. ábra*, illetve *5.2. táblázat* szemlélteti.

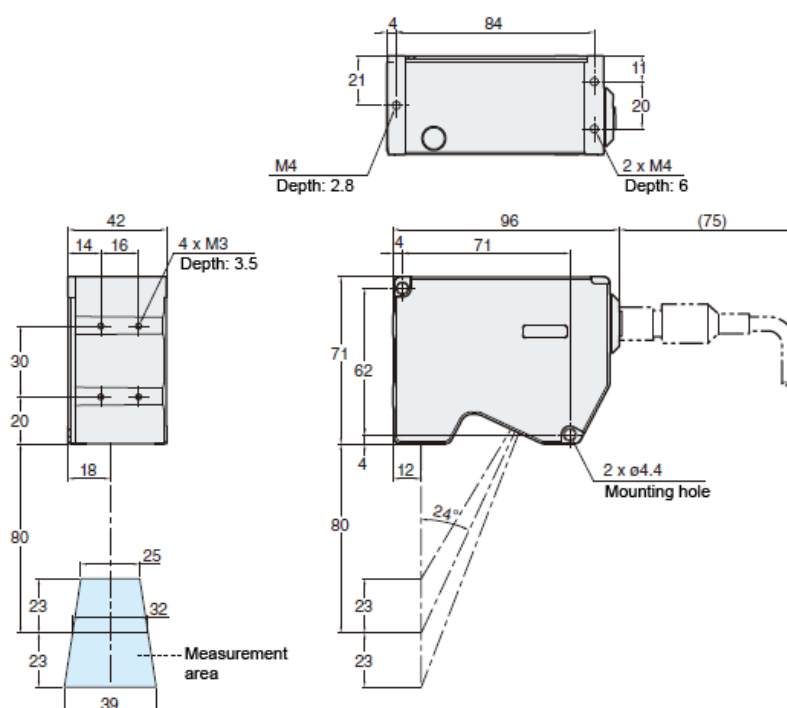
<sup>3</sup> a cég fő profilja kép feldolgozók, vonalkód olvasók, digitális mikroszkópok, lézerszenkerek fejlesztése

<sup>4</sup> a lézerszenkerekkel eltérően nem pontfelhőt regisztrál, 2 dimenziós metszeteket

<sup>5</sup> kék fény hullámhossza: 420-490 nm; vörös fény hullámhossza: 650-750 nm [14]

|                                                        |                      |
|--------------------------------------------------------|----------------------|
| Típus                                                  | Keyence LJ V7080     |
| Szerelés [-]                                           | diffúz visszaverődés |
| Mérési tartomány Z / X tengely [mm]                    | 80 ± 23 / 32 ± 7     |
| Fényforrás típusa [-]                                  | kék félvezető lézer  |
| Fényforrás hullámhossza [nm]                           | 405                  |
| Fényforrás teljesítménye [mW]                          | 4,8                  |
| <b>Pontosság Z / X tengely mentén [μm]<sup>6</sup></b> | <b>0,5 / 10</b>      |
| Mintavételezés sebessége [ms]                          | 16                   |
| Környezet maximális fényereje [lux]                    | 10000                |
| Hőmérséklet tartomány [°C]                             | 0 - 45               |
| Relatív páratartalom tartomány [%]                     | 20 - 85              |
| Anyaga [-]                                             | Alumínium            |
| Tömege [g]                                             | 400                  |

5.2. táblázat Keyence LJ V7080 profil lézerszenker fontosabb paraméterei [8]



5.6. ábra Keyence LJ V7080 profil lézerszenker műszaki és működési rajza [8]

A lézerszenkernert a Keyence által kimondottan ehhez a típushoz kifejlesztett **LJ-Navigator 2 szoftver** segítségével tudjuk vezérelni. A program nagy előnye az általunk eddig használt technológiában használt szoftverekhez képest, hogy az adatgyűjtés és feldolgozás egy helyen történik, azaz nem kell adat importálással/exportálással foglalkozni, ami bizonyos mennyiségű (konverzió típusától függő) adatvesztéssel jár. Az adatfeldolgozás részletezése az 6.6. fejezetben történik. Az eszköz automatikusan egyszerre 16 különböző mérést tud végrehajtani egy adott kontúron. Ilyen például körsugár, távolság, szög, stb. mérése.

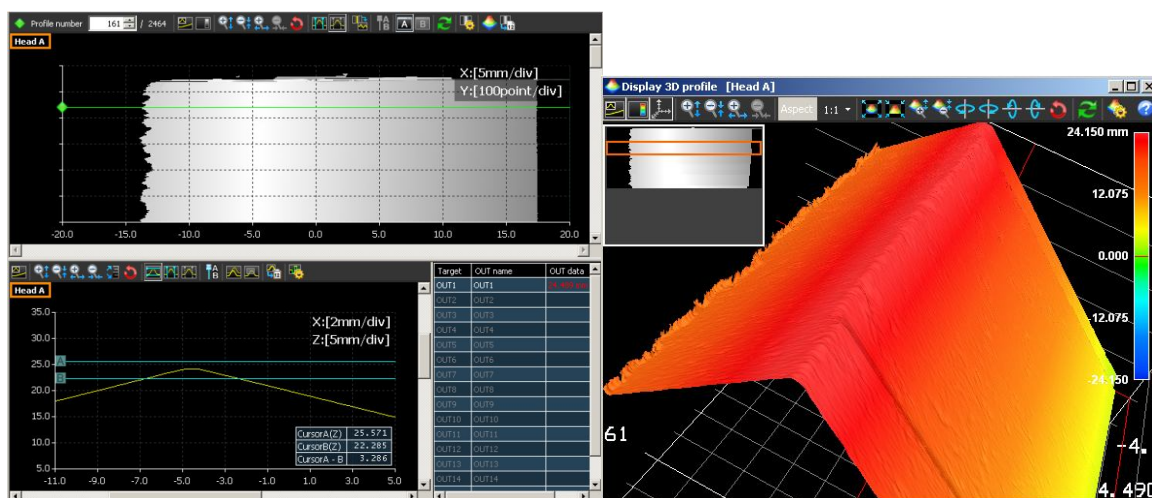
<sup>6</sup> Z - tengely: digitalizálандó felületre merőleges irány; X - tengely: relatív elmozdulás iránya

Az alkalmazás kezelése nem, viszont a megfelelő paraméterek beállítása már igényel némi szakértelmet, mivel az egyes beállítási lehetőségek fizikai tartalmával tisztában kell lenni, hogy az adott munkadarab digitalizált formátuma a számunkra megfelelő minőségben álljon elő. A mérés megkezdése előtt a paraméterek beállítását az 5.7. ábra piros kerettel kiemelt részén látható, strukturáltan szedett menüpontokban lehet elvégezni. Ezt balról jobbra, egymásután lehet végrehajtani, és amikor az egyik fülön lévő beállításokat elvégeztük, akkor tudunk a következő fülre lépni. A zöld részben a profil és kép minőségével foglalkozhatunk, a kék részen a méréssel kapcsolatos opciók közül lehet választani, míg a lila részen a rögzített adatok továbbításával, eredmények mutatóásával kapcsolatos beállításokat tudjuk megadni.



5.7. ábra Szkenelés beállítási lehetőségei az LJ - Navigator 2 szoftverben

A kiértékelést az 5.8. ábra bal oldalán látható menüpontot előhívva tudtuk elvégezni. További lehetőségként kaphatunk a beszkenelt felületről egy 3 dimenziós képet (5.8. ábra jobb oldala), amely viszont csak látványelem, a mérésbe és kiértékelésbe közvetlenül nem vonható be.



5.8. ábra Bal oldalon a kiértékeléshez használt menü, jobb oldalon a szkennelt profilok sorozatáról 3D-s látványkép

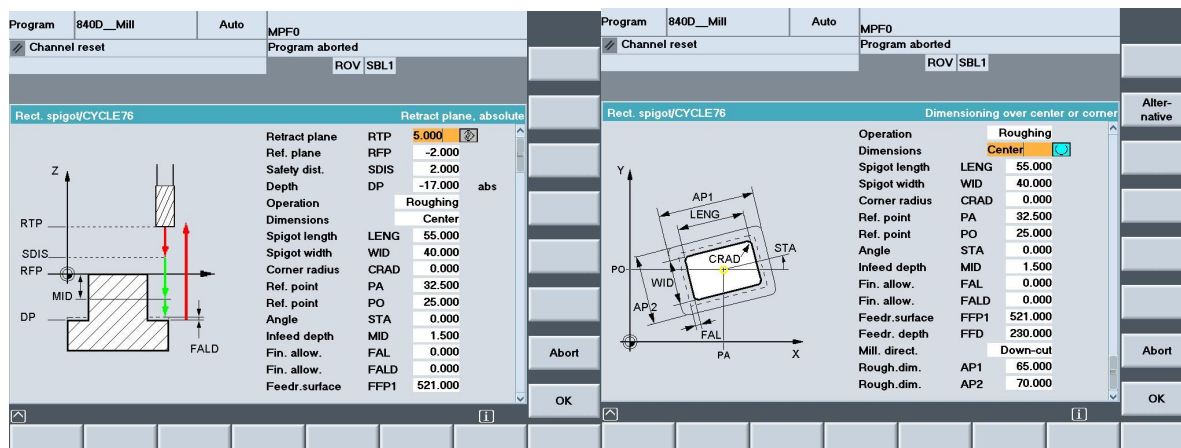
### 5.3. Topper TMV-510T Sinumerik 840D vezérléssel

Ahogy már az 5.2 fejezetben említettük a munkadarab és a lézerszenzor között relatív elmozdulást kellett biztosítani. Ehhez a BME Gyártástudomány és –technológia Tanszéken található szimultán négytengelyes megmunkálásra is alkalmas *Topper TMV-510T* szerszámgépet használtuk, ami a Siemens által fejlesztett csúcskategóriás *Sinumerik 840D* vezérléssel van ellátva. A megmunkáló központ munkatere X irányban 510 mm, Y tengely mentén 360 mm, míg a Z löket 300 mm. A főorsó teljesítménye 5,5 kW, ami 12 000 maximális percenkénti fordulatot képes előállítani. Az X-Y-Z tengelyek mentén a gyorsmeneti előtolás maximális sebessége rendre 48 – 48 – 40 [ $\frac{m}{min}$ ], míg a maximális munkameneti előtolás minden tengely mentén 10  $\frac{m}{min}$ . A pozícionálási pontossága 0,01 mm, az ismétlési pontossága 3  $\mu m$ . A megmunkáló központ egy 20 szerszámtár hellyel rendelkező, közvetett cseréléssel ellátott dobtárral van felszerelve. A szerszámgépet az 5.9. ábra szemlélteti.



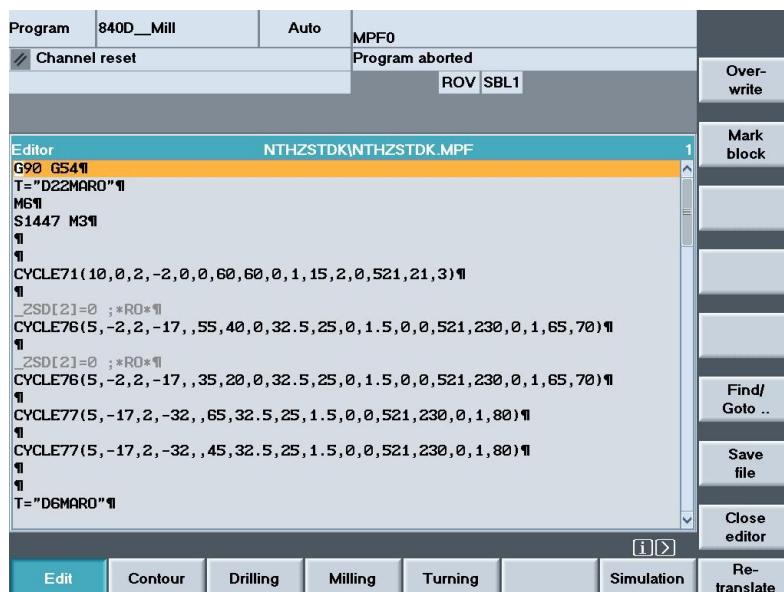
**5.9. ábra** Topper TMV-510T szerszámgép (forrás: Nagy és Hodosán [10], 14. oldal, 10. ábra)

A vezérlés ugyan lehetőséget nyújt a G kódos programozásra is, viszont az egyszerűbb és sűrűn igénybevett műveleteket (mint például síkmarás, fúrás, stb.) már felhasználóbarát párbeszédpanelon keresztül is megadhatjuk, amire példát az 5.10. ábra mutat. Ennek előnye, hogy a programozási idő és a hibázási lehetőség is jelentősen mérséklődik.



5.10. ábra Négyzetcsap „programozása” Sinumerik 840D vezérlésen (forrás: Nagy és Hodosán [10], 17. oldal, 12. ábra)

A 5.11. ábrán látható egy főprogram különböző ciklusok beillesztése után. Zárójelben a megadott paraméterek vannak kötött sorrendben, így gyakorlott programozó a párbeszédpanel előhívása nélkül is tudja a paramétereket korrigálni. Az ábrán továbbá az is látható, mennyire képes a vezérlő a program méretét, illetve a G kódok számát redukálni.



5.11. ábra Ciklusokkal feltöltött program (forrás: Nagy és Hodosán [10], 18. oldal, 14. ábra)

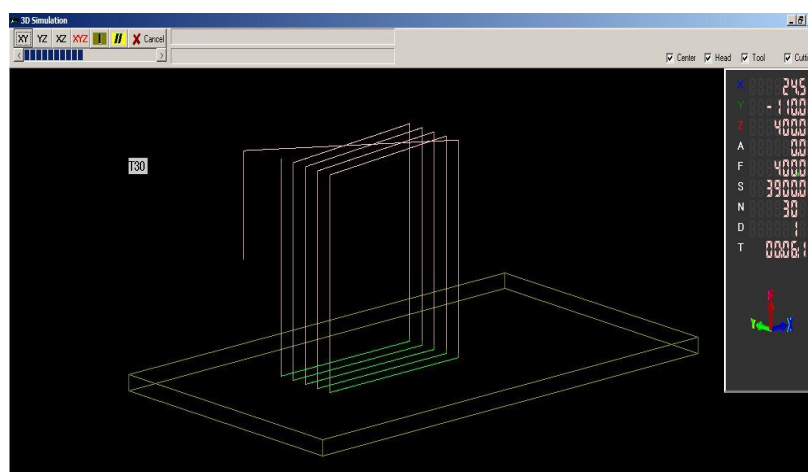
A vezérlés marási megmunkáláson kívül gyakorlatilag minden feladatra alkalmazható, úgy mint esztergálás, fúrás csiszolás lézervágás, stb. Ebből kifolyólag maga a rendszer moduláris felépítésű, tehát elegendő csak azokat a funkciókat megvásárolni és integrálni, amire ténylegesen szükség van. A későbbiekben, ha igény van rá, természetesen bővíthető a többi funkcióval is. A 32 bites mikroprocesszor lehetőséget nyújt arra, hogy a vezérlés egyszerre 31 tengelyt tudjon vezérelni. Ma már egy felső kategóriás vezérléstől alap szolgáltatásként megkövetelhető, hogy képes legyen NURBS interpolációra is.[10]

## 6. Vizsgálati folyamatok

TDK munkánk során sarkalatos pont volt a köveken a kutatásaink alapját képező mintafelületek kialakításához szükséges megmunkálási mód kiválasztása, illetve az jellemző kitöredések kiértékeléséhez szükséges módszer megállapítása. Az ehhez kiválasztott berendezések és szoftverek működését az 5. fejezetben ismertettük. A megmunkálás folyamatát, illetve a kiértékelés módját az 6. fejezetben mutatjuk be.

### 6.1. A megmunkálás módja

TDK munkánk során öt különböző típusú követ tanulmányoztunk, melyeken különböző minőségű lépcsőket, azaz mintafelületeket alakítottunk ki. A kövek vizsgálatainkhoz szükséges lépcsőinek megmunkálásához a berendezést az 5.1. fejezetben részletesen bemutatott Prussiani Golden Plus típusú szerszámgéppel hajtottuk végre. A megmunkálási folyamat első lépéseként az adott követ az asztalra helyeztük, majd körmös megfogóval és alátámasztással rögzítettük. A munkadarab-koordinátarendszer nullpontjának felvétele egy iparban általánosan használt bemérő fejjel történt. A StoneCAM programban megrajzoltuk a programozott pont pályáját, majd az egyes szakaszokhoz az alkalmazott paramétereket hozzárendeltük. A szimulációk elvégzése szolgáltatta a szükséges programot. Elsőként, a felületi egyenlőtlenségek megszüntetése érdekében sík felületet martunk. Erre azért volt szükség, mert az esetleges egyenlőtlenségek potenciális veszélyt jelentenek a megmunkálás szempontjából. A StoneCAM szimuláció közben jellemző környezete az 6.1. ábrán látható [2].



6.1. ábra StoneCam szimuláció (forrás: Fogarassy és Kun [2], 36. oldal, 5.4 ábra)

TDK munkánk során ötféle követ (*Rosa Beta gránit*, *Giallo Farfalla brazil gránit*, *G684 gabbró*, *GN-1-es gránit*, *GF-1-es gabbró*) martunk vizsgálatainkhoz. Ellenirányú marás

alkalmazása mellett minden körre öt különböző vágósebességgel, a megmunkálási környezetre jellemző többi paraméter állandó értéken való tartása mellett munkáltunk meg különböző minőségű mintafelületeket. A nagyolás után a fogásmélységet 1 mm-re, a fogásszélességet 45 mm-re, az előtolást 400 mm/min értékre beállítva minden körre öt mintafelületet martunk a különböző, előre meghatározott vágósebességekkel, melyek értékei, illetve a belőlük az 6.2. fejezet szerinti módon számolt fordulatszámok a 6.1. táblázatban olvashatók.

| Mintafelület | $v_i$ – vágósebesség [ $\frac{m}{min}$ ] | $n_i$ – fordulatszám [ $\frac{1}{min}$ ] |
|--------------|------------------------------------------|------------------------------------------|
| 1.           | 1400                                     | 4458                                     |
| 2.           | 1100                                     | 3503                                     |
| 3.           | 800                                      | 2548                                     |
| 4.           | 500                                      | 1593                                     |
| 5.           | 200                                      | 637                                      |

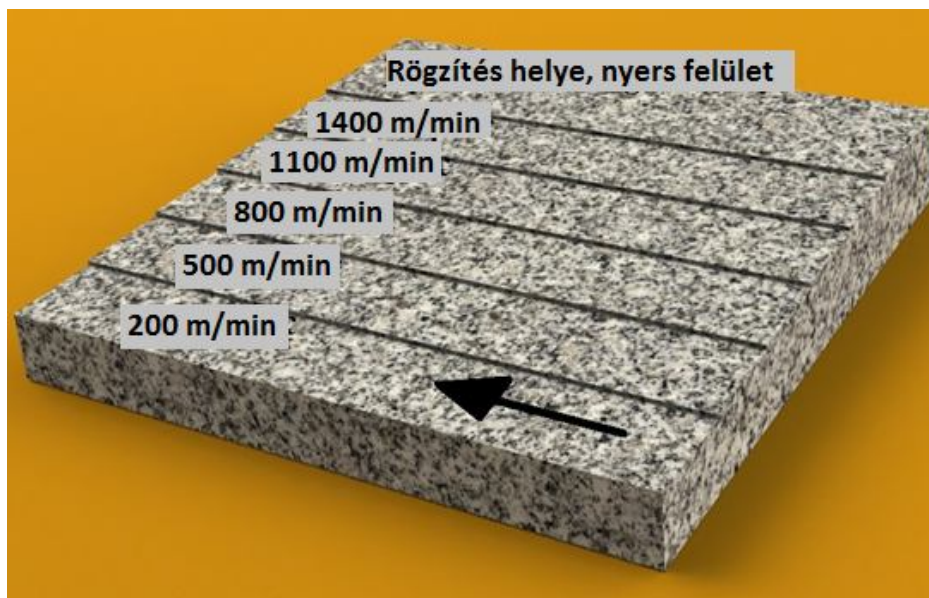
6.1. táblázat Mintafelületenkénti vágósebesség és fordulatszám adatok

Az egyik felhasznált marási program az 6.2. ábrán látható [2].

```
G90
#MCS G0Z0.0
G54 (work origin)
#MCS G0B0
(ADAPTED=FALSE)
(maro_100 UTENSILE CODICE 64547424060781)
T30D1
M6
G0X344.456Y-411.3
/S3900M03
/G4K2
G0Z5
M07
G1Z-1F100
X80F400
G2G6X18.7Y-350I80J-350
G1Y-170
G2G6X80Y-108.7I80J-170
G1X380
G2G6X441.3Y-170I380J-170
G1Y-350
G2G6X380Y-411.3I380J-350
G1X344.456
X380
G3X397.564Y-408.73R61.3
G1X62.436
G2G6X19.324Y-358.725I80J-350
G1X440.676
G3X441.3Y-350R61.3
G1Y-308.72
X18.7
Y-258.715
X441.3
Y-208.71
X18.7
Y-170
G2X19.75Y-158.705R61.3
G1X440.25
G0Z5
M09
M05
#MCS G0Z0.0
M30
```

6.2. ábra Az egyik általunk használt marási program (forrás: Fogarassy és Kun [2], 36. oldal, 5.5 ábra)

Elsőként a legnagyobb (1400 m/min) sebességgel martuk le a teljes felületet, majd a következő (1100 m/min) értéken az előzőnél már csak egy 45 mm-rel rövidebb oldalhosszúságú felületet munkáltunk meg, 1 mm-rel mélyebben. Ennek analógiájára alakítottuk ki a további három (800, 500, 200 m/min) paraméterrel meghatározott felületet is. Így kaptuk meg mind az öt kövön az öt különböző minőségű mintafelületet, ahogy az az 6.3. ábrán látható [2].



6.3. ábra az egyes felületek megmunkálásához alkalmazott vágósebességek és a megmunkálás iránya (forrás: Fogarassy és Kun [2], 36. oldal, 5.6 ábra)

## 6.2. A vágási sebesség számítása a fordulatszámából

Ahhoz, hogy a marási folyamat bármely más geometriájú szerszámmal is reprodukálható legyen, szükséges a fordulatszámértékeket vágási sebesség-értékekké átszámolni. Ezt a következő képlettel tehetjük meg:

$$v = \frac{d \cdot \pi \cdot n}{1000} \left[ \frac{m}{min} \right] \quad (6.1.)$$

ahol

d – az alkalmazott síkmaró átmérője [mm]

n – fordulatszám  $\left[ \frac{\text{ford.}}{\text{min}} \right]$

A fentiekben meghatározott öt különböző vágósebeséggel valamennyi kőnél végrehajtottuk a korábban ismertetett marási folyamatokat, ezzel minden munkadarabon létrehoztunk öt különböző minőségű felületet. Ennek eredményeképpen 25 mintafelület állt rendelkezésünkre vizsgálatainkhoz. Ezzel lehetőségünk nyílt az öt különböző kötípus be-és kilépő éleire megadott paraméterek mellett jellemző kitöredezési jelenségek összehasonlítására.

### **6.3. A kövek éleinek megmunkálás utáni vizsgálata - digitalizálás és kiértékelés**

A kövek élein megfigyelhető kitöredezések méretének meghatározásához először szükséges volt azok digitalizálása. Ezt a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gyártástudomány és –technológia Tanszék által beszerzett Keyence LJ V7080 típusú kékfényű lézerszkennerral végeztük, melyet az *5.2. fejezetben* részletesen bemutatunk. Az eszköz X irányban 0,01 mm, míg Z irányban 0,5 µm pontosságú, ennek megfelelően a vizsgálati tartományába helyezett munkadarabról jó minőségű, pontos, a további vizsgálatokhoz jól felhasználható metszeteket szolgáltat.

A vizsgálatot a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gyártástudomány-és Technológia Tanszéken végeztük. Az élek digitalizálásához a Keyence szkenneren és annak szoftverén (Keyence LJ-Navigator 2) kívül a tanszéken található Topper TMV510 típusú megmunkálóközpontot vettük igénybe. Célunk az volt, hogy a kövekről minél pontosabb metszeti képeket tudjunk rögzíteni, ez azonban a szkennер mozgatása esetén nem teljesült volna maradéktalanul, hiszen abban az esetben számolnunk kellett volna az esetleges, rezgésekből származó hibákkal. Éppen ezért döntöttünk úgy, hogy kísérleteink során a szkennert az NC vezérlésű megmunkálóközpont ajtajánál található vízszintes fémlapra, mágneses talp segítségével rögzítjük, és a vizsgálandó követ fogjuk a Topper gép segítségével mozgatni. A vizsgálandó követ a megmunkálóközpont asztalára helyeztük és a megfelelő NC program segítségével mozgattuk, miközben a rögzített szkennер meghatározott távolságonként elkészítette az éppen vizsgált kő élének meghatározott távolságonként jellemző metszeti képét. A szkennер szoftvere szintén rendelkezésünkre állt, így az eszköz számítógépre történő csatlakoztatása után a program képes volt a metszetek megfelelő formátumban történő rögzítésére és tárolására.

## 6.4. A digitalizálás módja

A vizsgálni kívánt követ a megmunkálóközpont asztalára helyeztük, majd egy olyan rögzített elem sík felületéhez ütköztettük, amely koordinátarendszerének nullpontját korábban már felvettük. Az elem úgy volt beállítva, hogy a hozzáütköztetett kötőmb vizsgálni kívánt éle a szkennert fényéhez viszonyítva a mozgatás során végig azonos távolságban és pozícióban maradjon, így az élről torzítatlanul kaptuk meg a metszeti képeket. Ahhoz, hogy a kő élet annak teljes hosszában digitalizálhassuk, az asztal mozgatását NC programmal kellett megoldanunk.

Elsőként a szkennert a szerszámgép házának egy adott pontjára rögzítettük és csatlakoztattuk a számítógépre. Az NC program indítása előtt az asztalt a kézikérék segítségével olyan pozícióba állítottuk, hogy a szkennert kék fénye éppen a kő alacsonyabban lévő oldaléle mellett álljon. A digitalizálás végrehajtását ketten oldottuk meg, hiszen egyszerre kellett kezelni a Keyence szoftvert, illetve a megmunkálóközpontot is. A végrehajtás módja az 6.4. képen látható. A program a metszetek rögzítését a Start monitoring parancs kiadására kezdi meg, ehhez azonban vizsgálatunknál szükség volt a szerszámgép NC programjának a szoftverrel megközelítőleg azonos időben történő indítására.



6.4. ábra A digitalizálás végrehajtása

Az asztal mozgatását a 6.2. táblázatban található NC programmal oldottuk meg (a feladat jelen esetben csak a mozgatás volt, szerszámcserére nem volt szükség).

|             |                                                        |
|-------------|--------------------------------------------------------|
| N5 G90 G54  | Abszolút méretmegadás (G90), nullpont kijelölése (G54) |
| N10 F30     | Előtolás megadása: $f=30$ mm/min (F30)                 |
| N15 G1 X300 | X irányú elmozdulás (X300)                             |
| N20 M30     | Program befejezése (M30)                               |

6.2. táblázat Az asztal mozgatására szolgáló NC program

A lézerszkennер mintavételezési frekvenciáját 20 Hz-re állítottuk, így az előtolás 30 mm/min értéke mellett 0,1 mm-es távolságonként rögzítettük a profilokat. Az öt kő belépő, illetve kilépő éleit is beszkeneltük az előbbieken ismertetett paraméterek mellett, majd a program segítségével az egyes kövek adott éléhez tartozó metszeti képeket mentettük.

A Keyence kékfényű lézerszkennert számítógépre csatlakoztatva, a Topper megmunkálóközpont segítségével tehát összesen tíz darab állományt rögzítettünk, melyek az egyes kövek be-és kilépő élének 0,1 mm-es távolságonként felvett metszeti képeit tartalmazzák. Az adatokat olyan formátumban mentettük, hogy később a szoftver kiértékelő funkcióit alkalmazhassuk, és a metszetek alapján megállapíthassuk az egyes kitöredezések jellemző méreteit.

## 6.5. Az adatok kiértékelése

A szkennelés során kapott állományokat a program további funkcióival lehetőségünk van kezelni. A szoftver segítségével az adott metszeten mind X, mind Z irányban mérhetünk távolságot, illetve az adott kitöredezés hossza is megállapítható az ahhoz tartozó metszetek számából. Egy, a szoftver által megjelenített metszet az 6.5 ábrán látható. Ez az él egy olyan metszetét mutatja, amely megközelítőleg hibátlan, a marásból származó károsodás nem érinti. A felső parancssor bal oldalán látható számláló az aktuális profilszámot jelzi ki. Ezt léptetve mindig a következő, vagy az előző 0,1 mm-es távolságban található metszethez juthatunk.



6.5. ábra A vizsgált él egy olyan metszete, amely megközelítőleg hibátlan, a marásból származó károsodás nem érinti

Kiértékeléseink során első lépésként megkerestük az adott mintafelületnek az elméleti csúcsához leginkább közelítő, legmagasabb pontját. A program a „Display profile of overwriting”, azaz a felülírás kijelzése funkció segítségével lehetőséget ad arra, hogy ezt a metszetet halványan rögzítsük, így az a kiértékelés során végig látható marad.

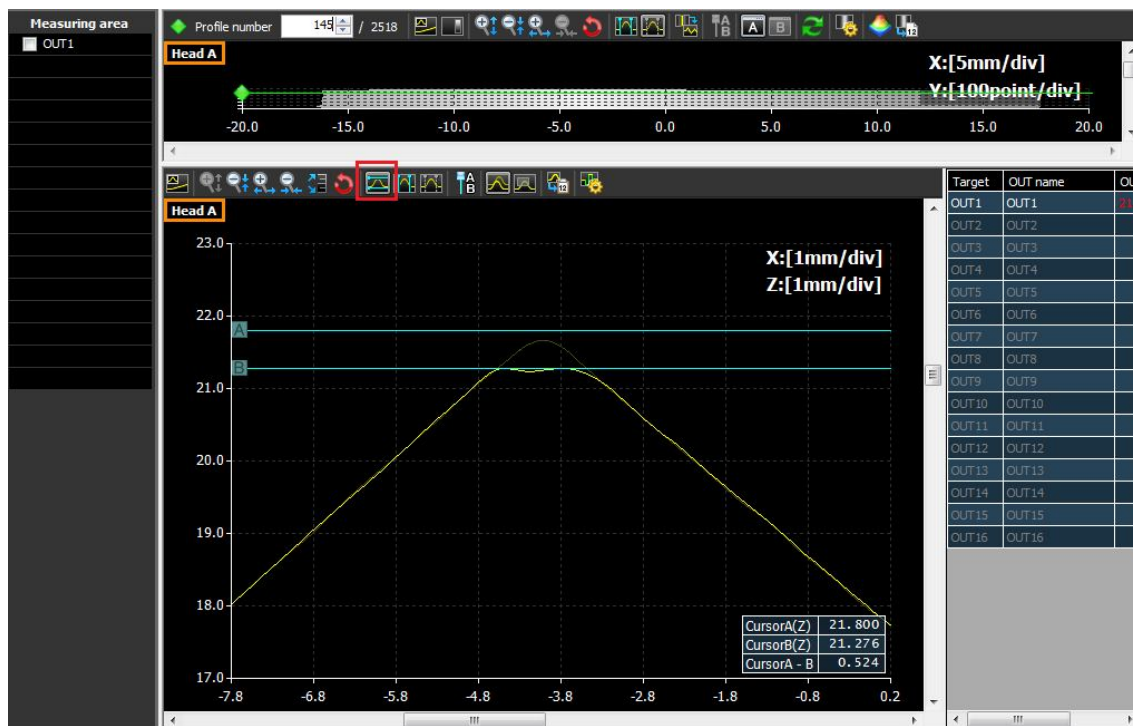
Ezután újra az adott mintafelület első metszetére álltunk, és megkezdtuk annak kiértékelését. Egy kitöredezés megjelenését az jelezte számunkra, hogy a csúcs elkezdett süllyedni, a végét jelentő metszetet pedig úgy tudtuk beazonosítani, hogy addig léptettük a profilokat, amíg a csúcs a legmélyebb pont után emelkedve az általunk korábban rögzített, az elméleti csúcsot közelítő metszet magasságát szinte elérte. Tudjuk, hogy a profilokat 0,1 mm-enként rögzítettük. Így a kitöredezés végét jelentő profil sorszámából a kezdeti profil számát kivonva, a különbséget 0,1 mm-rel szorozva megkapjuk az adott kitöredezés hosszát. A halványan rögzített referenciacsúcs, illetve az aktuális metszet képe az 6.6. ábrán látható.



6.6. ábra A rögzített referenciacsúcs

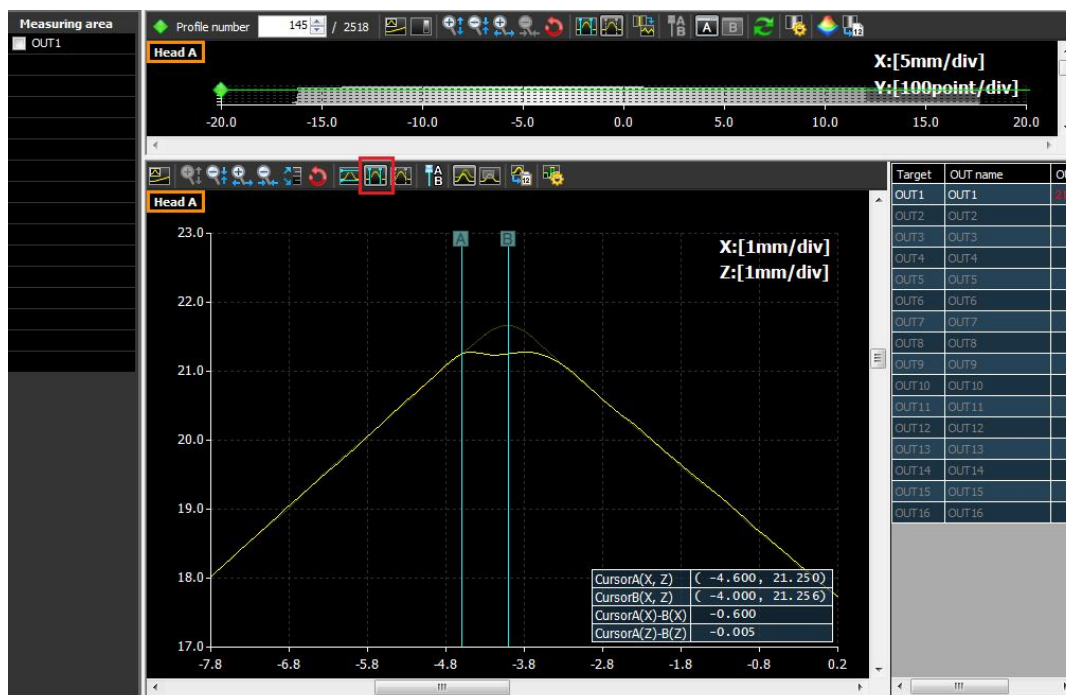
A szoftver lehetővé teszi a felhasználó számára az adott metszeten történő X és Z irányú távolságmérést is. Vizsgálataink során ezt a funkciót arra használtuk fel, hogy az adott kitöredezések elméleti csúcsához viszonyított maximális mélységét rögzítsük. Egy adott kitöredezés metszeteit vizsgálva megkerestük annak bal oldalán található legmélyebb pontot, majd a program „Horizontal cursor”, azaz vízszintes mutató megnevezésű funkciójával elérhető vízszintes segédvonalak segítségével meghatároztuk az elméleti csúcstól vett

távolságát. Az egyik vonallal az elméleti csúcsra, a másikkal a kitöredezés bal oldalának legmélyebb pontjára álltunk. A metszeti kép jobb alsó sarkában figyelhető meg az a táblázat, amelynek utolsó, CursorA-B sora mutatja a számunkra releváns értéket, a két vonal helyzetének különbségét, melyet Excel-táblázatban rögzítettünk minden esetben. A felső vízszintes vonalat az elméleti csúcs minél pontosabb közelítése érdekében valamivel az általunk referenciának választott metszet csúcspontja fölé helyeztük, amellyel azt ideális állapotot kívántuk modellezni, amikor a kő felső és oldallapja pontosan derékszöget zárnak be egymással. Az adatgyűjtés módja az 6.7. ábrán látható.



6.7. ábra A kitöredezés maximális mélységének Z irányú összetevőjének meghatározása

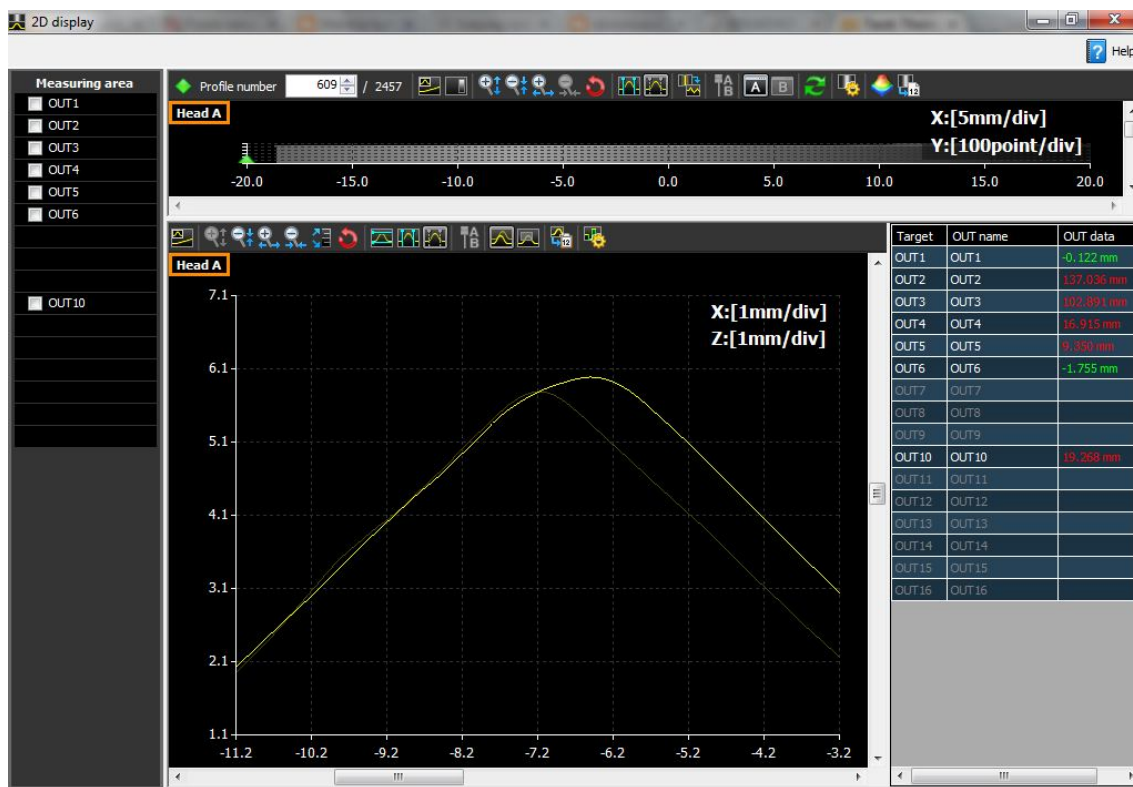
Az X irányú távolságmérés után a „Vertical cursor”, azaz a függőleges mutató nevű funkció segítségével Z irányban is meghatároztuk az adott értéket, melyet szintén az Excel-táblázatba rögzítettünk. A Z irányú meghatározás a 6.8. ábrán látható. A számunkra szükséges értéket a metszeti kép jobb alsó sarkában található táblázat CursorA(X)-B(X) táblázatából olvastuk ki.



6.8. ábra A kitöredezés maximális mélységének X irányú összetevőjének meghatározása

A bal oldali legmélyebb pont jellemző értékeinek meghatározása után ugyanezt az előbbiekben ismertetett módszer alapján a jobb oldali legmélyebb pontra is elvégeztük. Az adott mintafelületre jellemző összes értéket (kitöredezések kezdetiét és végét jelentő metszet, a kitöredezés hossza, a bal –és jobb oldali legmélyebb pontok metszetének sorszáma, illetve a maximális mélység X és Z irányú összetevője) Excel-táblázatban rögzítettük, illetve a szükséges további számításokat is azon a felületen végeztünk, melyről a 6.6. fejezetben írunk részletesebben.

Miután az adott mintafelületen az összes kitöredezést megkerestük és jellemző méreteit rögzítettük, továbbléptünk a következő lépcsőre, amelyre az előző szintről történő átmenetet a metszeti kép jobb oldali élének a referenciaként beállított metszettől való eltolódása egyértelműen jelzett számunkra a 6.9. ábrán látható módon. Az új mintafelületet szintén a korábban ismertetett szempontoknak megfelelően vizsgáltuk meg, illetve rögzítettük a jellemző adatokat.



6.9. ábra A programban egyértelműen megfigyelhető a két szint közötti átmenet

A kiértékelés során öt kő összesen tíz darab (be-és kilépő), korábban digitalizált élének kitöredezéseit vizsgáltuk meg a Keyence LJ V7080 lézerszkennel LJ-Navigator 2 szoftverének segítségével. Az egyes éleken belül mind az öt mintafelületet külön elemeztük a számunkra lényeges szempontok alapján. Összesen ötven darab állomány született, melyek adataival további számításokat végezhattünk az adott kitöredezések méretére vonatkozóan, melyeket a továbbiakban ismertettünk.

## 6.6. A szükséges számítások elvégzésének módja

A kiértékelés során kapott adatokat és a szükséges számítások eredményeit a Microsoft Office Excel 2007 program segítségével rögzítettük. A program alkalmas volt a TDK munkánkhoz szükséges számítások elvégzésére is.

A Keyence szkennel szoftverének segítségével kapott adatokat (az adott kitöredezéshez tartozó első és utolsó metszet sorszáma, a bal és a jobb oldali legmélyebb pontok metszeteinek sorszáma, illetve X és Z irányban jellemző méreteik) mind az öt vizsgált kő mindegyik mintafelületének esetében, a be-és a kilépő élre vonatkozóan külön táblázatba rögzítettük. Ezek után az egyes mintafelületek összes kitöredezése esetében kiszámítottuk annak hosszát, illetve a kitöredezés felületenkénti maximális mélységeit, azaz a kitöredezés

egyres határoló felületeire vetített maximális mélységeit mind a bal, mind a jobb oldalra vonatkozólag, végül az adott kitöredezés elméleti térfogatát. Végül minden mintafelület esetében az egyes kitöredezésekre vonatkozó elméleti térfogatokat átlagoltuk, ezzel megkapva az adott mintafelület kitöredezéseire jellemző térfogatátlagot.

Számításainkat a következő módon végeztük:

1. A kitöredezés hosszának számításakor figyelembe vettük, hogy a metszeteket egymástól 0,1 mm távolságban vettük fel. Ezek alapján:

$$l = 0,1 \cdot (s_v - s_e) \quad (6.2.)$$

ahol

$l$  - az aktuális kitöredezés hossza [mm]

$s_v$  - az aktuális kitöredezéshez tartozó utolsó metszet sorszáma [-]

$s_e$  - az aktuális kitöredezéshez tartozó első metszet sorszáma [-]

2. A kitöredezés egyes határoló felületeire vetített maximális mélységének számítása Pithagorasz-tétellel történt a következő módon:

$$l_t = \sqrt{X^2 + Z^2} \quad (6.3.)$$

ahol

$l_t$  - a kitöredezés egyes határoló felületeire vetített maximális mélysége [mm]

$X$  - az adott kitöredezés elméleti csúcstól vett  $X$  irányú távolsága [mm]

$Z$  - az adott kitöredezés elméleti csúcstól vett  $Z$  irányú távolsága [mm]

3. A kitöredezést helyettesítő test térfogatának számítási módja:

$$V_e = \frac{\frac{l}{2} \cdot l_{tb} \cdot l_{tj} \cdot \pi}{6} \quad (6.4.)$$

ahol

$V_e$  – az aktuális kitöredezést helyettesítő test térfogata [mm<sup>3</sup>]

$l$  – az aktuális kitöredezés hossza [mm]

$l_{tb}$  - a kitöredezés egyes határoló felületeire vetített maximális mélysége a bal oldalon [mm]

$l_{tj}$  - a kitöredezés egyes határoló felületeire vetített maximális mélysége a jobb oldalon [mm]

4. Az átlagos kitöredezési térfogatot az adott mintafelület aktuálisan vizsgált élén található kitöredezések elméleti térfogatainak számtani átlagával jellemeztük.

Az általunk használt táblázatok jellemző formátuma a vizsgálati úton kapott és a számított értékekkel a 6.10. ábrán látható.

| 4.kő, 4. mintafelület | Kitöredezés |      |        | Baloldali mélység [mm] |      |       | A kitöredezés határoló felületeire vetített maximális mélysége (bal) [mm] | Jobboldali mélység [mm] |      |       | A kitöredezés határoló felületeire vetített maximális mélysége (jobb) [mm] | A kitöredezést helyettesítő test térfogata [mm <sup>3</sup> ] |
|-----------------------|-------------|------|--------|------------------------|------|-------|---------------------------------------------------------------------------|-------------------------|------|-------|----------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| Kitöredezés sorszáma  | Eleje       | Vége | hossza | helye                  | X    | Z     |                                                                           | helye                   | X    | Z     |                                                                            |                                                               |
| 1                     | 1398        | 1417 | 1,9    | 1410                   | 0,65 | 0,564 | 0,860578875                                                               | 1408                    | 0,75 | 0,764 | 1,070605436                                                                | 0,458059746                                                   |
| 2                     | 1418        | 1439 | 2,1    | 1428                   | 0,6  | 0,509 | 0,786817005                                                               | 1426                    | 0,65 | 0,717 | 0,967775284                                                                | 0,418423397                                                   |
| 3                     | 1439        | 1485 | 4,6    | 1451                   | 0,7  | 0,737 | 1,016449212                                                               | 1453                    | 0,8  | 0,737 | 1,087735722                                                                | 1,33080771                                                    |
| 4                     | 1485        | 1501 | 1,6    | 1490                   | 0,35 | 0,342 | 0,48935059                                                                | 1491                    | 0,5  | 0,675 | 0,840014881                                                                | 0,172097864                                                   |
| 5                     | 1573        | 1590 | 1,7    | 1584                   | 0,4  | 0,314 | 0,508523352                                                               | 1581                    | 0,45 | 0,437 | 0,627271074                                                                | 0,141893822                                                   |
| 6                     | 1593        | 1615 | 2,2    | 1599                   | 0,4  | 0,395 | 0,562161009                                                               | 1600                    | 0,65 | 0,617 | 0,896208123                                                                | 0,290028502                                                   |
| 7                     | 1713        | 1728 | 1,5    | 1723                   | 0,35 | 0,298 | 0,459678148                                                               | 1722                    | 0,4  | 0,409 | 0,572084784                                                                | 0,103217638                                                   |
| 8                     | 1728        | 1742 | 1,4    | 1736                   | 0,3  | 0,398 | 0,498401445                                                               | 1735                    | 0,4  | 0,465 | 0,613371829                                                                | 0,11199008                                                    |
| 9                     | 1742        | 1758 | 1,6    | 1747                   | 0,35 | 0,356 | 0,499235415                                                               | 1747                    | 0,6  | 0,662 | 0,893445018                                                                | 0,186741827                                                   |
| 10                    | 1781        | 1794 | 1,3    | 1791                   | 0,45 | 0,37  | 0,582580467                                                               | 1792                    | 0,5  | 0,593 | 0,775660364                                                                | 0,15371607                                                    |
|                       |             |      |        |                        |      |       |                                                                           |                         |      |       |                                                                            |                                                               |
|                       |             |      |        |                        |      |       |                                                                           |                         |      |       |                                                                            |                                                               |
|                       |             |      |        |                        |      |       |                                                                           |                         |      |       |                                                                            |                                                               |
|                       |             |      |        |                        |      |       |                                                                           |                         |      |       |                                                                            |                                                               |
|                       |             |      |        |                        |      |       |                                                                           |                         |      |       | Átlagos kitöredezési térfogat [mm <sup>3</sup> ]                           | 0,336697666                                                   |

6.10. ábra A kiértékelés során használt táblázatok formátuma

A kiértékelés fontos lépése az átlagos kitöredezési mérték meghatározása. A mérőszámot Gyurika [5] alkotta meg doktori kutatásában. Az átlagos kitöredezési mérték az a mérőszám, amely meghatározza, hogy az adott paraméterekkel megmunkált mintafelületen a kitöredezés milyen mértékben lép fel, mekkora térfogatvesztést okozva egységnyi megmunkálási hosszban számítva. A mérőszámot a kutató által meghatározott 6.5. képlettel számíthatjuk:

$$M_{\text{átl}} = \left( \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{V_0} \right) = 4 \cdot \left( \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{\pi \cdot L} \right) \quad (6.5.)$$

ahol

$M_{\text{átl}}$  - az átlagos kitöredezési mérték

$V_i$  - a mintafelületen adódó egyes kitöredezések térfogata [mm<sup>3</sup>]

$L$  - a mintafelület, a megmunkálási sáv szélessége, egységesen 45 mm

Az átlagos kitöredezési mérték bővebb bemutatására a 7.2. fejezetben térünk ki.

A kiértékelés során mind az öt vizsgált kő be-és kilépő éleire, azokon belül pedig külön az öt mintafelületre elkészítettük a jellemző adatokat és a kutatásunk szempontjából szükséges számításokat tartalmazó táblázatokat a Microsoft Office Excel 2007 program segítségével. Az így kapott adatok, tendenciák elemzését, illetve az ezek alapján levont következtetéseinket a *7.3. fejezetben* mutatjuk be.

## 7. Az eredmények bemutatása

### 7.1. Korábbi várakozások

Az áttekintett irodalmak, valamint a korábbi kutatási eredmények alapján összeállítottuk az előzetes feltevéseinket a kövek kitöredezési mértékének alakulása kapcsán. Mint a TDK munkánk elsődleges célja, bizonyítani kívántuk a belépő és kilépő élek átlagos kitöredezési mértéke között fennálló összefüggést: azaz, hogy a belépő élek kitöredezési mérőszáma minden esetben elmarad a kilépő éleket jellemző értéktől. Célunk volt továbbá a doktori kutatás során kidolgozott iparilag is alkalmazható rendszer bemutatása és alkalmazhatóságának igazolása. A kékfényű lézerszenkennerrel kiépített rendszerrel kapott eredményeket az elmélet megalapozásához végzett vizsgálatok eredményivel vetettük össze és arra számítottunk, hogy az értékek hibahatáron belül megegyeznek egymással. A kutatás értékelése során törekedtünk arra, hogy a megfogalmazott célkitűzéseknek megfelelően értelmezzük az eredményeket, kitérve az eltérések magyarázataira, valamint az esetleges hibák okaira.

### 7.2. A felhasznált és számított adatok

A digitalizált profilokból összegyűjtöttük a kitöredezések jellemző méreteit, melyek a kiértékelés alapadatait szolgáltatták. Az értékeket a 7.1. táblázat szerint regisztráltuk, és a jellemző mutatókat is a Microsoft Office Excel programmal határoztuk meg.

| 568-ig          | Kitöredezés |      |        | Baloldali mélység |      |       | Tényleges hossz (bal) | Jobboldali mélység |      |       | Tényleges hossz (jobb) | Elméleti térfogat |
|-----------------|-------------|------|--------|-------------------|------|-------|-----------------------|--------------------|------|-------|------------------------|-------------------|
|                 | Eleje       | Vége | hossza | helye             | X    | Z     |                       | helye              | X    | Z     |                        |                   |
| 1. mintafelület |             |      |        |                   |      |       |                       |                    |      |       |                        |                   |
| 1               | 138         | 150  | 1,2    | 141               | 0,5  | 0,351 | 0,610901792           | 146                | 0,35 | 0,396 | 0,528503548            | 0,101379222       |
| 2               | 186         | 196  | 1      | 192               | 0,3  | 0,308 | 0,429958137           | 190                | 0,75 | 0,426 | 0,862540434            | 0,097040726       |
| 3               | 196         | 231  | 3,5    | 224               | 0,35 | 0,426 | 0,551340185           | 204                | 0,6  | 0,513 | 0,78941054             | 0,398601579       |
| 4               | 251         | 277  | 2,6    | 271               | 0,55 | 0,588 | 0,805136013           | 270                | 0,55 | 0,529 | 0,763112705            | 0,418003277       |
| 5               | 278         | 310  | 3,2    | 305               | 0,6  | 0,661 | 0,892704318           | 290                | 0,7  | 0,75  | 1,025914226            | 0,766861736       |
| 6               | 334         | 350  | 1,6    | 343               | 0,65 | 0,513 | 0,828051327           | 342                | 0,6  | 0,455 | 0,753010624            | 0,261051832       |
| 7               | 377         | 389  | 1,2    | 380               | 0,35 | 0,294 | 0,457095176           | 383                | 0,7  | 0,529 | 0,877405835            | 0,125932204       |
| 8               | 424         | 464  | 4      | 432               | 0,75 | 0,763 | 1,069892051           | 440                | 0,75 | 0,617 | 0,97117918             | 1,087546206       |
| 9               |             |      | 0      |                   |      |       | 0                     |                    |      |       | 0                      | 0                 |
| 10              |             |      | 0      |                   |      |       | 0                     |                    |      |       | 0                      | 0                 |
| 11              |             |      | 0      |                   |      |       | 0                     |                    |      |       | 0                      | 0                 |
| 12              |             |      | 0      |                   |      |       | 0                     |                    |      |       | 0                      | 0                 |
|                 |             |      |        |                   |      |       |                       |                    |      |       | Térfogatátlag          | 0,271368065       |
|                 |             |      |        |                   |      |       |                       |                    |      |       | Térfogatszám:          | 3,256416783       |

7.1. táblázat Az adatgyűjtésre használt táblázat

A kitöredezések jellemző méreteit felhasználva meghatároztuk az adott mintafelületen (egy meghatározott vágósebességgel megmunkált köfelület) előforduló kitöredezések térfogatát a helyettesítő test térfogatának számításával [5]. Az így kapott térfogatértékeket a következő három mutató meghatározásához használtuk fel:

- **Átlagos kitöredezési térfogat:** Az adott mintafelületen tapasztalható kitöredezések térfogatának átlagos értéke, melyből következtethetünk a szemcseméretre, amely befolyásolja a kitöredezések méretét, valamint a jellemzően kitépődő, kipergő szemcsék méreteire és így a kihullásra hajlamos ásványok fajtáira.
- **Kitöredezések térfogatának összege:** Az adott mintafelületen tapasztalható összes kitöredezés térfogatának összege. Meghatározására azért van szükség, hogy következtethessünk a megmunkálás során kialakuló térfogatvesztés mértékére az adott mintafelületek esetén.
- **Átlagos kitöredezési mérték:** A mérőszám meghatározza, hogy az adott paraméterekkel megmunkált mintafelületen a kitöredezés milyen mértékben lép fel, mekkora térfogatvesztést okozva egységnyi megmunkálási hosszön számítva. Tehát ez a mutató objektíven értékeli a kitöredezések mértékét egy adott mintafelület esetében, így lehetővé teszi az összehasonlítást, illetve a minősítést. A doktori kutatás keretében Gyurika [5] által megalkotott mérőszám számítását az (7.1.)-es képlettel végezhetjük el. (Ahol  $M_{\text{átl}}$  az átlagos kitöredezési mérték,  $V_i$  a mintafelületen adódó egyes kitöredezések térfogata,  $L$  pedig a mintafelület, a megmunkálási sáv szélessége, egységesen 45 mm.) A mérőszám segítségével lehetőségünk nyílik a különböző kövek összehasonlítására a kitöredezési tulajdonságaik szempontjából, ezzel megteremtve a minősítés szabványosítási lehetőségét. Mindezt az iparban alkalmazott eszközök használatával, mivel a mérőszám a dolgozatban is bemutatott vizsgálati rendszer alkalmazásával a szükséges pontossággal meghatározható.

$$M_{\text{átl}} = \left( \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{V_0} \right) = 4 \cdot \left( \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{\pi \cdot L} \right) \quad (7.1.)$$

A vizsgálat során a fenti mérőszámokat minden értékelendő mintafelületre kiszámítottuk, ezeket az értékeket tartalmazza a 7.2. táblázat. Az értékelést az itt bemutatott értékek alapján végeztük el, mivel az előbbieken felsorolt három mutató alkalmas arra, hogy

az előzetes feltevéseink alapján felállított szempontokat megvizsgáljuk. A táblázat értékeit áttekintve megállapíthatjuk, hogy egy-egy kő esetében is jelentős eltéréseket tapasztalhatunk, amit a szemcseszerkezet heterogenitása okoz.

|                                                                       | Belépő élek |         |         |         |         | Kilépő élek |         |         |         |         |
|-----------------------------------------------------------------------|-------------|---------|---------|---------|---------|-------------|---------|---------|---------|---------|
| 1. kő, Rosa Beta                                                      |             |         |         |         |         |             |         |         |         |         |
| mintafelület száma:                                                   | 1.          | 2.      | 3.      | 4.      | 5.      | 1.          | 2.      | 3.      | 4.      | 5.      |
| Kitöredezések térfogatátalaga:                                        | 0,27137     | 0,19909 | 0,07535 | 0,13521 | 0,13735 | 0,62575     | 0,55763 | 0,28052 | 0,38006 | 0,84187 |
| Kitöredezések térfogatának összege:                                   | 3,25642     | 2,58815 | 0,90414 | 1,62257 | 1,6482  | 7,50895     | 5,01863 | 2,80515 | 3,80059 | 10,1024 |
| Átlagos kitöredezési mérték:                                          | 0,09214     | 0,07323 | 0,02558 | 0,04591 | 0,04663 | 0,21246     | 0,142   | 0,07937 | 0,10753 | 0,28584 |
|                                                                       |             |         |         |         | 0,0567  |             |         |         |         | 0,16544 |
| 2. kő, Giallo Farfalla                                                |             |         |         |         |         |             |         |         |         |         |
| mintafelület száma:                                                   | 1.          | 2.      | 3.      | 4.      | 5.      | 1.          | 2.      | 3.      | 4.      | 5.      |
| Kitöredezések térfogatátalaga:                                        | 0,31317     | 0,31946 | 0,38663 | 0,20378 | 0,08036 | 1,13042     | 0,9666  | 0,95333 | 0,81974 | 0,54352 |
| Kitöredezések térfogatának összege:                                   | 3,75813     | 3,8336  | 4,6396  | 2,44532 | 0,96434 | 12,4338     | 10,6326 | 11,44   | 8,19741 | 13,7196 |
| Átlagos kitöredezési mérték:                                          | 0,10633     | 0,10847 | 0,13127 | 0,06919 | 0,02729 | 0,3518      | 0,30084 | 0,32369 | 0,23194 | 0,38818 |
|                                                                       |             |         |         |         | 0,08851 |             |         |         |         | 0,31929 |
| 3. kő, Gabbró                                                         |             |         |         |         |         |             |         |         |         |         |
| mintafelület száma:                                                   | 1.          | 2.      | 3.      | 4.      | 5.      | 1.          | 2.      | 3.      | 4.      | 5.      |
| Kitöredezések térfogatátalaga:                                        | 0,30728     | 0,32804 | 0,11012 | 0,09974 | 0,1011  | 0,34315     | 0,33838 | 0,32483 | 0,14037 | 0,12526 |
| Kitöredezések térfogatának összege:                                   | 3,07281     | 2,9524  | 0,77085 | 0,89763 | 0,8086  | 2,74526     | 3,04544 | 3,24829 | 0,98256 | 1,00211 |
| Átlagos kitöredezési mérték:                                          | 0,08694     | 0,08354 | 0,02181 | 0,0254  | 0,02288 | 0,07767     | 0,08617 | 0,09191 | 0,0278  | 0,02835 |
|                                                                       |             |         |         |         | 0,04811 |             |         |         |         | 0,06238 |
| 4. kő                                                                 |             |         |         |         |         |             |         |         |         |         |
| mintafelület száma:                                                   | 1.          | 2.      | 3.      | 4.      | 5.      | 1.          | 2.      | 3.      | 4.      | 5.      |
| Kitöredezések térfogatátalaga:                                        | 0,30145     | 0,20242 | 0,13438 | 0,06507 | 0,18186 | 0,62733     | 0,52305 | 0,34253 | 0,33669 | 0,19952 |
| Kitöredezések térfogatának összege:                                   | 3,31599     | 2,22661 | 1,34377 | 1,04118 | 1,63669 | 5,64601     | 3,13829 | 4,79541 | 3,36698 | 1,99522 |
| Átlagos kitöredezési mérték:                                          | 0,09382     | 0,063   | 0,03802 | 0,02946 | 0,04631 | 0,15975     | 0,0888  | 0,13568 | 0,09527 | 0,05645 |
|                                                                       |             |         |         |         | 0,05412 |             |         |         |         | 0,10719 |
| 5. kő                                                                 |             |         |         |         |         |             |         |         |         |         |
| mintafelület száma:                                                   | 1.          | 2.      | 3.      | 4.      | 5.      | 1.          | 2.      | 3.      | 4.      | 5.      |
| Kitöredezések térfogatátalaga:                                        | 0,28265     | 0,10978 | 0,09872 | 0,08581 | 0,02779 | 0,16065     | 0,13284 | 0,08495 | 0,10922 | 0,05877 |
| Kitöredezések térfogatának összege:                                   | 3,77363     | 1,31742 | 1,18469 | 1,02967 | 0,33344 | 1,12458     | 1,06273 | 0,33979 | 0,54609 | 0,29386 |
| Átlagos kitöredezési mérték:                                          | 0,10677     | 0,03728 | 0,03352 | 0,02913 | 0,00943 | 0,03182     | 0,03007 | 0,00961 | 0,01545 | 0,00831 |
|                                                                       |             |         |         |         | 0,04323 |             |         |         |         | 0,01905 |
| Átlagos kitöredezési mérték az adott kő belépő/kilépő mintafelületein |             |         |         |         |         |             |         |         |         |         |

7.2. táblázat A jellemző kitöredezési mutatók

Dolgozatunkban kitérünk továbbá az ipari gyakorlatban is hatékonyan alkalmazható vizsgálati rendszer, illetve az elméleti vizsgálatokhoz alkalmazott módszer összehasonlítására a kapott kitöredezési jellemzők szempontjából. A 7.3. táblázat tartalmazza az elméleti kutatás eredményeit az egyes mintafelületekre, illetve megtalálhatók benne az adott mintafelületekhez tartozó átlagos kitöredezési mértéket jellemző mérőszámok, amelyeket a bemutatott vizsgálati rendszer alkalmazásával határoztunk meg.

|                  | Rapid  | Keyence        | Arány<br>(Rapid/Keyence) |
|------------------|--------|----------------|--------------------------|
| 1ko_kilepo_005_1 | 0,6033 | 0,6257         | 96,41%                   |
| 1ko_kilepo_005_2 | 0,5762 | 0,5576         | 103,33%                  |
| 1ko_kilepo_005_3 | 0,2743 | 0,2805         | 97,80%                   |
| 1ko_kilepo_005_4 | 0,4021 | 0,3801         | 105,79%                  |
| 1ko_kilepo_005_5 | 0,8748 | 0,8419         | 103,91%                  |
| 2ko_kilepo_005_1 | 1,0896 | 1,1303         | 96,39%                   |
| 2ko_kilepo_005_2 | 0,9777 | 0,9666         | 101,15%                  |
| 2ko_kilepo_005_3 | 0,9345 | 0,9533         | 98,03%                   |
| 2ko_kilepo_005_4 | 0,7767 | 0,8197         | 94,75%                   |
| 2ko_kilepo_005_5 | 0,5691 | 0,5435         | 104,70%                  |
| 3ko_kilepo_005_1 | 0,3093 | 0,3432         | 90,12%                   |
| 3ko_kilepo_005_2 | 0,3000 | 0,3280         | 91,44%                   |
| 3ko_kilepo_005_3 | 0,2996 | 0,3248         | 92,23%                   |
| 3ko_kilepo_005_4 | 0,1456 | 0,1404         | 103,73%                  |
| 3ko_kilepo_005_5 | 0,1319 | 0,1253         | 105,31%                  |
| 4ko_kilepo_005_1 | 0,6737 | 0,6273         | 107,40%                  |
| 4ko_kilepo_005_2 | 0,4772 | 0,5231         | 91,23%                   |
| 4ko_kilepo_005_3 | 0,372  | 0,3425         | 108,61%                  |
| 4ko_kilepo_005_4 | 0,3678 | 0,3367         | 109,24%                  |
| 4ko_kilepo_005_5 | 0,182  | 0,1995         | 91,23%                   |
| 5ko_kilepo_005_1 | 0,1471 | 0,1607         | 91,54%                   |
| 5ko_kilepo_005_2 | 0,1436 | 0,1328         | 108,13%                  |
| 5ko_kilepo_005_3 | 0,0776 | 0,0849         | 91,40%                   |
| 5ko_kilepo_005_4 | 0,1019 | 0,1092         | 93,32%                   |
| 5ko_kilepo_005_5 | 0,0615 | 0,0588         | 104,59%                  |
|                  |        | átlagos arány: | 99,27%                   |

**7.3. táblázat** Az elméleti kísérlet és a gyakorlatban is alkalmazható rendszerrel kapott eredmények összehasonlítása

A 7.3. táblázat adatai alapján belátható, hogy az ipari alkalmazásra szabott rendszerrel kellően pontos, az elméleti kutatás során kapott értékekkel +/- 10%-os, átlagos értéket tekintve 1%-on belüli hibahatáron belül azonos értékeket kaptunk, tehát kijelenthetjük, hogy a doktori kutatásban tervezett és általunk alkalmazott vizsgálati és értékelő rendszer alkalmas a szabványosítható minősítő eljáráshoz szükséges adatok gyűjtésére és feldolgozására. A rendszer alkalmazhatóságát bizonyítják továbbá a vizsgált kövekre kapott eredményeink, melyek az alábbiakban kerülnek bemutatásra. A kiépített vizsgálati rendszerrel végzett kutatás során tapasztalatokat szereztünk a hatékonyságáról, és az elvégzett információgyűjtés jól

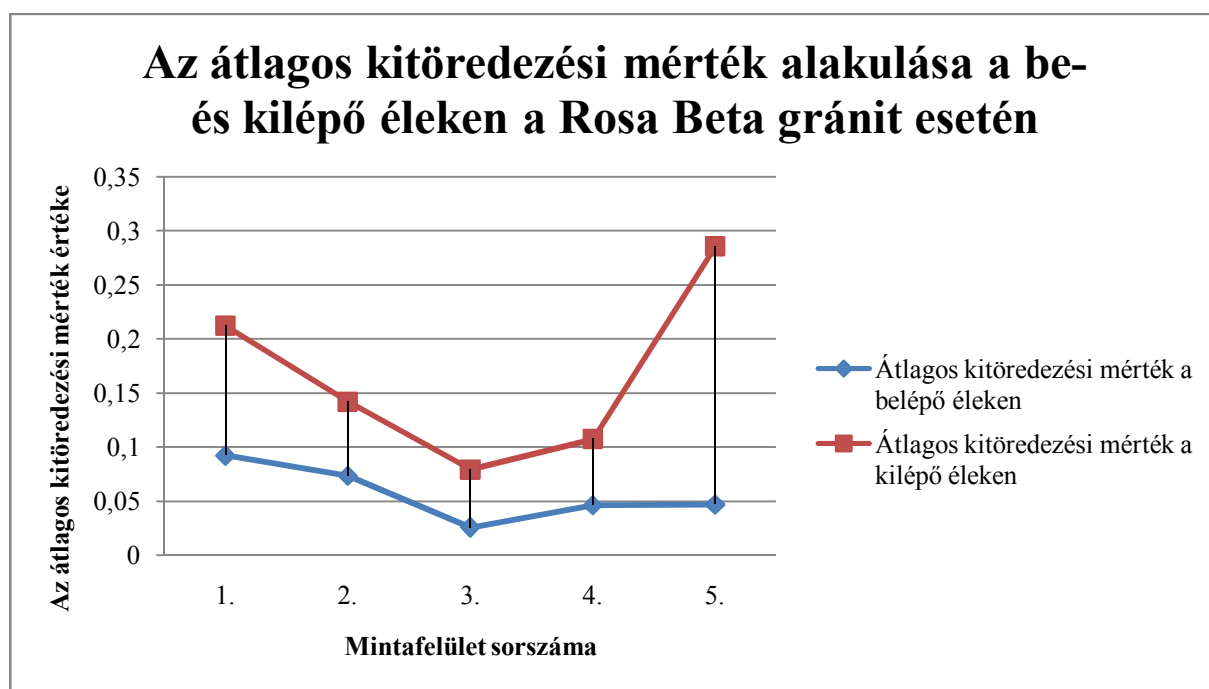
példázza, hogy az ipari környezetben is alkalmazható eszközökkel hogyan nyerhetünk a minősítéshez szükséges pontosságú és mennyiségű adatot a vizsgált kőelekről. Az elméleti kutatás során használt módszerrel ellentétben ezzel az eljárással a követelményekben rögzített igényeknek megfelelően gyorsan és egyszerűen végezhetjük el a kiértékelést, valamint az így kapott eredmények pontossága is kielégítő a minősítő tevékenység szempontjából.

### 7.3. Az egyes kőek mintafelületeinek értékelése [7]

A kiértékelési folyamatot minden egyes, a vizsgálatra kiválasztott különböző szemcseméret-tartományokba eső kőre elvégeztük, az eredményeket pedig mintafelületenként összevetettük annak érdekében, hogy az előzetes feltevéseink igazolását elvégezhessük.

#### 1-es kő, Rosa Beta

A kutatási folyamatban ez a gránit képviseli a közepes átlagos szemcsemérettekkel rendelkező kereskedelmi gránitokat. A 7.1. ábra mutatja az egyes mintafelületek be-, illetve kilépő élein tapasztalható átlagos kitöredezési mértéket.



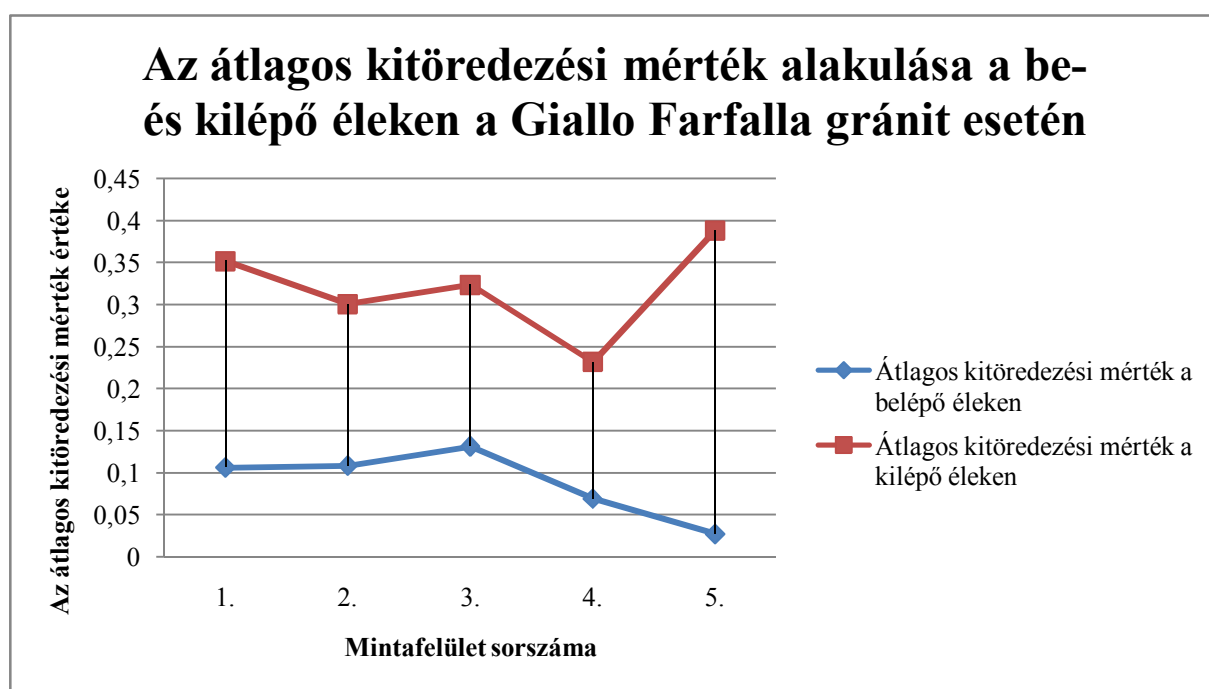
7.1. ábra Az 1-es kő átlagos kitöredezési mértékének alakulása

Ahogy a diagram is mutatja, ennél a kőtípusnál egyértelműen kimutatható az arányosság a belépő és a kilépő élek átlagos kitöredezési mértéke között, a kitöredezési mérték alakulásának változása a be- és kilépő éleken is azonos tendenciát követ. Ezen kívül

megfigyelhető a kapcsolat az élekre kapott mérőszámok között: a belépő élekre számított mutató elmarad a kilépő éleken tapasztalhatótól minden mintafelület esetén szignifikáns különbséget tapasztalhatunk. Tehát kijelenthetjük, hogy a közepes szemcseméretű kereskedelmi gránitok esetén az előzetes feltevéseink között bemutatott jelenség egyértelműen megfigyelhető.

## 2-es kő, Giallo Farfalla

A Giallo Farfalla kereskedelmi megnevezésű, nagy szemcseméretekkel rendelkező gránittípus esetén számított eredményeink alakulását a 7.2. ábra mutatja be.



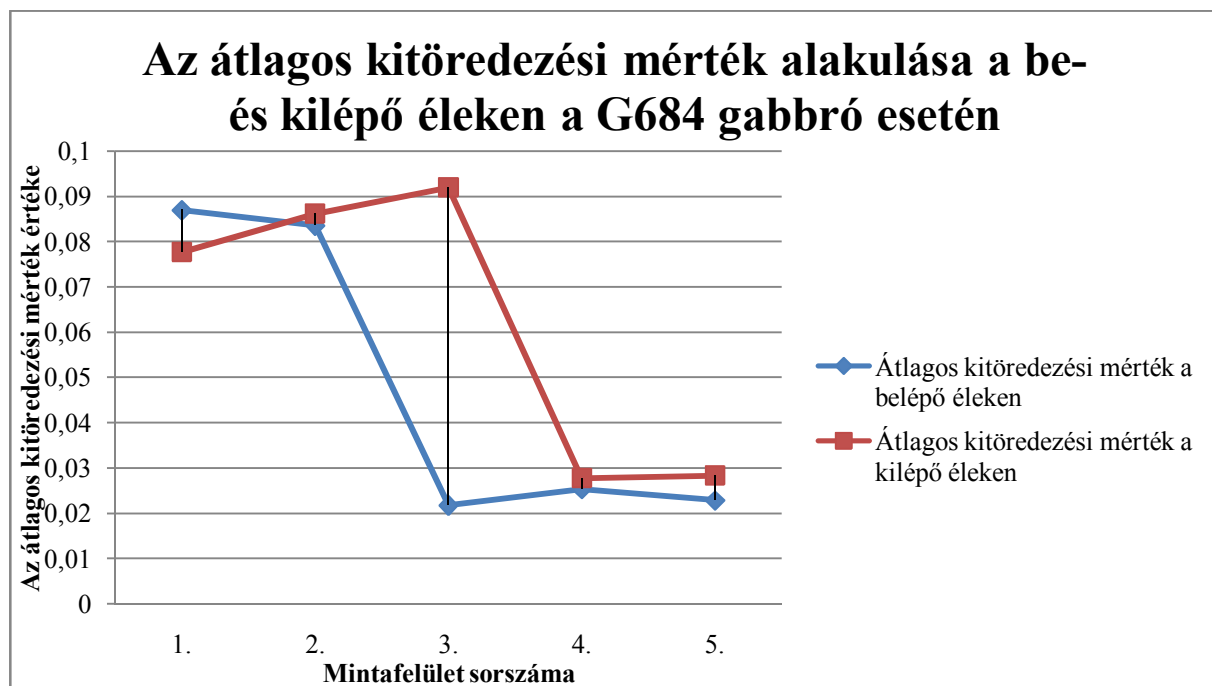
7.2. ábra A 2-es kő átlagos kitöredezési mértékének alakulása

Ahogy a közepes átlagos szemcseméretekkel rendelkező kereskedelmi gránitot vizsgálva, a nagy szemcseméret-tartományba sorolható méretű kőzetalkotó ásványokkal rendelkező Giallo Farfalla gránit esetében is elmarad a belépő élek kitöredezési mértéke a kilépő éleken tapasztalhatótól. Igaz ez az egyes mintafelületekre külön-külön is, de megállapíthatjuk, hogy általánosságban, ezen gránittípus esetén a belépő élek kitöredezési mértéke minden mintafelületen kisebb, mint a legalacsonyabb kitöredezési mutatószám, ami a 4. mintafelület kilépő élén tapasztalható. A belépő és kilépő élek kitöredezési mértéke közötti arányosság azonban a Rosa Beta gránitnál tapasztalt szabályossággal ellentétben nem figyelhető meg egyértelműen. Mindezt a kitöredezések által okozott térfogatvesztés

nagyságával magyarázhatjuk, valamint a közetszerkezet is okozhat olyan mértékű szemcsekitépődéseket, amelyek eltéréseket eredményezhetnek. Ilyen közetszöveti sajátosság lehet a hintetten elhelyezkedő kvarccsomók kitépődése a megmunkálás hatására már a belépő éleken.

### 3-as kő, G684 gabbró

A 3. vizsgált kő egy apró átlagos szemcsemérettel rendelkező gabbró, mely szintén a kereskedelmi gránitok csoportjába tartozik, közettulajdonságai azonban a természetes gránitokétól némileg eltérhet. Vizsgálatunk azonban az ilyen jellegű közetszöveti eltérésekre nem terjed ki, illetve a szabványosítás szempontjából a kereskedelmi kötermékek csoportosítását vettük alapul a kövek kiválasztásához. A G684 gabbró adatai alapján számított átlagos kitöredezési mérték-értékeket a 7.3. ábrán látható diagram szemlélteti.



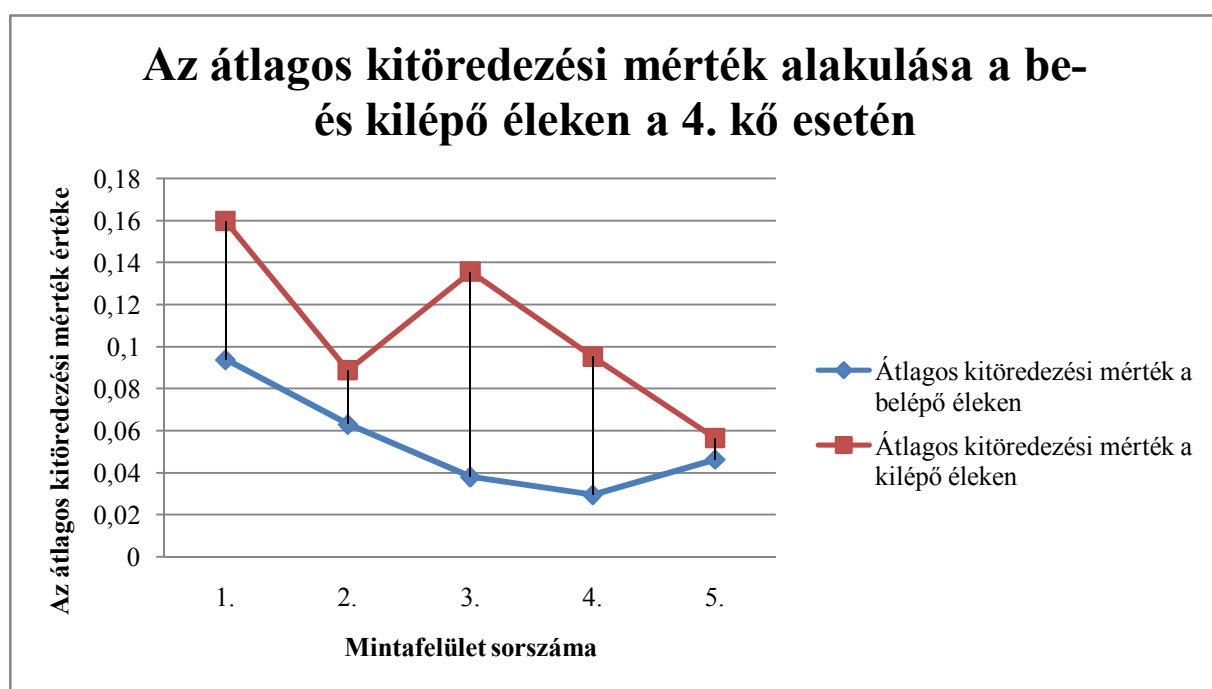
7.3. ábra A 3-as kő átlagos kitöredezési mértékének alakulása

Jelentős eltéréseket mutat a 3-as kő az első kettőhöz képest. A megmunkálás során mutatott viselkedése alapján ennél a kereskedelmi gránittípusnál nem figyelhető meg olyan szignifikáns különbség a belépő és a kilépő élek kitöredezési mértéke között, mint a nagyobb szemcseméretű kőzetek esetében. Ennél a kőnél is elmondhatjuk, hogy a belépő élek kitöredezési mértéke elmarad a kilépő éleken tapasztalhatótól, kivéve az első mintafelületet, ahol az átlagos kitöredezési mérték nem követi az előzetes feltevésünket. Az eltérés hátterében a szemcseszerkezet, az apróbb szemcsék kipergése és az elnyúló kitöredezések

(szélesebb, nagyobb éltartományt érintő kipergések, szemcsekiszakadások) állhatnak. Ugyanakkor megfigyelhető egyfajta arányosság a be- és kilépő élek átlagos kitöredezési mértékének alakulásában ezen kő esetén is, hasonlóan a Rosa Betánál tapasztalhatóhoz.

#### 4-es kő, GN-1 gránit

Ahogy az MSZ szabvány rögzíti az öt különböző szemcseméret-tartományt, úgy mi is öt különböző átlagos szemcsemérettekkel rendelkező gránitot választottunk. Így került megmunkálásra a 4-es számú nagy szemcsékkel rendelkező kereskedelmi gránit. Az GN-1 gárnitra vonatkozó átlagos kitöredezési mérték alakulását foglalja össze a 7.4. ábra.

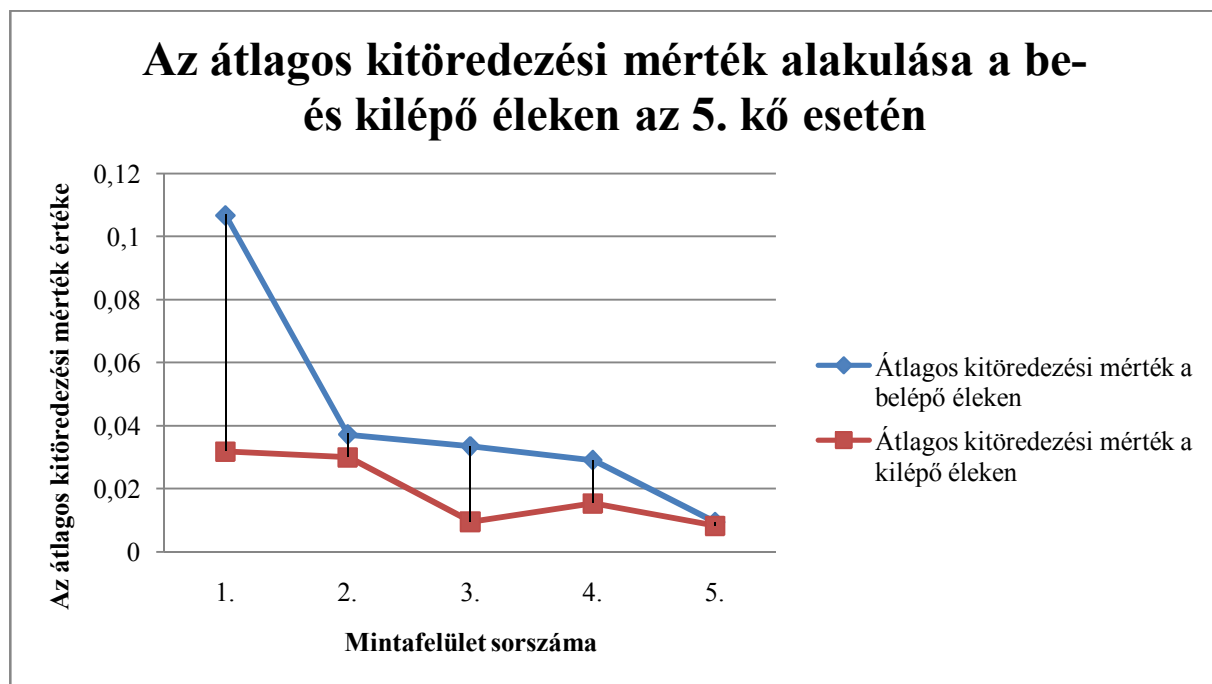


7.4. ábra A 4-es kő átlagos kitöredezési mértékének alakulása

Ennél a kőtípusnál, hasonlóan a másik két természetes, közepes- és nagy szemű gránithoz, egyértelműen megállapítható a belépő és kilépő élekre számított átlagos kitöredezési mérték eltérése: az előbbi éleken az érték minden esetben alacsonyabbra adódott, mint a adott mintafelület kilépő élén. Ugyanakkor kirajzolódik az arányosság is a be- és kilépő élek kitöredezési mértéke között is. A második mintafelületen tapasztalható eltérést a szemcseszerkezet magyarázhatja, a kilépő élen tapasztalható alacsony kitöredezési mérték oka lehet a kemény kőzetalkotók heterogén eloszlása a kőzetszövetben. Szintén hasonló jelenségek okozhatják azt is, hogy az ötödik mintafelületen a két élen közel azonos értéket kaptunk a jellemző mutatószámra.

## 5-ös kő, GF-1 gabbró

Az 5. kő, az GF-1 gabbró egy szintén apró szemcseméretekkel rendelkező kereskedelmi gránit. Kőzetszövege a 3-as kőéhez hasonlítható, ahogy általános jellemzői és tulajdonságai is. Az erre a kőre számított adatokat a 7.5. ábra foglalja össze.



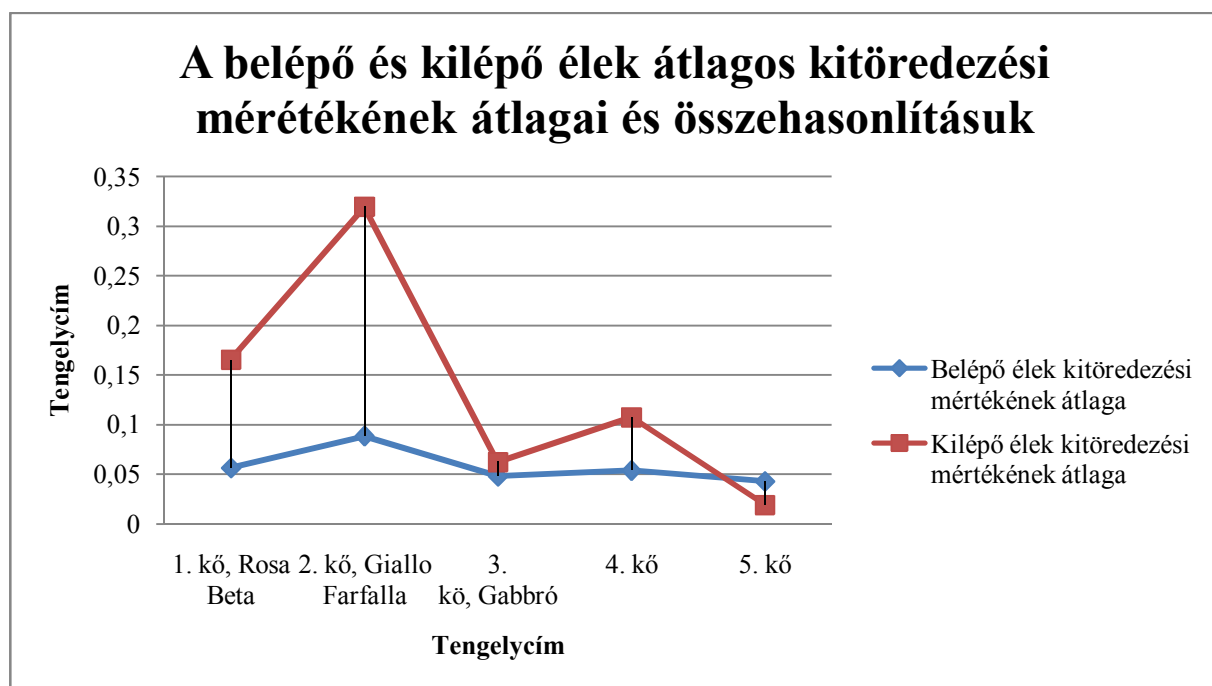
7.5. ábra Az 5-ös kő átlagos kitöredezési mértékének alakulása

Ennek a kőnek az esetében is a 3-as kőéhez hasonló szabálytalanságot tapasztalhatunk az ötödik mintafelületen, ahol a két élre kapott átlagos kitöredezési mérték azonosra adódott. Ennek ellenére az általános arányosság a belépő és a kilépő élek kitöredezési mértéke között fennáll, viszont az előző kövek viselkedésével ellentétben a belépő éleken kapott kitöredezési mérték adódott a kilépő éleken tapasztalhatónál nagyobbra. Az eltérést a szemcseszerkezet heterogenitásán kívül mérési és értékelési hibák is okozhatják, melyekre a későbbiekben részletesen kitérünk. Az GF-1 gabbró esetén további vizsgálatokra van szükség ahhoz, hogy feltárjuk a szabálytalan viselkedés okát, melyet jelen munka keretein belül nem végeztünk el.

### A belépő és a kilépő élek átlagos kitöredezési mértékének általános összehasonlítása

Mivel minden kő esetén tapasztaltuk az előzetes feltevéseinken alapuló szabályszerűséget, miszerint a belépő élek kitöredezési mértéke elmarad a kilépő élek kitöredezési mértékétől, ezért elvégeztünk egy általános összehasonlítást, melyben az egyes kövek mintafelületeire kapott átlagos kitöredezési mérték átlagát meghatároztuk, majd az így

kapott eredményeket hasonlítottuk össze az öt kő esetén. Ennek az összehasonlításnak az eredményét szemlélteti a 7.6. ábra.



**7.6. ábra** Az átlagos kitöredezési mértékek átlagának összehasonlítása

A diagram szerint megállapíthatjuk, hogy a belépő éleken tapasztalható kitöredezési mértékek minden vizsgált kő esetében, az 5. követ kivéve elmaradtak a kilépő éleken tapasztalhatóktól, a szemcseméretre való tekintet nélkül. Az ötödik kő esetében további vizsgálatokkal állapítható meg az eltérés valódi oka. Az ismertett adatokkal tehát igazoltuk az előzetes feltevésünket nem csak az egyes kövek esetében külön-külön, de általánosságban is. Továbbá a 7.6. ábrán is megfigyelhető a be- és kilépő élek kitöredezési mértéke között tapasztalható arányosság.

## 7.4. A vizsgálatok eredményei

Ahogy az egyes kövekre kapott eredmények ismertetésénél utaltunk erre, a vizsgálatainkkal alátámasztottuk a korábbi feltevéseinket. A belépő élek kitöredezési mértéke elmarad a kilépő élekre számított átlagos kitöredezési mértéktől. A belépő és a kilépő élek jellemző mutatószáma általában arányosságot mutat egymással, az általunk vizsgált kövek esetében. Az eltérések okai a szemcseszerkezet heterogenitásában keresendők, az egyes kövek közötti eltéréseket pedig az eltérő szemcseszerkezeti tulajdonságot, illetve a változatos kőzetalkotók okozzák.

A bemutatott vizsgálatokkal igazoltuk továbbá az iparban is alkalmazható vizsgálati rendszer alkalmazhatóságát. A kapott adatokat az elméleti kutatás eredményivel vetettük össze, és az eltérések mértéke alapján megállapítottuk, hogy a tervezett rendszer kellően pontos adatokat szolgáltat az objektív értékeléshez és az összehasonlításához, melyet a vizsgált kövek esetében el is végeztünk. Az eredmények ismertetésén keresztül bemutattuk a vizsgálati rendszerrel szerzett adatok és az abból számított mérőszámok használhatóságát és a rendszer működését.

## **7.5. A vizsgálati rendszer korlátai, a vizsgálat során fellépő lehetséges hibák**

Az olyan heterogén szerkezetű anyagok vizsgálata során, mint a kereskedelmi gránitok, számos hibaokot fogalmazhatunk meg. A kiépített vizsgálati rendszer korlátait ezek a hibák jelentik, így igyekeztük számba venni a lehetséges okokat annak érdekében, hogy megoldási javaslatokkal előkészítsük a későbbi folyamatfejlesztés lehetőségét.

A vizsgálati rendszer szempontjából három csoportba soroltuk a fellépő lehetséges hibákat:

- Gépi pontatlanságok
- Ember által okozott hibák
- Egyéb külső (környezeti) hatások

A gépi pontatlanságok közé sorolhatjuk az összes olyan hibatényezőt, amelyek az alkalmazásnak megfelelő beállítások kiválasztása ellenére is felléphetnek a rendszer működése során. Az eszközök hibái ide sorolhatók, így például ilyen hibát jelent a szkennerek által hibásan rögzített profil vagy profilrészlet, melynek oka valamilyen zavart jelentő optikai jelenség, vagy az eszköz elmozdulása az előzetes beállításokhoz képest. Az ilyen zavarok elhárításában segítségünkre van a mérés folyamatos megfigyelésének lehetősége, illetve a mért adatok ellenőrzése az értékelés előtti fázisban. A későbbiekben ezt akár automatizálni is lehet, így tovább csökkentve a hibás profilok által okozott tévesztéseket.

Az ember által okozott hibák jelentik a legtöbb hibalehetőséget, ezeket a hibákat a kutatásban résztvevő személyek okozhatják. A hibák eredménybefolyásoló hatását különböző folyamatellenőrzési, folyamatminősítési vizsgálatokkal lehet megállapítani, kiküszöbölésükre alkalmas lehet azonban az automatizálás, amely nem csak a hibák mértékét lenne képes csökkenteni, de a módszert gyorsabbá és így hatékonyabbá teheti. A mérőszemélyzet által okozott hibák elsősorban a kiértékelésben jelentkeznek, a profilokról történő adatfelvétel

során. Az olyan feladatoknál, amelyekre nem lehet standard előírást állítani, a mérőszemély belátására van bízva a referencia megválasztása, ez pedig a több tagból álló csapat esetén hibás értékeket eredményező különbségeket okozhat.

Mint minden mérést vagy vizsgálatot, így a bemutatott kutatást is terhelik a környezeti hatásokból eredő külső hatásokból származó hibák. A mérési körülmények gondos megválasztása ellenére, a gépi beállításoktól és a személyzettől függetlenül jelentkezhetnek. A környezeti hatások, mérési körülmények minden esetben ellenőrizendők, ugyanis a magas páratartalom vagy a hőmérséklet ingadozása akár a vizsgált kőlapokra is hatással lehet, valamint a vizsgálat során alkalmazott eszközök működésére. Az optikai jelenségekből eredő hibák egyik fő oka a világítás helytelen megválasztása lehet, így erre különös gondot érdemes fordítani, próbavizsgálatokat kell végezni a digitalizálással történő adatgyűjtés előtt. A környezeti körülmények stabilizálásával ezek a hibák szinte teljesen kiküszöbölhetők.

Nem csak a vizsgálati rendszer hibáit kellett figyelembe vennünk a kutatás során. A kövek sajátos, heterogén szerkezete számos eltérést okozhat az elvárt jelenségektől. A kőzetalkotók változatossága és eltérő eloszlása, a szemcseszerkezet felépítése, a szemcseméret változékonysága, valamint a kőzetalkotók eltérő tulajdonságai mind-mind alapos vizsgálatot igénylő eltéréseket okozhatnak [2]. Ezekkel a hibaokkal magyarázhatók azok, a vizsgálat során fellépő eltérések, amelyek az általános szabályszerűségektől való különbözőséget eredményezték (ld. 5. kő esetén).

## **7.6. Az eredmények jelentősége**

A kutatási eredményeinkkel igazoltuk az előzetes feltevéseinket a belépő és a kilépő élek kitöredezési mértékének kapcsolatáról. Ismertettük továbbá a korábban kidolgozott doktori tézis alapján felépített vizsgálati rendszer alkalmazhatóságát, bemutattuk a működését és a lehetséges hibák által jelentett korlátait. Az elvégzett mérések alapján értékeltük a különböző szabványos szemcseméret-tartományokba sorolható kereskedelmi gránitokra kapott eredményinket és általános következtetéseket vontuk le a viselkedésükre vonatkozóan. A bemutatott értékelésekkel bizonyítottuk az átlagos kitöredezési mérték, mint mérőszám alkalmazhatóságát az egyes kövek és mintafelületek hatékony összehasonlítására.

Munkánkkal olyan ismeretanyagot állítottunk össze, mely további kutatások alapjául szolgálhat amellet, hogy igazoltuk már kidolgozott doktori tézisek tartalmának alkalmazását. Így bemutattuk a kövek kitöredezési mértékének alakulását a be- és kilépő élek között tapasztalható kapcsolat szempontjából.

## 8. Következtetések

Ahogy a bemutatott eredmények is alátámasztják, kutatásainkkal igazoltuk az előzetes feltevéseinket. Célul tűztük ki, hogy feltárjuk a kapcsolatot a belépő és kilépő élek átlagos kitöredezési mértéke között és a vizsgálatokkal bebizonyítottuk a korábbi várakozásainkat: a belépő élek átlagos kitöredezési mértéke minden vizsgált szemcseméret-tartományba eső kereskedelmi gránit esetén elmaradt a kilépő élek esetében tapasztalhatótól. Nem csak az egyes kövek esetén mutatható ki ez a tendencia, az összes kőél összehasonlítását elvégezve kimutattuk, hogy a belépő élek kitöredezési mértéke szignifikánsan alacsonyabb a kilépő éleket jellemző mérőszámnál. Amellett, hogy az értékek a fenti szabályszerűség szerint alakultak, kijelenthetjük, hogy a be- és kilépő éleken számított átlagos kitöredezési mérték az egyes mintafelületeken arányosságban áll egymással.

Munkánkkal bemutattuk továbbá a korábban kidolgozott doktori tézis szerint elkészített ipari környezetben is alkalmazható vizsgálati rendszer működését és alkalmazhatóságát. A kapott eredmények ismeretében megállapítható, hogy a rendszer a minősítő tevékenység részévé válhat, az átlagos kitöredezési mérték számításához szükséges adatok regisztrálására a kékfényű lézerszkenner megfelelő, a kiértékelési műveletek pedig objektív minősítést tesznek lehetővé. Ugyanis az elméleti kutatáshoz gyűjtött adatokkal összevetve ezeket az eredményeket megállapíthatjuk, hogy  $\pm 10\%$ -os hibahatáron belül *azonos* értékeket kaptunk ezzel a gyorsabb és hatékonyabb módszerrel. Így tehát iparilag alkalmazott eszközzel is nagy pontossággal mérhetők a mart kereskedelmi gránitfelületek élein tapasztalható kitöredezések, az átlagos kitöredezési mérték pedig az így gyűjtött adatokból meghatározható.

A munkánk során felmerülő hibalehetőségeket külön összegyűjtöttük, annak érdekében, hogy a későbbiekben a mérési folyamat fejlesztése során ezeket a minimálisra csökkenthessük a bemutatott javítási lehetőségek alkalmazásával. A vizsgálatban rejlő hibalehetőségek összegyűjtésére azért is volt szükség, hogy a kövek heterogenitása által okozott eltérések mellett feltárjuk azokat a további lehetséges hatásokat, amelyek a kapott eredményeket befolyásolják.

A hibaelemzés és a megoldási javaslatok kidolgozása előrevetíti a munka folytatását, méghozzá a rendszer fejlesztésének lehetőségét. A lehetséges hibaokok által okozott eltérések minimalizálása vagy kiszűrése mellett a vizsgálat időigényét csökkentheti az értékelés automatizálása egy speciális, erre a célra szánt számítógépes program létrehozásával. Az automatizálás a folyamat hatékonyságát jelentősen javíthatná, valamint a segítségével a

bemutatott mérési eljárás szabványosíthatóvá tehető. A számítógépes program lehetőséget nyújt arra is, hogy képzés vagy speciális szaktudás nélkül is elvégezhetőek legyenek a kiértékelési műveletek és objektív minősítésre alkalmas eredményeket kaphassunk.

A későbbiekben a rendszerfejlesztés mellett a létrehozott ismeretanyagra támaszkodva további doktori tézis megfogalmazása és igazolása válik lehetővé a szerszám kilépési szögének optimalása területén. A különböző átlagos szemcseméretű kövekre összeállított eredmények alapján általános, a kövek megmunkálás során tapasztalható viselkedéséről levonható következtetések fogalmazhatók meg. A kilépési szög helyes megválasztása pedig lehetőséget ad arra, hogy a tapasztalt kitöredezési mérték minimalizálható legyen a későbbiekben akár a szabványos szemcsemérettartomány-osztályokra általánosítva. Mindemellett további megmunkálási paraméterek változtatásának vizsgálatával a kömegmunkálási folyamatokat általánosan leíró szabályszerűségek, tendenciák tárhatók fel.

## 9. Összefoglalás

TDK munkánk céljaként fogalmaztuk meg, hogy a bemutatásra kerülő mérési rendszer alkalmazhatóságnak vizsgálatán keresztül a mart gránitfelületek belépő és kilépő éleinek kitöredezési mértékének összehasonlítását végezzük el. A kutatás során a rendszert a gyakorlatban is megvalósítottuk a Gyártástudomány és –technológia Tanszék, valamint az Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék munkatársainak segítségével. A mart gránitfelületek minőségi paramétereit vizsgáló kísérletsorozat újabb lépcsőjeként az élek minőségének egy lehetséges összehasonlító mérőszámának használatát is szerettük volna bemutatni a dolgozatunkban.

Munkánkkal bemutattuk azt a korábban a doktori kutatás keretén belül leírt, a gyakorlatban is hatékonyan alkalmazható, ipari környezetre szabott vizsgálati rendszert, amely a szabványosítást igénylő minősítő eljárás részeként alkalmas lehet az objektív összehasonlításra. Ezzel pedig a felületi minőség és a csúszásbiztonság, mint felületi minőséget jellemző paraméterek után, az élek kitöredezési jellemzőit is számításba vehetjük, minőségi mérőszámként a kereskedelmi forgalomban kapható kőtermékek esetén. A minősítésre alkalmas mérőszámot az általunk vizsgált öt különböző (MSZ szabványban rögzített tartományok szerinti) átlagos szemcseméretekkel rendelkező kereskedelmi gránit esetére meghatároztuk, és a számított adatok ismeretében megállapítottuk azt az általános szabályszerűséget, mely szerint a belépő és kilépő élek kitöredezési mértéke arányosságot mutat egymással amellet, hogy a belépő élekre kapott érték minden esetben elmarad a kilépő éleken tapasztalhatótól. A bemutatott ipari környezetben is működtethető vizsgálati rendszer alkalmazhatóságának bizonyítása mellett igyekeztünk feltárni annak korlátaait is annak érdekében, hogy a továbbfejlesztési lehetőségekkel a rendszer javítható legyen és rávilágítsunk a további módosítási lehetőségekre.

A kutatás, kezdve a megmunkálástól a vizsgálatokon keresztül az értékelésig egy doktori kutatás téziseinek bizonyításaként, a minősítésre létrehozott mérőszám alkalmazási példajaként, valamint a vizsgálati rendszer megvalósításaként olyan ismeretanyag létrehozását tette lehetővé, amely a további kömegmunkálással kapcsolatos kísérletek, mint egy jövőbeli doktori tézis kidolgozásának alapját jelentheti.

Dolgozatunk nem jöhetett volna létre Gyurika István Gábor tanszéki mérnök segítségével, akinek doktori kutatásához szorosan kapcsolódik a bemutatott munkánk. Szeretnénk továbbá köszönetet mondani Dr. Gálos Miklósnak, aki a megvalósításhoz szükséges geológiai

ismereteket bocsátotta rendelkezésünkre. Köszönettel tartozunk továbbá Emszt Gyulának, az Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék laborvezetőjének és Gyúros Istvánnak, a Woldem Kft. ügyvezetőjének, akik nélkül a kísérleti folyamat egyes lépéseit nem valósíthattuk volna meg.

## 10. Irodalomjegyzék

- [1] B.Yang, X.Shen, S.Lei. 2009. Mechanisms of edge chipping in laser-assisted milling of silicon nitride ceramics. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 49, 344–350.
- [2] Fogarassy M., Kun Zs. (2012): A vágósebesség felületi érdességre és csúszásbiztonságra gyakorolt hatásainak vizsgálata kövek marásánál. BME TDK Konferencia, Gépgyártástechnológia szekció, 2012. november
- [3] Gálos M., Gyurika I., Hodosán Zs., Igali J., Kun Zs.: Mart gránitfelületek éleit minősítő vizsgálati rendszerek összehasonlító elemzése, 2013, *Mérnökgeológia-Kőzetmechanika 2013* (Szerk: Török Á., Görög P. & Vásárhelyi B.)
- [4] Gálos M., Gyurika I., Kun Zs.: Vizsgálati rendszer kiépítése mart gránitfelületek élkítőredezéseinek elemzéséhez, 2013, *Mérnökgeológia-Kőzetmechanika 2013* (Szerk: Török Á., Görög P. & Vásárhelyi B.)
- [5] Gyurika I. (2013). Experimental protocols to define quality metrics for milled edges in granite. IN-TECH2013 konferencia, 57-60. o., ISBN-978-953-6326-88-4
- [6] H. Chai, B. R. Lawn. 2007. A universal relation for edge chipping from sharp contacts in brittle materials: A simple means of toughness evaluation. *Acta Materialia*, 55, 2555–2561.
- [7] Hodosán Zs., Kun Zs.: Mart gránitlapok belépő és kilépő éleinek kitöredezési vizsgálata, 2013, *Mérnökgeológia-Kőzetmechanika 2013* (Szerk: Török Á., Görög P. & Vásárhelyi B.)
- [8] Keyence honlapja: <http://www.keyence.com/products/measure/laser-2d/lj-v/models/lj-v7080/index.jsp>
- [9] M. S. Ab Karim, A. Sarhan, and M. Shukor. 2011. Experimental Study on Minimizing Edge Chipping in Glass Milling Operation Using an Internal CBN Grinding Tool. *Materials and Manufacturing Processes*, 26, 969–976.
- [10] Nagy T., Hodosán Zs. (2011): Szkennelési eljárások összehasonlítása idő, költség és pontosság szempontjából. BME TDK Konferencia, Gépgyártástechnológia szekció, 2011. november
- [11] Prussiani honlapja:  
[http://www.prussiani.com/sito/index.php?option=com\\_content&view=article&id=38&Itemid=156&lang=en](http://www.prussiani.com/sito/index.php?option=com_content&view=article&id=38&Itemid=156&lang=en)

[12] R. H. Bao, L. C. Zhang, Q. Y. Yao, J. Lunn. 2009. Estimating the Peak Indentation Force of the Edge Chipping of Rocks Using Single Point-Attack Pick. Rock Mechanics and Rock Engineering, 44, 339-347.

[13]Szakértői vélemény: Rosa Beta (003-MG-007/2010), Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszéki Csoport, Budapest, 2010

[14] Szakértői vélemény: Giallo Farfalla (43540-003-MG-006b/2012), Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszéki Csoport, Budapest, 2012

[15] Szakértői vélemény: Kereskedelmi Gránitok jellemzése, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszéki Csoport, Budapest, 2013

[16] Wikipédia: <http://hu.wikipedia.org/wiki/F%C3%A9ny>